

Министерство образования и науки Российской Федерации
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова
Кафедра динамики электронных систем

УДК

«УТВЕРЖДАЮ»
Зав. кафедрой д.т.н.
ученая степень
профессор
звание
Ю.А. Брюханов
личная подпись, и.о. фамилия
« » июня 2010 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Анализ качества передачи видео в сетях Wi-Fi
в зависимости от используемого алгоритма
управления очередью пакетов

Руководитель А.Н. Тараканов
личная подпись, и.о. фамилия
« » июня 2010 г.

Студент П.А. Савасин
подпись, и.о. фамилия
« » июня 2010 г.

Ярославль 2010

Реферат

Объем 67 стр., 3 ч., 25 рис., 1 табл., 37 источников.

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ПЕРЕДАЧИ ВИДЕО, WI-FI СЕТЬ, ОЧЕРЕДЬ ПАКЕТОВ, ADAPTIVE RED, DROP TAIL, RIO

Цель работы: Исследовать поведение Wi-Fi сети с видеотрафиком при внедрении различных алгоритмов управления очередью

Полученные результаты:

1. Выявлено, что использование алгоритма Drop Tail приводит к возрастанию сетевой задержки пакета.
2. Наиболее оптимальным для рассматриваемой сети признан алгоритм Adaptive RED, имеющий параметры $\min_{th}=15$ $\max_{th}=45$ $\max_p=0,01$ $\alpha=0,065$ $w_q=0.031$

Полученные результаты позволяют утверждать, что использование алгоритма Adaptive RED дает возможность повысить качество передачи видео, при этом сократив сетевые задержки.

Содержание

Введение	4
1.Классификация и технологии беспроводных сетей	8
1.1. Классификация сетей.....	8
1.2. Стандартизация в области телекоммуникаций.....	13
1.3. Модель взаимодействия открытых систем	19
1.4. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	22
2. Требования мультимедийных приложений к сети и ограничения сетей TCP/IP	33
2.1. Параметры качества обслуживания, влияющие на качество передачи мультимедийной информации.....	35
2.2. Алгоритмы качества обслуживания	37
2.2.1. Дифференцированные и интегрированные службы	37
2.2.2. Random Early Detection.....	39
2.2.3. Adaptive RED	42
3. Исследование модели сети при передаче видео	44
3.1. Описание модели исследуемой сети	44
3.2. Алгоритм Drop Tail.....	47
3.3. Алгоритмы RED	53
3.4. Алгоритм Adaptive RED.....	58
Заключение	64
Литература.....	65

Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Меняются технологии, но суть сетей передачи остаётся прежней — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Особенно бурное развитие беспроводных технологий наблюдается в последние 10-15 лет.[1]

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце 19-ого века. К тому моменту уже окончательно оформились две основные задачи индустрии телекоммуникаций - передача голоса (телефония) и передача данных (телеграф). Проводная связь тогда казалась проще, надежней и более защищенной. Начался век проводных телекоммуникаций. Землю опутали тысячи километров кабелей, а потребление информационных ресурсов все росло.[2]

К концу 20-ого века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в последовательность нулей и единиц. Благодаря цифровой обработке все тесней переплетались, развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, с появлением же пакетной передачи данных они и вовсе слились почти воедино. Появился так же термин «мультимедиа», обозначающий объединение самых разных информационных технологии (голос, аудио\видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи.[3]

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и. т.д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast

Ethernet/ Gigabit Ethernet (100/1000 Мбит/с) изменения коснулись также и глобальных сетей (замена X25 на Frame Relay). Сегодня без них невозможны такие сервисы как электронная почта, факсимильная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, ICQ, дистанционное обучение, видеоконференции и др.[4-5]

В конце 20-ого начале 21-ого веков человечество стало отходить от идеи проводных телекоммуникаций, развитие микроэлектроники позволило создать массовые, дешёвые устройства для беспроводной связи.

Бум сотовой связи, сравнимый пожалуй только с ростом производства ПК, не прекращается уже четверть века: уже сейчас мобильных телефонов в мире в 2 раза больше чем обычных стационарных аппаратов. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных вычислительных сетей, растут и множатся технологии персональных и региональных беспроводных сетей [1].

Бурное развитие беспроводных технологий как во всем мире так и в России продиктовано следующими объективными преимуществами беспроводных решений:

- гибкость архитектуры
- быстрота проектирования и развертывания
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки кабеля[6]

Необходимо отметить, что современные телекоммуникационные технологии бьются не только за объемы и дальность передачи данных, но и за качество передачи и совместимость нескольких типов трафика. Методы обеспечения качества обслуживания (QoS) является сегодня одним из важнейших вопросов сетевых технологий, т.к. без их применения невозможна качественная работа современных мультимедийных приложений, таких как IP-телефония, видео- и радиовещание. Эти методы

оперируют параметрами, характеризующими скорость передачи данных, задержку пакетов и потерю пакетов. Методы обеспечения качества обслуживания фокусируют внимание на влиянии очередей в коммуникационных устройствах на передачу трафика. В них используются различные алгоритмы управления очередями, резервирования и обратной связи, позволяющие снизить негативное влияние очередей до приемлемого для пользователей уровня. [7-8]

Очереди являются неотъемлемым атрибутом сетей с коммутацией пакетов. Сам принцип работы таких сетей подразумевает наличие буфера у каждого входного и выходного интерфейсов коммутатора пакетов. Буферизация пакетов во время перегрузок представляет собой основной механизм поддержания трафика, обеспечивающий высокую производительность сетей этого типа. С другой стороны, очереди означают неопределенную задержку при передаче пакетов через сеть, а это главный источник проблем для чувствительного к задержкам трафика. Так как сегодня операторы пакетных сетей очень заинтересованы в передаче мультимедийного трафика, им необходимы средства обеспечения компромисса между стремлением предельно загрузить свою сеть и выполнением требований QoS одновременно для всех типов трафика. [9]

В методах обеспечения качества обслуживания используются различные механизмы, направленные на уменьшение негативных последствий пребывания пакетов в очередях с сохранением в то же время положительной роли очередей. Набор механизмов достаточно широк. [10]

Для обеспечения необходимых требований к различным потокам данных используются два метода QoS: управление перегрузкой (congestion management) и предотвращение перегрузок (congestion avoidance). Первый метод основан на присвоении квот и приоритетов потокам, и в случае перегрузки, потоки получают качество, ограниченное их квотой и приоритетом (например, WFQ- Weighted Fair Queuing). Второй метод ограничивает размер очереди (например, RED - Random early detection). [11-

12]

В данной работе будут рассмотрены алгоритмы предотвращения перегрузок и их влияние на передачу видео-трафика.

Цель работы: Исследовать поведение Wi-Fi сети с видеотрафиком при внедрении различных алгоритмов управления очередью.

- Drop Tail
- Random Early Detection In/Out Coupled (RIO-C)
- Random Early Detection In/Out De-coupled (RIO-D)
- Adaptive Random Early Detection (Adaptive RED)

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Рассмотреть требования к сети со стороны мультимедийного трафика и ограничения TCP/IP сетей.

2. Провести моделирование передачи по Wi-Fi сети видео и web-трафика, с использованием алгоритмов управления очередью пакетов Drop Tail, RIO-C, RIO-D, Adaptive RED, работающих на маршрутизаторе.

3. Проанализировать влияние этих технологии на качество передачи видео. Оценить размер очереди, общую задержку в сети, PSNR (ПОСШ) полученного видео.

4. Оценить влияние параметров алгоритма Adaptive RED на задержки в сети, а так же качество передачи видео, основываясь на критерии PSNR (ПОСШ).

1. Классификация и технологии беспроводных сетей

1.1. Классификация сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критериев классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по мере развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализацией абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных[1].

Вполне справедливы и симптом градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Практически все рассматриваемые нами технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» объясняется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто

определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. Обычно полагают, что если ширина спектральной полосы, в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы, то система узкополосная. В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. Например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т.е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты. В нашем случае под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства, связанные с широкой рабочей полосой. Поэтому точный критерий не существует, да и невозможен [3].

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история

появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи. Технологически его никак нельзя «зафиксировать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропадающим связи и т. п. [2].

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN - wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10-15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1 - 10 мВт. Локальные сети (WLAN wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстоянии до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11 [2].

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транковые системы. Недавно появилось семейство стандартов на широкополосные беспроводные сети городского масштаба

IEEE 802.16. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеоинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, и проводной телефонии) давно продемонстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный вопрос. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхосигнале, который при таких задержках устранить нереально. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их

последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеоинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером является появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета)[4].

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

1.2. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготовителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной [4].

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный телекоммуникационный союз (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вобрали в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radio communication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного телекоммуникационного союза ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии

(ССГТТ — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые - «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ИТУ исследовательский сектор ИТУ-D, был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau - TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ИТУ играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ИТУ появилась 140 лет назад, 17 мая 1865г., в Париже, когда представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз – International Telegraph Union (ITU) Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи. С 1885 г. ИТУ занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ИТУ в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием[13].

К середине 20-х годов были основаны международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee - CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ИТУ обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ИТУ получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию ССИТТ. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших в практике реорганизаций, в результате чего ИТУ обрел свой современный вид. Отметим,

что современная структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций: тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова isos (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC - International Electro technical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association) в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT - Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы различные промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешении конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарт создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в

развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Североамериканскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформились в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др[5].

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт в сотрудничестве с отраслевыми институтами - ЦНИИС, ЛОНИИС и др. К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается

оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7163-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700-1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

1.3. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с ССИТТ в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС[10].

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи. Физический уровень предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т.д.[4].

Сетевой уровень (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками,

адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным[4].

Транспортный уровень (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы, На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологии. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных[4].

Основное назначение сеансового уровня (Session) организация, поддержание и окончание сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления (Presentation). Цель уровни представления — преобразование данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд. Прикладной уровень (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно и вычислительной машине.[5].

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую

границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу [2].

1.4. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

Множественный доступ с пространственным разделением основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести

передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно скудных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства[2].

Более гибким является множественный доступ с временным разделением (Time Division Multiplexing TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи[2].

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично переопределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях – даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных.

Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов E1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в

поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки \times 8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных - $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$ (т.е. 2048000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце[2].

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения. Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с кодовым разделением (Code Division Multiplexing CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (CDMA2000, WCDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами[2].

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11,

16, 32,64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный [1].

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать — он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами сигналов (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют методом расширения спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum) [14].

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т. е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum и THSS Time Hopping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне F одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей F . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одновременной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и

применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.[1]

Если метод частотных скачков представляет из себя метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т.е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на N субпоток, где N — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения[2].

До недавнего времени распространение технологии OFDM одерживала сложность его аппаратной реализации. Однако сегодня, с развитием полупроводниковой технологии, это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 a/g и DVB, а также является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004[2].

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM[15].

Рассмотренные выше механизмы это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это фиксированное распределение временных интервалов между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или классическая схема Aloha. В ней при передаче данных мобильным устройством не используется какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 70-х годах в Гавайском университете и применялась в

сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18% загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился метод множественного доступа с детектированием несущей (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т.е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В P-настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью P. Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью $1 - p$, т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В i-настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать

данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается[4].

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ИВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 используется схожая схема - бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY - NPMA)[4].

Схема с цифровым детектированием (DSMA - Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посылает пакет с подтверждением о получении пакета данных[4].

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого

производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является схема множественного доступа с распределением по запросу (Demand Assigned Multiple Access DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удастся зарезервировать каналный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посылает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно. Схема TDMA с резервированием отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на N интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют N интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервировавшей канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут

пересылать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа без гарантии доставки пакетов.

Схема с резервированием пакетов (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассылает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом он не зарезервировал временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение и питый Интерпол. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

2. Требования мультимедийных приложений к сети и ограничения сетей TCP/IP

Доставка мультимедийного трафика предъявляет жёсткие требования к производительности сетей, отличные от тех, которые накладываются для передачи текста и изображений.

- **Задержки.** Пользователи интернета испытывают задержку при загрузке текста и изображений. Эти задержки не оказывают влияния на качество содержания после его полного получения. Для мультимедийных приложений ситуация иная. После начала воспроизведения аудио – или видеопотока последующие кадры должны поступать своевременно. В противном случае приложение должно компенсировать отсутствие данных. Например, приложение может сделать паузу. Из-за этого возникает прерывистое изображение или звук.

- **Потери.** Многие мультимедийные приложения могут примириться с небольшими потерями данных. Например, видеоплеер может восстановить отсутствующую часть кадров на основе ближайших кадров. Однако, поскольку потери и задержки снижают качество информации, многие приложения имеют ограниченную поддержку для восстановления утерянных пакетов.

- **Высокая пропускная способность.** Передача потоков аудио и видео требует достаточно высокой пропускной способности. Например, несжатое голосовое сообщение требует скорости 64 Кбит/с. Эффективная техника сжатия позволяет уменьшить это требование до 9-10 Кбит/с. Требование к пропускной способности для видео потоков сильно варьируется в зависимости от качества, частоты кадров, размера изображения.[8]

Изначально сети TCP/IP разрабатывались и использовались для передачи текстов с небольшим количеством изображений. Эти сети обеспечивают оптимальный и надёжный транспорт, который хорошо

подходят для большинства приложений Интернета (WEB, FTP, электронная почта), однако они имеют некоторые ограничения, критичные для мультимедийных приложений:

- Качество сервиса. IP предоставляет оптимальный сервис без установления соединения, который допускает не только потерю пакетов, но и доставку их не в правильном порядке.
- Повторная передача данных. Передача информации с использованием протокола TCP предполагает повторную передачу потерянных сегментов сообщений, т.е. сообщения доставляются надёжным способом. Надёжная доставка не является главной целью мультимедийных приложений, поскольку повторная передача утерянного сегмента может вызвать слишком большую задержку при воспроизведении.[7]

2.1. Параметры качества обслуживания, влияющие на качество передачи мультимедийной информации

Чтобы правильно спроектировать сеть передачи трафика реального времени, необходимо учитывать недостатки основных средств межсетевого взаимодействия, которые влияют на качество передачи мультимедийной информации.

Задержки.

Задержка – это период времени, за которое пакет проделывает путь от источника до получателя. Принято выделять причин задержек: задержки на распространение, задержки на сериализацию, задержки на обработку и задержки очереди. Задержка на распространение вызвана длиной пути, который должен пройти сигнал. Для оптоволоконной сети, охватывающей 20 000 км, односторонняя задержка составляет 70 миллисекунд. Появление задержки на обработку обуславливают устройства, которые передают кадры по сети. Задержки на сериализацию – это период времени, в течение которого бит перемещается в интерфейс. Эти задержки влияют на общую задержку незначительно. Задержки очереди происходят в результате удерживания пакетов в очереди из-за перегрузки исходящего интерфейса. Это происходит, когда принято больше пакетов, чем интерфейс может обработать за данный интервал.

Рекомендация сектора стандартизации при Международном телекоммуникационном союзе (ITU-T) гласит, что для хорошего качества передачи мультимедийной информации значение односторонней сквозной задержки не должно превышать 150 мс. [9]

Джиттер

Другой способ задержки очереди – это джиттер. Джиттер – это неравномерность задержек на доставку пакетов. Отправитель ожидает, что пакеты будут доставляться с одинаковыми интервалами. Но эти пакеты

могут задержаться в сети и не достичь адресата за этот период. Разница во времени между тем, когда ожидалось получение пакета и временем фактического получения, называется джиттер. Как видно на рис. 1, время отправления и получения пакетов А и В. Однако пакет С. Столкнулся с задержкой, поэтому получен позже ожидаемого момента. Вот почему буфер компенсации джиттера, который сглаживает неравномерность задержек пакетов, просто необходим. Он задерживает поступающие пакеты, чтобы передавать их приложению с заданным интервалом. Кроме того, он также фиксирует ошибки, контролируя номер последовательности в полях сообщений протокола RTP. [9]

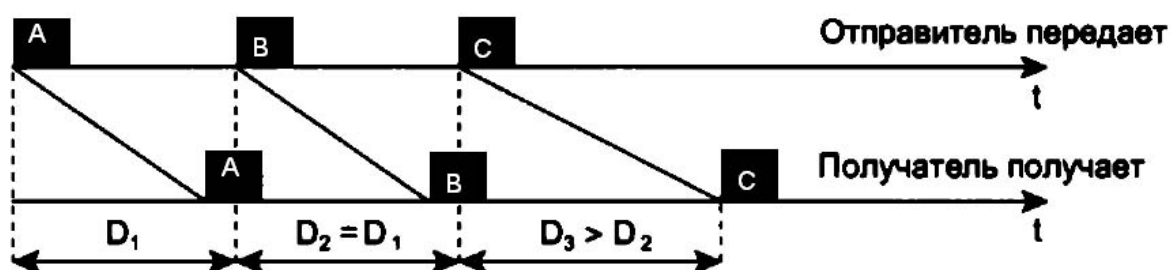


Рис.1. Задержка пакетов в сети

Чем больше неравномерность задержек, тем больше должен быть буфер компенсации джиттера. Использование статического буфера – не самый лучший вариант. Он может оказаться или слишком большим или слишком маленьким. Это может приводить к ухудшению качества информации из-за потери пакетов при маленьком буфере или из-за чрезмерной задержки при слишком большом буфере. Иногда лучше просто удалять некоторые пакеты, имея буфер ограниченного объёма, чем создавать дополнительные задержки в буфере компенсации джиттера. Адаптация установления размеров буфера может эффективно компенсировать задержки. Динамический буфер компенсации джиттера увеличивается или уменьшается в зависимости то вариации задержек последних пакетов. Для определения уровня джиттера используются временные метки в заголовке протокола RTP.[3]

Для решения этих проблем необходимо использовать QoS.

2.2. Алгоритмы качества обслуживания

2.2.1. Дифференцированные и интегрированные службы

Принято разделять качество обслуживания на интегрированные и дифференцированные службы. Дифференцированные службы обычно используются в больших сетях. В основе их работы – установка соответствующего уровня QoS для определённой части трафика. Это осуществляется за счёт установки поля «тип обслуживания» в заголовке IP пакета. Интегральные службы используются, когда ещё до отправления необходимо удостовериться в том, что определённый тип трафика будет поставлен с соответствующим уровнем QoS. Для этого используется резервирование ресурсов. [7] У интегральных служб есть недостаток. Им требуется предварительная договорённость между устройствами сети при установке канала для каждого потока. Это организовать сложно в большой сети и при наличии большого числа потоков. [8] В то же время, дифференциальные службы можно организовать локально на каждом устройстве, без предварительной настройки всех узлов вдоль маршрута. [9]

Хотя эти два механизма существенно отличаются, основная их цель – обеспечение необходимой пропускной способности и задержки для определённого приложения. В данной работе рассматриваются дифференциальные службы [7].

К основным задачам качества обслуживания можно отнести:

- Маркировка пакетов. Функция маркировки пакетов используется узлами сети для назначения приоритета обслуживания трафика путём установки соответствующего значения в поле QoS в заголовке IP-пакета.
- Распределение ресурсов. Распределение ресурсов предполагает способность дифференцировать и определять требования к обработке различных пакетов. В соответствии с этими требованиями алгоритм обслуживания должен планировать порядок передачи пакетов,

поставленных в очередь. Здесь можно выделить следующие технологии: FIFO (First-in-First-out), WFQ(Weighted Fair Queuing)

- Предотвращение перегрузки и отбрасывания пакетов. Это предполагает использование активного алгоритма управления размерами очереди, позволяющего предвидеть перегрузки очереди ещё до её переполнения. [7]

2.2.2. Random Early Detection

Алгоритм произвольного раннего обнаружения (Random Early Detection — RED) представляет собой алгоритм предотвращения перегрузки, предложенный Салли Флойдом (Sally Floyd) и Ваном Якобсоном (Van Jacobson) [16-18]

Случайное раннее обнаружение (RED) представляет собой упреждающее отбрасывание пакетов. При этом подходе в целях повышения производительности сети узел отбрасывает несколько входящих пакетов прежде, чем очередь полностью переполнится. Основная цель этого алгоритма – предупреждение перегрузки. RED предназначен не для реагирования на возникновение перегрузки, а для её предотвращения. Принцип работы алгоритма представлен на рис.2 [19]



Рис. 2. Схема работы алгоритма RED

Основные параметры алгоритма являются: пределы изменения средней длины очереди (min_{th} , max_{th}), максимальная вероятность отбрасывания (max_p), весовой коэффициент средней очереди (w_q)

Как уже упоминалось ранее, механизм RED использует превентивный подход к предотвращению перегрузки сети. Вместо ожидания фактического переполнения очереди, RED начинает отбрасывать пакеты с ненулевой вероятностью, когда средний размер очереди превысит определенное минимальное пороговое значение. Эта вероятность определяется формулой (1) [20]

$$P = P_{\max} \frac{avg - min_{th}}{max_{th} - min_{th}} \quad (1)$$

Таким образом, вероятность отбрасывания пакетов будет линейно расти от 0 при min_{th} до определённого значения P_{\max} при max_{th} , как это показано на рис. 3

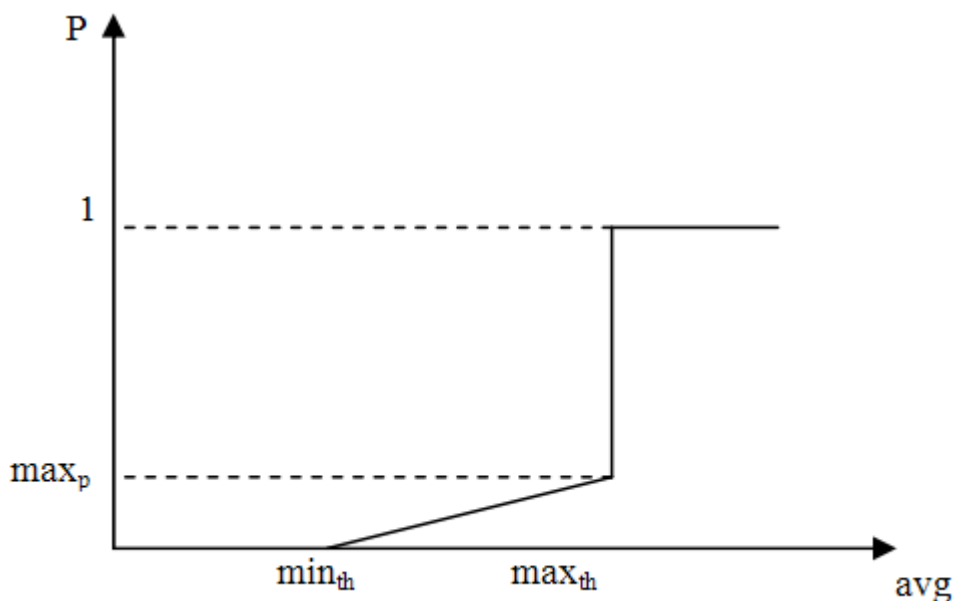


Рис. 3. Зависимость вероятности отбрасывания пакета от среднего размера очереди

Следовательно, средний размер очереди строго ограничен максимальным пороговым значением, поскольку в этом случае вероятность отбрасывания пакетов достигает своего наибольшего значения. Другими словами, главная цель механизма произвольного раннего обнаружения (RED) заключается в минимизации среднего размера очереди. [8]

При определении вероятности отбрасывания пакетов механизм RED вычисляет не текущий, а экспоненциально взвешенный средний размер очереди. Текущий средний размер очереди определяется на основании предыдущего среднего и текущего действительного размера. Использование механизмом RED среднего размера очереди обусловлено стремлением реагировать только на продолжительную перегрузку сети и "не замечать" моментальных всплесков трафика. Средний размер очереди вычисляется по формуле (2) [21]

$$avg = (1 - w_q)avg + w_q \cdot q \quad (2)$$

где q – текущий размер очереди.

Sally Floyd и Van Jacobson [27] предложили использовать соотношение (3) для определения w_q

$$w_q = 1 - e^{1/C} \quad (3)$$

где C – пропускная способность канала [пакет/сек]

Как будет показано в результате моделирования, алгоритм RED отбрасывает намного меньшее число пакетов, чем алгоритм Drop Tail, однако он не обеспечивает выигрыш в задержке. Для решения этой проблемы можно рассмотреть следующий алгоритм, который называется Adaptive RED (ARED)

2.2.3. Adaptive RED

Wu-chang Feng [22-23] показал, что одним из главных недостатков RED то, что средний размер очереди находится в зависимости от установленных параметров. Алгоритм может оказаться либо агрессивным, либо консервативным. Для решения этой проблемы он предложил алгоритм ARED. Главное его отличие от алгоритма RED – изменение максимальной вероятности отбрасывания в зависимости от изменения средней длины очереди. Принцип работы алгоритма представлен на рис.4 [24]

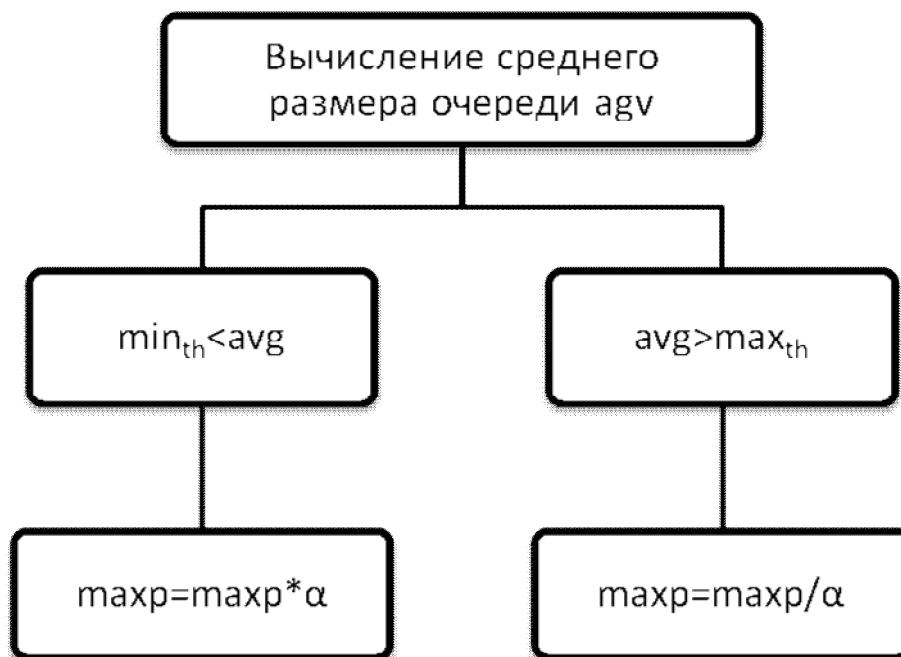


Рис. 4. Принцип работы алгоритма Adaptive RED

Дополнительным параметром, используемым в этом алгоритме является параметр α ($\alpha < 1$). С помощью этого параметра можно контролировать максимальную вероятность отбрасывания. Это позволит более жёстко контролировать размер очереди.

Несмотря на объём публикаций по теме предотвращения перегрузок

[25-33], остается проблема выбора настроек параметров для этих алгоритмов. Многие исследователи согласны с тем, что влияние алгоритма на качество передачи потоков сильно зависит от правильного задания его параметров, но до сих пор нет вразумительной инструкции, как на практике выбирать значения этих параметров. В данной работе с помощью моделирования в NS-2 [34] оценивается влияние параметров этих алгоритмов на качество передачи.

3. Исследование модели сети при передаче видео

3.1. Описание модели исследуемой сети.

В проводимом исследовании имитируется работа сети на 50 компьютеров, выполненной по топологии, представленной на рис. 5.

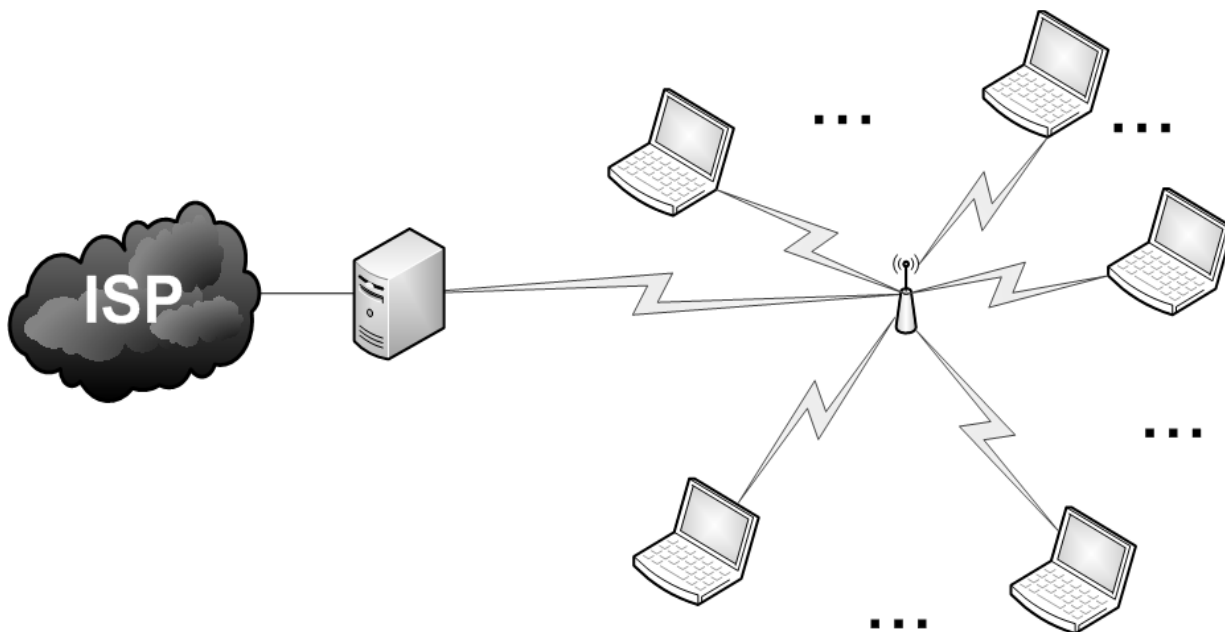


Рис. 5. Топология исследуемой сети

Данная топология является моделью сети интернет кафе, в которой 50 посетителей пользуются услугами интернета и IP-телевидения. Поставщиком услуг является ISP, он предоставляет выход в Интернет и подключение к видео-сервисам. ISP соединён с беспроводным WiFi маршрутизатором каналом в 100Мбит\с. Каждый пользователь подключается к маршрутизатору по беспроводному каналу с пропускной способностью 54Мбит\с. На маршрутизаторе возможно функционирование различных алгоритмов управления очередью фреймов.

В ходе исследования к каждому пользователю передается один из трех видов трафика. Время моделирования составляет 10 секунд. Параметры потоков представлены в таблице 1.

Таблица 1
 Параметры передаваемых видеопотоков

Название потока	Прямая скорость потока	Обратная скорость потока	Размер пакета
Видеотрафик	2.5 Мбит/с	-	1028 байт
Web-трафик	768 кбит/с	48 кбит/с	1024 байт
FTP-трафик	1 Мбит/с	1 Мбит/с	1024 байт

Передаваемое видео сжато с использованием XVID видеокодека.[35] Видео фрагмент един для всех частей исследования, это стандартное видео «Foreman», выбранное из-за наличия большой динамической части изображения. Данный выбор сделан не случайно, т.к. потери видео пакетов сказываются в большей степени именно на таком типе видео. Размер видеокадра 352 x 288 пикселей, частота – 30 кадров\с.

В ходе работы рассматривается зависимость качества переданного видео, от различных алгоритмов управления очередью фреймов на маршрутизаторе. В данной работе для оценки качества полученного видео используется одна из наиболее популярных метрик для оценки качества передаваемого видео – PSNR (Peak Signal to Noise Ratio – Пиковое соотношение сигнал/шум), определяемого по формуле (4) [36]. PSNR измеряется с помощью логарифмической шкалы и вычисляется по среднеквадратичной ошибке MSE (mean squared error) между исходным видеокадром и полученным видеокадром относительно числа $(2^k - 1)^2$ (квадрата наибольшего возможного значения пикселя, где k – битовая глубина цвета):

$$PSNR = 20 \log_{10} \frac{2^k - 1}{MSE} \text{ (dB)} \quad (4)$$

Высокое значение PSNR (на практике более 30 дБ) означает определенную схожесть полученного и исходного кадра. Большим минусом использования PSNR в системах цифровой обработки изображений является

то, что данная величина не имеет абсолютного значения. Бессмысленно говорить о том, что если критерий PSNR равен, например, 25 дБ, то это хорошо. Величина PSNR используется обычно только для сравнения различных алгоритмов обработки или для изучения влияния параметров на эффективность того или иного алгоритма. Следует иметь в виду, что критерий PSNR характеризует «среднее» качество изображения в целом, а на различных его фрагментах ошибки, в принципе, могут различаться. Величину PSNR можно легко и быстро вычислить, поэтому оно так популярно при оценивании качества видео. [36-37]

Для наблюдения за работой сети отслеживается её загрузка и время задержки пакетов, в зависимости от времени. Для оценки эффективности работу алгоритма управления очередью рассматривается зависимость количества пакетов в очереди от времени.

В работе рассматриваются следующие алгоритмы управления очередью:

- Drop Tail
- RED
- RIO-C
- RIO-D
- Adaptive RED

3.2. Алгоритм Drop Tail

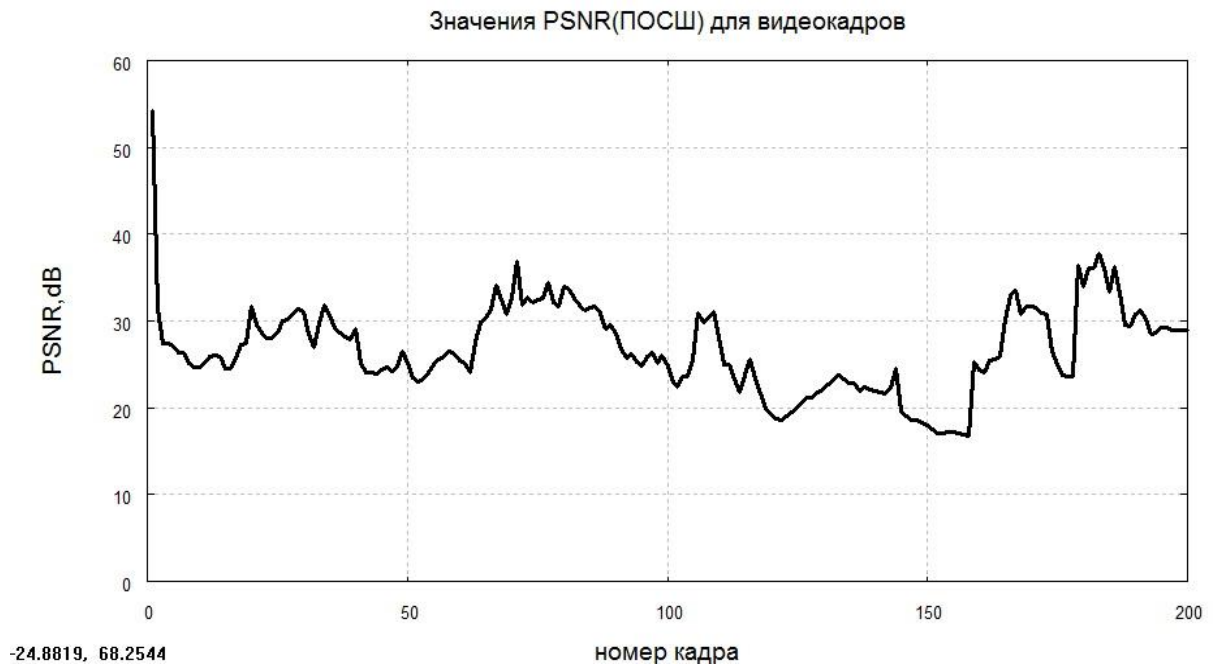


Рис. 6. Зависимости пикового отношения сигнал/шум от номера кадра для тестового видеофрагмента при использовании алгоритма Drop Tail

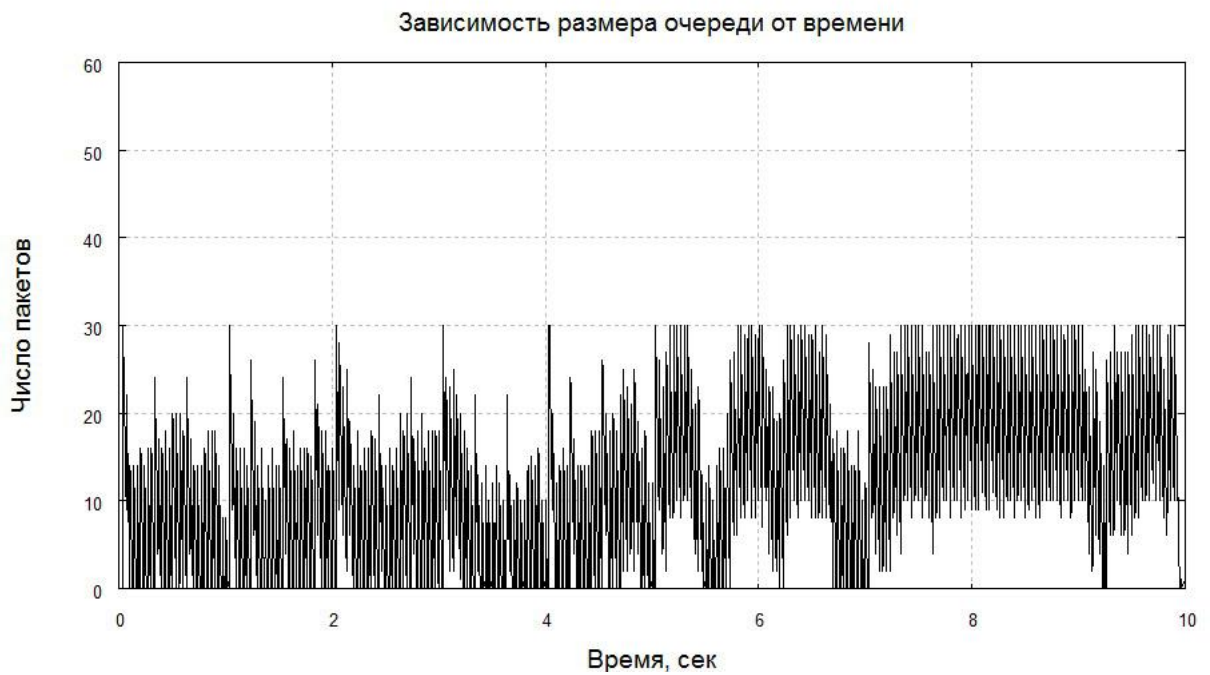


Рис. 7. Зависимость размера очереди на маршрутизаторе от времени, при использовании алгоритма Drop Tail

На рис. 6 и рис. 7 представлены графики PSNR для видеокадров и размера очереди в зависимости от времени. Для этого случая максимальный размер очереди был установлен в 30 пакетов. Когда очередь заполняется до заданного максимального размера, все вновь поступающие пакеты отбрасываются, пока очередь не будет иметь место, достаточное для поступления входящего трафика. Мы можем наблюдать, что наибольшее число таких переполнений сосредоточено на интервале 5-10 сек. Это объясняется тем, что динамичность картинки в данные моменты больше.

График PSNR дает нам представление о качестве принятого видео. Наибольшая часть кадров находится на уровне ниже 30Дб, провалы на графике четко соотносятся с временем переполнения очереди. Среднее значение составило 30,41 Дб. Однако даже при отсутствии переполнения качество видео низкое. Это можно объяснить потерей пакетов, и как следствие – отставанием изменения динамической части изображения от оригинала.

Для улучшения ситуации пойдем по пути увеличения максимального размера очереди.

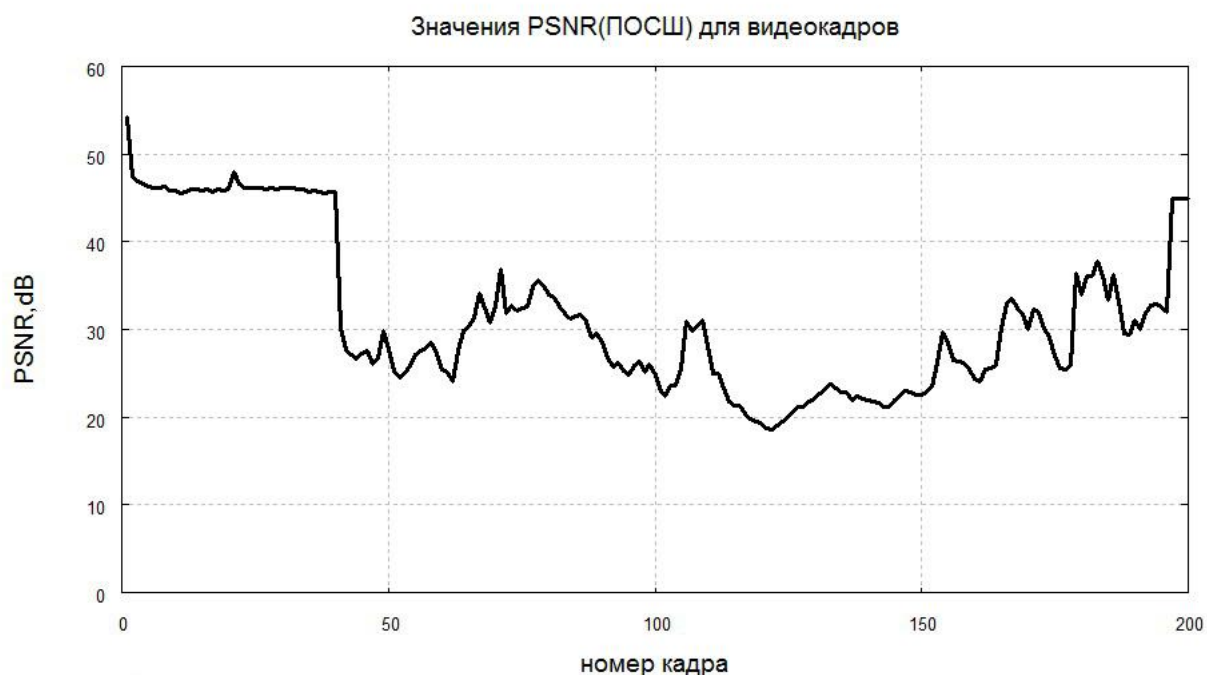


Рис. 8. Зависимости пикового отношения сигнал/шум от номера кадра для тестового видеофрагмента при использовании алгоритма Drop Tail

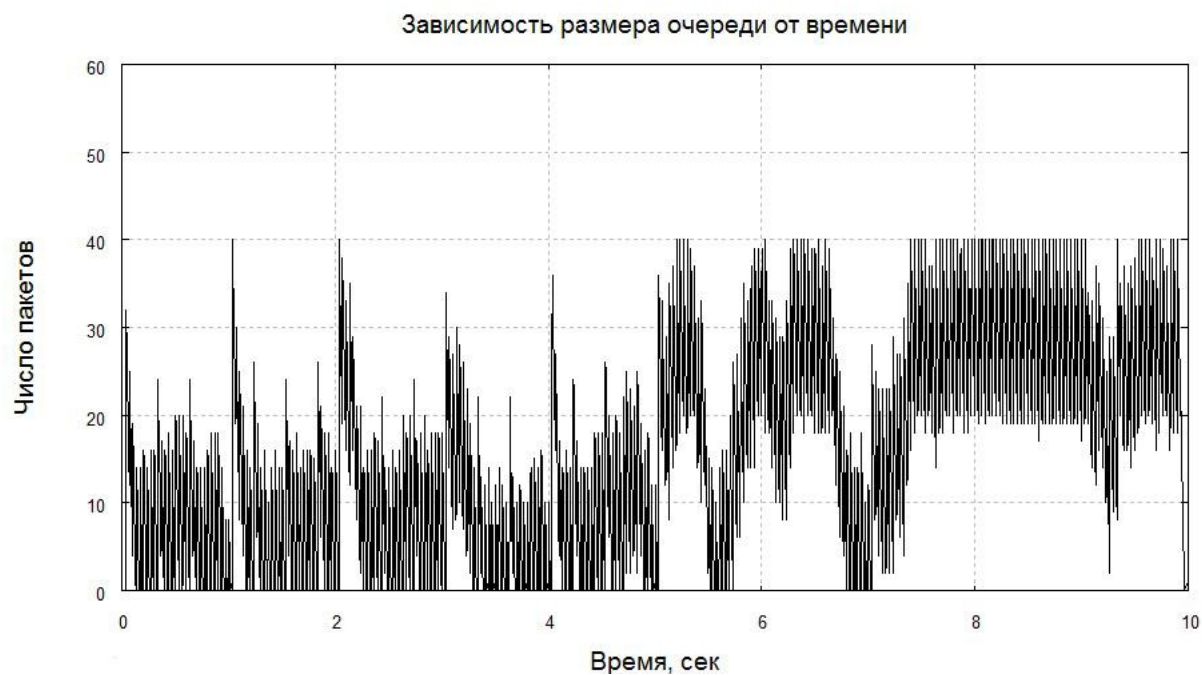


Рис. 9. Зависимость размера очереди на маршрутизаторе от времени, при использовании алгоритма Drop Tail

Следующие графики приведены для очереди в максимум 40 пакетов. Данное ограничение по-прежнему недостаточно. Большая часть видео принята в низком качестве, в тоже время снизилось число приближений размера очереди к максимальному. Снижение качества видео в те моменты, когда очередь не переполнена вызвано особенностью кодирования. Большая часть отправляемой информации не содержит непосредственно кодированную картинку, а несет в себе лишь вектора смещения. При потере этих данных искажения будут отражаться на динамической части изображения. Потеря же пакетов, несущих информацию о всем изображении более критична. Этим и вызван резкий провал на графике PSNR.

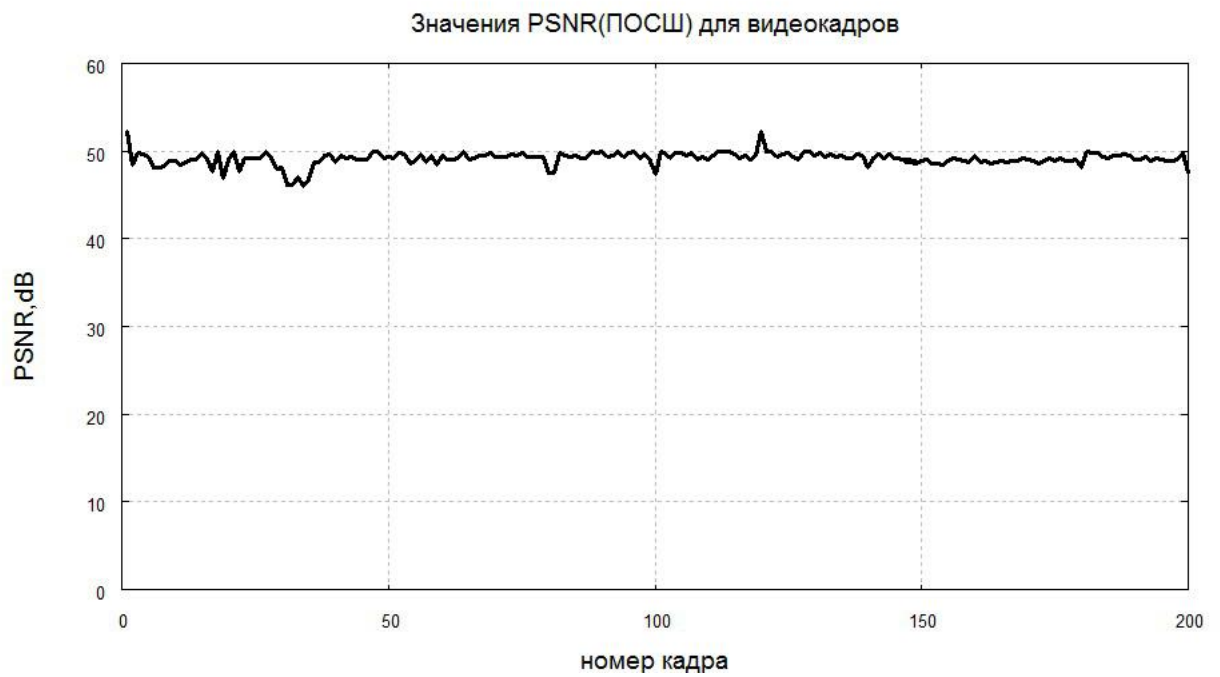


Рис. 10. Зависимости пикового отношения сигнал/шум от номера кадра для тестового видеофрагмента при использовании алгоритма Drop Tail

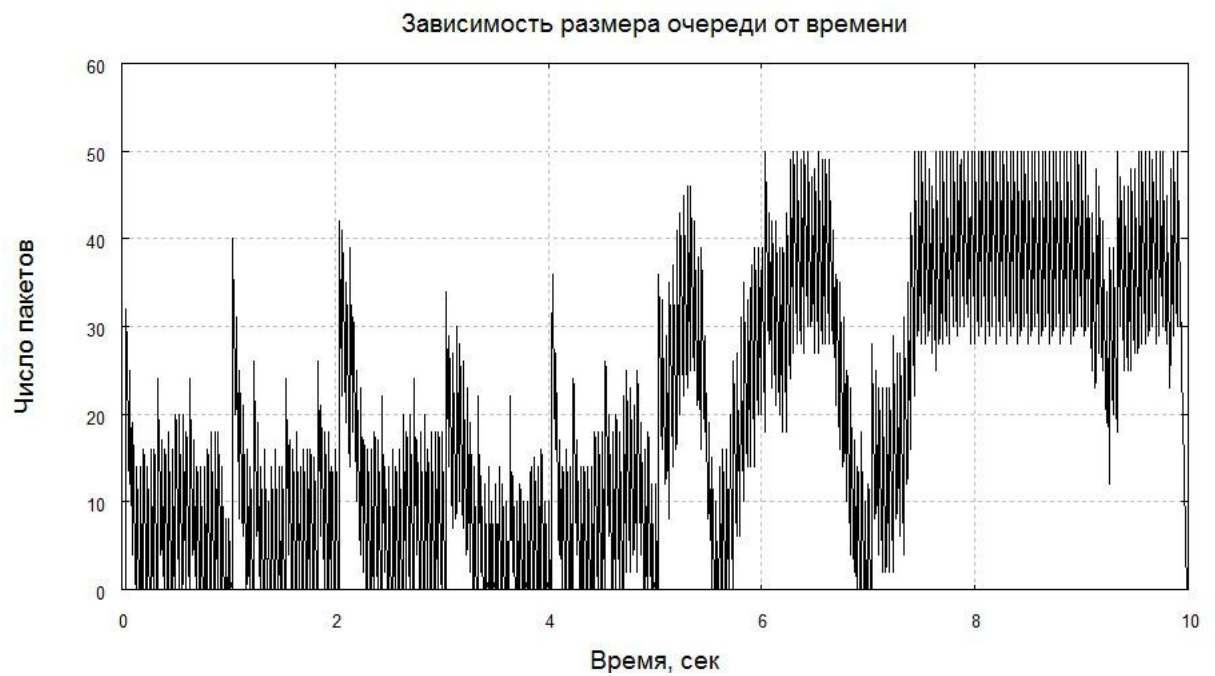


Рис. 11. Зависимость размера очереди на маршрутизаторе от времени, при использовании алгоритма Drop Tail

Данные графики визуализируют работу сети и качество передачи видео для случая установки максимального размера очереди равным 50 пакетам. Среднее значение PSNR составило 49,56 дБ. На графике размера очереди по прежнему есть интервалы, на которых очередь максимальна. Из-за того, что алгоритм сигнализирует только о том, что очередь переполнена, очереди могут оказаться заполненными в течение достаточно длительного времени. Из-за большого размера очередей увеличивается время доставки сетевого пакета от одной рабочей станции до другой. График задержки пакета в очереди представлен на рис. 12. Мы можем заметить что одновременно с переполнением очереди происходит увеличение задержки, и она продолжает расти, т.к. маршрутизатор не выходит из режима переполнения буфера очереди. В итоге получается, что Drop Tail нерационально использует пространство памяти маршрутизатора. Как будет показано далее, решить сложившуюся проблему возможно внедрением алгоритмов RED на маршрутизаторе.

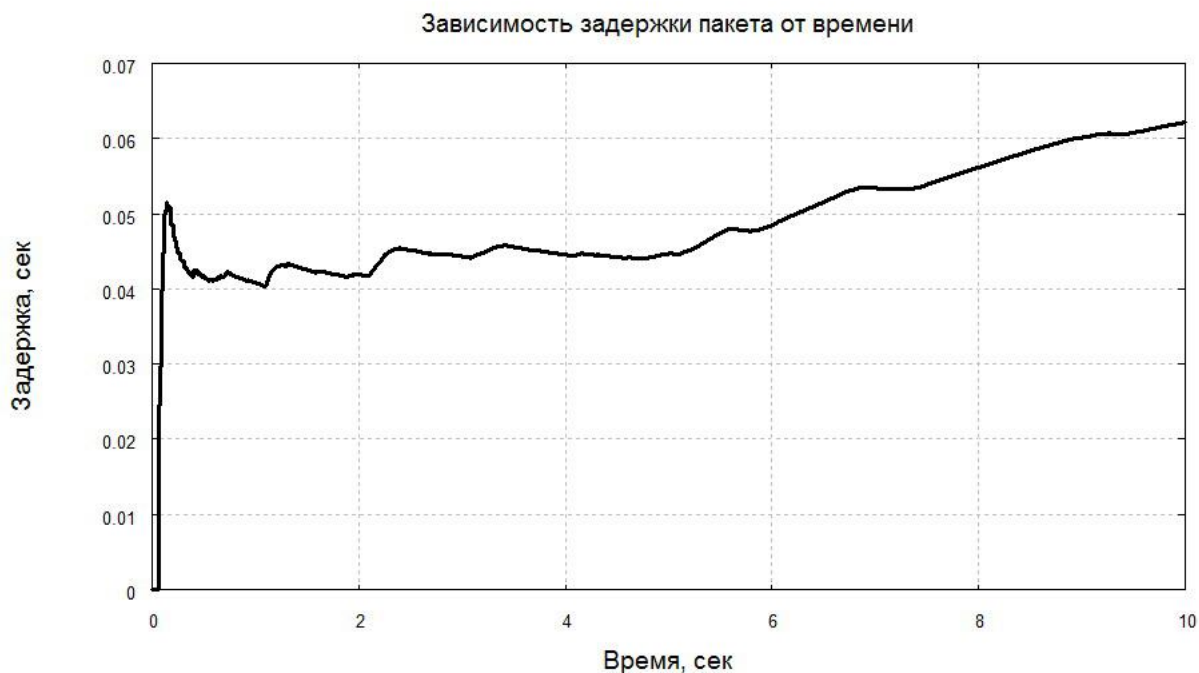


Рис. 12. Зависимость задержки пакета в сети от времени, при использовании алгоритма DropTail

3.3. Алгоритмы RED

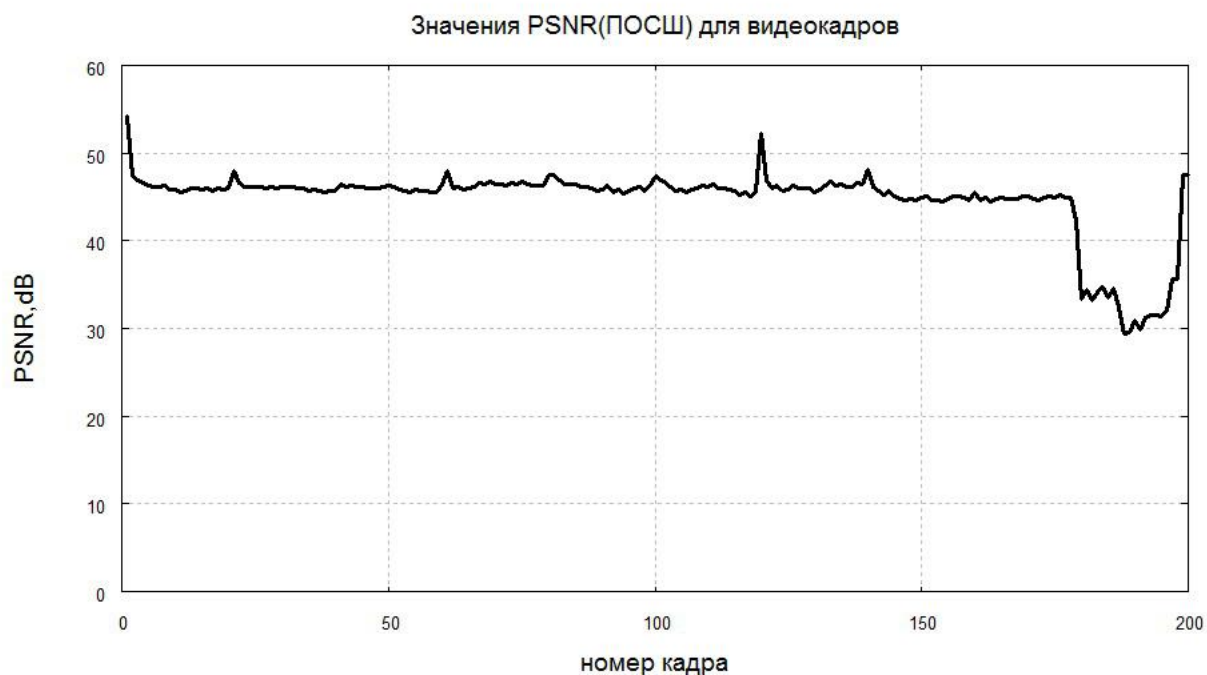


Рис. 13. Зависимости пикового отношения сигнал/шум от номера кадра для тестового видефрагмента при использовании алгоритма RIO-C

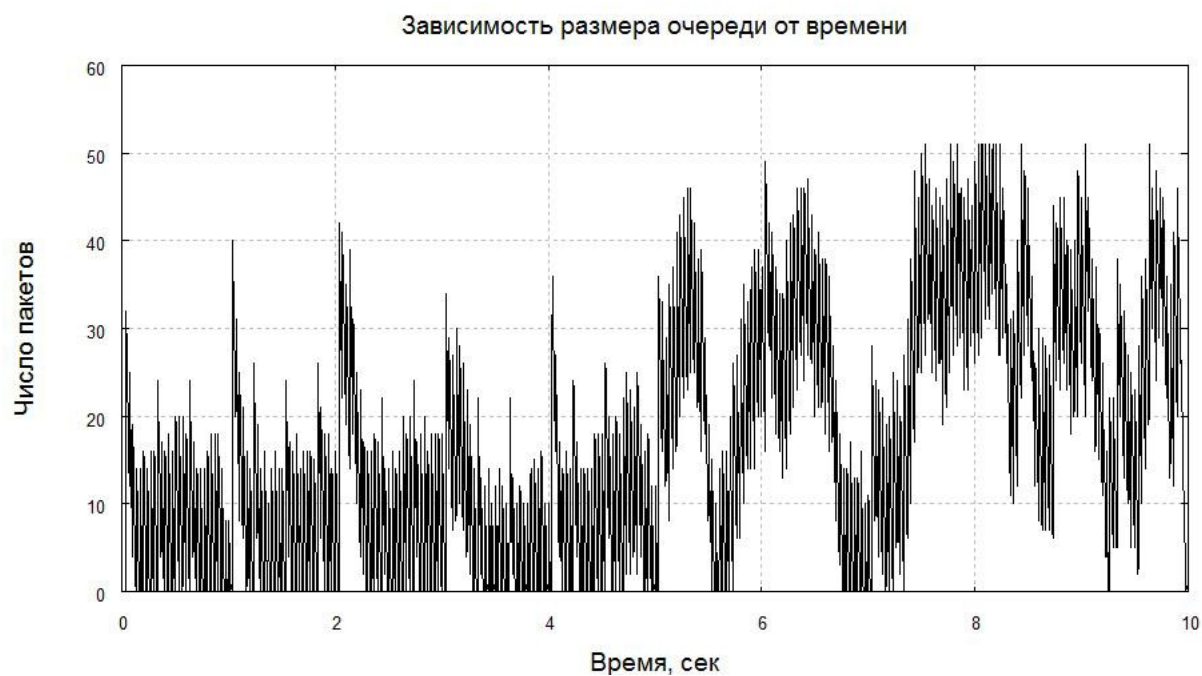


Рис. 14. Зависимость размера очереди на маршрутизаторе от времени, при использовании алгоритма RIO-C

Вторым исследуемым алгоритмом управления очередью является Random Early Detection (RED). Данный алгоритм имеет несколько модификаций, рассмотрим первую из них - RED In/Out Coupled (RIO-C), графики представлены на рис 13 - 14. Основываясь на проведенном ранее изучении алгоритма Drop Tail, для очереди были выбраны следующие параметры: количество виртуальных очередей – 2, минимальный размер – 10 пакетов, максимальный – 30 пакетов, $\max_p = 0.10$.

На графике размера буфера очереди можно заметить, как алгоритм разгружает память маршрутизатора. Алгоритм принимает решение отбросить пакет или нет, основываясь на статистике. Существует вероятность отбросить пакет, максимальное значение которой задает пользователь и оно должно находиться в интервале $[0.10; 0.50]$. Постоянно отслеживается размер очереди, при его увеличении возрастает вероятность потери пакетов, причем это распространяется как на вновь приходящиеся, так и на находящиеся в очереди пакеты. По сравнению с Drop Tail мы уже не наблюдаем таких длительных перегрузок маршрутизатора. Отбрасывание пакетов не может не сказаться на качестве видео, в конечном итоге качество видео ухудшается до 30 Дб, тем не менее среднее значение PSNR составило 45,27 Дб.

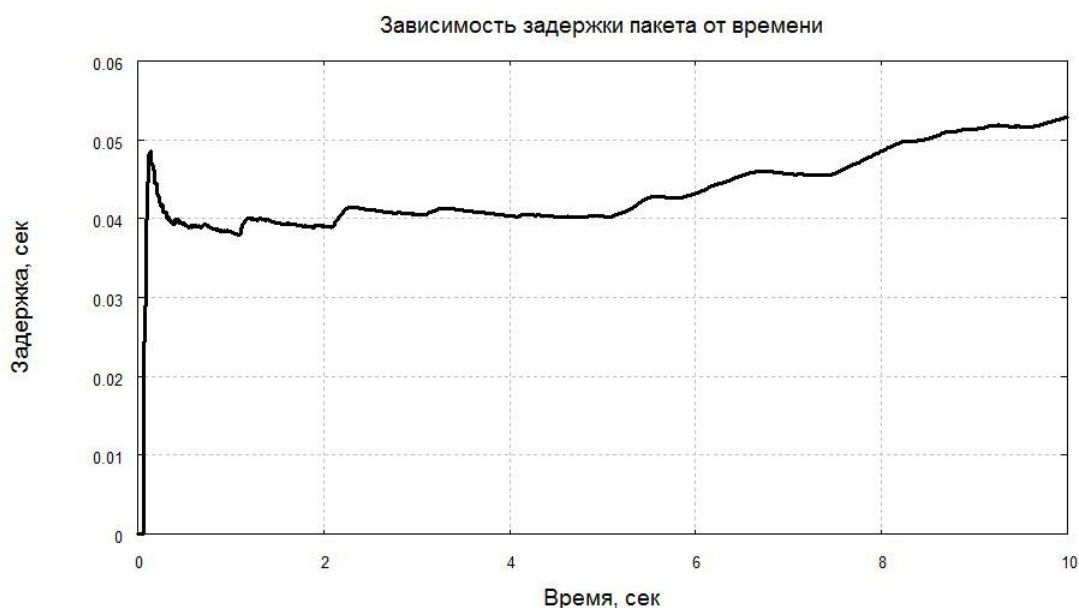


Рис. 15. Зависимость задержки пакета в сети от времени, при использовании алгоритма RIO-C

Обратимся к графику задержки пакета в очереди. Так же, как и в предыдущих случаях, при приближении текущего значения размера буфера очереди к максимальному происходит увеличение времени задержки пакета. В данном случае, максимальная задержка составила 0.0527 сек. Это ниже, чем при работе алгоритма Drop Tail, но увеличение задержки сказывается на принимаемом видео и работе алгоритмов джиттер-буфера, что нельзя считать положительным.

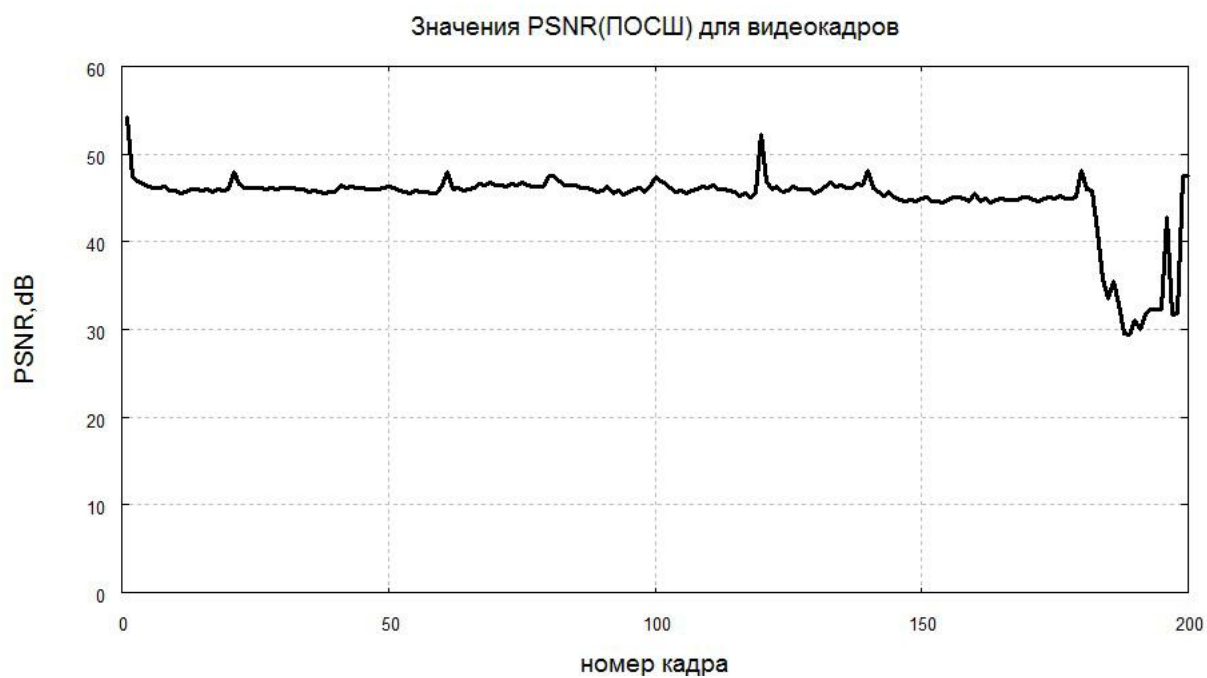


Рис. 16. Зависимости пикового отношения сигнал/шум от номера кадра для тестового видефрагмента при использовании алгоритма RIO-D

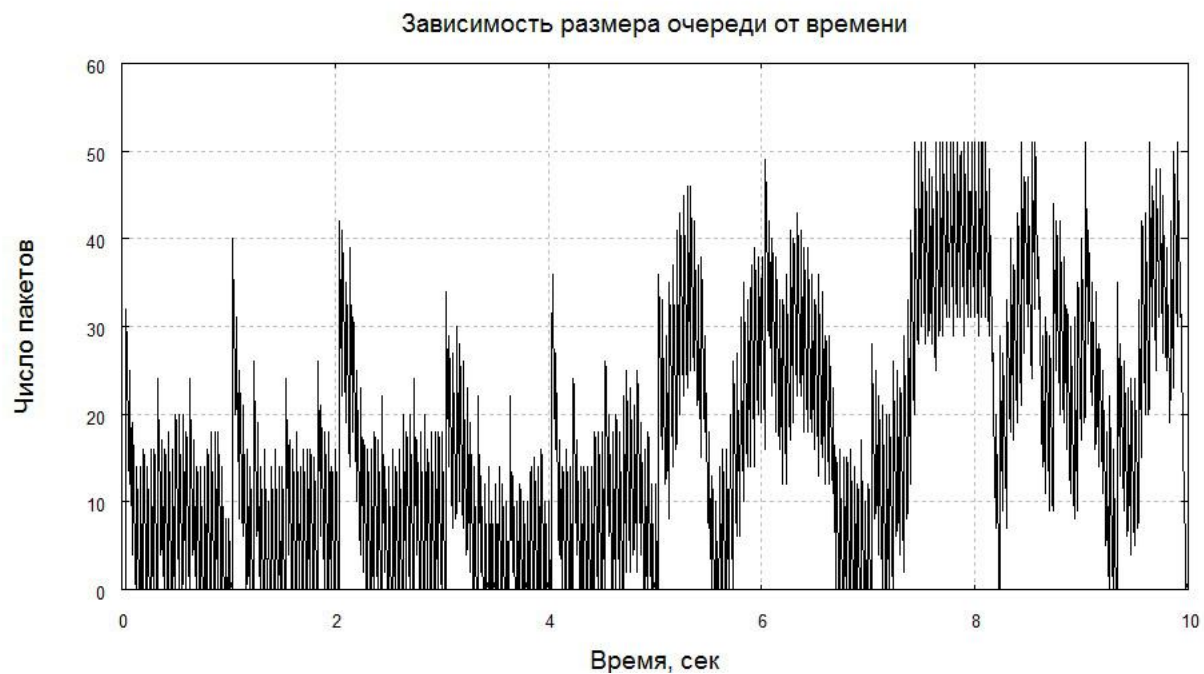


Рис. 17. Зависимость размера очереди на маршрутизаторе от времени, при использовании алгоритма RIO-D

Для версии алгоритма RED In/Out Decoupled (RIO-D) графики представлены на рис. 16 - 17. Отличие от предыдущей версии заключается в том, что вероятность отбрасывания существует только для вновь приходящих пакетов, те пакеты, что уже находятся в очереди не будут отброшены. Это подтверждается и на полученных графиках. Если провести сравнение графиков размера очереди, то можно заметить, что в случае RIO-D на периоде (8;10) секунд размер очереди пакетов имеет большее минимальное значение и не наблюдается таких резких провалов, как в случае использования RIO-C.

Графики задержки пакетов идентичны для обоих случаев и представлены на рисунке выше. Алгоритмы не могут совсем устранить увеличение задержки, но по сравнению с Drop Tail, максимальное время меньше.

3.4. Алгоритм Adaptive RED

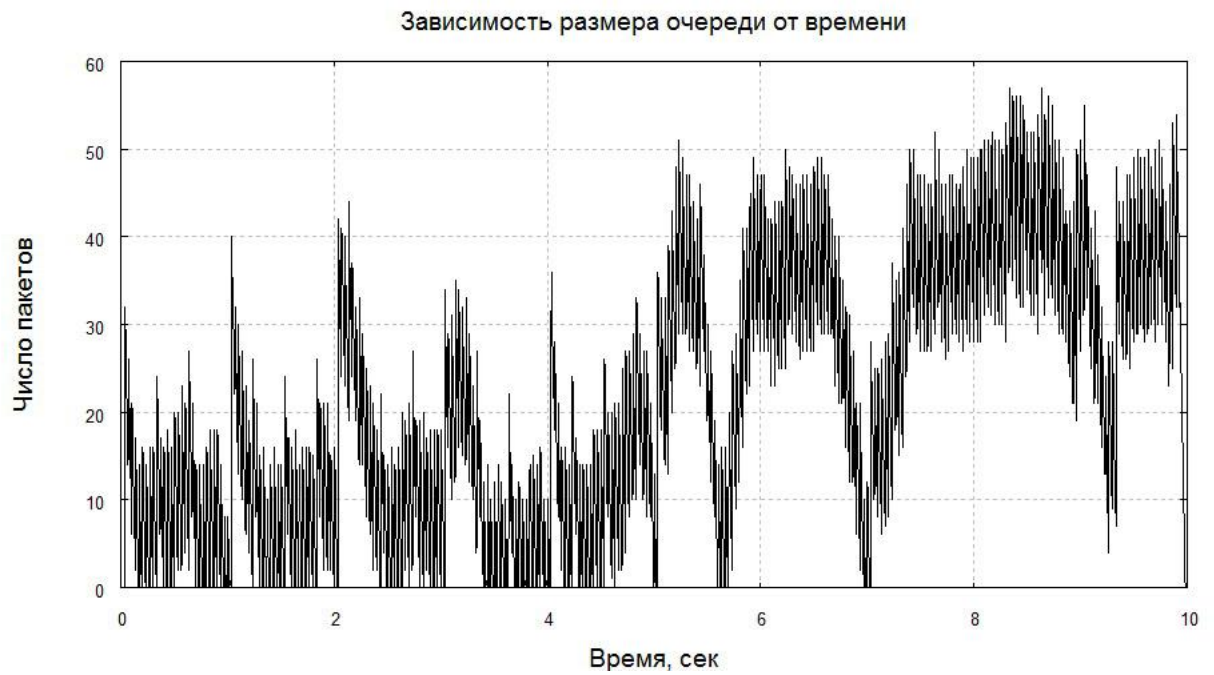


Рис. 18. Зависимости пикового отношения сигнал/шум от номера кадра для тестового видеофрагмента при использовании алгоритма Adaptive RED

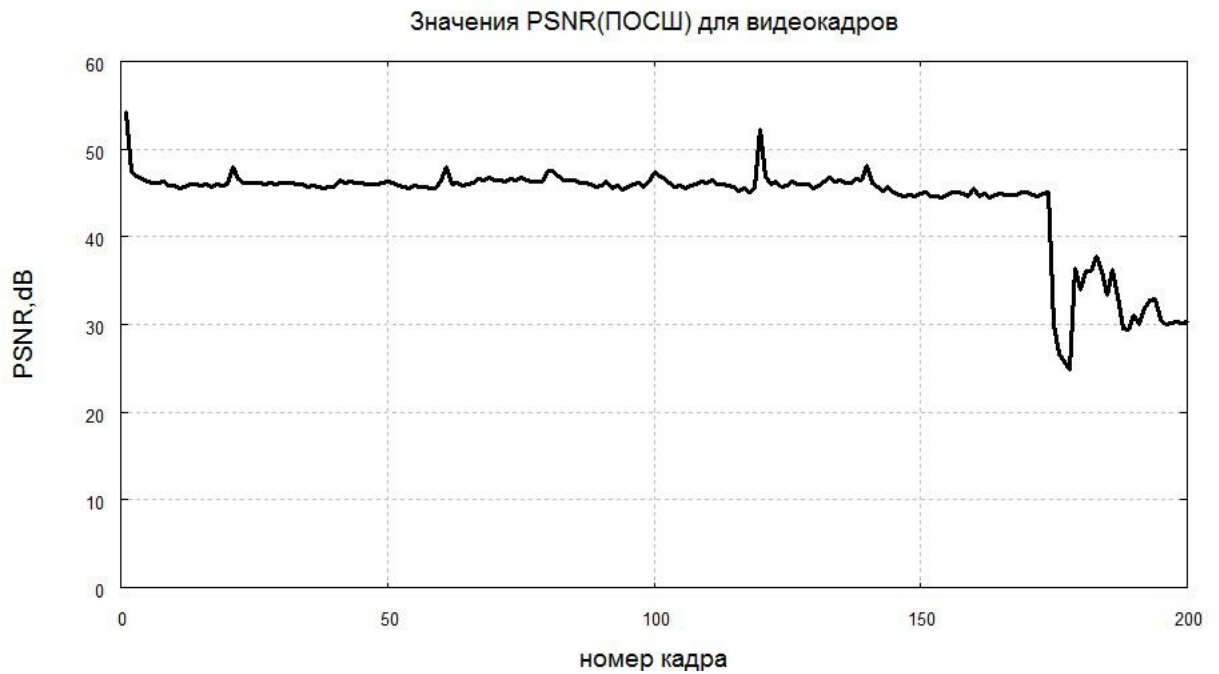


Рис. 19. Зависимость размера очереди на маршрутизаторе от времени, при использовании алгоритма Adaptive RED

На рис. 18 показана зависимость длины очереди от времени для алгоритма ARED с параметрами $\min_{th}=15$ $\max_{th}=45$ $\max_p=0,01$ $\alpha=0,065$. В данном случае использовано стандартное значение величины $w_q=0,002$. При сравнении этой зависимости с зависимостями выше, можно заметить, что средняя длина очереди при использовании ARED меньше чем при использовании Drop Tail и RED. График более сглаженный, алгоритм плавно изменяет размер очереди, резкие выбросы объясняются передачей I-кадров кодированной видеопоследовательности. Качество видео, которое можно оценить на графике PSNR (рис. 19) так же превосходит качество видео для случаев использования алгоритмов RED, но уступает качеству передачи видео при использовании алгоритма Drop Tail с максимальным размером очереди. Для части видео с малой динамикой значения PSNR совпадают с алгоритмами Drop Tail и RED. Для динамичной же части наблюдается первоначально резкий провал, вызванный тем что алгоритм ещё не успевает разгрузить память маршрутизатора, и дальнейшее увеличение значения PSNR, в то время как при использовании алгоритмов RED такого процесса не наблюдается.

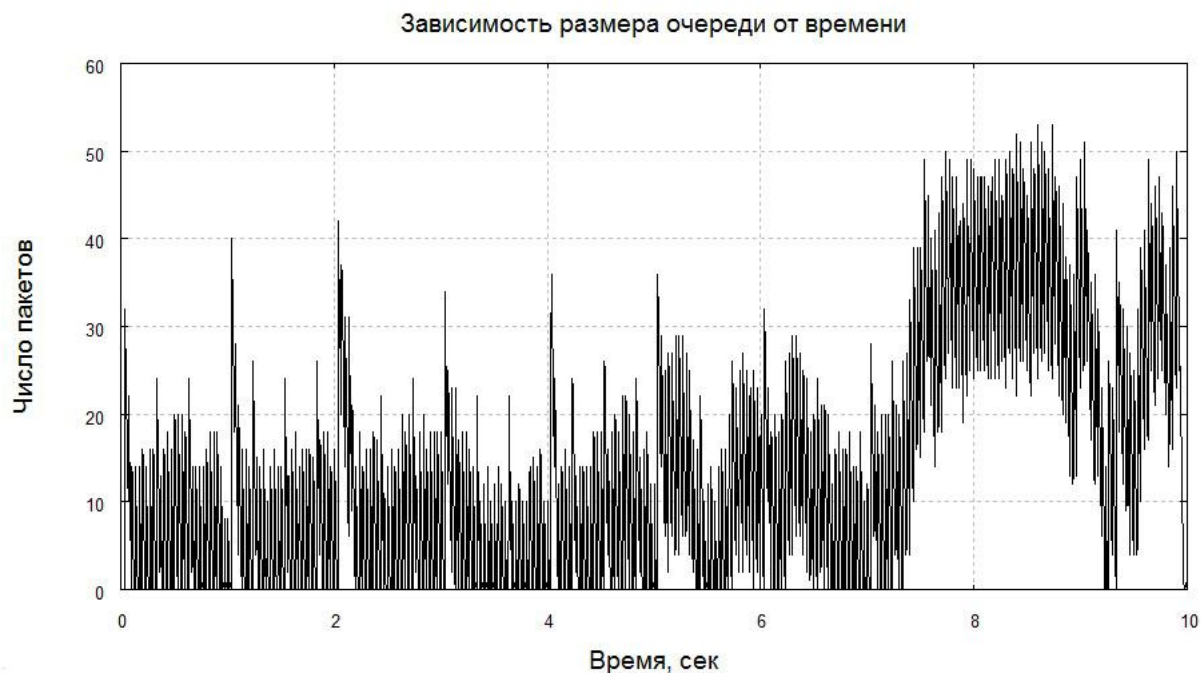


Рис. 20. Зависимости пикового отношения сигнал/шум от номера кадра для тестового видеофрагмента при использовании алгоритма Adaptive RED

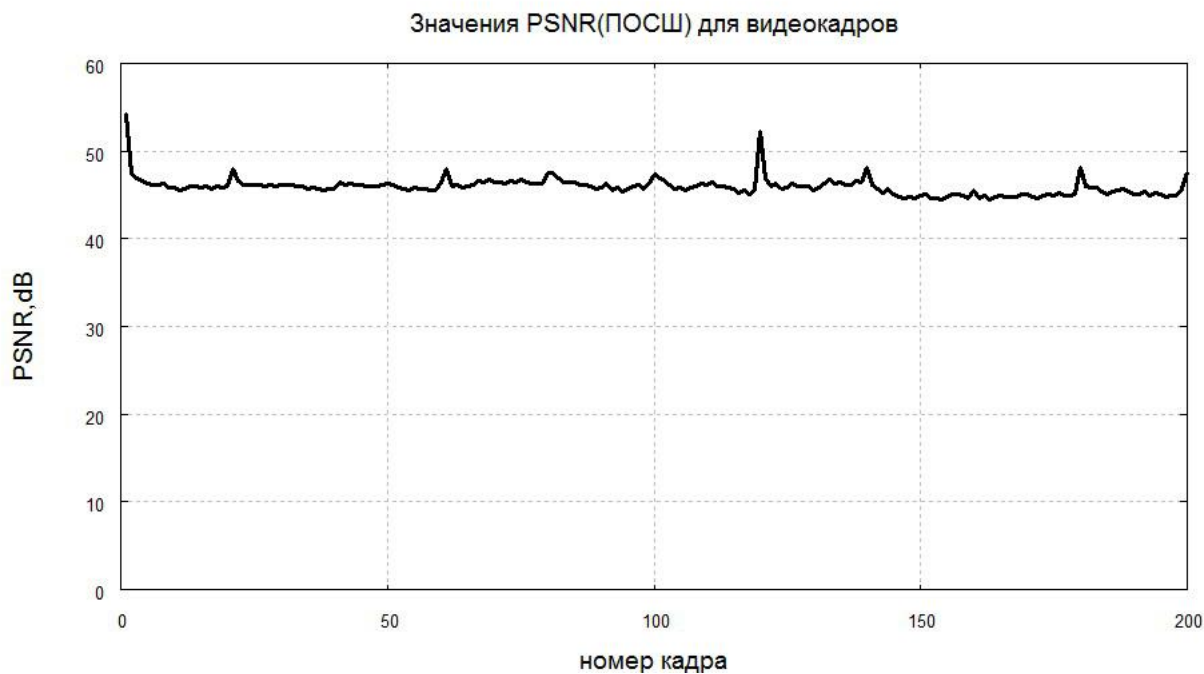


Рис. 21. Зависимость размера очереди на маршрутизаторе от времени, при использовании алгоритма Adaptive RED

Для того что бы добиться максимального качества видео пойдём по пути настройки параметров алгоритма под конкретно рассматриваемый случай. Для этого, произведем расчет значения w_q под конкретную пропускную способность канала. Графики зависимости размера очереди от времени и PSNR от номера кадра представлены на рис. 20 - 21. ARED имеет следующие параметры: $\min_{th}=15$ $\max_{th}=45$ $\max_p=0,5$ $\alpha=0,065$ $w_q=0.031$.

По сравнению с предыдущим случаем мы имеем улучшение качества видео, кадры передаются по сети неискаженными. Размер очереди уменьшился, большую часть времени он не превышает 20 пакетов. Резкие увеличения очереди связаны с передачей I-кадров, поскольку всё остальное время передаются лишь вектора движения, эти выбросы являются единичными, и алгоритм не может отреагировать на них.

Сравнивая зависимости задержек в сети от времени для трёх алгоритмов, можно заметить, что благодаря малому размеру очереди, задержки на доставку пакетов при использовании ARED меньше (рис. 22).

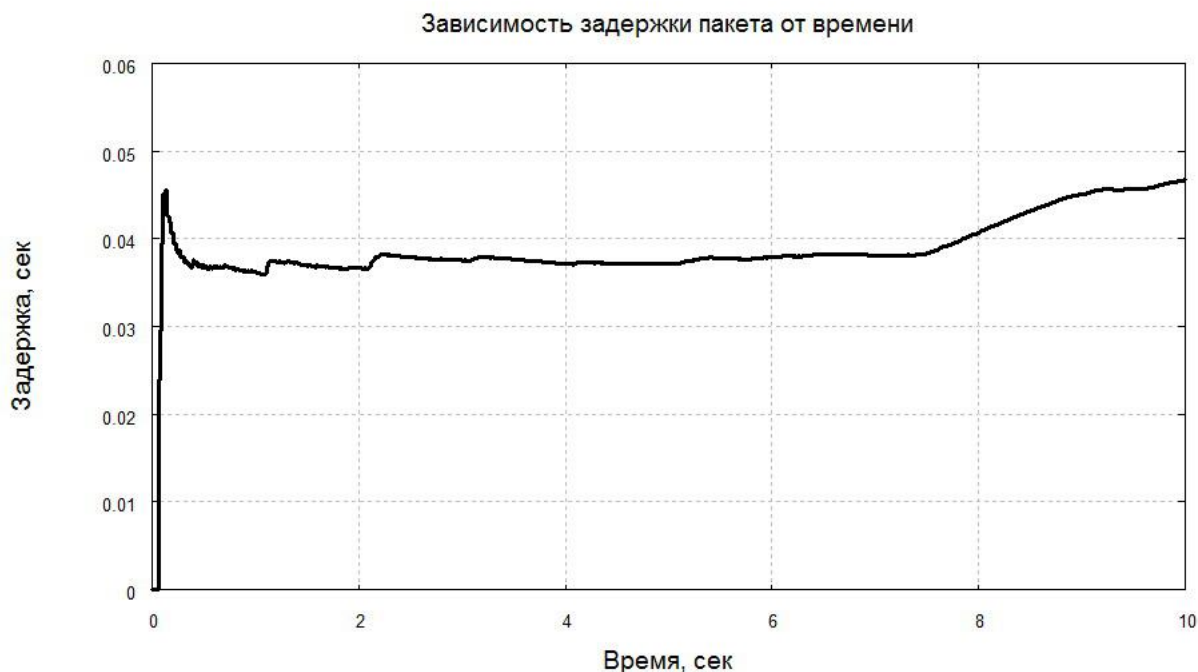


Рис. 22. Зависимость задержки пакета в сети от времени, при использовании алгоритма Adaptive RED

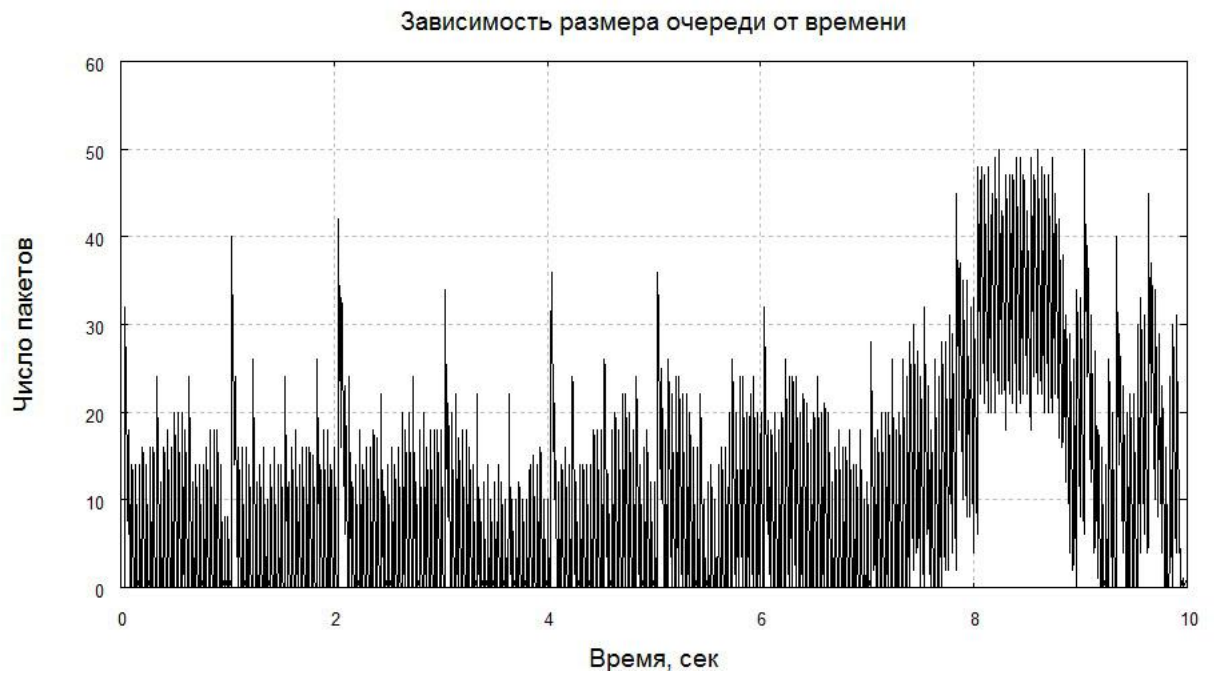


Рис. 23. Зависимости пикового отношения сигнал/шум от номера кадра для тестового видеофрагмента при использовании алгоритма Adaptive RED

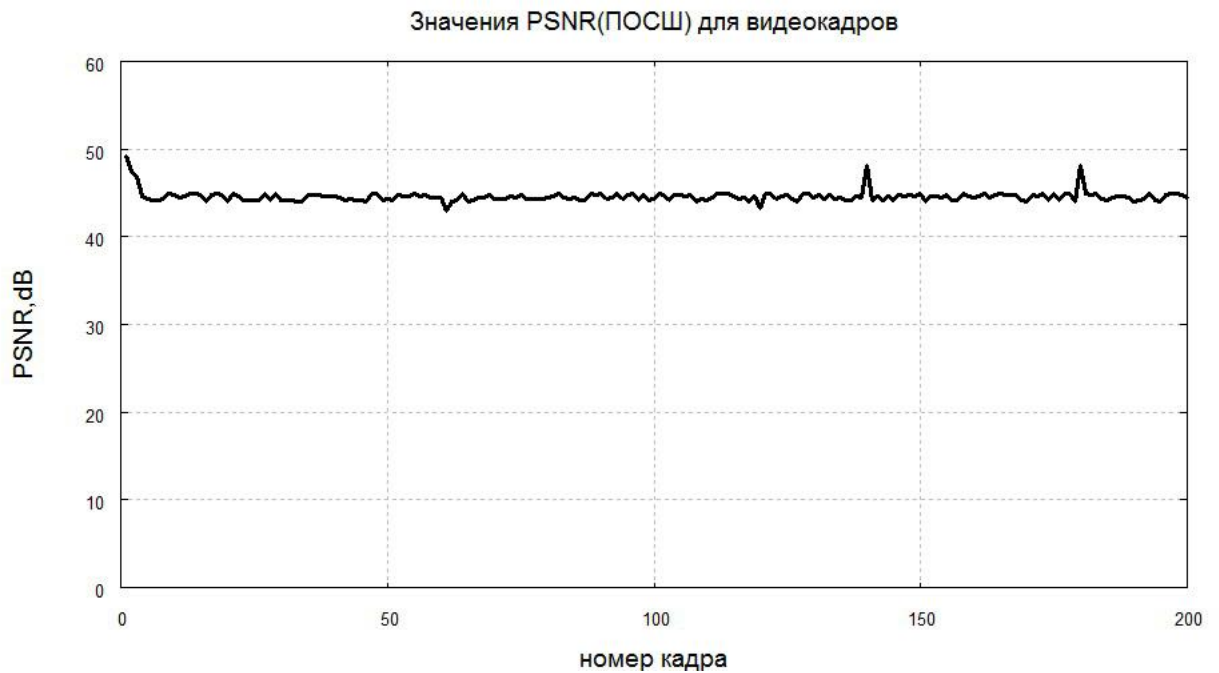


Рис. 24. Зависимость размера очереди на маршрутизаторе от времени, при использовании алгоритма Adaptive RED

На рис. 23 показана зависимость длины очереди от времени для алгоритма ARED с параметрами $\min_{th}=15$ $\max_{th}=45$ $\max_p=0,01$ $\alpha=0,065$ $w_q=0.031$. Как можно заметить, увеличение очереди до высокого уровня наблюдается лишь на промежутке 8-9сек. Это связано с повышенной динамикой передаваемого видео в данный момент времени. При уменьшении количества передаваемой информации алгоритм снижает размер очереди. Видео передается в высоком качестве, среднее значение PSNR – 46,3Дб, это объясняется тем, что большую часть времени размер очереди далек от максимального.

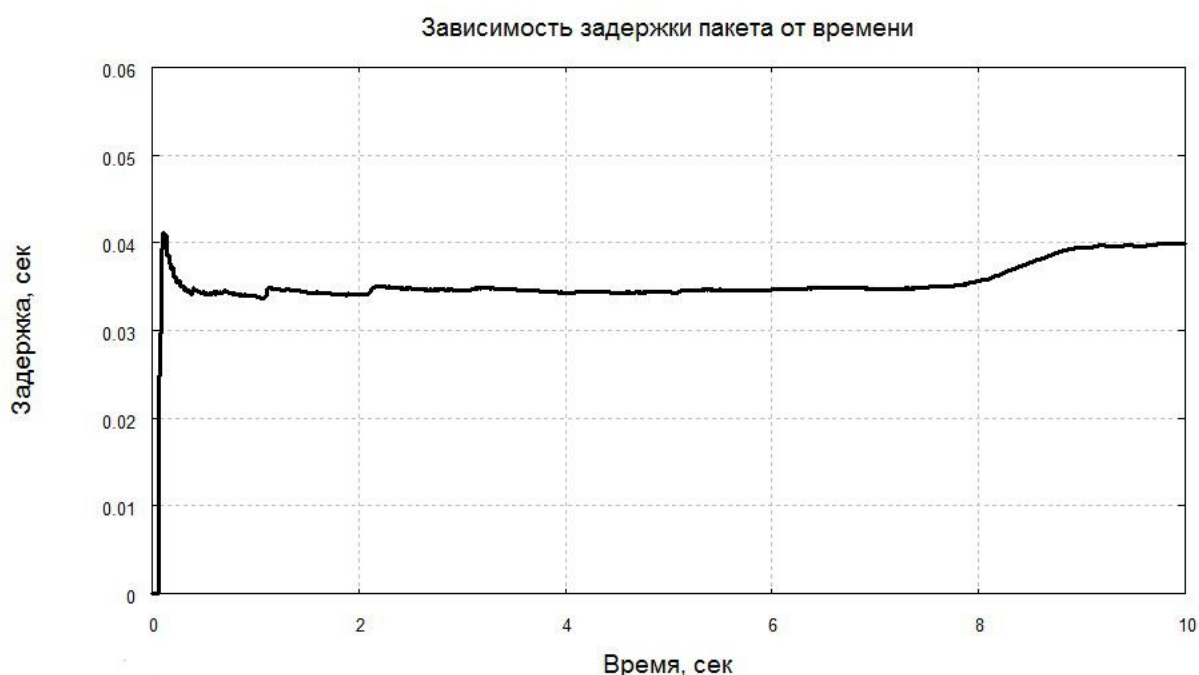


Рис. 25. Зависимость задержки пакета в сети от времени, при использовании алгоритма Adaptive RED

В связи с тем, что маршрутизатор не нагружен, задержка пакетов в сети находится на постоянном уровне, и лишь при увеличении динамики видео нарастает очередь и сетевая задержка. Нарастание не значительное с уровня 0.034 сек до 0.04 сек. Данный случай работы алгоритма Adaptive RED показывает нам наилучшее соотношение качество видео/задержка в сети.

Заключение

В ходе работы были рассмотрены вопросы, связанные с передачей видео информации по беспроводной Wi-Fi сети, при внедрении на маршрутизатор различных алгоритмов управления очередью пакетов. А также, определены факторы, влияющие на качество передачи видео. По результатам исследования были выявлены недостатки в самом примитивном алгоритме – Drop Tail. Рассмотрены алгоритмы группы RED, изучено влияние их параметров на работу сети. Выявлены тонкости, связанные с настройкой параметров алгоритмов.

Было проведено моделирование передачи видео по сети, с использованием данных алгоритмов управления очередью, получены и проанализированы показатели производительности сети – размер очереди и время доставки пакета, оценено качество передачи видео на основе наиболее распространенного критерия - PSNR.

Анализируя полученные результаты возможно сделать следующие выводы:

- Наибольшее влияние на производительность сети и качества полученного видео оказывает длина очереди.
- Алгоритм Drop Tail способен поддерживать качественную передачу видео только при больших объемах очереди.
- Ввиду особенностей своей работы, алгоритм Drop Tail нерационально использует память маршрутизатора.
- Алгоритмы RED и Adaptive RED при правильной настройке способны улучшить качество передачи видео, при этом оказывая меньшую нагрузку на память маршрутизатора.
- Наиболее оптимальным для рассматриваемой конфигурации сети, с точки зрения задержки на доставку пакетов и качества передачи видео, оказался алгоритм Adaptive RED, имеющий параметры $\min_{th}=15$ $\max_{th}=45$ $\max_p=0,01$ $\alpha=0,065$ $w_q=0.031$.

Литература

1. Величко В.В., Субботин Е.А., Шувалов В.П., Ярославцев А.Ф. Телекоммуникационные системы и сети. Том 3. М.: Горячая линия – Телеком, 2005, 592 с.
2. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. М.: Техносфера, 2004, 288 с.
3. Мейтин М. MPEG как предвестник эры интерактивного телевидения. Электроника: НТБ. 2001, стр 16-20.
4. Олифер Г.В., Олифер Н.А. Компьютерные сети, 3-е изд. – СПб: Питер, 2008, 958 с.
5. Столлингс В. Современные компьютерные сети, 2-е изд. – СПб: Питер, 2003, 364 с.
6. Таненбаум Э. Компьютерные сети, 4-е изд. – СПб. : Питер, 2007, 992 с.
7. Вегешна Ш . Качество обслуживания в IP сетях. – М. : И.Д. Вильямс, 2003, 368 с.
8. Гончаров А.А., Ильин А.Ю., Семенов Ю.А., Исследование возможностей получения гарантированного качества обслуживания при передаче мультимедиа через перегруженные каналы // Информационные процессы, 2006 , стр. 310-321.
9. Кришнамурти Б. WEB-протоколы. Теория и практика. – М.:Бином, 2002, 593 с.
10. Джонатан Д., Питерс Д. Основы передачи голосовых данных по IP сетям, 2-е изд. – М.: И.Д. Вильямс, 2007, 400 с.
11. Athuraliya S., Li V., S. H. Low S., Yin Q., RED: Active Queue Management, //IEEE Network, May 2001, P.202 – 207
12. Christiansen M., Jeffay K., Ott D., Smith F. Tuning RED for Web traffic // Proceedings of ACM SIGCOMM 2000, August-September 2000, P. 139-150.
13. IEEE Standart Association, available at <http://www.ieee.org>
14. Гольдштейн В.С. Сигнализация в сетях связи. Т.1. М.: Радио и связь, 1998, 423 с.

15. Концепции развития связи РФ/ Под ред. В.В. Булгака, 1996, 224 с.
16. Floyd S., Gummadi R., Shenker S. Adaptive RED: an algorithm for increasing the robustness of RED's Active Queue Management, <http://www.icir.org/floyd/papers/adaptiveRed.pdf>, August 2001.
17. Floyd S., and Fall K. Promoting the use of end-to-end congestion control in the Internet // IEEE/ACM Transactions on Networking, August 1999, P.402 – 422.
18. Floyd S., Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance // IEEE/ACM Transactions on Networking, August 1999, P. 397– 413.
19. Elloumi O., Afifi H. RED algorithm in ATM networks // IEEE ATM Workshop 1997. Proceedings, May 2003, P. 312 – 319.
20. Eddy W., Allman M. A comparison of RED's byte and packet modes // Computer Networks, June 2003, P. 103-125.
21. Le L., Aikat J., K. Jeffay. The effects of Active Queue Management and explicit congestion notification on Web performance // IEEE/ACM Transactions on Networking, August 2005, P. 134-147.
22. Feng W. A self-configuring RED gateway // Infocom, Mar 1999, P. 221 – 234.
23. Feng W., Kandlur D., Saha D. Techniques for eliminating packet loss in congested TCP/IP network // U. Michigan CSE-TR-349-97, November 1999.
24. Fall K., Varadhan K. The ns manual. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>
25. Aweya J., Ouellette M., Montuno D., Chapman A. Enhancing TCP performance with a load-adaptive RED mechanism // International Journal of Network Management, V. 11, N. 1, 2005, P. 304 – 325.
26. Aweya J., Ouellette M., Montuno M., Chapman C. An Optimization-oriented view of Random Early Detection // Computer Communications, 2001.
27. Braden R., Clark D., Crowcroft J., Davie D., Deering A., Estrin D., Floyd S., Jacobson V., Minshall G., Partridge C., Ramakrishnan K., Zhang L.

- Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet. RFC 2309, April 2005.
28. Chiu D., Jain R. Analysis of the increase/decrease algorithms for congestion avoidance in computer networks // Journal of Computer Networks and ISDN, 17(1), June 2003.
 29. Lin D., Morris R. Dynamics of Random Early Detection // Proceedings of SIGCOMM 97, September 2001, P.127 – 138.
 30. Mahajan, R., Floyd, S. Controlling high-bandwidth flows at the congested Router // ICSI Tech Report TR-01-001, April 2001, P. 235 – 247.
 31. Ott T., Lakshman T., Wong L. SRED: Stabilized RED // Proceedings IEEE INFOCOM '99, New York, March 2003, P.123 – 129.
 32. Rosolen V., Leduc G. A RED discard strategy for ATM networks and its performance evaluation with TCP/IP traffic // IEE/ACM Computer Communication Review, July 2006, P. 345 – 353.
 33. Shenker S., Zhang L., Clark D. Some observations on the dynamics of a congestion control algorithm // ACM Computer Communication Review, October 2008, P.30 – 39.
 34. Altman E., Jimenez T. NS simulator for beginners // Lecture notes, 2003-2004 Univ. de Los Andes, Merida, Venezuela and ESSI, Sophia-Antipolis, France, 2003.
 35. Ватогин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В., Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003, 384 с.
 36. Chung J., Claypool M. NS by example. <http://nile.wpi.edu/NS/>
 37. Kunniyur S., Srikant R. Analysis and design of an adaptive virtual queue (AVQ) algorithm for Active Queue Management // CSL Technical Report, University of Illinois, January 2007 P. 153 – 159.