

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи

КОБРИН АРТЕМ ВИТАЛЬЕВИЧ

УДК 621.391

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ
НА СТЫКЕ МОБИЛЬНЫХ И СТАЦИОНАРНЫХ СЕТЕЙ НА
ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПОТОКОВОГО АГЕНТА**

Специальность: 05.12.02 - Телекоммуникационные системы и сети

Диссертация на соискание учетной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Поповский Владимир Владимирович
доктор технических наук

Харьков - 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	8
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ПЕРЕДАЧИ ПОТОКОВОГО ТРАФИКА В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ	12
1.1. Обзор тенденции развития телекоммуникационных технологий	12
1.2. Анализ предпосылок предоставления услуг передачи речи и видео по верх сетей LTE	24
1.3. Анализ требований QoS для предоставления сервисов передачи данных, речи и видео	27
1.4. Анализ работы буфера компенсации джиттера и рабочих характеристик применительно к передаче потокового трафика через IP сети	29
1.5. Систематизация типов, параметров и моделей буферов компенсации джиттера	33
1.6. Анализ существующих алгоритмов компенсации джиттера. .	36
1.6.1. Модель фиксированного буфера компенсации джиттера.	36
1.6.2. Модель 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. АНАЛИЗ ПРИЧИН ДЖИТТЕРА В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ	41
2.1. Анализ причин джиттера в проводной сети	42
2.1.1. Пакетное планирование на стороне отправителя (тип 2)	42

2.1.2.	Перегрузка в локальной сети (тип 2)	42
2.1.3.	Перегрузки в канале доступа (тип 3)	43
2.1.4.	Распределение нагрузки между несколькими линиями доступа или сервис провайдерами (тип 1)	44
2.1.5.	Распределение нагрузки (тип 1)	44
2.1.6.	Внутреннее разделение нагрузки в маршрутизаторах (тип 1)	45
2.1.7.	Высокоприоритетный служебный трафик (тип 2) . .	45
2.2.	Анализ основных причин джиттера в беспроводной сети LTE	46
2.2.1.	Хэндовер	46
2.2.2.	Расстояния между абонентом и базовой станцией . .	48
2.2.3.	Внутрисистемные помехи	51
2.2.4.	Замирания в канале	56
2.3.	Синтез математической модели процесса задержки	66
2.4.	Выводы ко 2 разделу	69

РАЗДЕЛ 3. СИНТЕЗ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ ДЖИТТЕРА ДЛЯ ПОТОКОВОГО ТРАФИКА В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ

3.1.	Обзор методов фильтрации джиттера	71
3.1.1.	Методы оценки джиттера в стационарном состоянии	71
3.1.2.	Рекурсивные методы оценки джиттера	74
3.1.3.	Фильтр Калмана-Бьюси (ФКБ)	76
3.2.	Синтез алгоритма ФКБ в различных условиях априорной неопределенности	77
3.2.1.	Алгоритм фильтрации, который может быть синте- зирован в том случае, когда в (2.10), (2.11) известны последовательности $\{\mathbf{r}_v\}$, $\{\mathbf{R}_2(\mathbf{k})\}$	77

3.2.2.	Алгоритм фильтрации при известной вероятности появления выбросов ε и известных ковариационных матрицах $\{\mathbf{R}_2(\mathbf{k})\}$	78
3.2.3.	Алгоритм фильтрации с оценкой выбросов, требующий информацию о характеристиках выбросов	78
3.2.4.	Алгоритм фильтрации, не требующий информации о вероятности появления и амплитудах выбросов. . . .	80
3.3.	Обзор робастных алгоритмов фильтрации на основе фильтра Калмана для случайных процессов содержащих выбросы и скачки	82
3.4.	Сравнительный анализ алгоритмов фильтрации для случайных процессов содержащих выбросы и скачки	85
3.5.	Обзор концепции потоковых агентов	88
3.6.	Выводы ко 3 разделу	91
РАЗДЕЛ 4. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ БУФЕРОМ КОМПЕНСАЦИИ ДЖИТТЕРА		92
4.1.	Анализ методов оптимального управления	94
4.1.1.	Управление состоянием системы	94
4.1.2.	Управление наблюдением системы	96
4.2.	Метод управления наблюдением для реализации буфера компенсации джиттера	97
РАЗДЕЛ 5. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПРЕДЛОЖЕННОГО БУФЕРА КОМПЕНСАЦИИ ДЖИТТЕРА С ОСНОВНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ДЖИТТЕРА В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ		99
5.1.	Анализ эффективности буфера компенсации джиттера в ситуации изменения маршрута передачи пакетов	99

5.2. Анализ эффективности буфера компенсации джиттера в ситуации хендовера между базовыми станциями	102
5.3. Анализ эффективности буфера компенсации джиттера в ситуации перегрузки в сети	103
5.4. Анализ эффективности буфера компенсации джиттера в ситуации увеличения расстояния между базовой станцией и абонентом в сети LTE	104
5.5. Анализ эффективности буфера компенсации джиттера в ситуации внутрисистемных помех	106
5.6. Выводы ко 5 разделу	106
Литература	107

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

CDMA	Code Division Multiple Access
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
eNB	E-UTRAN Node B
EPA	Extended Pedestrian A Model
ETU	Extended Typical Urban model
EVA	Extended Vehicular A Model
FTP	File Transfer Protocol
GSM	Global System for Mobile communications
HSPA	High Speed Packet Access
IETF	Internet Engineering Task Force
IMS	IP Multimedia Core Network Subsystem
IPTV	Internet Protocol Television
LTE	Long Term Evolution
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
NGN	Next-Generation Network
NS3	Network Simulator 3
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
QoS	Quality of Service
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SIP	Session Initiation Protocol
TB	Transport Block
TD-SCDMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
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

ПА Поточковый Агент

РФКБ Робастный Фильтр Калмана-Бьюси

СКО Средний Квадрат Отклонений

ФКБ Фильтр Калмана-Бьюси

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 перспективные мобильные сети развиваются в направлении внедрения следующего поколения NGN (Next Generation Network). На данный момент основными представителями таких сетей являются WiMAX и LTE сети. Согласно прогнозу [1] 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 звонков, важными являются такие сетевые характеристики: задержка, число потерянных и поврежденных пакетов и джиттер задержки. Согласно [2]

наибольший вклад в задержку и потери пакетов вносит неоптимальный буфер компенсации джиттера (буфер воспроизведения). До 40% допустимой задержки, определенной в рекомендации [3], может составлять задержка буфера компенсации джиттера. Еще одной проблемой является то, что оконечные устройства могут компенсировать ограниченный размер джиттера (порядка 50 мс).

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

Связь работы с научными программами, планами и темами.

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

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

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

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

воляющую отображать динамику изменений состояний.

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

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

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

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

Научная новизна полученных результатов.

1. В дополнении к известной работе [4] проведен анализ условий возникновения джиттера с учетом факторов вносимых гибридными сетями, который включает анализ основных причин джиттер в стационарных и мобильных сетях .
2. Разработана математическая модель задержки прибытия пакетов, научная новизна которой состоит в том, что в ней в отличие от известных моделей, учитывают различные флуктуации задержки (скачки и выбросы), которые не удовлетворяют нормальному распределению.
3. Разработан инвариантный алгоритм буфера компенсации джиттера, который позволяет решить ряд проблем возникающих, когда процесс пакетной задержки отклоняется от нормального распределения и имеет выбросы и скачки.

4. Предложены рекомендации по практическому применению буфера компенсации джиттера в сетях LTE на основе потоковых агентов.

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

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

В работе [5] автору принадлежит обзор алгоритма оценки сетевой задержки.

В работе [6] автору принадлежит разработка алгоритма оценки джиттера на основе рекурсивных фильтров.

В работе [7] автору принадлежит анализ эффективности использования робастного фильтра Калмана для оценки процесса задержки.

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

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в статьях [5–9] в специализированных научных изданиях утвержденных в ВАК Украины, Кроме того, материалы диссертации опубликованы в XXX тезисах доклада на научно-технических конференциях и форумах [XXX–XXX] и в одном отчете по НИР.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ПЕРЕДАЧИ ПОТОКОВОГО ТРАФИКА В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ

1.1. Обзор тенденции развития телекоммуникационных технологий

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

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

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

Преимуществом сети с коммутацией каналов является встроенное каче-

ство 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 запуск только одной сети.

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

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

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

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

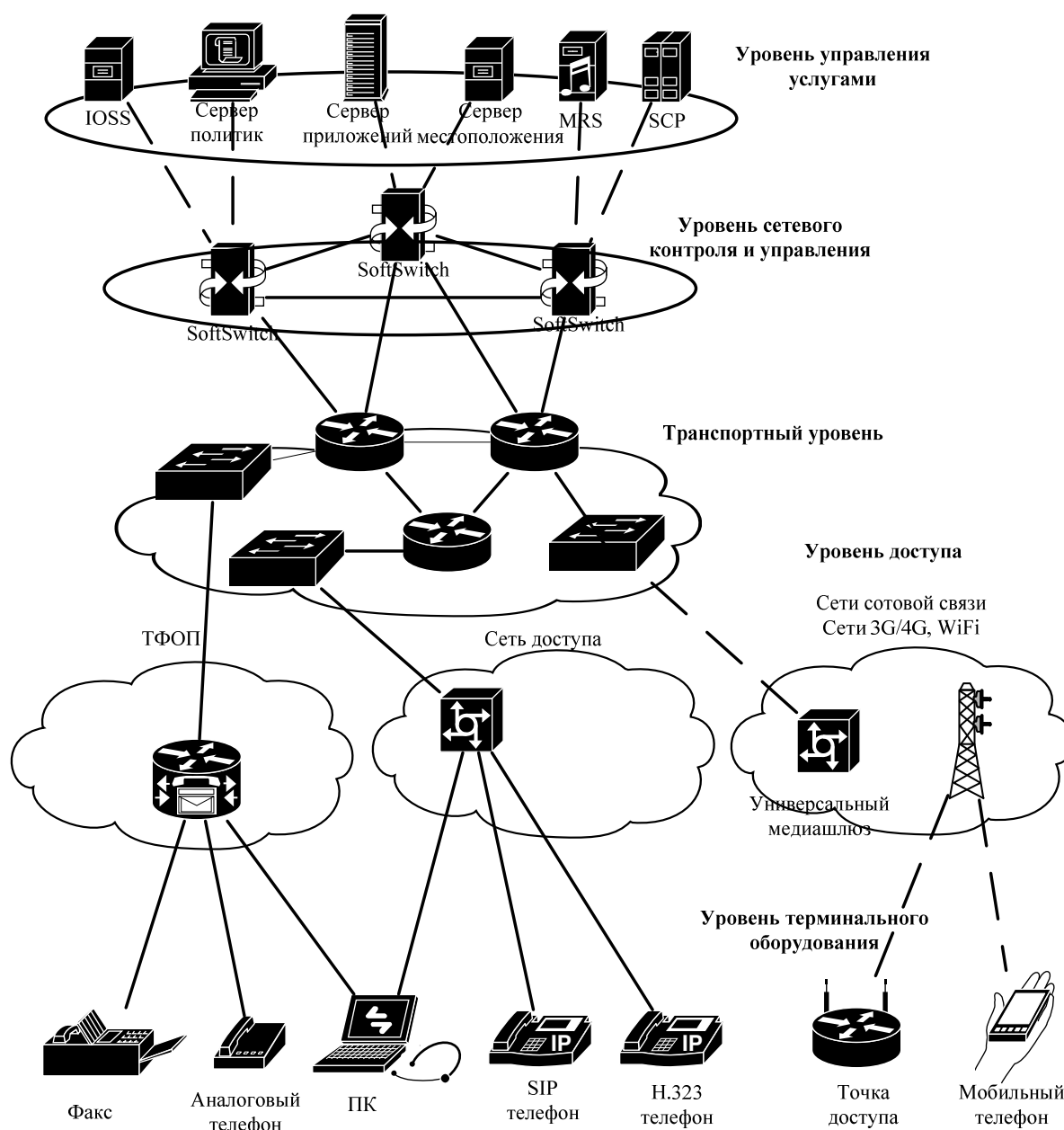


Рис. 1.1. Архитектура сети NGN

Как было сказано ранее, сети следующего поколения являются сетями с

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

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

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

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

Глобальное количество обслуживаемых широкополосных устройств до-

стигло в 1 квартал 2013 года 1,7 миллиарда и к концу 2018 года достигнет 7 миллиардов (рис. 1.2). Основными устройствами широкополосного доступа есть и будут смартфоны. Мобильный широкополосный доступ получит большую долю от общей широкополосной связи на многих рынках, дополняя xDSL в определенных сегментах и заменяя его в других.

Количество обслуживаемых мобильных устройств, таких как мобильные ПК, мобильные роутеры, планшеты, которые используют большой экран, увеличится с 300 млн в 2012 году до 850 млн в 2018 году, что превысит число абонентов фиксированной широкополосной связи (рис. 1.3). Общее количество смартфонов достигло в 2012 году 1,2 млрд и, как ожидается, вырастет до 4,5 млрд в 2018 году. На сегодняшний день основным мобильным устройством является базовый телефон. Проникновение смартфонов будет быстро увеличиваться, в то время как, по оценкам, количество обслуживаемых базовых телефонов останется высоким, медленно снижаясь с 5 млрд сегодня до 4 млрд в 2018 году. Это связано с тем что базовые телефоны будут продолжать находиться в нижнем сегменте продаваемых абонентских устройств.

На рис. 1.4 иллюстрирован отчет по количеству обслуживаемых мобильных устройств различными технологиями: LTE, WCDMA/HSPA, GSM/EDGE, TD-SCDMA, CDMA и другими. Технология LTE, которая развернута и представлена во всех регионах, в 2018 году составит 2 млрд устройств. Эти устройства будут представлять лидирующую долю от общего количества устройств. Быстрый переход на более совершенные технологии в развитых странах, означает что мировое количество абонентов GSM/EDGE будет снижаться после 2012-2013 годов. Глобально, GSM/EDGE будет продолжать играть ведущую роль с точки зрения числа абонентов до посленних лет прогнозного периода. Это связано с тем что новые менее обеспеченные пользователи, вероятно будут использовать самые дешевые мобильные устройства и технологии мобильной связи. Кроме этого требу-

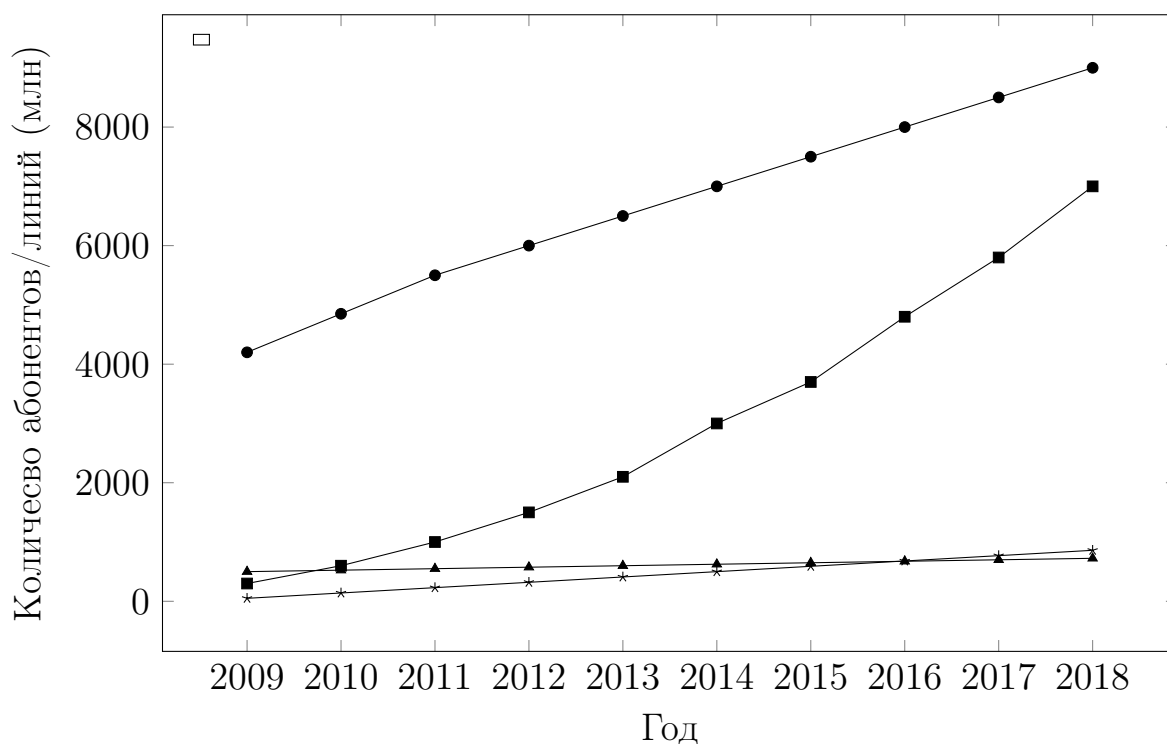


Рис. 1.2. Стационарные и мобильные обслуживаемые устройства, 2009-2018 [1]

ется время для обновления установленной базы мобильных устройств.

Мобильный трафик изменяется. На рис. 1.5 изображена устойчивая тенденция роста трафика данных с некоторыми сезонными колебаниями. Это показывает, что мобильные данные абонентов сильно вырастут. Ведущую роль в увеличении общего количества трафика данных сыграло непрерывное увеличение среднего объема данных передаваемое и принимаемое с каждого устройства.

В 2013 году, как и ожидалось, общий мобильный трафик продолжил тенденцию удвоения каждый год. Трафик от мобильных ПК доминирует в большинстве регионов. Тем не менее, трафик смартфонов растет быстрее за счет увеличения числа устройств. В последние годы прогнозного периода, трафик данных будет довольно равномерно разделен между мобильными телефонами, с одной стороны, планшетами, мобильными маршрутизаторами и мобильными ПК с другой (рис. 1.6). Мобильный трафик будет

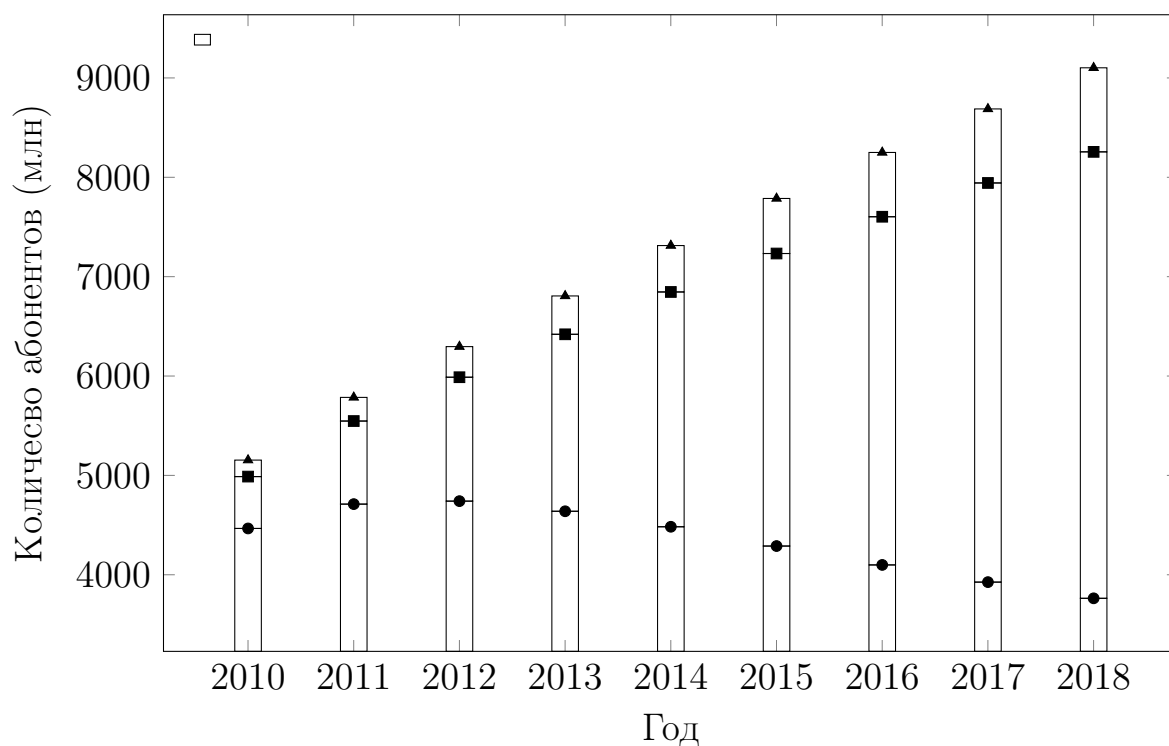


Рис. 1.3. Прогноз развития беспроводных сетей по устройствам [1]

расти значительно быстрее, чем фиксированный трафик данных в течение прогнозируемого периода. Тем не менее, в абсолютном объеме, трафик в фиксированных сетях останется доминирующим за тот же период (рис. 1.7).

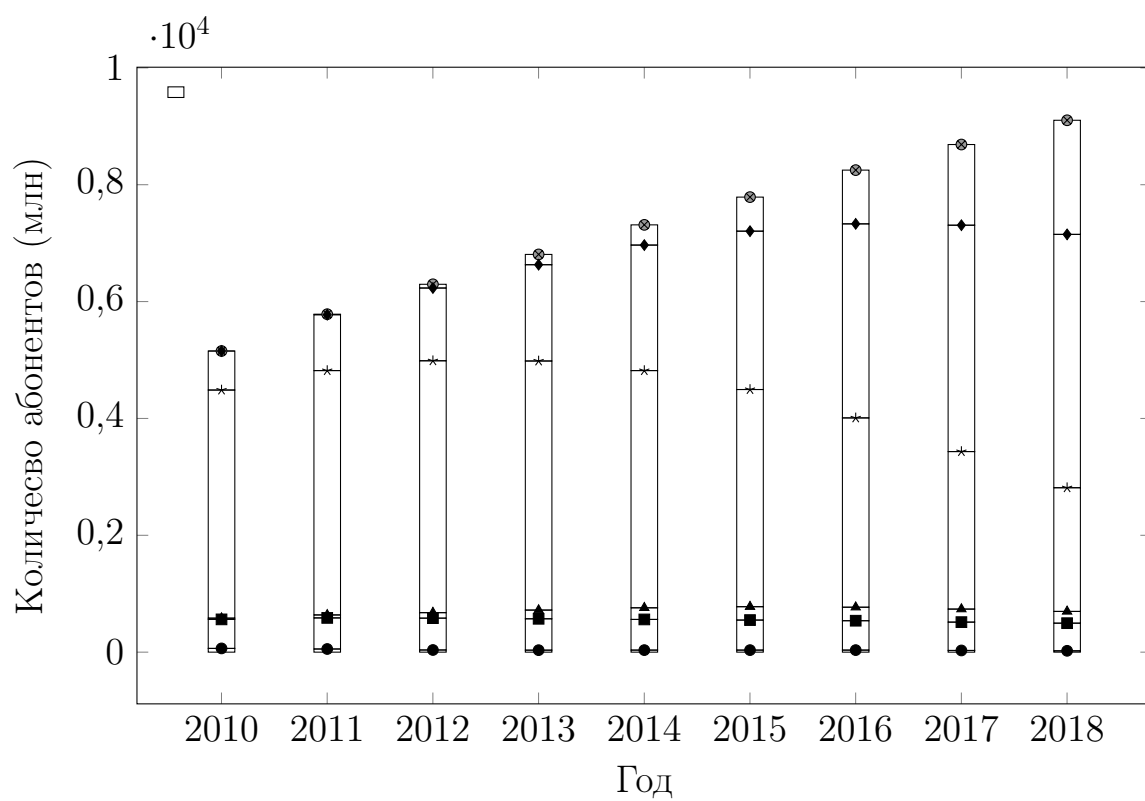


Рис. 1.4. Прогноз развития беспроводных сетей по технологиям [1]

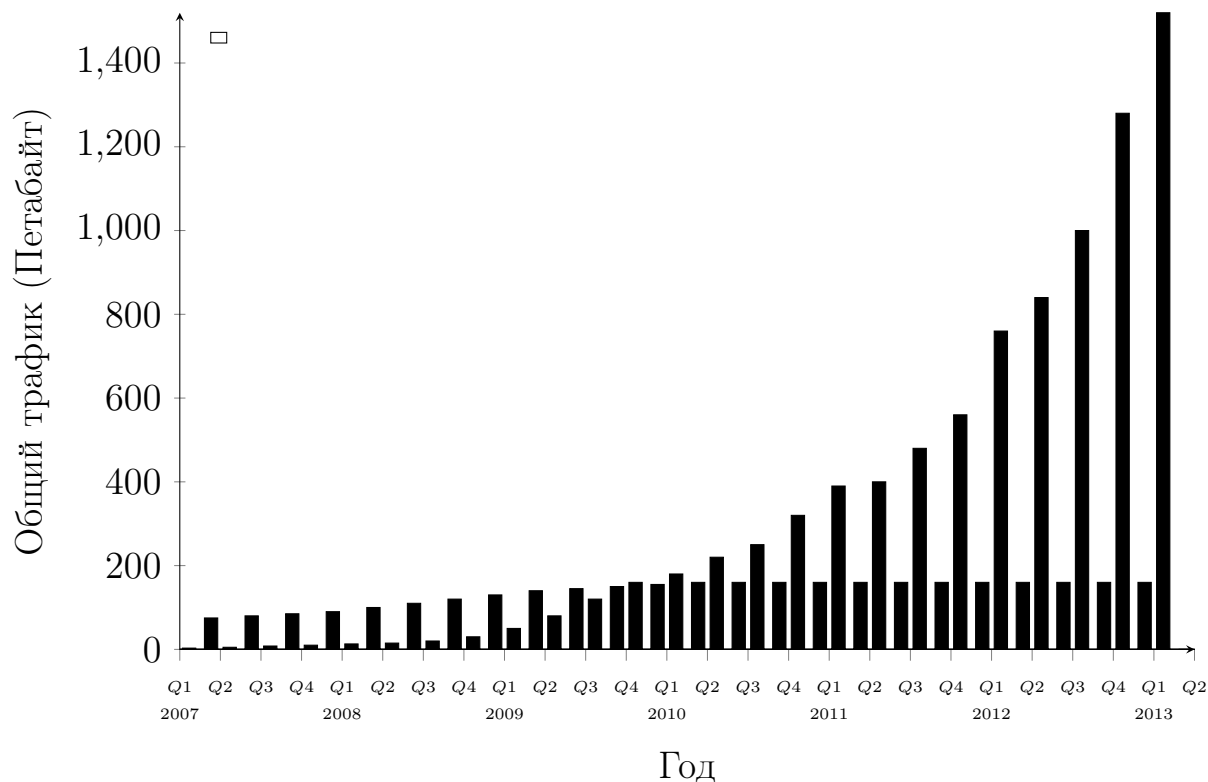


Рис. 1.5. Глобальный общий трафик передачи речи и данных в мобильных сетях, 2007-2013 [1]

Такие сервисы как социальные сети и сервисы с картинками и видео, являются драйверами роста мобильного трафика. В результате объем трафика возрастет к концу 2018 года в 12 раз. Рост трафика частично связан с размером экрана пользовательского устройства. Разрешение экрана также является фактором, влияющим на трафик. Современные смартфоны приблизились к уровню качества ПК экранов. В среднем один мобильный ПК генерирует приблизительно в 5 раз больше трафика чем смартфон. К концу 2012 года, средний мобильный ПК генерирует около 2,5 Гб трафика в месяц, по сравнению со средним смартфоном - 450 МБ в месяц. К концу 2018 года, по оценкам, в среднем, мобильный ПК будет генерировать около 11 Гб в месяц и смартфон около 2 Гбайт. Следует отметить, что существуют большие различия в пользовательских шаблонах между различными сетями, рынками и пользователями.

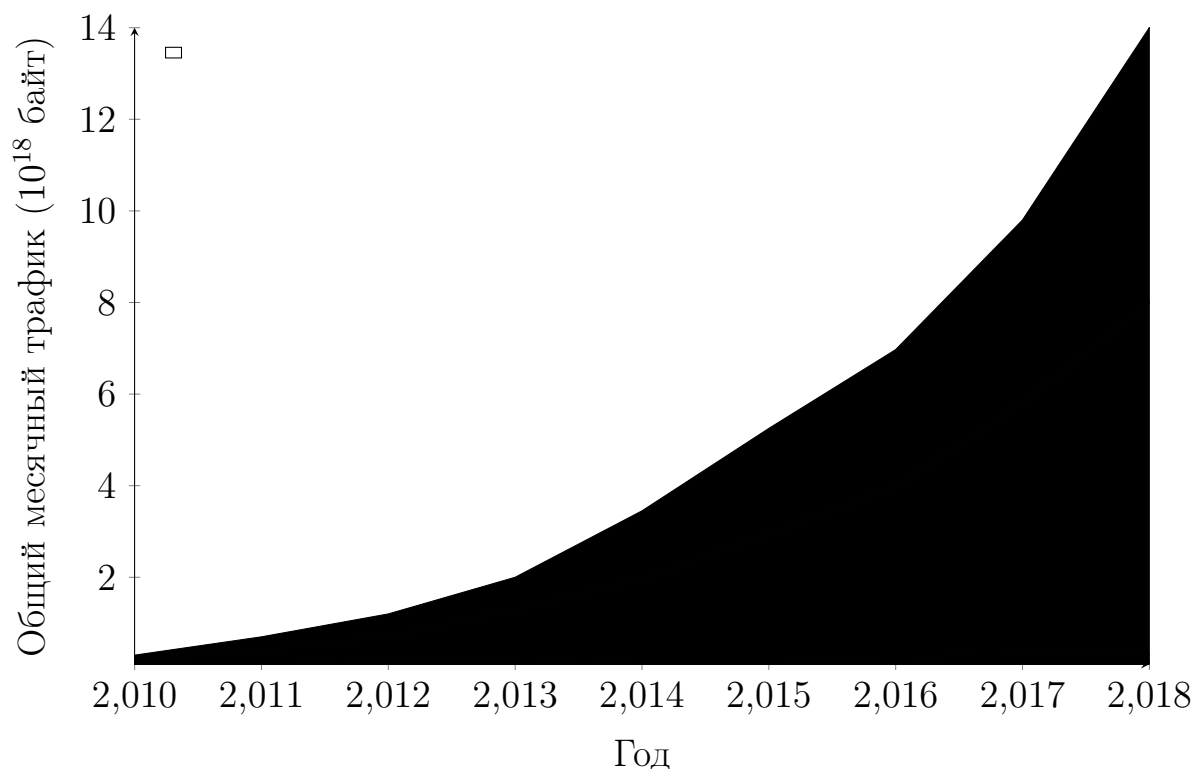


Рис. 1.6. Глобальный трафик передачи речи и данных в мобильных сетях, 2010-2018 [1]

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

Сервисы с потоковым видео так же показали высокую популярность. Люди используют эти сервисы на всех типах устройств. Так же видеокон-

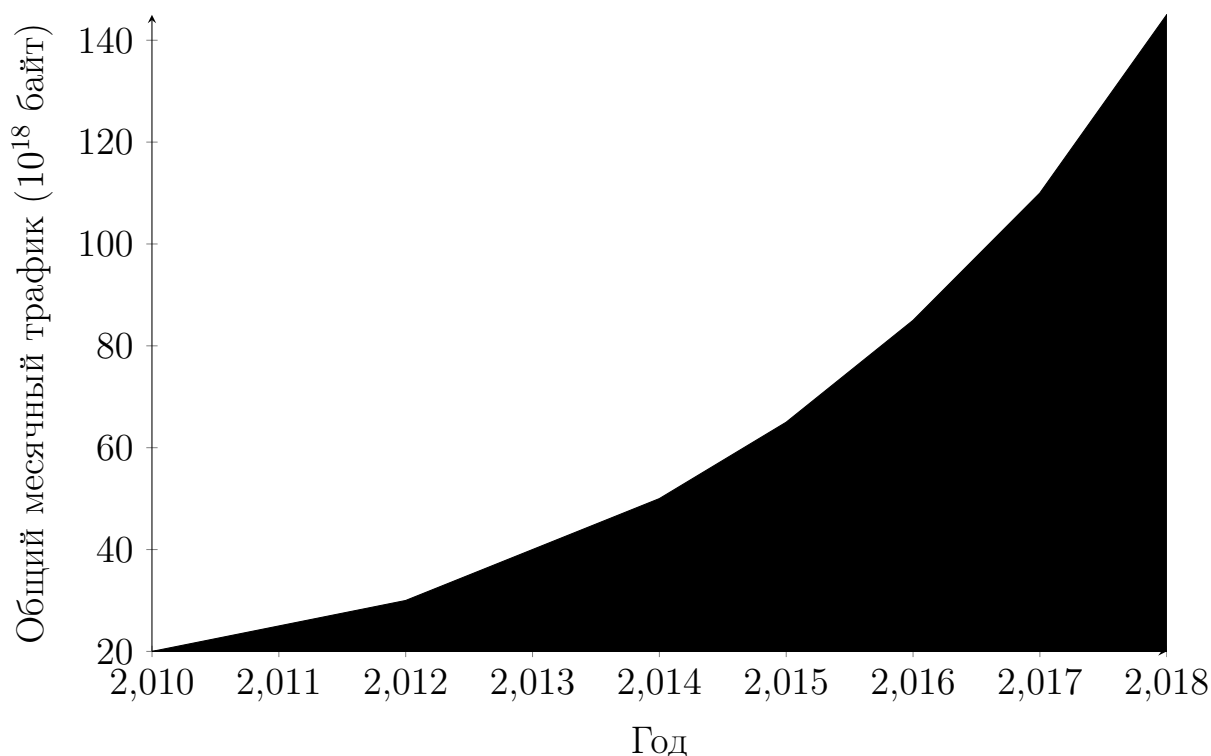


Рис. 1.7. Глобальный трафик в фиксированных сетях, 2010-2018 [1]

ференции при использовании мобильных устройств, будут стимулировать рост видео трафика в мобильных сетях. Сегодня видео составляет крупнейший сегмент трафика данных в мобильных сетях, и, как ожидается, будет расти примерно на 60 процентов в год вплоть до конца 2018 года, на этот момент, по прогнозам, объем видео трафика составит около половины от общего глобального трафика (рис. 1.8).

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

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

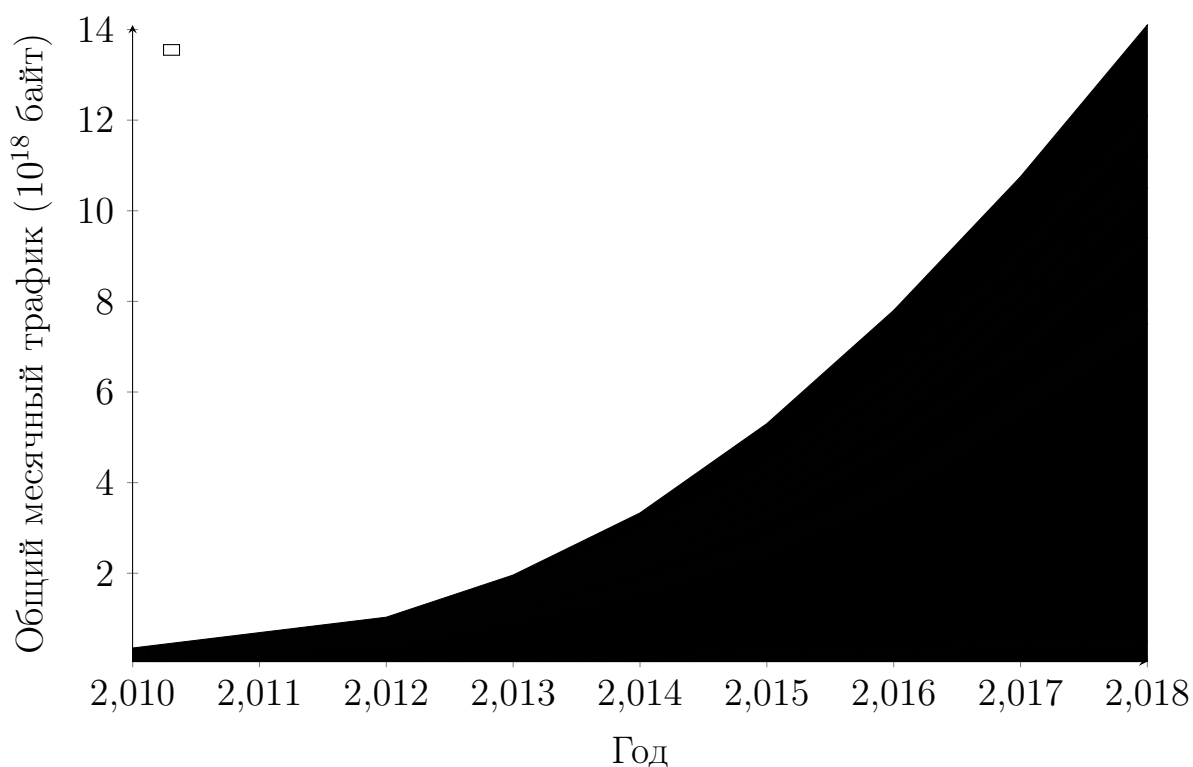


Рис. 1.8. Глобальный трафик разбитый по приложениям, 2010-2018 [1]

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

Со временем, пользователи, как правило, используют более современные услуги, которые ставят более высокие требования к возможностям устройства. Сегодня пользователи смартфонов, которые подключаются к

сервисам с музыкой и потоковым видео уже потребляют больше, чем 2 Гб трафика в месяц в среднем. Это в четыре раза больше потребления среднего пользователя со смартфоном. Во многих магазинах, легальные потоковые сервисы для музыки и для видео набирают популярность. При достаточном контенте и правильном уровне цен эти услуги демонстрируют высокие темпы популяризации.

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

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

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

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

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

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

Эти услуги используют обычный номер мобильного телефона (MSISDN, Mobile Subscriber Integrated Services Digital Network-Number), а VoLTE приносит функции мобильного оператора в мобильную широкополосную сеть основанную на IP. С помощью VoLTE услуги передачи речи данный могут быть использованы одновременно на LTE устройства.

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

Некоторые OTT (Over the Top) решения, такие как Skype, часто установленные на смартфоны, получили широкое распространение. Термин OTT означает доставку видео и аудио сигнала на приставку (компьютер, мобильный телефон) пользователя по сети Интернет без прямого

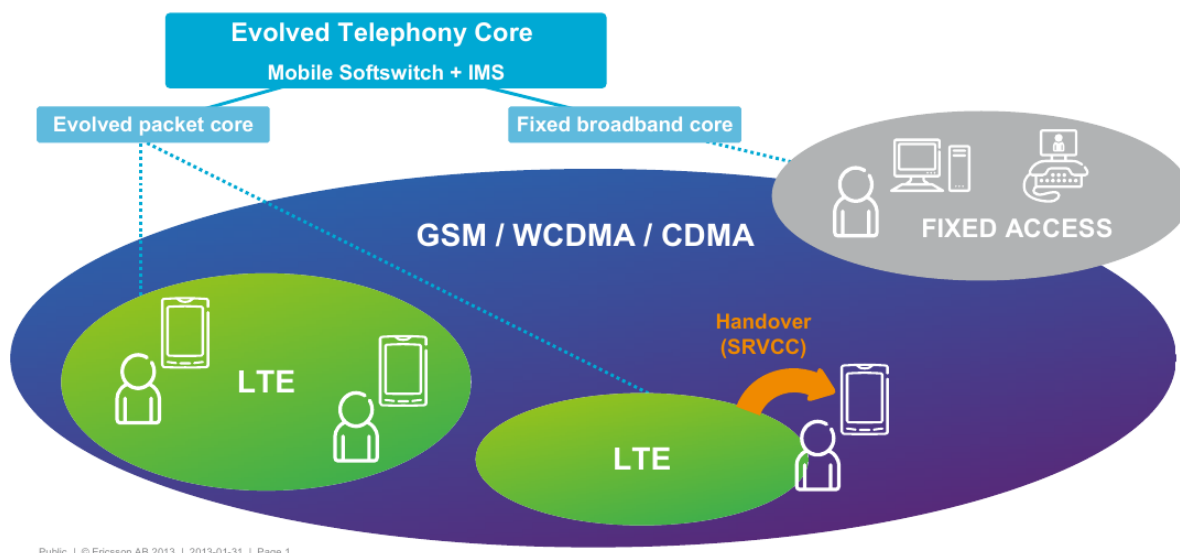


Рис. 1.9. Общий сетевой обзор решения VoLTE (IMS, EPC, LTE), включая поддержку устаревших сетей, когда пользователь находится за пределами покрытия LTE [10]

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 речевых и видео звонков поверх LTE - еще до того, когда LTE сеть будет полностью развернута.

LTE и EPC архитектуры не включают поддержку коммутации речевых и видео звонков. Перед началом использования LTE в телефонах, это огра-

ничество должно быть решено. На данный момент существует два решения этой проблемы [10]: CS fallback (CSFB) и IMS/VoLTE. CSFB подходит для использования, когда LTE покрытие является неоднородным (как правило, на ранних этапах развертывания LTE), а IMS/VoLTE может быть реализована, когда покрытие практически однородно (как правило, когда сеть LTE уже в более зрелом состоянии).

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

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

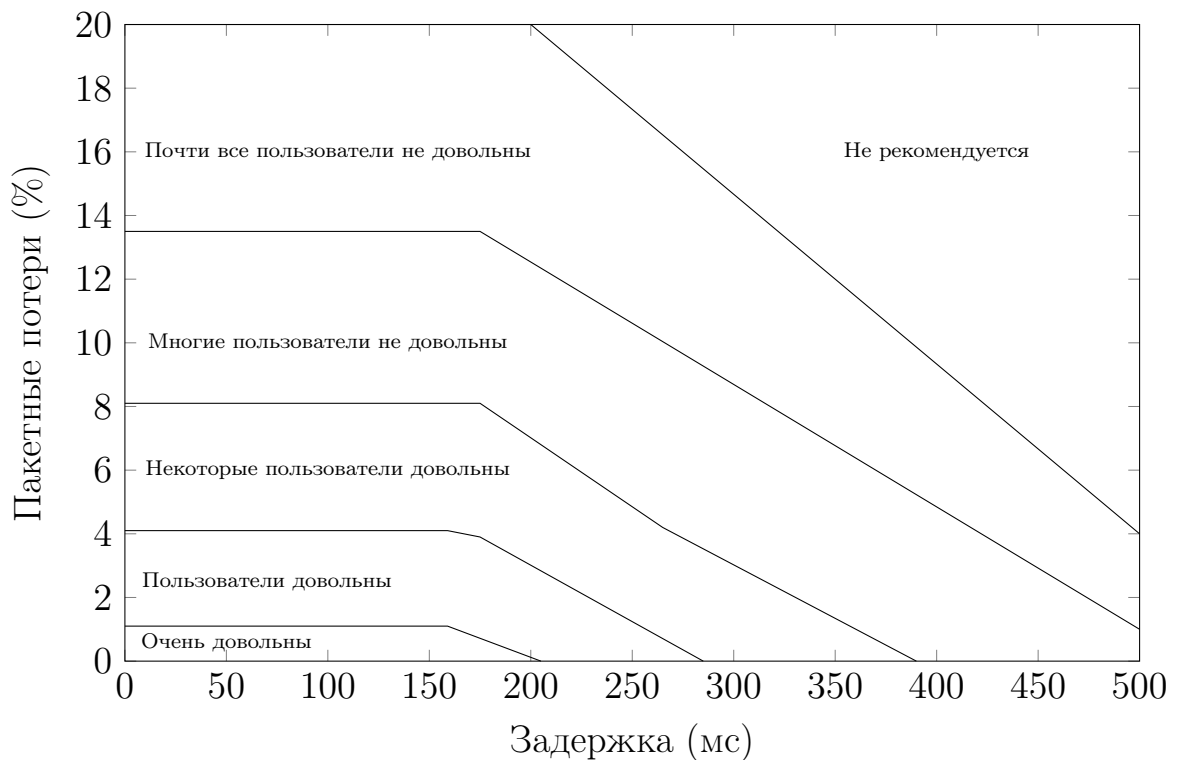


Рис. 1.10. Контуры качества передачи речи G711 с PLC

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

На рис. 1.10 видно, что качество передачи речи уменьшается с увеличением задержки и процента потери пакетов. Необходимо определить составляющие, которые вносят наибольший вклад в задержку и потерю пакетов. Составляющие задержки при передаче 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 протоколов TCP/IP.
- 4. Буфер компенсации джиттера.

Для большинства конечных устройств, работающих с VoIP, потерями на аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование, декодирование/декомпрессию и формирование стека протоколов TCP/IP можно пренебречь. Средняя величина задержки, вносимой каждой из составшихся составляющих VoIP [3, 11], представлена в табл 1.1.

Таблица 1.1

Типы и параметры буфера компенсации джиттера [2]

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

В соответствии с рекомендациями [3] 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 размер буфера требуется для компенсации изменений задержки, иначе часть пакетов будет отброшена, если они придут позже времени воспроизведения. При максимальном размере буфера появляется возможность свести количество отбрасываемых пакетов к минимуму, но при этом увеличивается время задержки. При минимальном размере буфера время задержки уменьшается, но при этом увеличивается количество отбрасываемых пакетов.

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

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

Буфер воспроизведения в приемнике удерживает каждый принятый пакет на величину времени буфера, в котором компенсируется джиттер без чрезмерной задержки воспроизведения. Если межпакетная задержка будет превышать буферное время, буфер будет истощаться, и декодеру не будет хватать пакетов, чтобы воспроизводить речь. Это приводит к нерав-

номерности воспроизведения речи. Согласно рекомендации ITU G.1020 [12] пакеты, прибывающие к получателю, обрабатываются согласно процессу, изображенному на рис. 1.11.

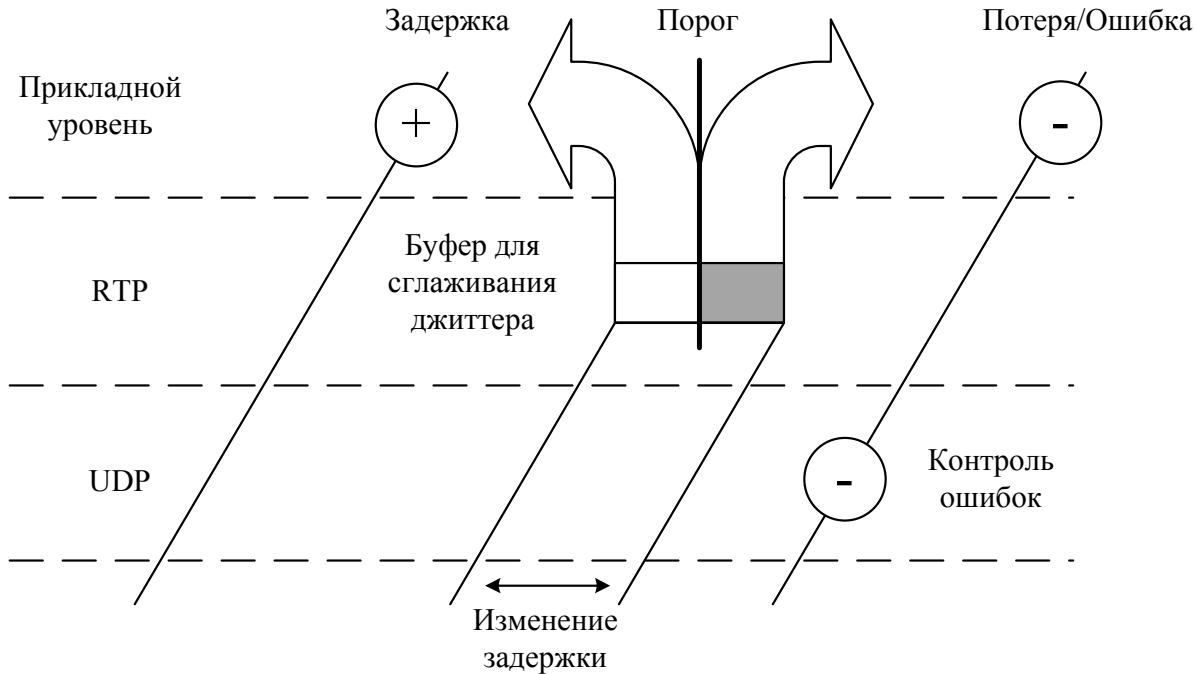


Рис. 1.11. Алгоритм обработки сетевых пакетов

Прибывающие пакеты обрабатываются по мере их продвижения по стеку протокола. Показано, что некоторые виды ухудшений, такие как ошибки и джиттер преобразуются в другие ухудшения, такие как общие потери и общие ошибки. На рис. 3.7 показан компромисс между задержкой и потерями, представленный в виде порога в диапазоне изменения задержки, основанном на размере буфера для сглаживания джиттера. Пакеты с задержкой находящейся в белой зоне будут приняты, тогда как пакеты с задержкой находящейся в черной зоне будут отброшены. Ясно, что чем больше задержка, тем больше пакетов прибывает до их времени воспроизведения и тем лучше будет компенсация джиттера. В тоже время, длительные задержки нежелательны, так как они ухудшают интерактивность человеческого общения. Отметим, что человеческое ухо терпимо относится к максимальным задержкам от 150 до 400 миллисекунд [13]. Различные

схемы кодирования также могут иметь различные допуски к потерям. Как следствие, хороший алгоритм компенсации джиттера основан на компромиссе между задержкой воспроизведения и потерями пакетов. Рассмотрим изменение процесса потерь во время взаимодействия пакетов с буфером компенсации джиттера. В зависимости от критерия, определяющего решение принимать или отбрасывать каждый конкретный пакет из потока, в результате может полностью измениться распределение общих потерь и общей задержки. Например, если случайные битовые ошибки вызывают ошибки в контрольной сумме UDP, то потери пакетов будут иметь случайное распределение, по мере того как они поступают на прикладной уровень. Но, если несколько последовательных пакетов испытывают чрезмерные задержки, то дополнительные отбрасывания, вызванные ограничениями буфера компенсации джиттера, сделают общее распределение потерь еще и прерывистым. Существуют обстоятельства, при которых порядок следования пакетов может изменяться во время их прохождения через сеть. При определенных условиях некоторые буферы компенсации джиттера неспособны восстановить порядок следования переупорядоченных пакетов и, в этом случае, они обозначаются как отброшенные пакеты. Также рассмотрим влияние буфера компенсации джиттера на процесс задержки. На рис. 1.12 показаны основные элементы тракта передачи речи, которые вносят вклад в речевую задержку. Задержка сети переменна и для компенсации джиттера и восстановления допустимого интервала между пакетами используют буфер компенсации джиттера. Заметим, что пакеты с минимальной задержкой на стороне отправителя и сети, проводят максимальное время в буфере компенсации джиттера; и наоборот, пакеты, которые задерживаются дольше минимального времени, проводят затем в данном буфере меньшее время. Кроме того, существует еще, и некоторое минимальное количество времени, которое каждый пакет должен проводить в буфере на стороне получателя, которое может быть столь же велико, как и целый

пакет.

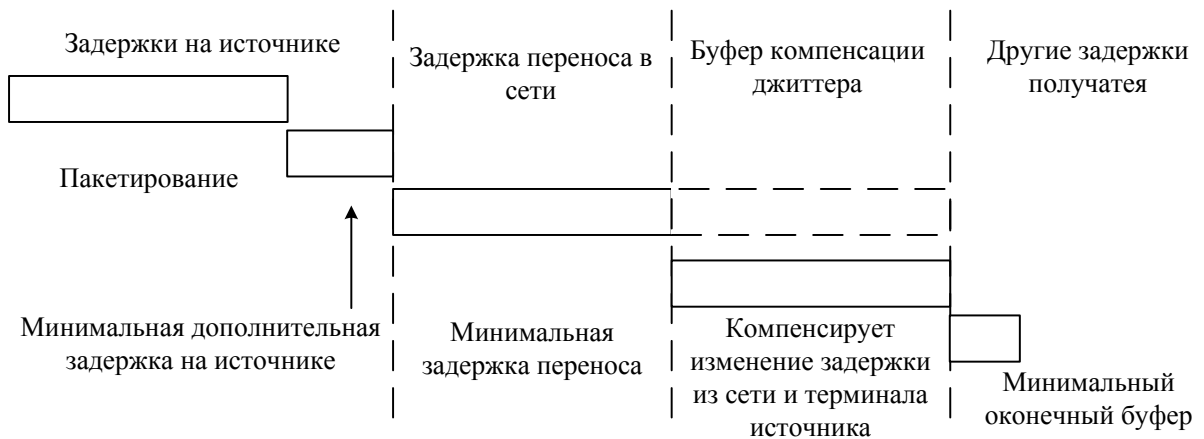


Рис. 1.12. Задержка в пакетных сетях и сетевых элементах

Правильное значение задержки буфера для объединения с другими задержками зависит от наличия описательной статистики. Например, среднюю задержку в сети следует суммировать со средним временем использования буфера компенсации джиттера, чтобы получить общую среднюю задержку. Этот метод предусматривает адаптацию буфера, требуя знания только среднего времени пребывания всех пакетов в очереди в оцениваемом временном интервале. С другой стороны, если известна только минимальная задержка в сети, то ее следует суммировать с максимальным временем использования буфера компенсации джиттера, чтобы дать общую задержку. Далее рассмотрим инициализацию буфера компенсации джиттера фиксированного размера. Если первый прибывающий пакет имеет минимальную задержку передачи, то получатель будет сохранять этот пакет в буфере все необходимое время, и размер буферизации будет равен ожидаемому. К счастью, многие пакеты прибывают за время, равное или близкое к минимальному времени передачи, поэтому этот случай весьма правдоподобен. С другой стороны, если первый пакет имеет довольно большую задержку, то для размещения ранее принятых пакетов со временем передачи, равным или близким к минимальному времени передачи, потребуется больше буферного пространства, а буфер для сглаживания фазового дрожания будет

вносить в общий расчет задержку, превышающую ожидаемую.

1.5. Систематизация типов, параметров и моделей буферов компенсации джиттера

Существуют два основных типа буферов компенсации джиттера – фиксированной длины и адаптивной длины. Буферы компенсации джиттера, согласно рекомендации [12], могут быть построены с использованием разных способов, приведенных в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Типы и параметры буфера компенсации джиттера

Тип	Атрибуты	Возможности	
Фиксированный и адаптивный	Размер (конфигурируется максимальная и номинальная или минимальная)	Целое количество пакетов	Дробное количество пакетов
Адаптивный	Управление	Синхронизированное ослабление при отсутствии / реполнения / антипереполнения	Оценить коэффициент потерь (конфигурировать приемлемый наименьший порог и минимальный счет пакетов между подстройками)
продолжение следует			

(продолжение)			
Тип	Атрибуты	Возможности	
	Подстройка	Синхронизи- ванная	Только в проме- жутках молча- ния
	Инициализация	Первый пакет	Малая выборка
	Неравномерность подстройки	Размер пакета	Дробная часть пакета
	Восстановление порядка пакетов	Да	Нет
	Режим передачи данных в полосе тональных частот	Обнаружение то- нальной частоты 2100 Гц; установ- ка максимальной длины	Нет

Более подробно рассмотрим параметры построения алгоритма адаптивного буфера компенсации джиттера по методу подстройки задержки воспроизведения, такие как алгоритмы выполняющие коррекцию синхронно и алгоритмы выполняющие коррекцию в промежутках между речевыми потоками. В схеме с синхронизированной подстройкой задержки воспроизведения (рис. 1.13 а) время воспроизведения всех последующих пакетов растягивается всякий раз, когда пакет чрезмерно задерживается в сети. Во втором случае, показанном на рис. 1.13 б, производится корректировка первого пакета речевого потока, а все остальные пакеты воспроизводятся через фиксированный интервал после первого пакета. Пакеты, прибывшие позже, отбрасываются, и кодек может либо повторить последний приня-
тый пакет или вставить паузу или проиграть другие экстраполированные звуки.

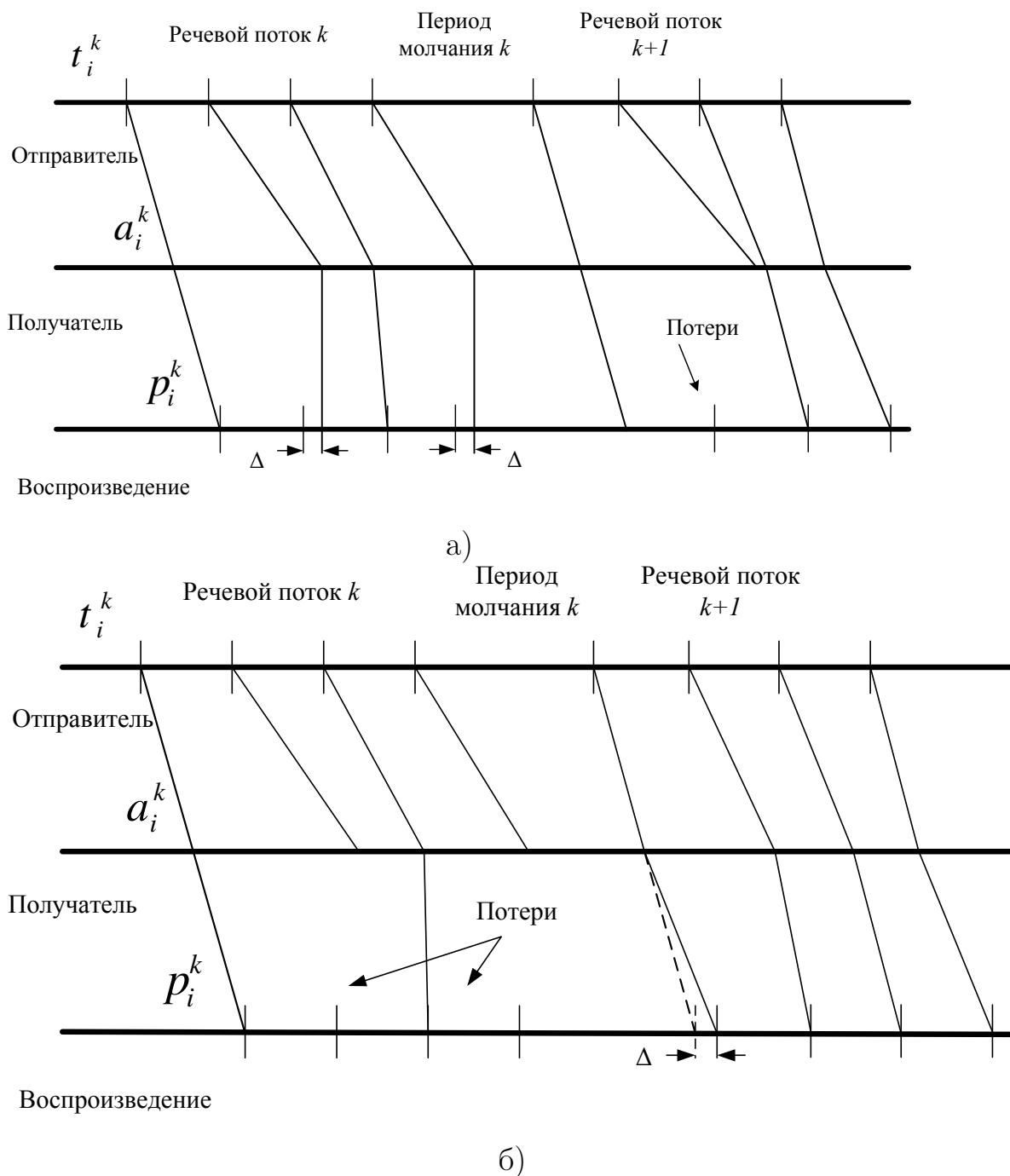


Рис. 1.13. Схема регулировки задержки воспроизведения в паузах между речевыми потоками а) с синхронной подстройкой б) с подстройкой первого пакета речевого потока

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

задержки только в периоды молчания.

1.6. Анализ существующих алгоритмов компенсации джиттера.

1.6.1. Модель фиксированного буфера компенсации джиттера.

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

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

В вышеприведенном шаге 2 минимальную задержку передачи следует оценивать на коротких интервалах, например 10 секунд. Данное минимальное значение первого интервала используется всегда, не считая краткосрочного увеличения минимума вне диапазона адаптации буфера. В этом случае ни один из пакетов не будет доставлен на верхние уровни и буфер

компенсации джиттера должен быть переустановлен на новый минимум, что вероятно будет происходить на практике. Или же, если краткосрочное значение минимума уменьшится до величины, при которой высокий процент (временно 50%) пакетов были бы помечены как потерянные из-за раннего поступления, то буфер компенсации джиттера должен быть переустановлен на новый минимум.

1.6.2. Модель адаптивного буфера компенсации джиттера.

Фиксированный буфер компенсации джиттера может быть заменен эмуляцией адаптивного буфера компенсации джиттера, как описано в данном пункте, когда имеется информация о временной последовательности потока пакетов. Временные последовательности поступления пакетов могут быть использованы эмулятором адаптивного буфера компенсации джиттера при определении динамики размера буфера и среднего времени использования буфера (задержка) для этой последовательности. Эта средняя задержка может быть объединена с другими константами задержки в терминале получателя для получения оценки средней задержки в терминале получателя. Рассмотрим пример эмулятора адаптивного буфера для сглаживания джиттера с коррекцией задержки в промежутках молчания [14]. 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, γ - константа, используемая для установки времени воспроизведения так чтобы только

небольшая часть поступающих пакетов была потеряна [14]. Эта константа равна 4 во всех экспериментах, выполняемых в [14]. В [13] 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 α называется шаговой постоянной, $\alpha \leq 1$ и обеспечивает устойчивость процедуры. В работе [14] значение α 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 среднии 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 прогнозу [1] 60% людей в конце 2018 года будут иметь широкополосное мобильное покрытие LTE. Поэтому развитие и оптимизация технологии LTE, на сегодня является актуальной задачей.
2. Сети LTE с помощью технологии VoLTE, позволяют предоставлять услуги реального времени, такие как речевые звонки в HD качестве, видео звонки, организация конференций с эффектом присутствия и т. д., которые критичны к джиттеру задержки. Беспроводные сети LTE и проводные сети, через которые передаются пакеты этих услуг, могут быть подвержены различным факторам, которые увеличивают джиттер задержки. Поэтому для разработки методов борьбы с джиттером задержки и соответственно улучшения качества предоставления услуг реального времени в сетях LTE, в разделе 2 будут рассмотрены основные факторы, влияющие на джиттер задержки.

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

РАЗДЕЛ 2

АНАЛИЗ ПРИЧИН ДЖИТТЕРА В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ

Выделяют три типа джиттера [4], которые могут быть вызваны различными причинами (рис. 2.1):

1. Постоянный джиттер - это стандартная передача пакетов с примерно постоянным изменением задержки.
2. Джиттер содержащий выбросы¹ 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 изменения² 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-

¹Под 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 [15]

²Под термином скачек задержки понимается увеличение или уменьшение задержки целого ряда пакетов в потоке [4]

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

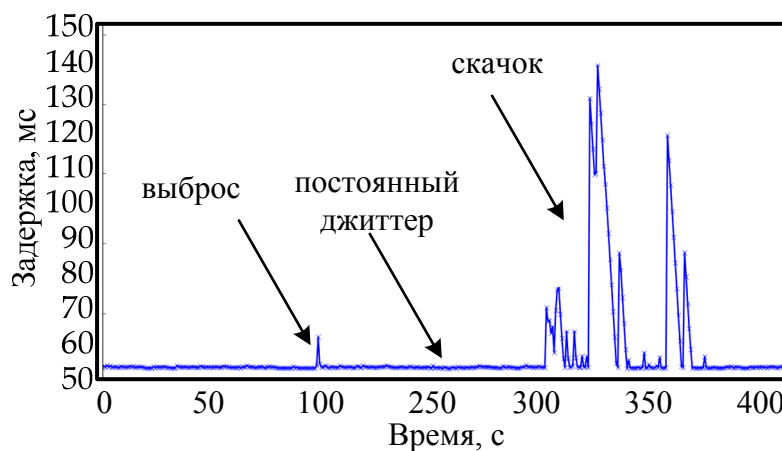


Рис. 2.1. Основные типы джиттера пакетной задержки

2.1. Анализ причин джиттера в проводной сети

2.1.1. Пакетное планирование на стороне отправителя (тип 2)

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

2.1.2. Перегрузка в локальной сети (тип 2)

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

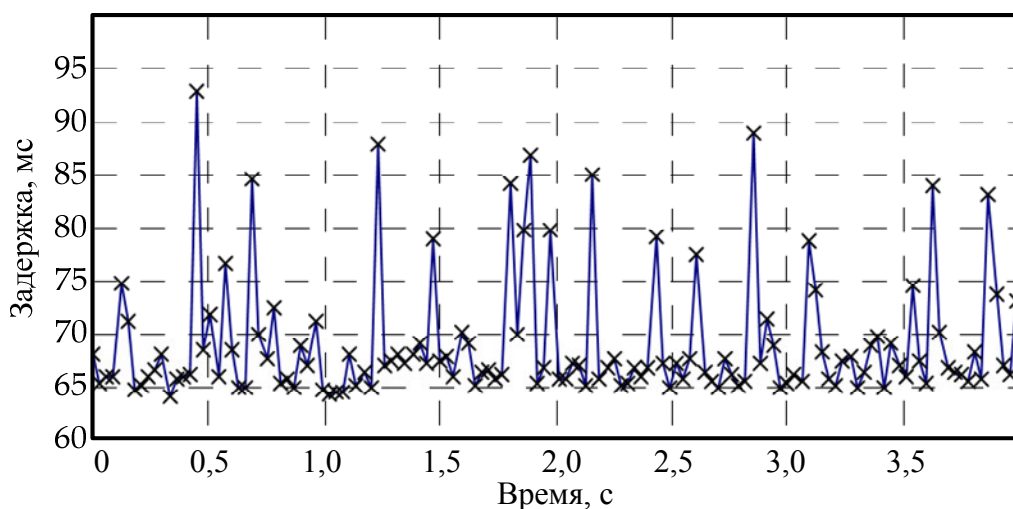


Рис. 2.2. Пример перегрузки в локальной сети [4]

2.1.3. Перегрузки в канале доступа (тип 3)

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

данных, то вводится дополнительная задержка в 40 мс. Проблема перегрузок 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.

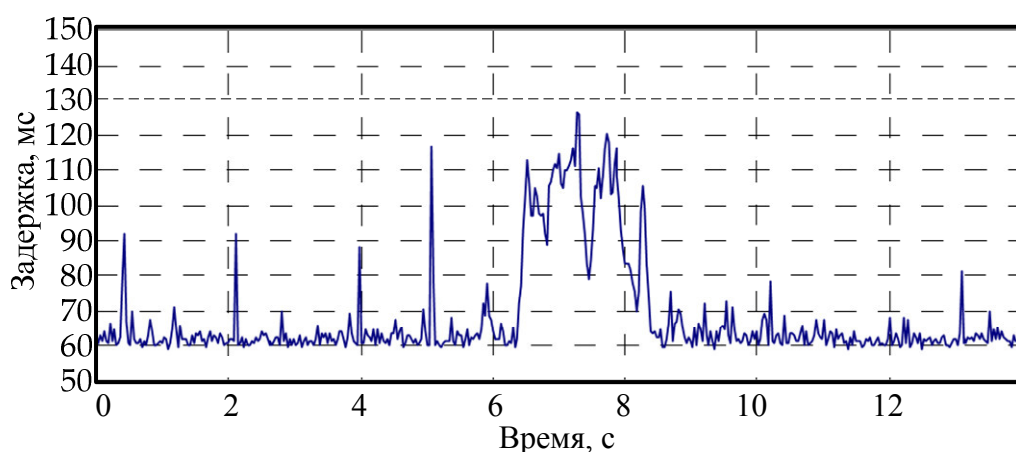


Рис. 2.3. Пример перегрузки сети доступа [4]

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. Внутреннее разделение нагрузки в маршрутизаторах (тип 1)

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

2.1.7. Высокоприоритетный служебный трафик (тип 2)

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

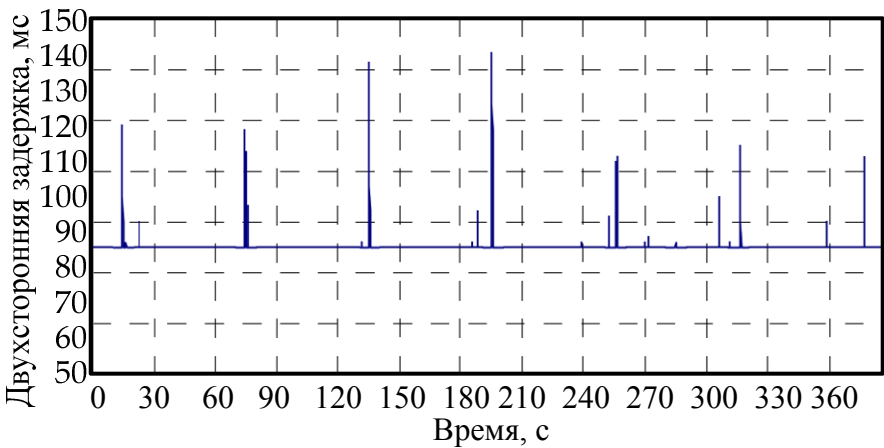


Рис. 2.4. Периодическое обновление таблицы маршрутизации без изменения маршрута [4]

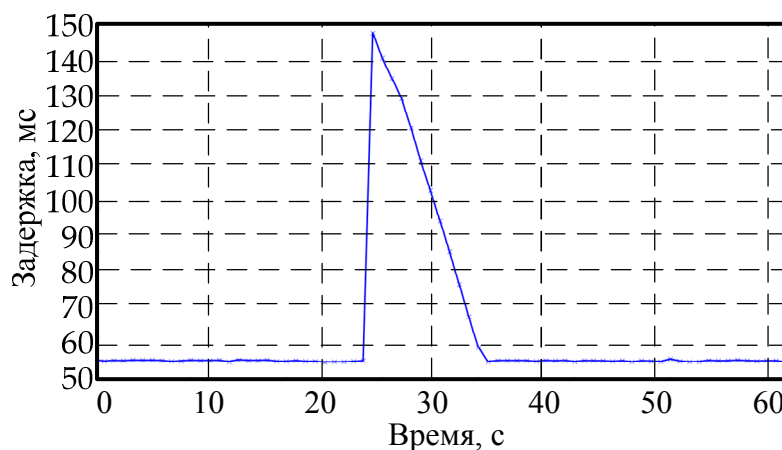


Рис. 2.5. Периодическое обновление таблицы маршрутизации при изменении маршрута [4]

2.2. Анализ основных причин джиттера в беспроводной сети LTE

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

2.2.1. Хэндовер

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

- Когда абонент уходит с зоны покрытия одной ячейкой сети и входит в зону покрытия другой ячейкой. Хэндовер позволяет абонентам не быть привязанным к какой-либо географической точке и дает возможность передвигаться в пределах сети оператора без разрыва соединения.
- Когда ёмкость сети в текущей ячейке израсходована при существовании соединения, которое находится в зоне, перекрытой другой

ячейкой, передаётся к этой ячейке в порядке освобождения ёмкости первой ячейки для других ее пользователей, которые могут быть соединены только с первой ячейкой.

- Когда канал используемый абонентом сильно зашумлён помехами, соединение передаётся другому каналу в той же ячейке или другому каналу в другой ячейке для устранения помех.
- Когда абонент входит в зону микроячейки, соединение может быть передано для освобождения емкости большой сети.

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

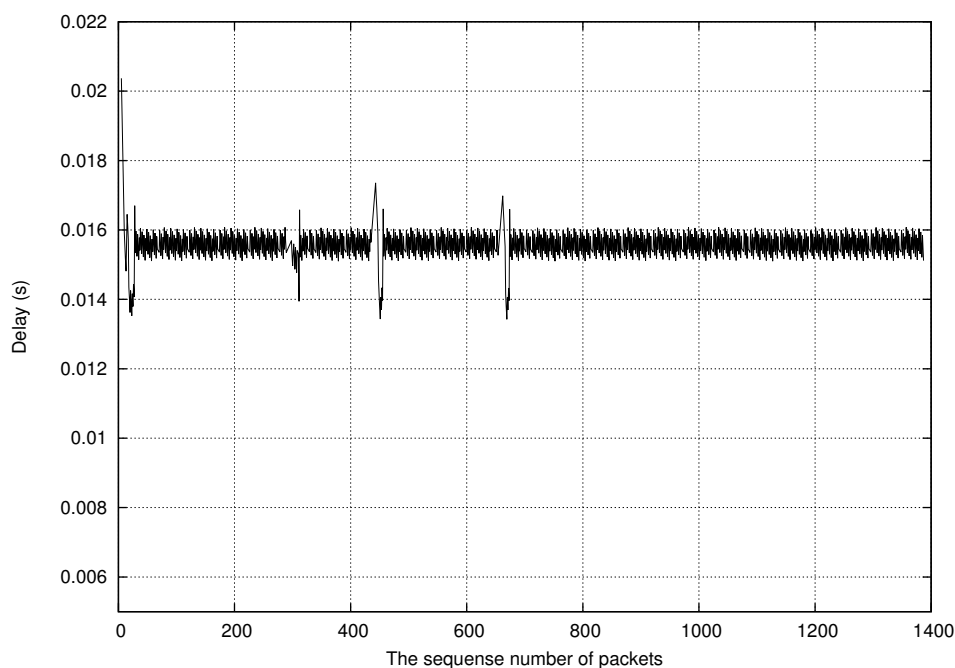


Рис. 2.6. Изменение задержки прибытия пакетов при хэндовере между базовыми станциями

2.2.2. Расстояния между абонентом и базовой станцией

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

Уравнение передачи для радиолинии протяженностью d [16]:

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

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

Для расчета пропускной способности канала воспользуемся спектральной эффективностью η_i из табл. 2.1 [17]. Которая рассчитывается по формуле:

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

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

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

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

Таблица 2.1

Соотношение спектральной эффективности (η_i) к индексу MCS
(I_{MCS})

Спектральная эффективность(η_i)	Q_m	R	MCS индекс (I_{MCS})
Reserved			0
0.15234375	2	0.076172	1
0.193359375	2	0.09668	2
0.234375	2	0.117188	3
0.305664063	2	0.152832	4
0.376953125	2	0.188477	5
0.489257813	2	0.244629	6
0.6015625	2	0.300781	7
0.739257813	2	0.369629	8
0.876953125	2	0.438477	9
1.026367188	2	0.513184	10
1.17578125	2	0.587891	11
1.326171875	4	0.331543	12
1.4765625	4	0.369141	13
1.6953125	4	0.423828	14
1.9140625	4	0.478516	15
2.16015625	4	0.540039	16
2.40625	4	0.601563	17
2.568359375	4	0.64209	18
2.73046875	6	0.455078	19
3.026367188	6	0.504395	20
3.322265625	6	0.553711	21

продолжение следует

(продолжение)			
Спектральная эффективность(η_i)	Q_m	R	MCS индекс (I_{MCS})
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

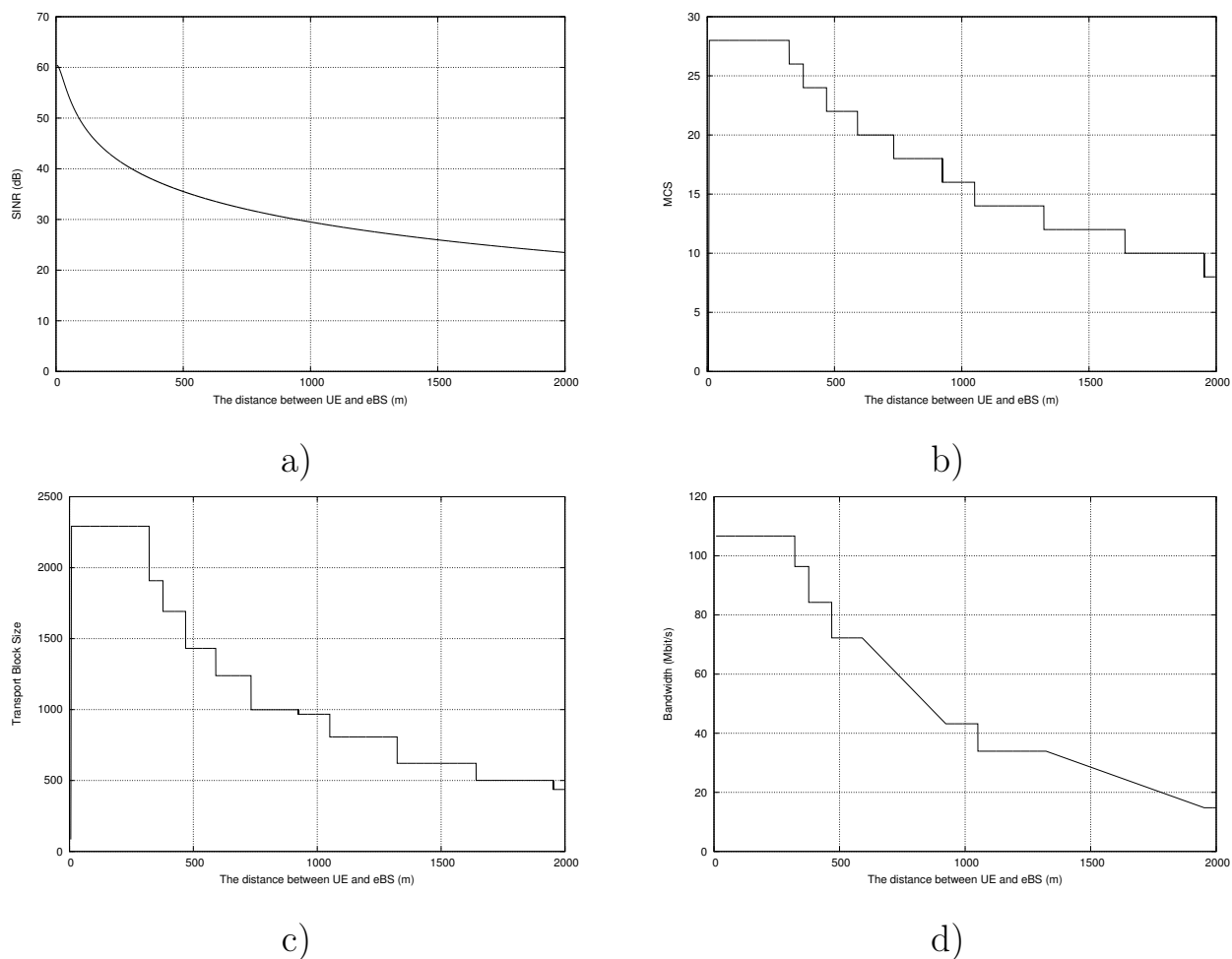


Рис. 2.7. Зависимость а) SINR б) MCS в) размера TBS г) скорости передачи нисходящего канала передачи от расстояния между абонентом и базовой станцией

2.2.3. Внутрисистемные помехи

Рассмотрим влияние всплесков внутрисистемных помех на характеристики канала передачи в сети LTE. Наличие этих помех определяет суть проблемы электромагнитной совместимости. Выброс внутрисистемных помех может быть вызван влиянием соседней базовой станции, которая работает в том же диапазоне. Анализ показывает, что выбросы помех влияют на характеристики канала в том числе на джиттер и потери пакетов. Для борьбы с внутрисистемными помехами используются различные методы: уход на другую частоту, помехоустойчивое кодирование и перемежение.

Тем не менее, с ухудшением условий распространения волны возникают блоковые ошибки. Это приводит к потере пакетов для IP услуг, таких как FTP и VoIP. В технологии LTE приходится использовать повторные передачи чтобы потери пакетов не снижались ниже определенного уровня, однако эта мера может быть не достаточно эффективной, чтобы предоставить хорошее качество для соответствующей услуги. В результате использования повторных передач появляется джиттер задержки. LTE передачи обычно планируются таким образом, чтобы быть синхронизированными с качеством канала. При этом пакеты передаются к и от пользователей, имеющих наилучшие каналные условия, а пользователи, которые испытывают провалы качества канала, будут ожидать пока условия канала не будут улучшены. Это означает, что пакеты в очереди передачи будут испытывать различные задержки из-за планирования. LTE также ограничивает количество повторных передач, чтобы избежать расхода слишком большого количества ресурсов передачи для тех пользователей, которые испытывают деградацию условий канала. Это означает, что потери пакетов могут происходить в дополнение к джиттеру задержки. Для услуг реального времени, характерно чтобы пакеты могли быть повторно переданы со сквозной задержкой до 50-100 мс. Пример задержек пакетов, которые могут произойти в присутствии внутрисистемных помех, показан на рис 2.8.

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 за-

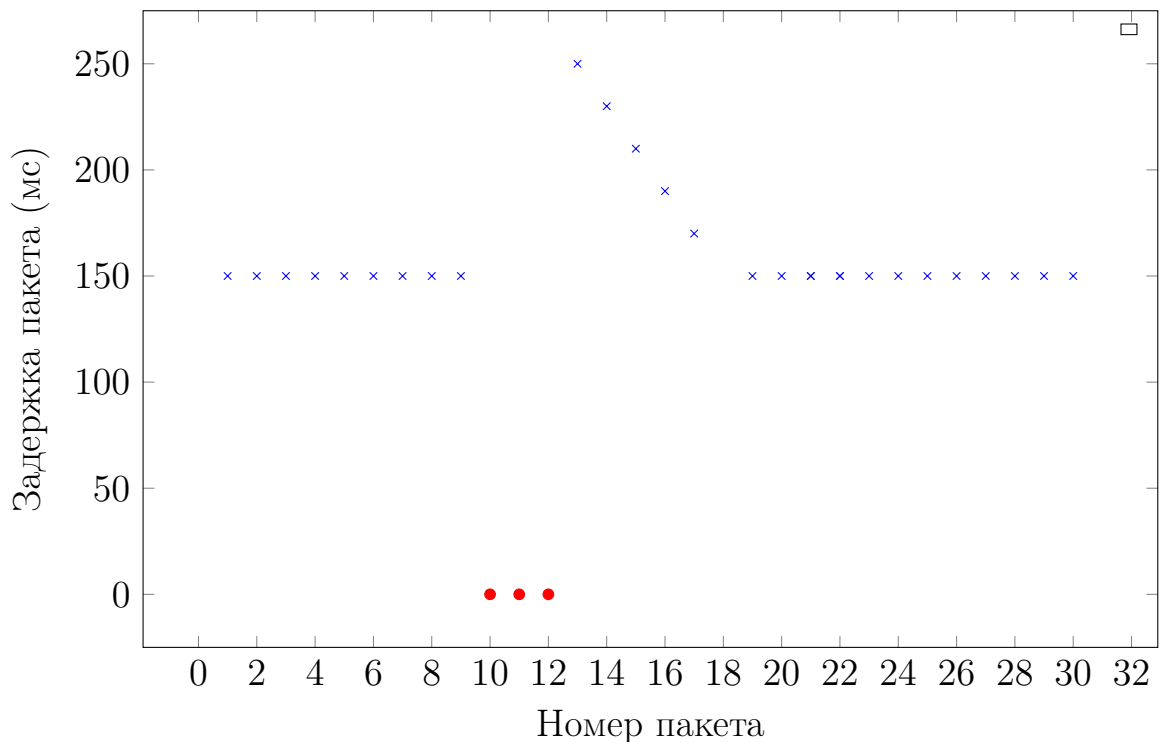


Рис. 2.8. Пример времени прибытия IP пакетов (синие маркеры), потерь пакетов (красные маркеры) и джиттера задержки в присутствии сильного всплеска внутрисистемных помех.

держкам 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 пакетно коммутируемой сотовой сети, которая использует повторные передачи. Величина потерь пакетов и размер скачка задержки зависит как от помехи так и от того как система настроена.

Проведем моделирование влияния внутрисистемных помех на параметры передачи пакетов в сети LTE. Схема моделирования в NS3 изображена на рис. 2.9. С уменьшением расстояния до источника помехи, мощность по-

мехи 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.

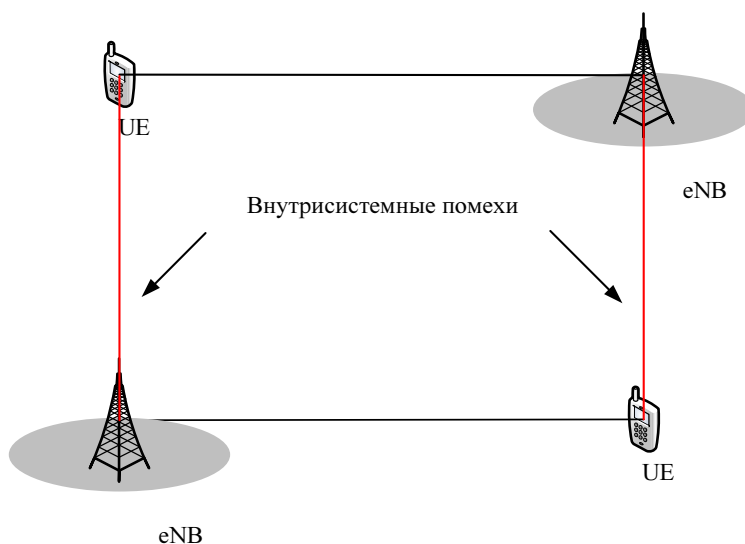
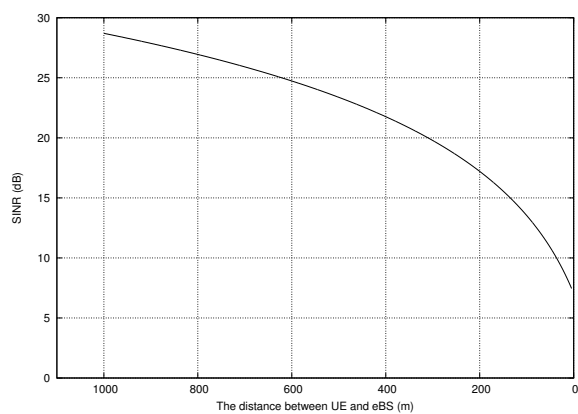
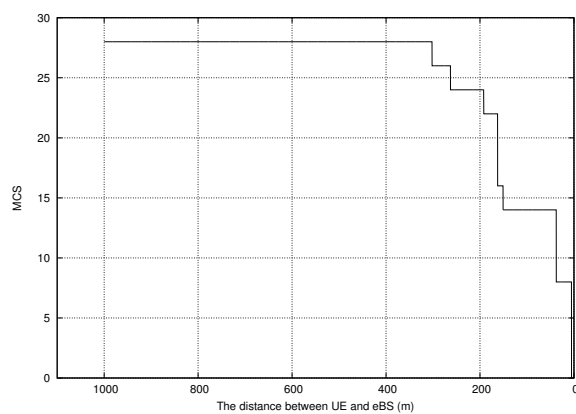


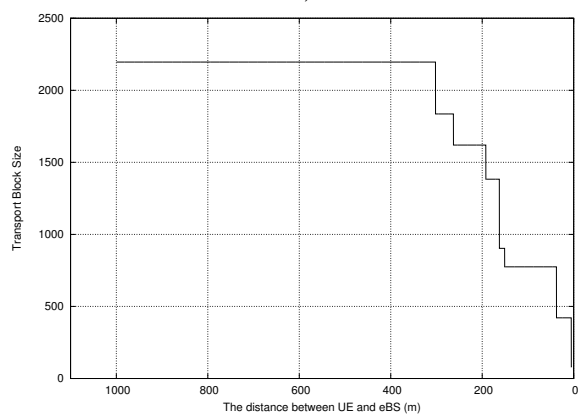
Рис. 2.9. Схема моделирования влияния внутрисистемных помех в NS3



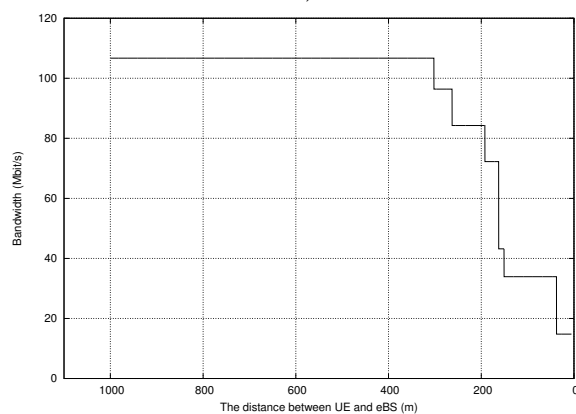
a)



b)



c)



d)

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

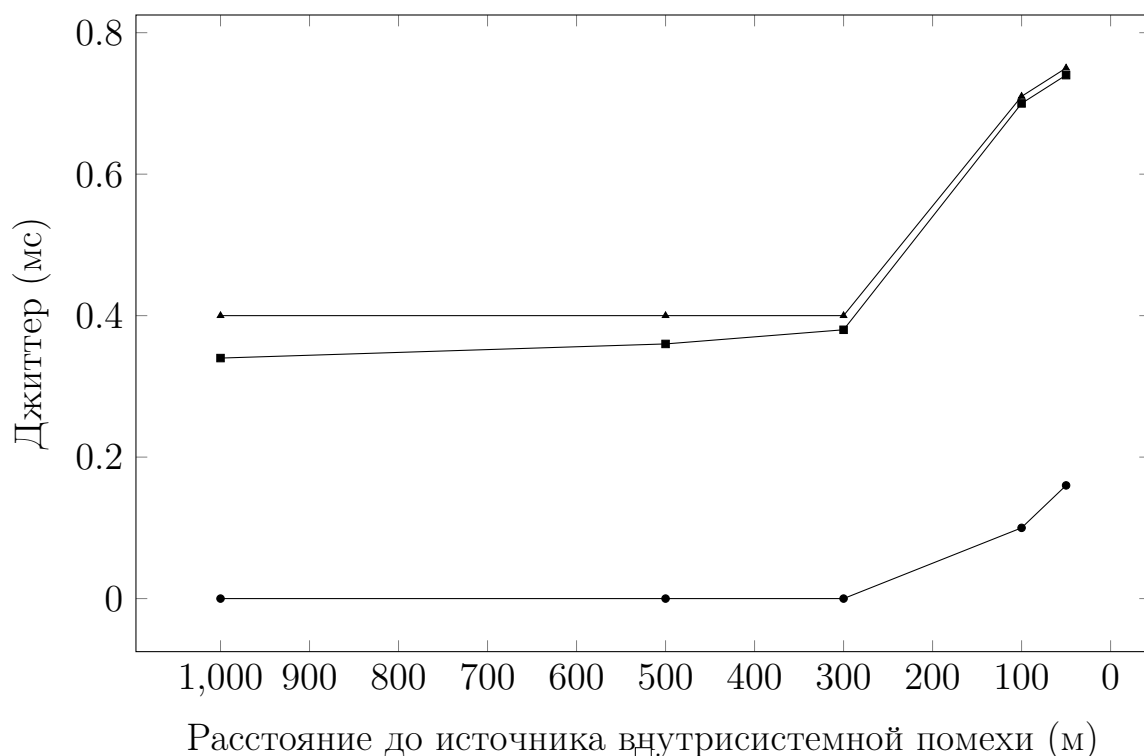


Рис. 2.11. Зависимость джиттера от расстояния до источника внутрисистемной помехи

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

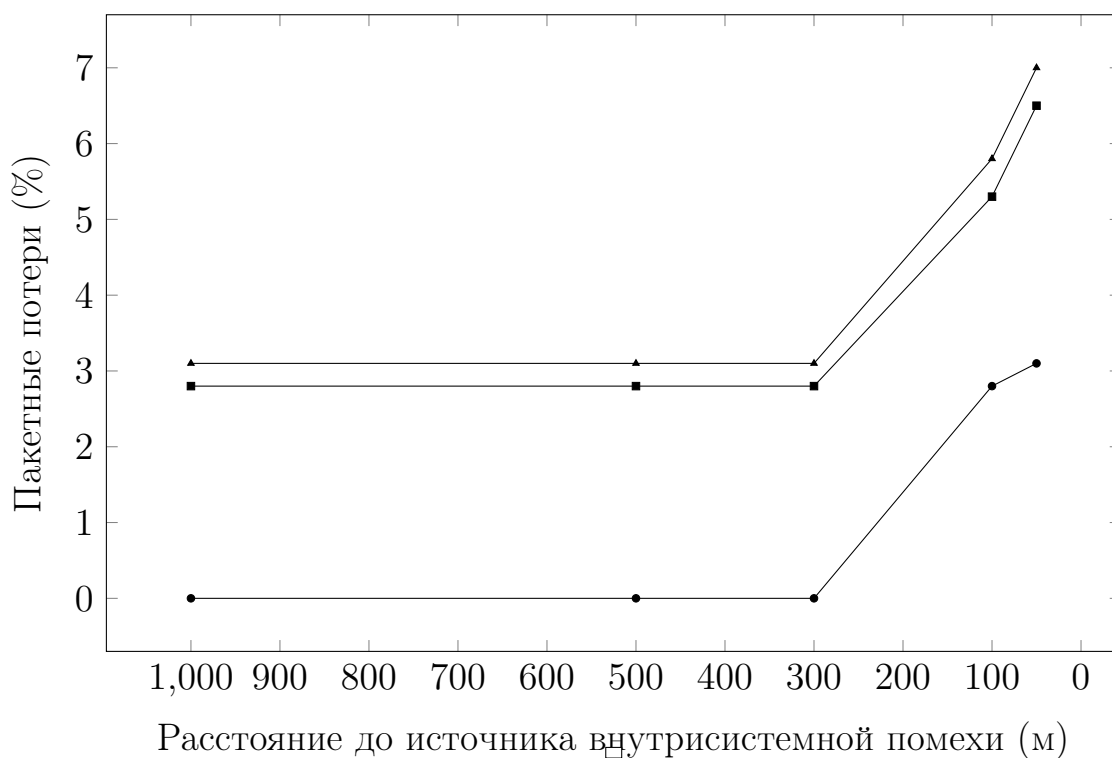


Рис. 2.12. Зависимость пакетных потерь от расстояния до источника внутрисистемной помехи

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 рас-

тет и число наложений его копий с разной синхронизацией, амплитудой, частотой и фазой. В результате сигнал становится стохастическим (недетерминированным) с рэлеевским распределением. Как известно, рэлеевское распределение достаточно точно отображает колебания амплитуды и изменения частоты (называемые еще доплеровским расширением), характерные для городской застройки.

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

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

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 ра-

Таблица 2.2

Расширенная А модель пешехода (ЕРА) [18]

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

боте в диапазоне 2 ГГц эти частоты соответствуют следующим скоростям движения пользовательского терминала: 2,7 км/ч, 38,4 км/ч и 162 км/ч. Требования к работе приемника формируются с учетом комбинации этих доплеровских сдвигов частоты с профилями задержки. И хотя существуют три профиля и три доплеровских сдвига частоты, из возможных сочетаний используются пять (табл. 2.6). Профиль пешехода как низкоскоростного объекта определен только для частоты 5 Гц; профиль пользователя в автомобиле – для 5 и 70 Гц, а типовой профиль для города не включает частоту 5 Гц.

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

Замирания в канале в конечном счете влияют на прикладной уровень услуг. Далее представим результаты моделирующего эксперимента, про-

Таблица 2.3

Расширенная А-модель при движении при движении в автомобиле (EVA) [18]

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

веденного в сетевом симмуляторе NS3, который демонстрирует влияние различных типов замирания на задержку, джиттер и пакетные потери в зависимости от расстояния между абонентом и базовой станцией (рис. 2.15-2.17).

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

Таблица 2.4

**Расширенная модель для типовой городской застройки
(ETU) [18]**

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

Таблица 2.5

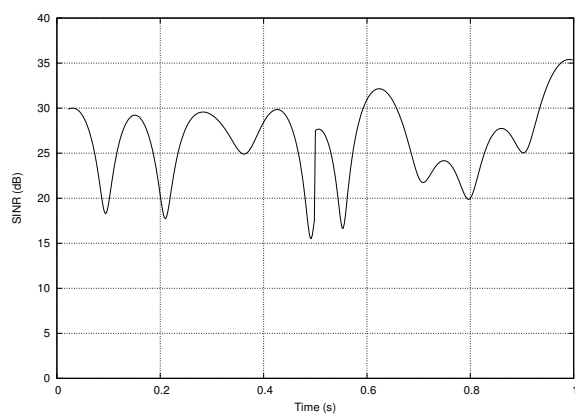
Профили задержек для технологии LTE [19]

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

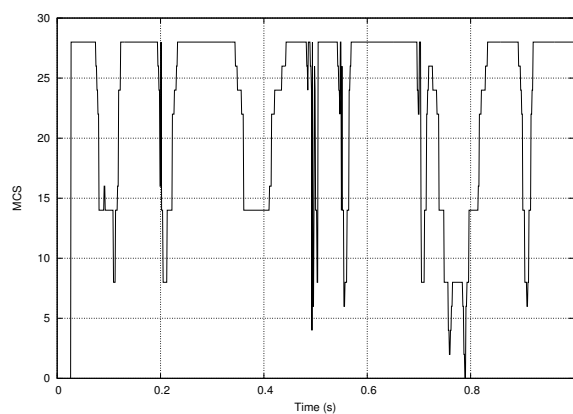
Таблица 2.6

Параметры модели канала [19]

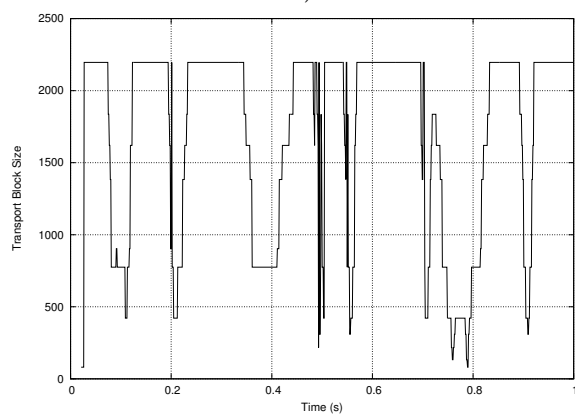
Модель	Максимальный доплеровский сдвиг частоты, Гц
ЕРА 5 Гц	5
ЕVА 5 Гц	5
ЕVА 70 Гц	70
ЕТU 70 Гц	70
ЕТU 300 Гц	300



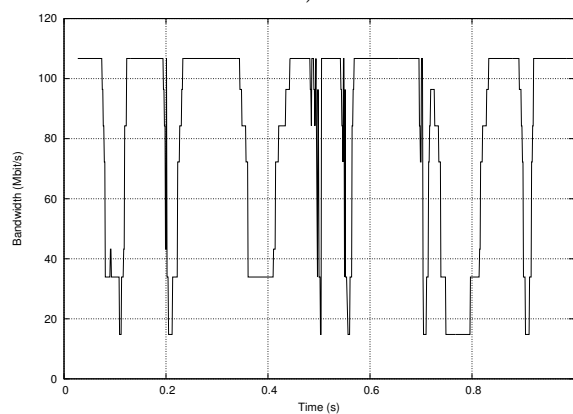
a)



b)

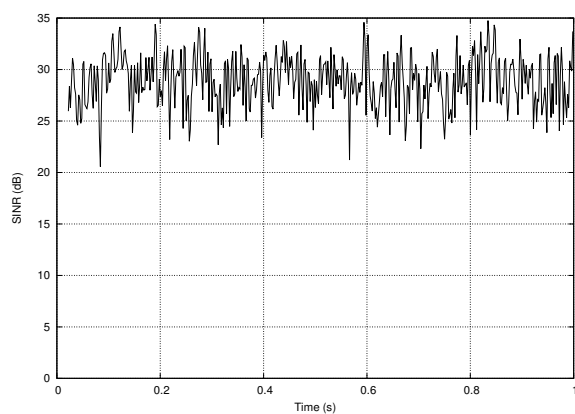


c)

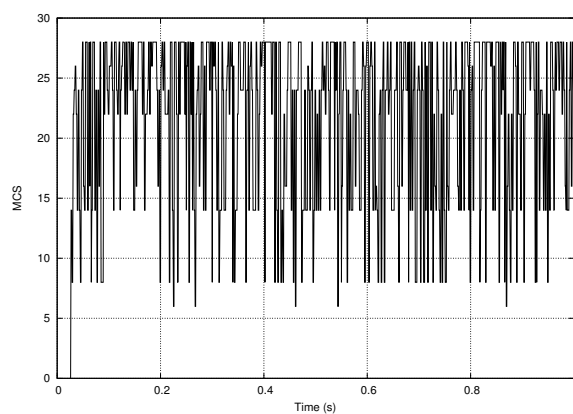


d)

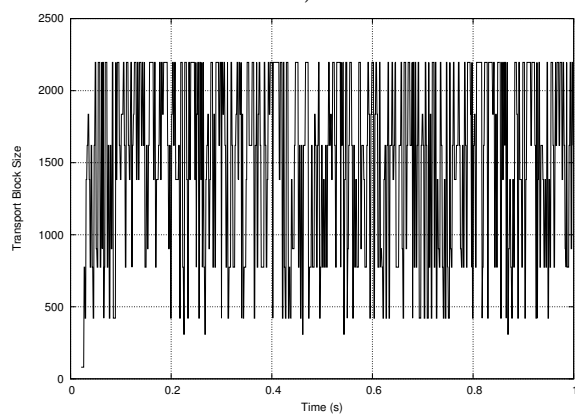
Рис. 2.13. Влияние замираний на а) SINR б) MCS в) размер ТВ г) скорость передачи нисходящего канала передачи при пешеходном сценарии (ЕРА 0-3 км/ч)



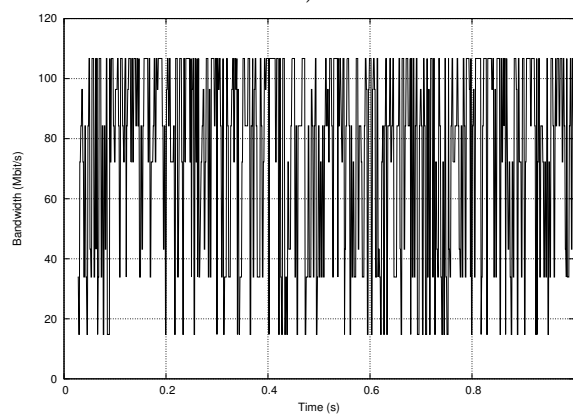
a)



b)



c)



d)

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

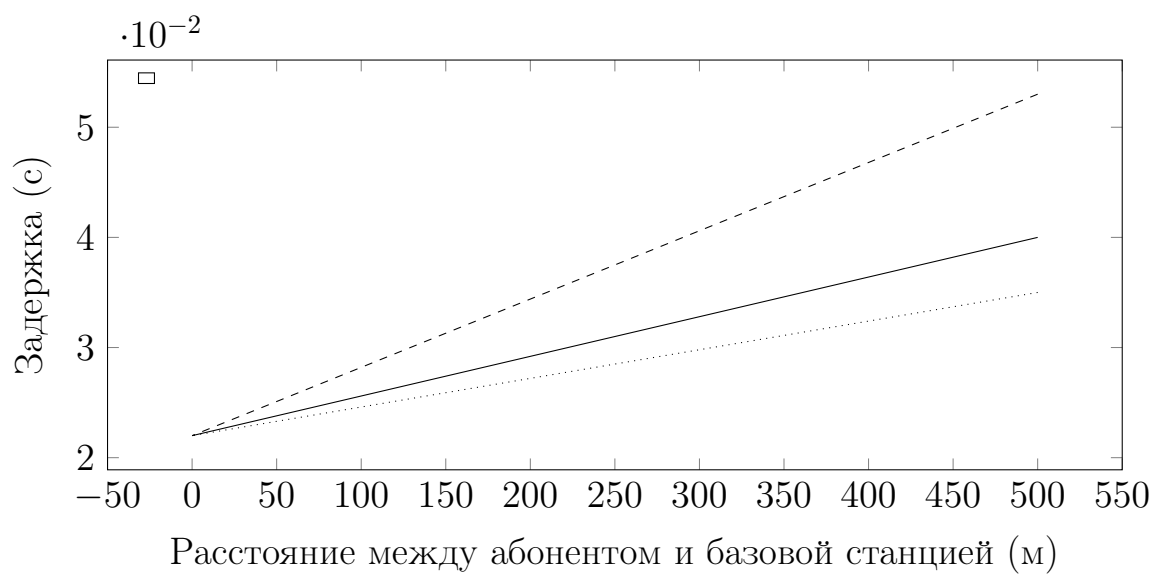


Рис. 2.15. Зависимость задержки пакетов от расстояния между абонентом и базовой станцией при замираниях

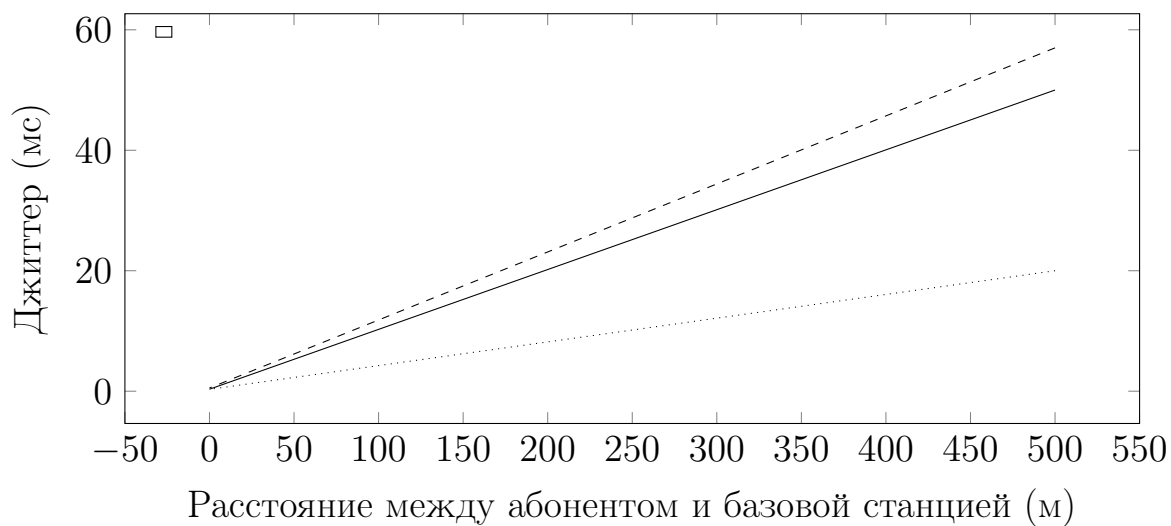


Рис. 2.16. Зависимость джиттера от расстояния между абонентом и базовой станцией при замираниях

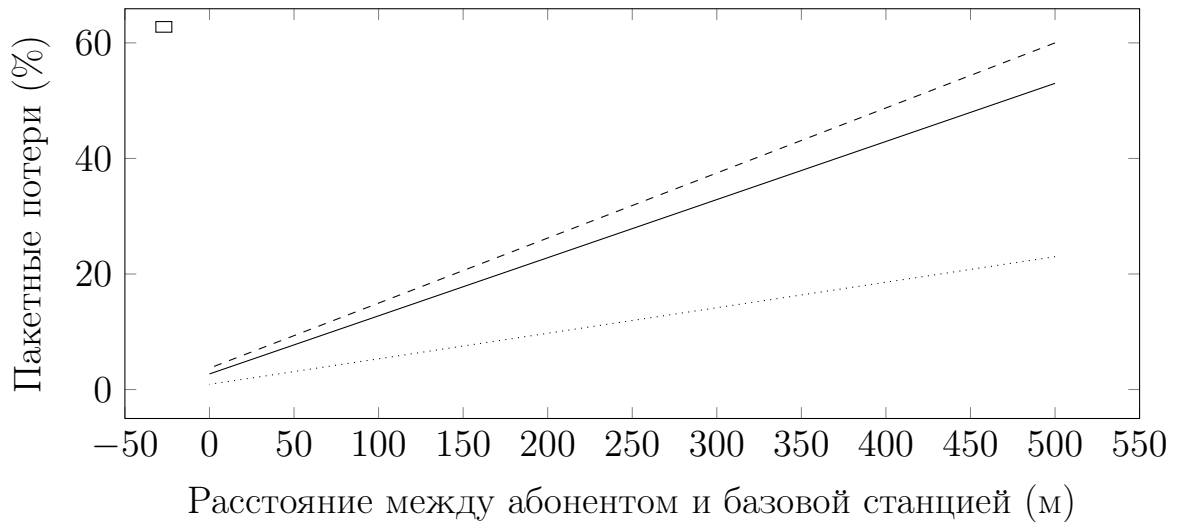


Рис. 2.17. Зависимость пакетных потерь от расстояния между абонентом и базовой станцией при замираниях

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 формирующий фильтр, описываемый уравнением состояния:

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

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:

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

где $\Phi(k+1, k)$ - матрица перехода; $G(k)$ - порождающий коэффициент; $\xi(k)$

- порождающая последовательность выборки из гауссовского белого шума (ГБШ), со спектральной плотностью мощности N_ξ .

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 ошибки измерения, являющийся порождающей последовательностью выборки из гауссовского белого шума со спектральной плотностью мощности N_ν , 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 буферы, маршрутизаторы и др. Таким образом, могут быть выделены участки квазистационарности и определенные временные промежутки, где процесс $x(t)$ нестационарен.

Как мы видим из раздела 2, процесс задержки имеет различные возмущения, вызванные различными причинами и, следовательно, математическая модель задержки должна учитывать все эти возмущения. Очевидно, указанные выбросы и скачки задержки можно учитывать, как в уравнении состояния (2.8) так и в уравнении наблюдения (2.9). Но смотря на то, что выбросы существенно ухудшают качество оценок, получаемых с помощью алгоритмов, оптимальных для гауссовского распределения. Разрабатываемый алгоритм компенсации джиттера должен будет игнорировать единичные выбросы. Тогда логичнее ввести выбросы задержки в уравнение наблюдения для того чтобы принимать выброс как ошибку наблюдения. И наоборот, при скачке задержки алгоритм компенсации джиттера должен, как можно раньше, увеличить размер буфера до необходимого значения, чтобы снизить пакетные потери. Тогда логичнее ввести скачки задержки в уравнение состояния.

Для описания помех $\xi(k)$, содержащие выбросы, могут быть использованы различные модели. Алгоритмы фильтрации, представленные в [20–23], основаны на описании помех в виде:

$$\xi(k) = (1 - r_v(k))\xi(k) + r_v(k)\xi_v(k), \quad (2.10)$$

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

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

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

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

$$x(k) = (1 - r_s(k))x(k) + r_s(k)x_s(k), \quad (2.13)$$

$$P[x(k)] = (1 - \varepsilon)N[0, R_1(k)] + \varepsilon N[0, R_2(k)], \quad (2.14)$$

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

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

где $x_s(k)$ представляет собой уравнение состояния случайного процесса скачка, а $r_s(k)$ представляет собой последовательностью случайных величин с двумя значениями на каждом шаге: «нуль» или «единица». Вероятности появления этих значений определяют долю засоренности скачками

уравнения состояния. Учитывая то, что в рассматриваемой модели имеет место два типа уравнения состояния: для выброса и для скачка, необходимо дополнительное устройство, предназначенное для идентификации типа изменений, которое будет рассмотрено дальше. С помощью предложенной модели случайного процесса сгенерируем ряд задержек с выбросами на рис. 2.18 а) и ряд задержек со скачками задержки на рис. 2.18 б).

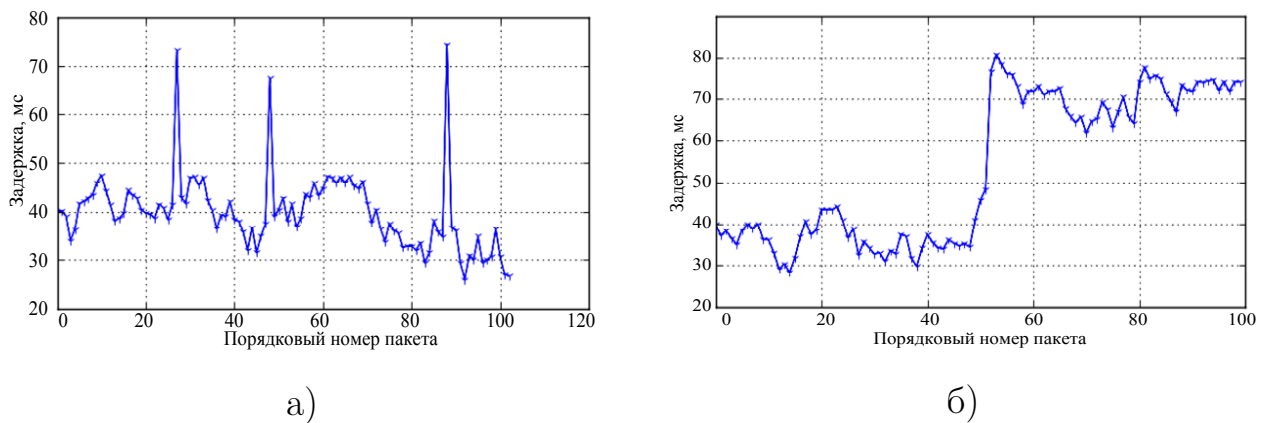


Рис. 2.18. Моделирование ряда задержек а) с выбросами, б) со скачками

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

2.4. Выводы ко 2 разделу

1. Проведен анализ основных причин джиттера в проводной и беспроводной сети, который включает анализ таких причин, как перегрузки в канале доступа, внутрисистемные помехи, замирания в канале связи и т. д. Все это показывает, что такие современные сети, как LTE, остаются подвержены влиянию джиттера. На данный момент разработка алгоритмов, которые позволяют мониторить текущее состояние и решать проблему с джиттером и пакетными потерями для трафика реального времени является актуальной задачей.

2. Предложено использовать градацию джиттера по 3 основным типам: постоянный джиттер, джиттер содержащий выбросы задержки и джиттер содержащий скачки задержки. Подобная градация позволит разработать дифференцированный подход к компенсации джиттера, вызванного различными факторами. Такой подход дает преимущество в том, что для этих трех типов джиттера необходим различный подход для его компенсации. Например, единичный выброс задержки необходимо проигнорировать, так как этот выброс вероятней всего является ложным и пакет все равно будет потерян, а при скачке задержки компенсатор джиттера должен как можно быстрее перестроится на новое значение задержки, чтобы как можно меньше пакетов были отброшены буфером из-за скачка джиттера.
3. На основе выше изложенного анализа, предлагаем разработать алгоритм компенсации джиттера и способ его эффективного внедрения в LTE сеть в разделе 3.

РАЗДЕЛ 3

СИНТЕЗ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ ДЖИТТЕРА ДЛЯ ПОТОКОВОГО ТРАФИКА В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ

3.1. Обзор методов фильтрации джиттера

3.1.1. Методы оценки джиттера в стационарном состоянии

В стационарном состоянии сети задержка $x(t)$ представляет собой случайную величину, распределение вероятностей которой близкое к нормальному $N(0, \xi_x)$. Однако реальная статистика сети не является стационарной, как мы видим из второго раздела. Таким образом возникают флуктуации задержки, которые могут иметь как единичный характер так и продолжаться длительное время. Все это приводит к тому, что плотность $p(x)$ нельзя считать идеально распределенной. Более того, реальную статистику, как правило, не удастся параметризовать. Поэтому традиционные, хорошо разработанные параметрические процедуры для 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 воздействия имеют небольшой процент аномальных “выбросов”, что приводит к утяжелению хвостов распределения. Эта статистическая неопределен-

ность, а также наличие аномалий может быть учтена в модели “засоренного” распределения, предложенного Хьюбером [24].

$$F(x) = (1 - \varepsilon)F_0(x) + \varepsilon F_1(x), \quad (3.1)$$

где ε - небольшое положительное действительное число ($\varepsilon < 0, 1$), $F_0(x)$ - известное распределение, $F_1(x)$ - 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 $S(\varphi)$. 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 σ и σ_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 сигнала 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 $S(\varphi)$.

Если наблюдение производится в дискретные моменты времени, то функция правдоподобия фазы φ 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 [25], 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:

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

Типичным для практики являются следующие значения величин: $\varepsilon \leq 0,1$ и $\sigma_1 \geq 10\sigma$.

Рассмотрим вторую сумму. Если $V_i \geq 3\sigma_1$, то единицей 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.

3.1.2. Рекурсивные методы оценки джиттера

Рассмотренная процедура оценки является точечной, привязанной к конкретной ситуации. В этой процедуре, не учитывается предистория 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 параллельных связей между соседними позициями i и $i + 1$.

Применим более общую марковскую модель функционирования сети, 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 изменения 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 помех. Однако в нашей прикладной задаче, распределение шумов не является гауссовским, причем распространенной причиной отклонения распределения вероятностей помех от гауссовского является наличие выбросов и скачков в оцениваемом процессе. Хорошо известно [26], 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 скач-

ки [15,20–23,27]. В [20] задача фильтрации при наличии выбросов решалась, как задача негаусовской фильтрации, однако реализация полученного алгоритма на ЭВМ представляет затруднительные трудности. Дальнейшее развитие этот подход получил в [21]. 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 [22,23]. 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 [15] предполагается, что в нормальном режиме работы измерительного устройства помехи распределены нормально с нулевым средним и известной ковариационной матрицей, а в режиме сбоя помехи имеют нормальное распределение с неизвестным средним и той же ковариационной матрицей. Алгоритм фильтрации получен на основе обнаружения момента появления выброса, оценивания его амплитуды и 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, является параметр Φ позволяющий регулировать сглаживающие свойства фильтра.

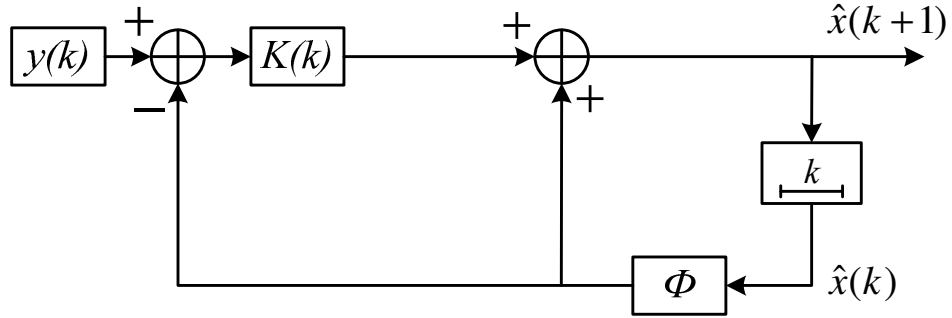


Рис. 3.1. Схема ФКБ

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_ξ шума наблюдения N_ν , а также значения интрвалов корреляции, определяемой матрицей Φ . 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, который может быть синтезирован в том случае, когда в (2.10), (2.11) известны последовательности $\{\mathbf{r}_v\}$, $\{\mathbf{R}_2(\mathbf{k})\}$.

Выражения описывающие алгоритм, имеют вид:

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

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

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

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

3.2.2. Алгоритм фильтрации при известной вероятности появления выбросов ε и известных ковариационных матрицах $\{\mathbf{R}_2(\mathbf{k})\}$

Выражения описывающие алгоритм, имеют вид:

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

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

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

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

3.2.3. Алгоритм фильтрации с оценкой выбросов, требующий информацию о характеристиках 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 [15, 24, 25]. 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 [25, 28] 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 не стационарных явлений является метод кусочно стационарных моделей, при этом переход на ту или иную модель управления осуществляется за счет обнаружения интервала корреляции квазистационарности [?].

Следующей разновидностью является алгоритм фильтрации не требующий 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:

$$\xi(k) = \xi(k) + r_v(k)Bu(k), \quad (3.26)$$

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

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 анализа этих алгоритмов [15] 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

Таблица 3.1

Дисперсия ошибок оценивания в момент $k = 20$. σ_{OPT}^2 - для оптимального фильтра (3.13)-(3.16), σ_{LIN}^2 - для линейного фильтра (3.17)-(3.20), σ_{KAL}^2 - для ФКБ, σ_{RB1}^2 - для алгоритма (3.21)-(3.24), σ_{RB2}^2 - для алгоритма (3.28)-(3.36) [15]

$R_1 = 1$	ε	R_2	σ_{OPT}^2	σ_{LIN}^2	σ_{KAL}^2	σ_{RB1}^2	σ_{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

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

3.3. Обзор робастных алгоритмов фильтрации на основе фильтра

Калмана для случайных процессов содержащих выбросы и скачки

1. Алгоритм РФКБ для случайного процесса, содержащего выбросы, согласно [27] 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).

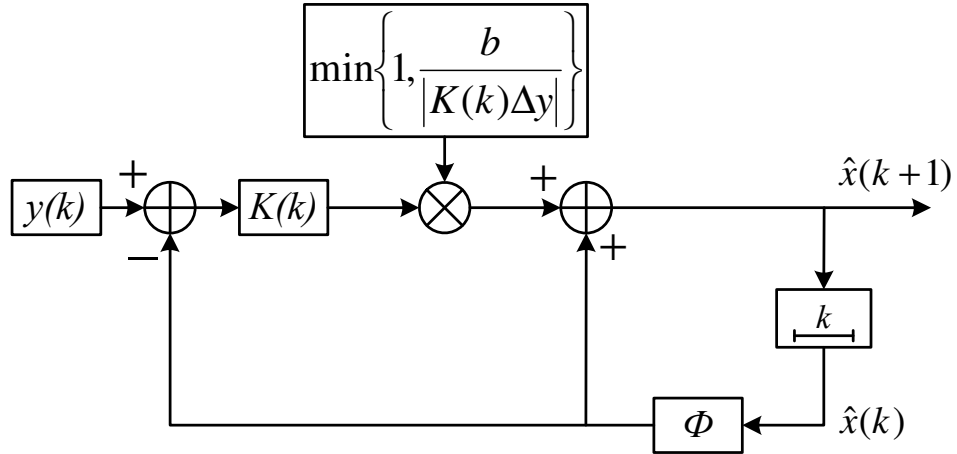


Рис. 3.2. Схема РФКБ для фильтрации случайных процессов содержащих выбросы

2. Алгоритм РФКБ для случайного процесса, содержащего скачки, согласно [27] 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).

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

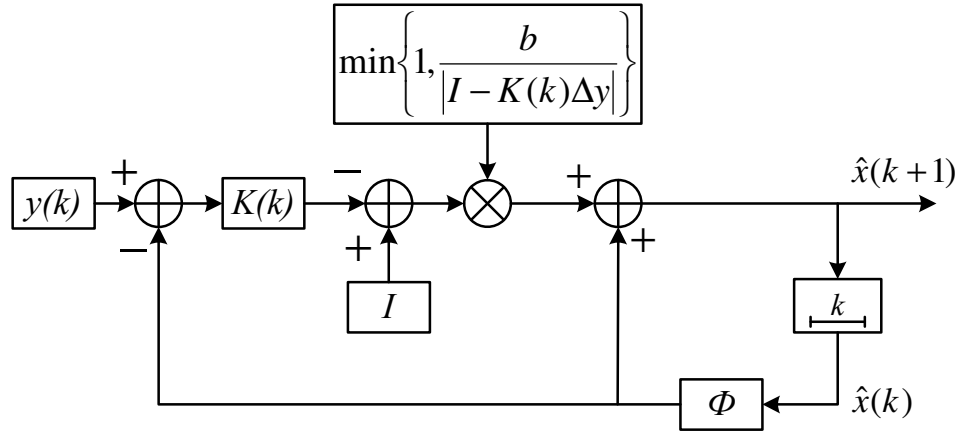


Рис. 3.3. Схема РФКБ для фильтрации случайных процессов содержащих скачки

ГРФКБ может быть реализован следующим образом [27]: 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:

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

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

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

```

1  def cond(arr, w, b):
2      try: # проверка, что количество элементов
3           # в массиве не меньше, чем окно наблюдения
4           arr[-w]
```

```

5     except IndexError:
6         return False
7     if arr[-w]<b:
8         return False
9     if w==1 and arr[-w]>=b:
10        return True
11    if k==1 and arr[-w]<b:
12        return False
13    else:
14        if cond(arr, w-1, b):
15            return True # обнаружен скачек задержки
16        else:
17            return False # не обнаружен скачек задержки

```

3.4. Сравнительный анализ алгоритмов фильтрации для случайных процессов содержащих выбросы и скачки

Чтобы сравнить алгоритмы фильтрации проведем моделирование оценки случайного процесса с помощью приведенных робастных алгоритмов фильтрации и фильтра Калмана. 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.

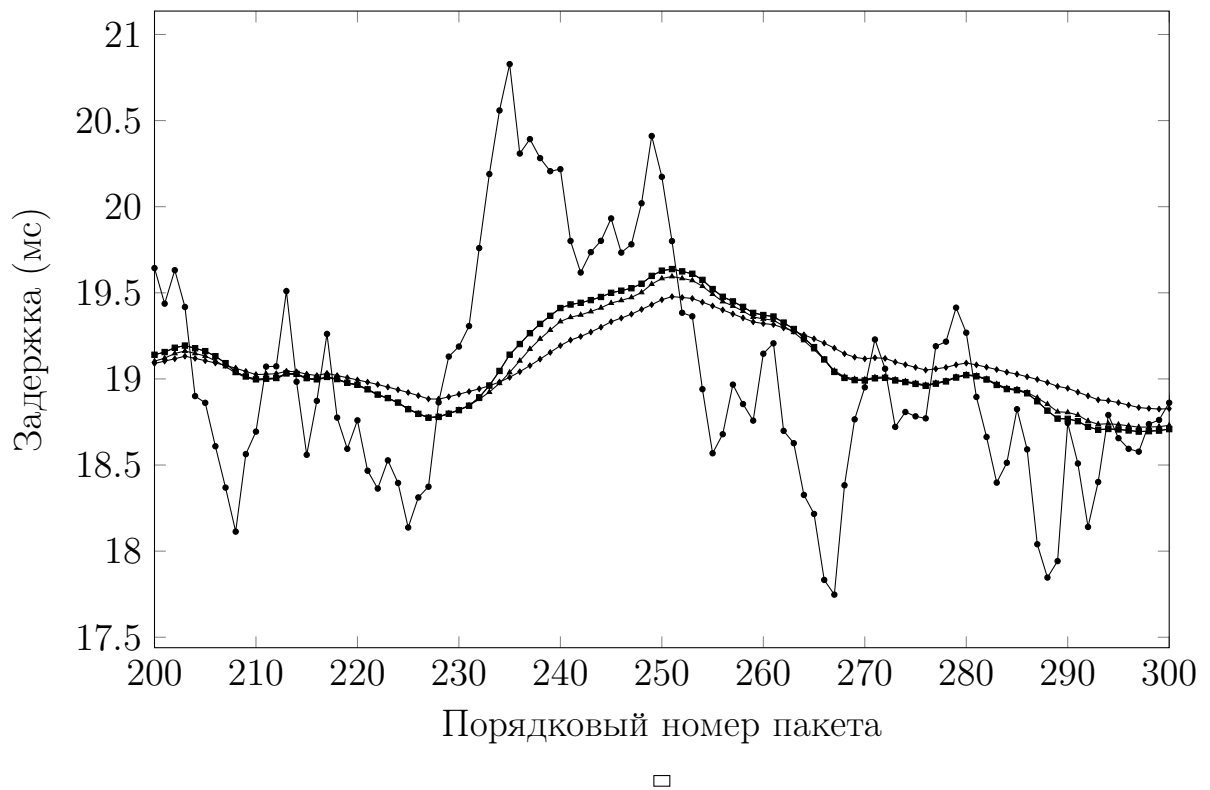


Рис. 3.4. Моделирование фильтрации в идеальных условиях

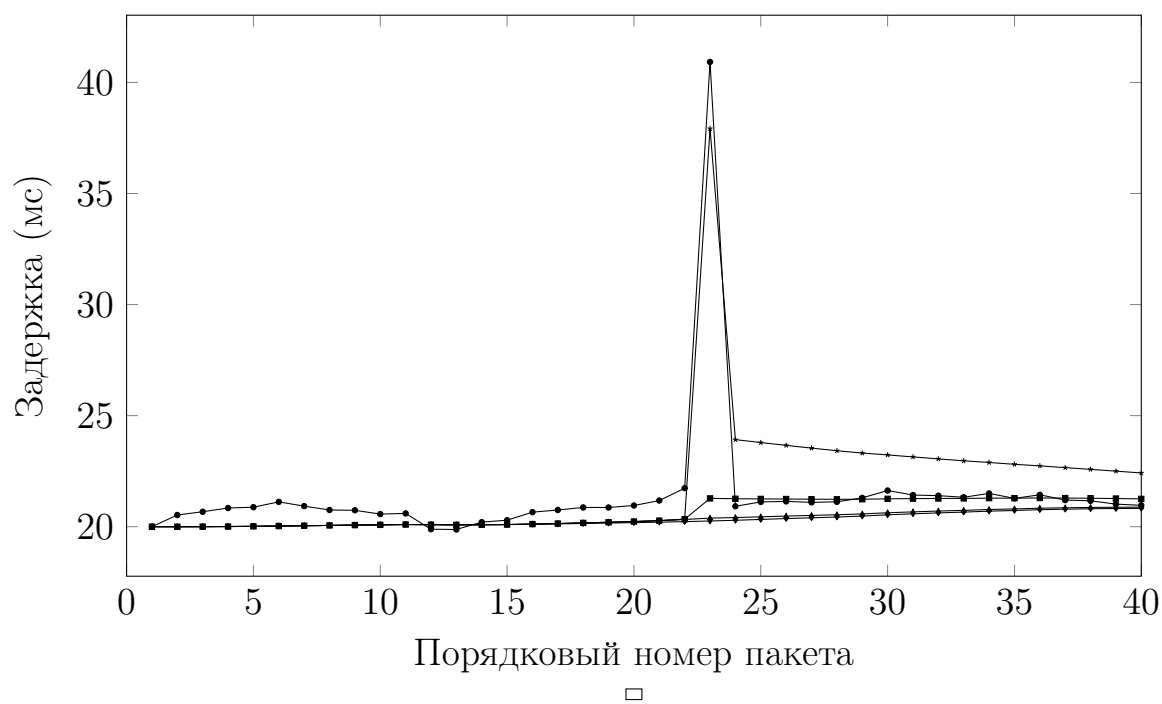


Рис. 3.5. Моделирование фильтрации при выбросах

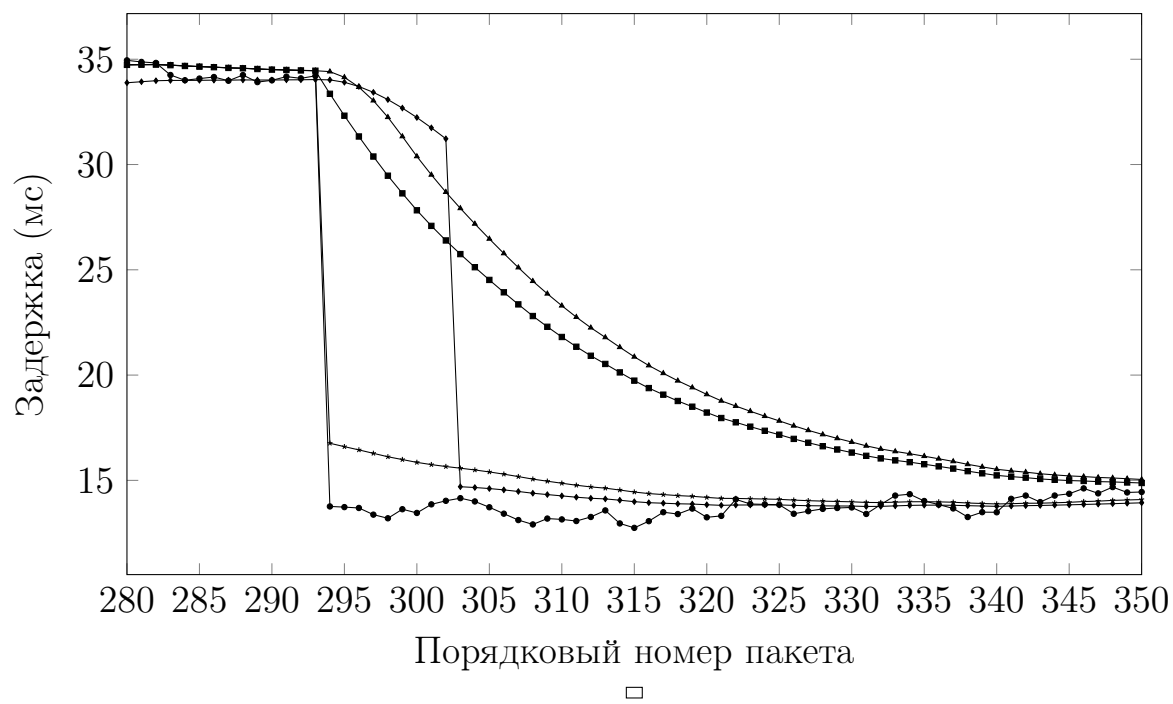


Рис. 3.6. Моделирование фильтрации при скачках

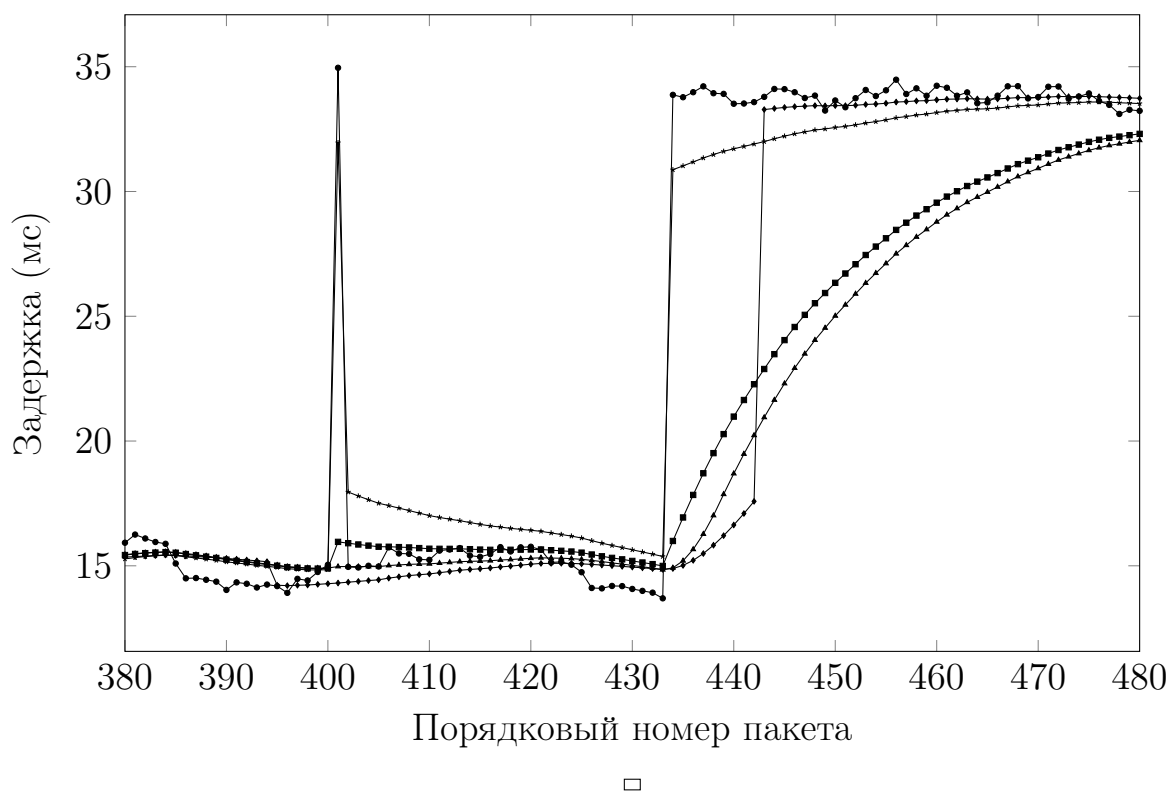


Рис. 3.7. Моделирование фильтрации в смешанной ситуации скачков и выбросов

В процессе эксперимента был получен средний квадрат отклонений (СКО) оценки в различных ситуациях зашумленности (скачки и выбросы) с помощью рассмотренных фильтров и результаты приведены в табл. 3.2

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

3.5. Обзор концепции потоковых агентов

При передаче мультимедийной информации по комбинированным сетям с учетом различных механизмов распространения с различными технологиями, важным является выполнение требований по качеству предоставления мультимедийной информации пользователю. При этом важными

Таблица 3.2

Типы и параметры буфера компенсации джиттера

Тип фильтра	Условия без выбросов и скачков	Условия со скачками	Условия с выбросами	Условия с выбросами и скачками
ФКБ	6,48	6	2,7	26,6
РФКБ (для выбросов)	11,02	29,93	3,2	23,1
РФКБ (для скачков)	2,15	0,85	19,8	42
ГРФКБ	31,08	10,93	27,4	14,4

являются такие характеристики: задержка, джиттер, число потерянных и поврежденных пакетов. Как показывает практика наибольшие потери качественных характеристик происходят на границах операторских сетей и сетей с различными механизмами распространения. Возникает необходимость установки соответствующих агентов, обеспечивающих мониторинг на том или ином промежутке сети. Вместе с тем от числа и места этих агентов существенно зависит качество мониторинга. Поточковый агент (ПА) это агент, который находится на базовой станции на пересечении проводной и беспроводной сети (рис. 3.8). 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, поточковый агент отправляет обратные сообщения в реальном времени, такие как подтверждение пакетов (ACKs), что говорит отправителю о прибытии каждого пакета к агенту корректно и вовремя.

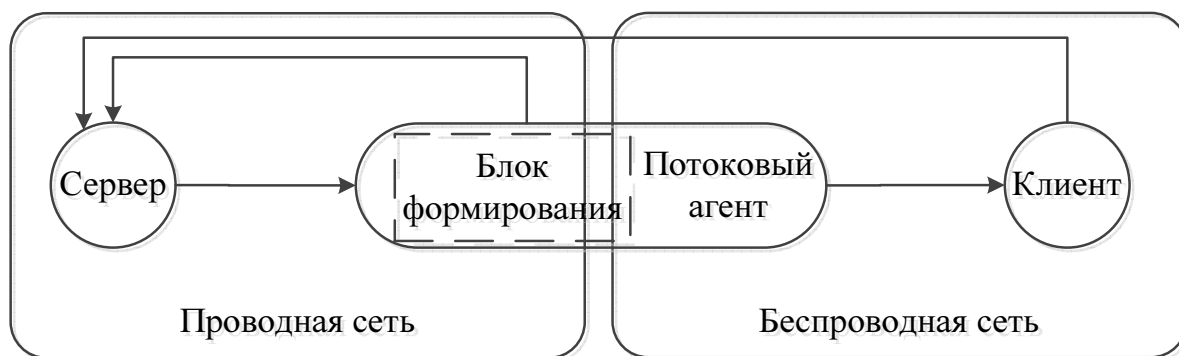


Рис. 3.8. Использование ПА

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

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

- ПА предоставляет дополнительную обратную связь для контент сервера с границы между проводной и беспроводной частью сети [29].
- ПА дает возможность определить место пакетной ошибки [29], 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 [30, 31].
- Прямая коррекция ошибок позволяет уменьшить битовые искажения для приложений восприимчивых к задержке [30, 31].

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.

3.6. Выводы ко **3** разделу

1. Проведен анализ алгоритмов фильтрации для оценки текущего состояния случайного процесса с выбросами и скачками. Выбран алгоритм фильтрации, обладающий рядом необходимых свойств, которые позволяют на его основе реализовать алгоритм буфера компенсации джиттера. Проведен анализ работы выбранного алгоритма с рядом задержек, которые были сгенерированы с помощью математической модели процесса задержки (**2.10** и (**2.13**). Отметим (табл. **3.2**), что выбранный алгоритм фильтрации превосходит остальные в условиях с выбросами и скачками.
2. Разработан инвариантный алгоритм буфера компенсации джиттера, который позволяет решить ряд проблем возникающих, когда процесс пакетной задержки отклоняется от нормального распределения и имеет выбросы и скачки. Сравнительный анализ работы предложенного алгоритма с реальными задержками, которые были получены при анализе основных источников джиттера в проводных и беспроводных сетях в разделе **2** проведем в разделе **5**.
3. Использование потоковых агентов позволяет решить проблему внедрения предложенного буфера компенсации джиттера в сеть LTE, избегая при этом дополнительных затрат так, как его внедрение можно реализовать простым обновлением программного обеспечения на SGW/PGW узле. Также ПА на данный момент уже имеет целый ряд полезных функций, которые решают множество проблем

на границе разделения сред для потокового трафика.

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.

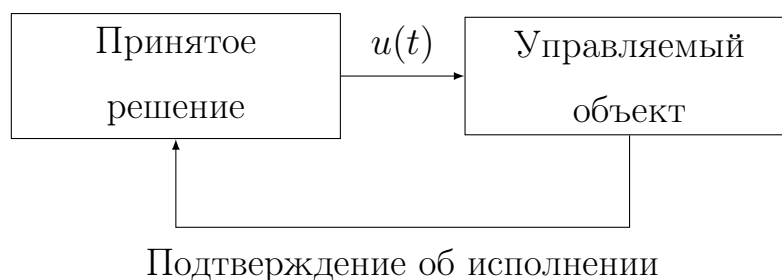


Рис. 4.1. Схема управления по возмущению (принцип Понселе)

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

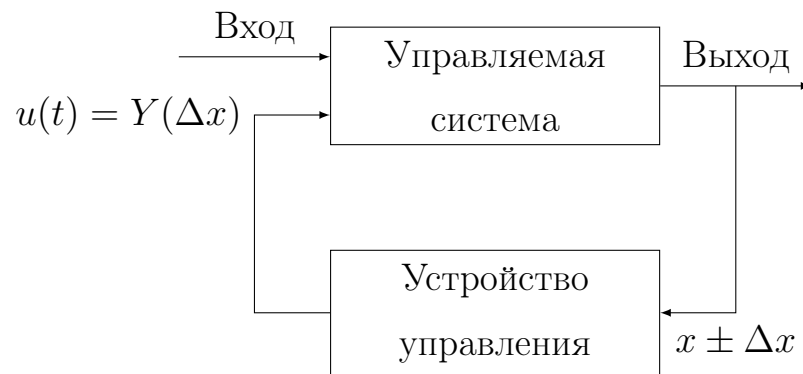


Рис. 4.2. Схема управления по отклонению (принцип Уатта)

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 среднеквадратичных критерий:

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

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:

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

Поскольку мы имеем дело со случайными процессами, то необходимо использовать 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:

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

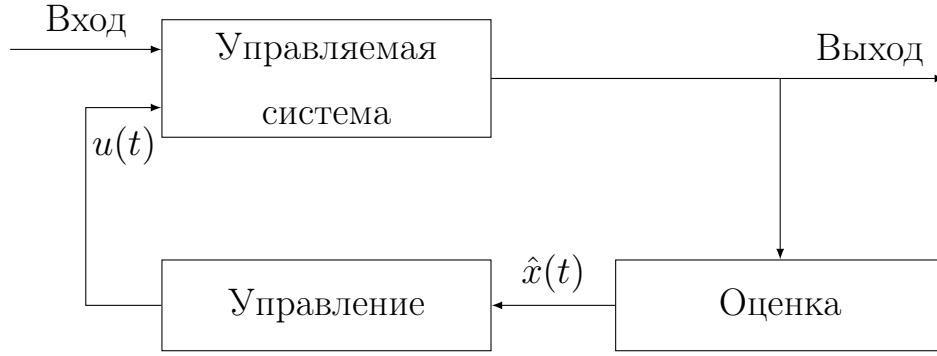


Рис. 4.3. Структурная схема управления системы с разделением на отдельные блоки стохастической оценки и детерминированного управления

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

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 $\alpha = \tau_{cor}^{-1}$, Δt - шаг дискретизации.

Предполагая состояние 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):

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

Очевидно, что когда уровни полезной составляющей и помеховой составляющей соизмеримы между собой, как это следует из рис. 4.4, полу-

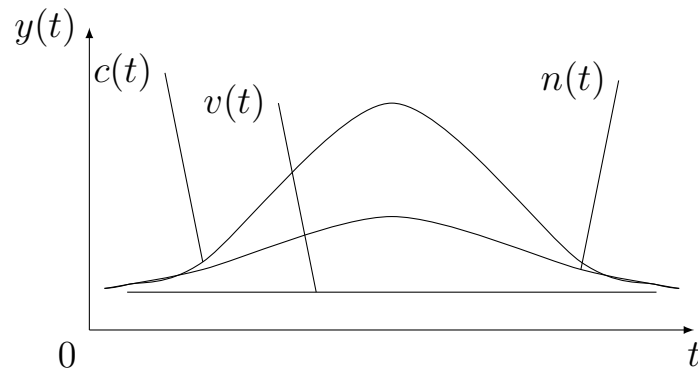


Рис. 4.4. Наблюдение сигнала с помехой и белым шумом

чить удовлетворительное качество оценки затруднительно. В этой ситуации уместно использовать адаптивную компенсацию помеховой составляющей $n(t)$.

Необходимо сформировать такой сигнал (антипомеху) $n^*(t) \approx -n(t)$, 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, который следует минимизировать: $\Delta n(t) \rightarrow 0$.

Однако формированию «антипомехи» $n^*(t)$ из основного источника наблюдения (4.10) мешает полезная составляющая $c(t)$, уровень, которой может быть значительным (рис. 4.4). Таким образом, прямого решения нет. В связи с этим, задача компенсации расширяется и реализуется в два этапа: в начале находится возможность создания «антипомехи», а потом скомпенсировать в помеху в наблюдении.

4.2. Метод управления наблюдением для реализации буфера компенсации джиттера

Как упоминалось ранее, из теории автоматического управления известна теорема о разделении [32, 33], утверждающая о том, что при средне-

квадратичном 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 алгоритмов управления, следует уточнить, каким способом будет осуществляться управление буфером компенсации джиттера поступающих пакетов. Очевидно, это может быть реализовано с помощью аддитивной коррекции:

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

или мультипликативной коррекции:

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

где l - масштабирующий множитель.

Для разработки алгоритмов 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 [34,35] 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):

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

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 алгоритм (4.15), представлена на рис. ??

РАЗДЕЛ 5

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

В данном разделе проведем сравнение предложенного алгоритма буфера основанного на ГРФК (3.37,3.38), описанного в разделе ?? с алгоритмом буфера (1.1-1.3) из [14]. С константами $\gamma = 4$ и $\Delta t = 5$.

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

Как уже упоминалось в разделе 2.1.7, обновление таблицы маршрутизации может привести к задержке небольшого количества пакетов. Проведем эксперимент для анализа эффективности работы буфера на основе ГРФК. На рис. 5.1 изображен ряд задержек, полученных в сетевом симмуляторе NS3 и основные промежуточные величины необходимы для расчета размера буфера: оценка процесса задержки (1.2) и дисперсия оценки (1.3) для буфера [14] и оценка процесса задержки (3.37,3.38) и дисперсия оценки (1.3) для буфера на основе ГРФК.

Благодаря буферу основанном на ГРФК (рис. 5.2) удалось уменьшить среднюю задержку воспроизведения с 63 мс при алгоритме буфера из источника [14] до 50 мс, при этом вероятность потери пакетов увеличилась с 2.7 до 2.8 %. Оценка Е модели для буфера на основе ГРФК составляет 55 и для буфера компенсации джиттера [14] - 53.

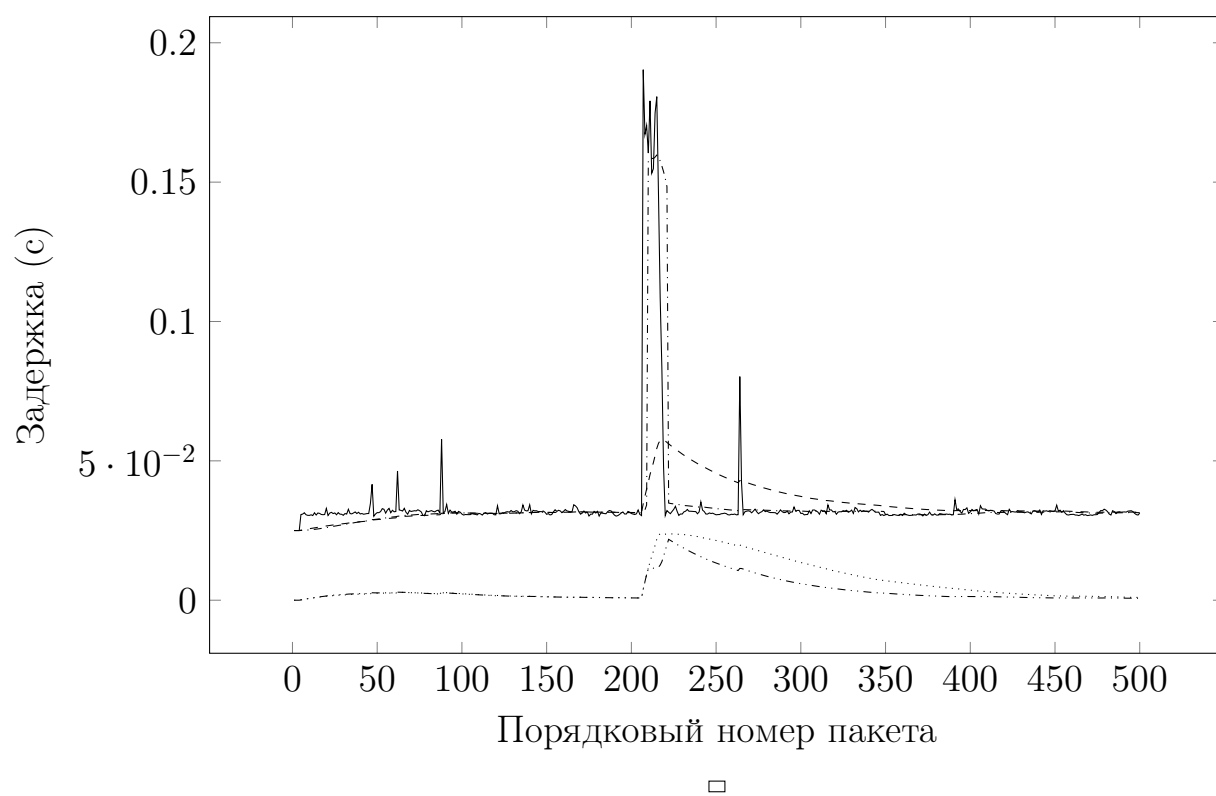


Рис. 5.1. Основные промежуточные величины, необходимые для расчета размера буфера

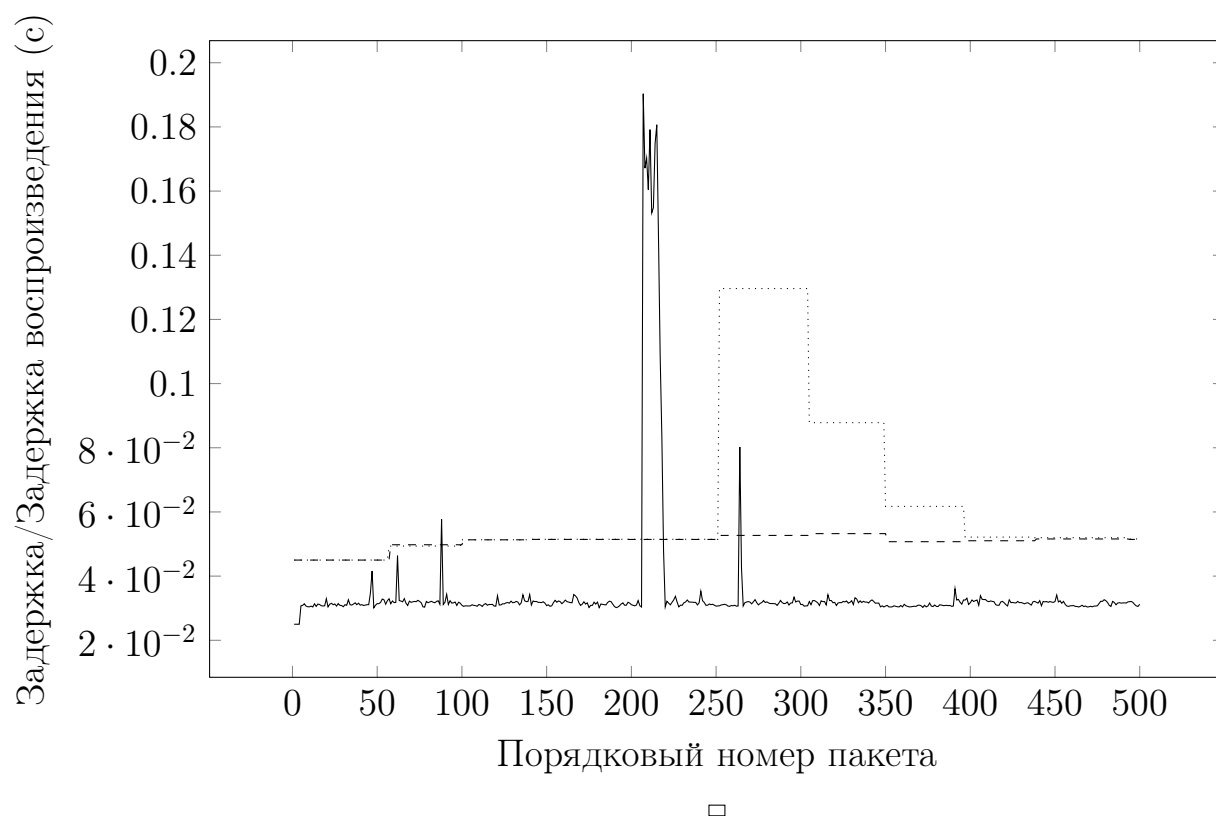


Рис. 5.2. Сравнение предложенного алгоритма с буфером компенсации джиттера [14] в ситуации изменения маршрута передачи пакетов

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

Проведем моделирование оценки буфера компенсатора джиттера при хэндовера в сети LTE. Для моделирования будем использовать данные, полученные в разделе 2.2.1. С буфером на основе ГРФК (рис. 5.3) средняя задержка воспроизведения составила 31 мс, с буфером компенсации джиттера [14] - 23 мс, при этом вероятность потери пакетов практически не изменилась, и составила 1,7 % для обоих алгоритмов компенсации джиттера. Оценка Е модели для буфера на основе ГРФК составляет 66 и для классического буфера - 65.

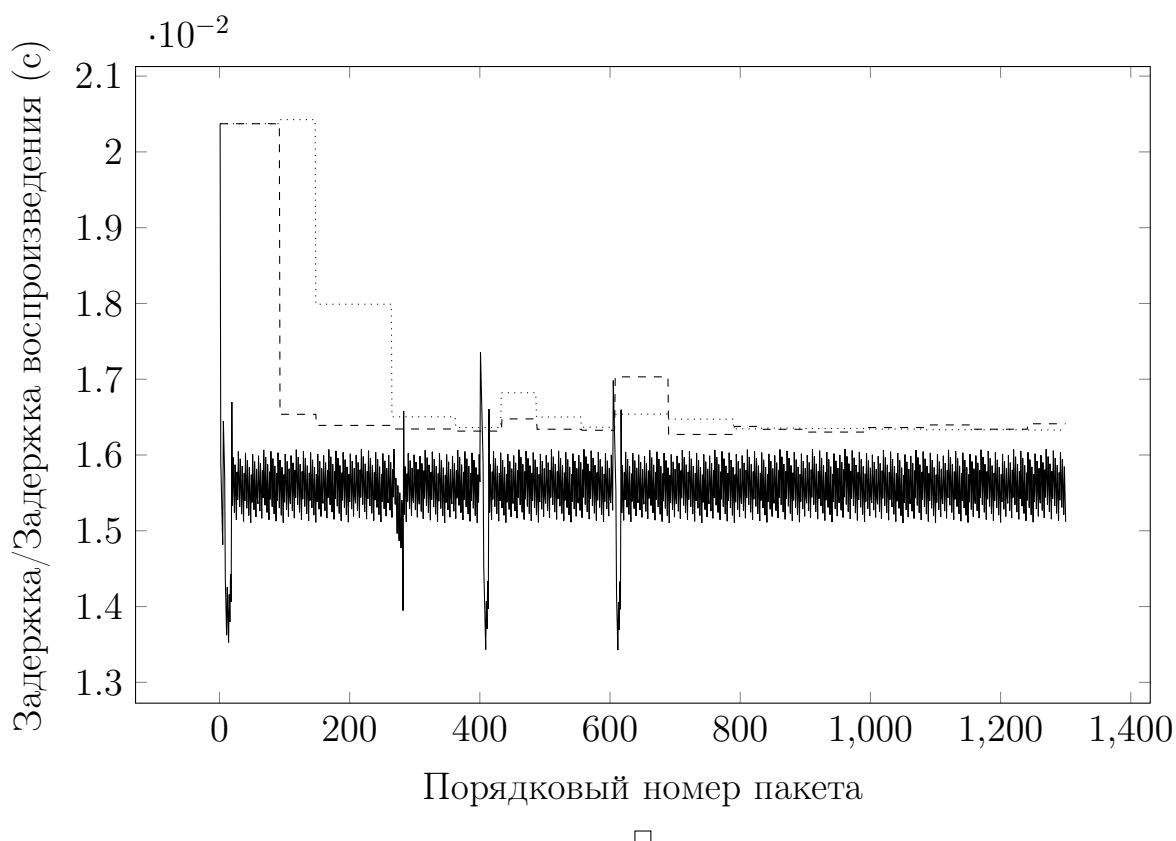


Рис. 5.3. Сравнение предложенного алгоритма с буфером компенсации джиттера [14] в ситуации хэндовера

5.3. Анализ эффективности буфера компенсации джиттера в ситуации перегрузки в сети

Благодаря буферу основанном на ГРФК на рис. 5.4 удалось уменьшить среднюю задержку воспроизведения с 31 мс, при использовании классического динамического буфера, до 12 мс, при этом вероятность потери пакетов составляет 30 и 12 % соответственно классический буфер и буфер основанный на РФК. Оценка Е модели для буфера на основе ГРФК составляет 22 и для классического буфера - 10.

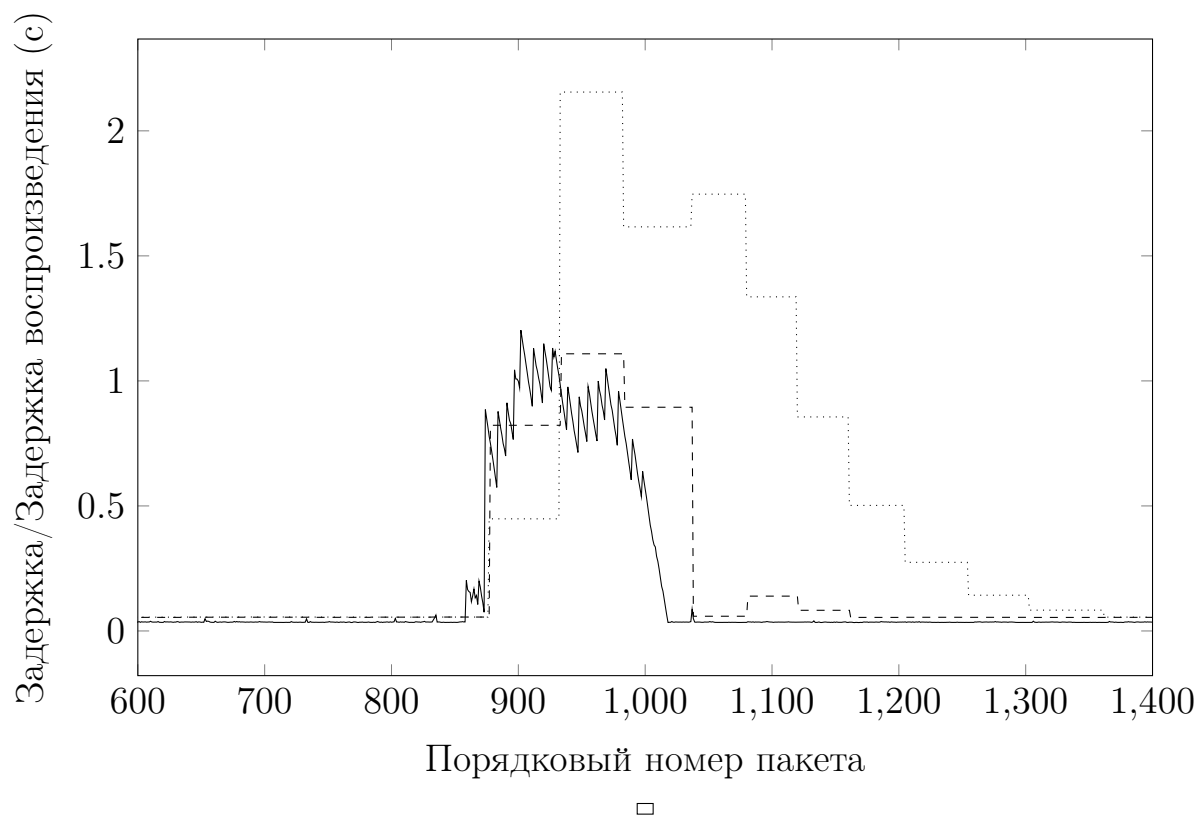


Рис. 5.4. Сравнение предложенного алгоритма с классическим буфером компенсации джиттера в ситуации перегрузки в сети

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

Благодаря буферу основанном на ГРФК на рис. 5.4 удалось уменьшить среднюю задержку воспроизведения с 106 мс, при использовании классического динамического буфера, до 36 мс, при этом вероятность потери пакетов составляет 14 и 13 % соответственно. Оценка Е модели для буфера на основе ГРФК составляет 21 и для классического буфера - 14.

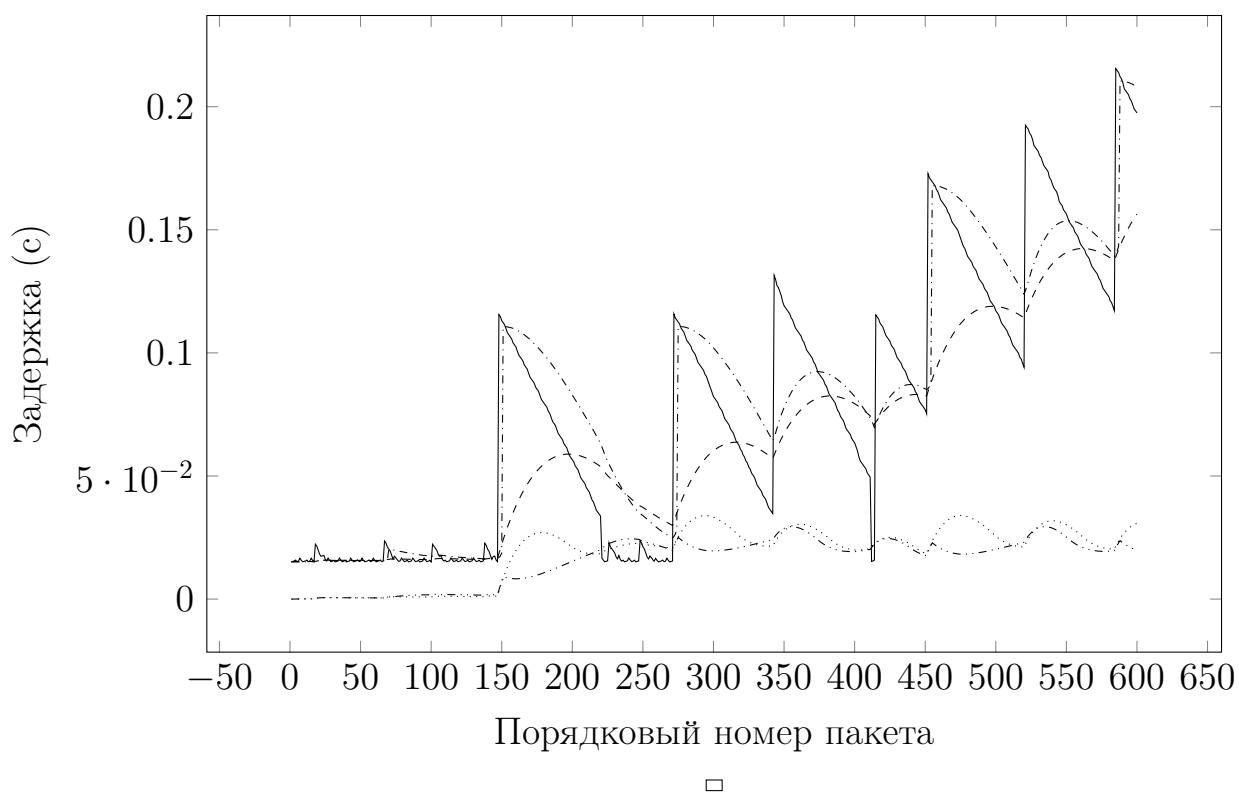


Рис. 5.5. Основные промежуточные величины, необходимые для расчета размера буфера

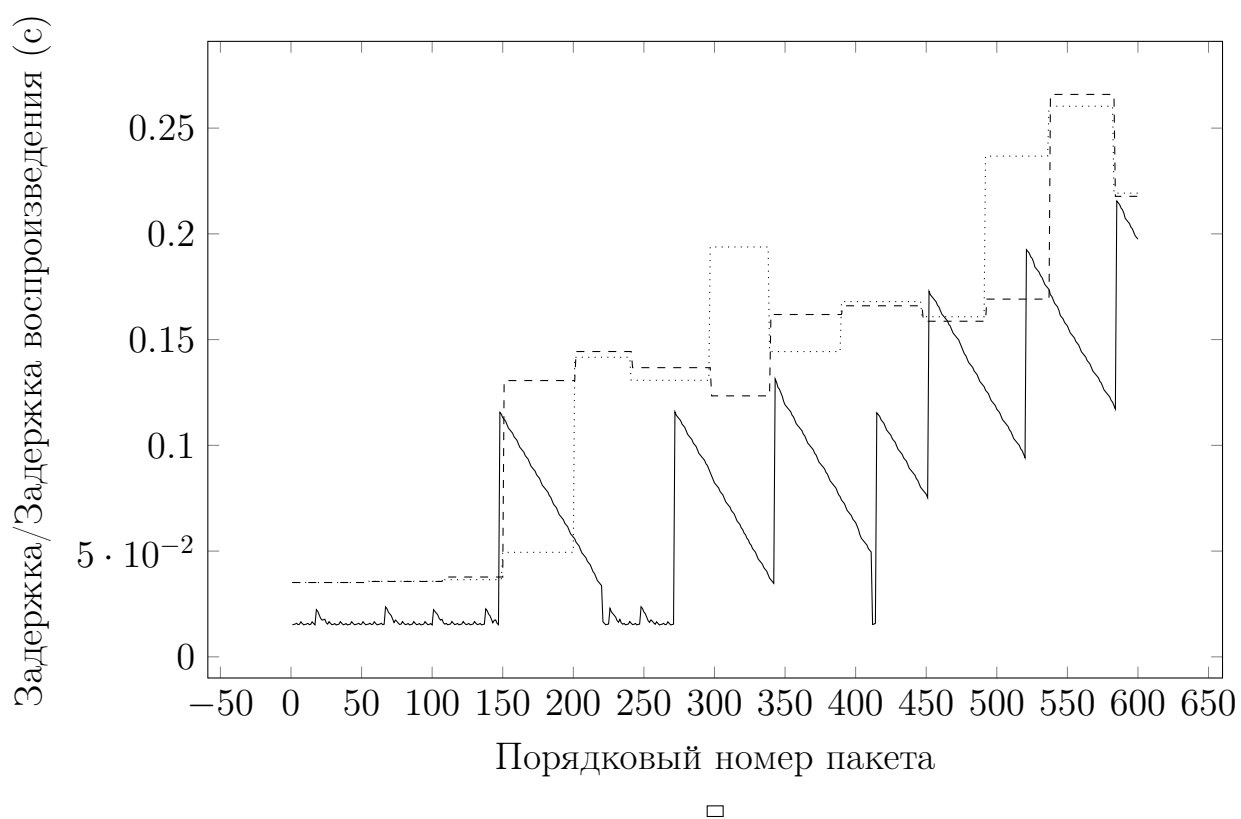


Рис. 5.6. Сравнение предложенного алгоритма с буфером компенсации джиттера [14] в ситуации увеличения расстояния между базовой станцией и абонентом в сети LTE

5.5. Анализ эффективности буфера компенсации джиттера в ситуации внутрисистемных помех

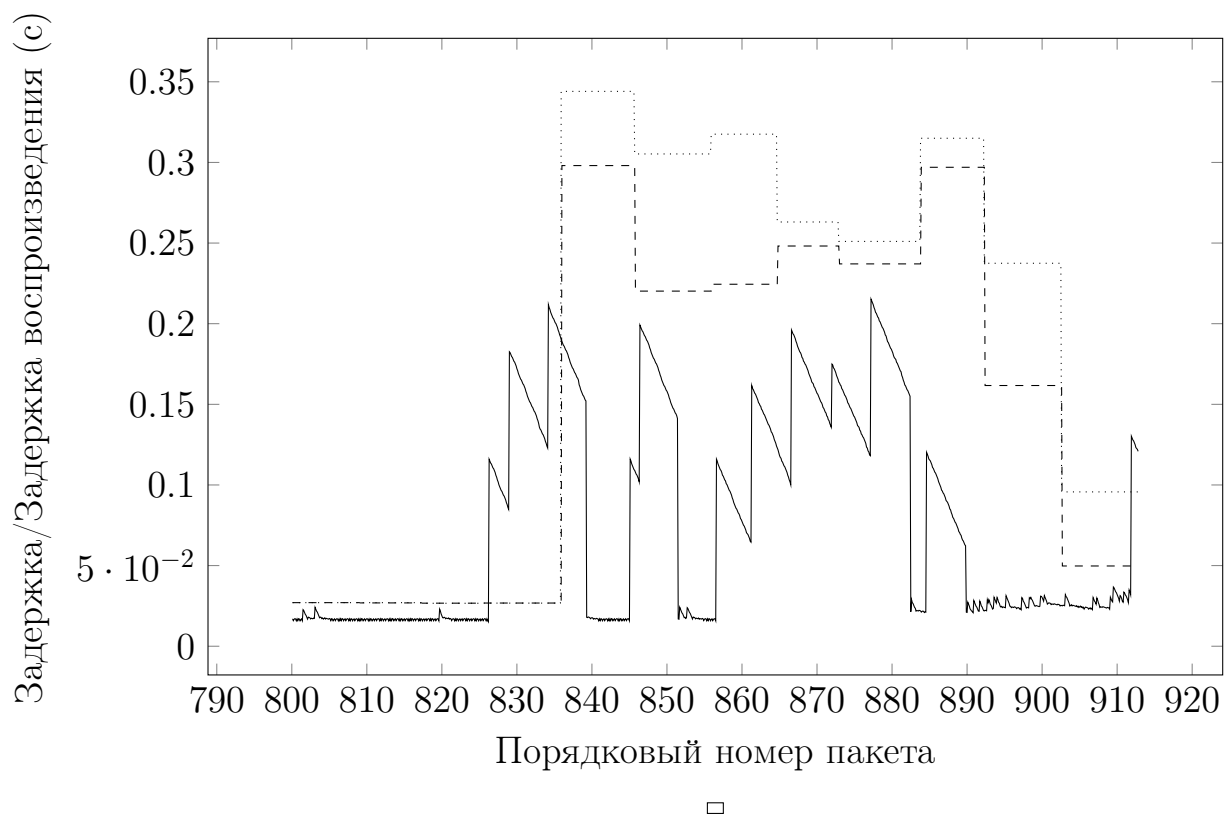


Рис. 5.7. Сравнение предложенного алгоритма с классическим буфером компенсации джиттера в ситуации внутрисистемных помех

5.6. Выводы ко 5 разделу

Проведен сравнительный анализ буфера компенсации джиттера на основе ГРФК (3.39)-(??) с адаптивным буфером компенсации джиттера (1.1)-(1.3) в различных ситуациях, возникающих в проводной и беспроводной сети, рассмотренных в разделе 2, которые вносят джиттер в сетевую задержку. На основании анализа, предложенный алгоритм позволяет уменьшить пакетные потери до 18% и среднюю задержку до 30% во время воздействия всплеска или скачка задержки. Что позволяет увеличить оценку QoS E-модели до 12-ти пунктов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ericsson. Ericsson mobility report June 2013 [Электронный ресурс]. Электронные данные. Режим доступа: <http://www.slideshare.net/Ericsson/ericsson-mobility-report-june-2013>. — Дата доступа: 06.08.2013.
2. П. Роковой А. Способ адаптивного регулирования джиттера буфера в VoIP // Весник НТУУ «КПИ» Информатика, управление и вычислительная техника. 2013. № 55. С. 199–204.
3. Recommendation ITU-T G.114 (05/03). One-way transmission time.
4. Clark Alan. Analysis, measurement and modelling of Jitter // Telchemy Incorporated. 2003.
5. Поповский В. В. Ощепков М. Ю. Кобрин А. В. Алгоритмы предварительной компенсации джиттера при передаче потокового видео в беспроводных сетях // Вестник ДУИКТ. 2012. Т. 10, № 1. С. 11–18.
6. 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.
7. Кобрин А. В. Тур Б. С. Оценка задержки с помощью робастного фильтра Калмана // Весник НТУ «ХПИ». 2013. № 33. С. 108–113.
8. В. Кобрин А. Адаптивный буфер компенсации джиттера задержки прибытия пакетов на основе робастного фильтра Калмана // Проблемы телекоммуникаций. 2013. № 1. С. 72–81. Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2013/1/1/131_kobrin_jitter.pdf. — Дата доступа: 06.08.2013.
9. В. Кобрин А. Синтез алгоритма адаптивного буфера компенсации джиттера задержки прибытия пакетов // Сборник научных работ До-

- НИЖТ. 2013. № 34. С. 38–48.
10. Ericsson. Press backgrounder VoLTE (January, 2013) [Электронный ресурс]. Электронные данные. Режим доступа: http://www.ericsson.com/res/thecompany/docs/corpinfo/volte_backgrounder.pdf. — Дата доступа: 06.08.2013.
 11. Recommendation ITU-T Y.1541 (12/11). Network performance objectives for IP-based services.
 12. Recommendation ITU-T G.1020 (11/03). Performance parameter definitions for quality of speech and other voiceband applications utilizing IP networks.
 13. Sue B. Moon Jim Kurose Don Towsley. Packet audio playout delay adjustment: performance bounds and algorithms // Multimedia Systems. 1998. № 6. С. 17–28.
 14. Ramjee R. Kurose J. Towsley D. Adaptive playout mechanisms for packetized audio applications in wide-area networks // INFOCOM 94. 1994. Т. 2. С. 680–688.
 15. Клёкис Э. А. Сравнительный анализ алгоритмов фильтрации для помех, содержащих выбросы // Труды Академии наук Литовской ССР. Серия Б. 1985. С. 85–91.
 16. Friis H. A Note on a Simple Transmission Formula // Proceedings of the IRE. 1946. Vol. 34. P. 254–256.
 17. 3GPP R1-081483. Conveying MCS and TB size via PDCCH.
 18. 3GPP TS 36.104 V8.0.0. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 8).
 19. Бекер Рэнди. Тестирование LTE-приемника: ключевые факторы ухудшения распространения сигнала // ИКС. 2010. № 01-02. С. 82 –83.

20. Masreliez C. J. Approximate non- Gaussian filtering with linear state and observation relations // IEEE Transactions on Automatic Control. 1975. Vol. 20, no. 1. P. 107–110.
21. Masreliez C. J., Martin R. D. Robust Bayesian Estimation for the Linear Model and Robustifying the Kalman Filter // IEEE Transactions on Automatic Control. 1977. Vol. 22, no. 3. P. 361–371.
22. Ершов А. А., Липцер Р. Ш. Робастный фильтр Калмана в дискретном времени // Автоматика и телемеханика. 1978. № 3. С. 60–69.
23. Ершов А. А. Робастные алгоритмы фильтрации // Автоматика и телемеханика. 1978. № 7. С. 68–73.
24. П. Хьюбер. Робастность в статистике. М.: Мир, 1984. с. 304.
25. И. Тихонов В. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. с. 624.
26. Цыпкин Я. З., Поляк Б. Т. Огрубленный метод максимального правдоподобия // В кн.: Динамика систем. Математические методы теории колебаний. 1977. № 22. С. 22–46.
27. Ruckdeschel P. Optimally Robust Kalman Filtering // Fraunhofer ITWM. 2010.
28. Поповский В. В. Олейник В. Ф. Математические основы управления и адаптации в телекоммуникационных системах. Харьков: СМИТ, 2011. с. 361.
29. Gene Cheung Wai-Tian Tan T. Y. Double feedback streaming agent for real-time delivery of media over 3G wireless networks // IEEE transactions on multimedia. 2004. Vol. 6. P. 304–314.
30. Philip A. Chou Z. M. Rate-distortion optimized streaming of packetized media // IEEE transactions on multimedia. 2006. Vol. 8. P. 390–404.
31. Gene Cheung Wai-Tian Tan T. Y. Real-time video transport optimization using streaming agent over 3G wireless networks // IEEE transactions on multimedia. 2005. Vol. 7. P. 777–785.

32. Сейдж Э. Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976. с. 496.
33. Справочник по теории автоматического управления: под ред. Красовского А. А. М.: Наука, 1982. с. 360.
34. Б. Уидроу. Адаптивные компенсаторы помех. Принципы применения и построения. 1975. С. 69–99.
35. Монзиго Р. А. Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию. М.: Радио и связь, 1986. с. 447.