

На правах рукописи

Кириянов Антон Геннадьевич

**Разработка и моделирование методов,  
применяемых в протоколах канального уровня  
сетей Wi-Fi для доставки видеопотоков реального  
времени**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в *Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»*

Научный руководитель: *доктор технических наук,  
профессор  
Ляхов Андрей Игоревич*

Официальные оппоненты: *Степанов Сергей Николаевич,  
доктор технических наук,  
профессор, и.о. заведующего кафедрой  
«Сети связи и системы коммутации»  
Ордена Трудового Красного Знамени  
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики»*

*Гудкова Ирина Андреевна,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры прикладной информатики  
и теории вероятностей ФГАОУ ВО  
«Российский университет дружбы народов»*

Ведущая организация: *Федеральное государственное учреждение  
«Федеральный исследовательский центр  
«Информатика и управление» Российской  
академии наук»*

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 002.077.05 на базе Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН) по адресу: *Большой Каретный пер., д. 19, стр. 1, Москва, 127051*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *ИППИ РАН*, а также на сайте <http://iitp.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
*д. ф.-м. н.*

*Цитович И.И.*

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** В последние годы в телекоммуникационной сфере наблюдается стремительный рост объемов данных, которые передаются по беспроводным сетям, причем основной вклад вносит передача мультимедийных данных — аудио- и видеопотоков, среди которых особое внимание стоит уделить так называемым потокам реального времени, возникающим, например, при аудио- и видеоконференцсвязи. Передача таких потоков предъявляет жесткие требования к качеству обслуживания, представляющие собой, как правило, ограничения на долю потерянных пакетов и на время доставки каждого пакета, и выполнение таких ограничений в беспроводных сетях, особенно в сетях с распределенным управлением, которыми являются широко распространенные и популярные сети Wi-Fi, представляет собой сложную задачу по многим причинам. Беспроводная среда передачи данных является значительно менее надежной по сравнению с проводной средой в смысле вероятности успешной попытки передачи пакета, которая зависит от местоположения получателя трафика. Более того, когда пакеты данных, адресованные различным получателям, находятся в единой очереди FIFO (от англ. First In, First Out — первым пришел — первым обслужен) точки доступа Wi-Fi, даже кратковременный отказ канала (порядка ограничения на время доставки пакета) для одного из получателей может приводить к существенному увеличению времени обслуживания пакетов всех получателей и, соответственно, к ухудшению качества передачи видеопотоков. Для решения этой проблемы необходимо разрабатывать интеллектуальные алгоритмы управления очередью передачи пакетов, которые учитывают особенности передачи в беспроводной среде, а также требования к качеству обслуживания трафика.

Помимо случайных помех в беспроводной среде причинами ошибок при передаче данных могут быть коллизии с соседними станциями, если передачи пересекаются во времени. Проблема коллизий становится все более сложной и актуальной в связи со стремительным ростом числа устройств в беспроводных сетях, а также числа беспроводных сетей, которые работают в одной области пространства. Радикальным решением проблемы коллизий является применение методов детерминированного доступа, основанных на резервировании канального ресурса в определенные моменты времени. Однако даже в зарезервированном интервале вероятность успешной передачи меньше единицы из-за случайных помех и интерференции от удаленных станций, что приводит к необходимости дополнительных попыток передачи пакета. Таким образом, ответ на вопрос, какой минимальный объем канального ресурса необходимо зарезервировать для передачи видеопотока переменной интенсивности с выполнением требований к качеству обслуживания, является нетривиальным.

**Степень разработанности темы.** Исследованию эффективности доставки данных в беспроводных сетях посвящено значительное количество работ, среди которых следует особо отметить работы российских и зарубежных ученых: А.П. Афанасьева, О.М. Брехова, Н.Д. Введенской, А.Б. Гольдштейна, В.В. Зяблова, А.Н. Красиловой, А.П. Кулешова, А.Е. Кучерявого, Е.А. Кучерявого, А.И. Ля-

хова, О.Г. Мелентьева, В.И. Неймана, Д.С. Осипова, А.Н. Рыбко, К.Е. Самуйлова, А.А. Сафонова, О.Д. Соколовой, С.Н. Степанова, В.Л. Стефанюка, А.М. Тюрликова, Е.М. Хорова, И.И. Цитовича, Б.С. Цыбакова, М.Ю. Якимова, G. Bianchi, C. Cicconetti, T. Clausen, M. Conti, P. Jacquet, G. Hiertz, E. Mingozzi, P. Serrano, J. Sobrinho, M. Voorhaen, A. Wolisz, Y. Yang и др. Среди этих работ большинство посвящено анализу эффективности методов случайного доступа, а другая часть работ, посвященная методам детерминированного доступа, не уделяет должного внимания алгоритмам динамического резервирования ресурса с учетом задержки, которая неизбежно возникает в сетях с распределенным управлением, а также использованию общего резервирования, в котором могут передаваться сразу несколько потоков данных. Все это приводит к необходимости разработки и анализа новых методов доставки данных в беспроводных сетях с соблюдением требований к качеству обслуживания.

**Целью диссертационной работы** является разработка и моделирование методов, применяемых на уровне доступа к каналу в сетях Wi-Fi для доставки видеопотоков реального времени с выполнением требований к качеству обслуживания.

Для достижения поставленной цели в диссертации ставятся и решаются следующие задачи:

1. Разработка дисциплины обслуживания очереди для случая кратковременных отказов канала, а также аналитической модели работы данной дисциплины при передаче видеопотоков реального времени.
2. Разработка и аналитическое моделирование алгоритмов динамического резервирования канального ресурса при передаче видеопотока реального времени в условиях помех с учетом задержки вступления решения в силу.
3. Аналитическое моделирование передачи нескольких видеопотоков реального времени в условиях помех с помощью общего периодического резервирования.

**Методы исследования.** В диссертации используются методы теории вероятности, теории случайных процессов, теории цепей Маркова, комбинаторного анализа, а также имитационного моделирования.

### **Научная новизна**

- Предложена и исследована новая дисциплина обслуживания очереди канального уровня в сети Wi-Fi для борьбы с кратковременными отказами канала при передаче нескольких видеопотоков реального времени, а также предложена аналитическая модель ее работы. Данная дисциплина позволяет предотвратить блокирование очереди головным пакетом, существенно улучшить качество передачи видеопотоков для получателей без отказа канала, а также смягчить ухудшение качества передачи видеопотоков для получателей с отказом канала.
- Разработаны алгоритмы динамического резервирования канального ресурса при передаче видеопотока реального времени в условиях помех, учитывающие задержку при установлении/отмене резервирования, а также возника-

ющее из-за этого отличие объема фактически занятого канального ресурса (т.е. недоступного для использования соседям владельца и адресата резервирования) от зарезервированного (т.е. доступного для передачи данных между владельцем и адресатом резервирования).

- Разработана аналитическая модель передачи видеопотока в условиях помех с помощью динамически устанавливаемых резервирований, учитывающая особенности процедуры установления и отмены резервирований при подсчете объема фактически занятого канального ресурса. С использованием данной модели проведено сравнение эффективности предложенных в диссертации алгоритмов.
- Впервые разработана аналитическая модель передачи нескольких видеопотоков реального времени в условиях помех с помощью общего периодического резервирования, которая позволяет определить оптимальный период резервирования при использовании дисциплины FIFO, а также оценить эффективность от применения общего резервирования для передачи нескольких видеопотоков по сравнению с использованием индивидуальных резервирований для каждого видеопотока.

**Практическая ценность и реализация результатов.** Использование теоретических результатов, полученных в диссертации, позволит осуществлять передачу мультимедийных данных с выполнением требований к качеству обслуживания, снизив при этом объем занятого канального ресурса.

Результаты работы внедрены и используются на практике, что подтверждено соответствующими актами. В частности, разработанные модели и методы использованы в НИР, выполняемых ИППИ РАН по проектам ОНИТ РАН, РФФИ, РНФ, а также для организации учебного процесса на Кафедре проблем передачи информации и анализа данных МФТИ в ИППИ РАН.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. При передаче видеопотоков реального времени в случае кратковременных ухудшений качества соединений с некоторыми получателями по сравнению с дисциплиной FIFO обслуживания очереди разработанная дисциплина, направленная на предотвращение блокирования очереди для остальных получателей, позволяет многократно снизить значение метрики MSE, характеризующей суммарную среднеквадратичную ошибку видеоизображения.
2. Разработанная аналитическая модель передачи видеопотока в условиях помех с помощью динамически устанавливаемых резервирований позволяет сравнить различные алгоритмы динамического резервирования ресурса с точки зрения доли потерянных пакетов и объема фактически занятого канального ресурса, определяемого с учетом задержки вступления в силу решения об установлении/отмене резервирования.
3. Разработанная аналитическая модель передачи нескольких потоков переменной интенсивности в условиях помех с помощью общего периодического резервирования позволяет определить максимальный период резервирования при использовании дисциплины FIFO, при котором требования к качеству

обслуживания выполнены для всех передаваемых потоков.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на ведущих международных и российских конференциях: International Workshop on Wireless Access Flexibility (WiFlex, Россия, 2013), 25th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC, США, 2014), IFIP Wireless Days (Франция, 2016), IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom, Болгария, 2016), «Информационные технологии и системы» (ИТиС, Россия, 2013, 2014, 2015), «Инжиниринг & Телекоммуникации» (En&T, Россия, 2014), а также на семинарах ИППИ РАН.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 12 печатных работах, из них 7 статей [1–7] — в рецензируемых изданиях, которые входят в перечень ВАК, 5 статей [8–12] — в сборниках трудов конференций. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами. Предложенные алгоритмы и модели были разработаны диссертантом лично. Во всех приведенных работах вклад соавторов заключался в постановке задач, частичном анализе литературы и частичном получении численных результатов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографии и приложения. Общий объем диссертации 146 страниц, включая 44 рисунка и 4 таблицы. Библиография включает 129 наименований.

## Содержание работы

**Во Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**Первая глава** посвящена описанию процесса передачи видеопотоков реального времени по сети Wi-Fi. При передаче видеопотоков реального времени необходимо обеспечить выполнение требований к качеству обслуживания — ограничений на долю потерянных пакетов  $PLR^{QoS}$  и на время доставки пакета  $D^{QoS}$ . Важную роль в этом играют методы доступа к каналу, которые можно разделить на два класса: методы случайного доступа и методы детерминированного доступа.

Метод случайного доступа в сетях Wi-Fi основан на принципе CSMA/CA (от англ. Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance — множественный доступ с контролем несущей и избеганием коллизий). Выполнять требования к качеству обслуживания при передаче видеопотока реального времени с использованием метода случайного доступа оказывается не всегда возможным, так как, во-первых, станции получают доступ к среде на конкурентной основе, что не гарантирует предоставление необходимого объема канального ресурса за заданное время, а во-вторых, при использовании метода случайного доступа несколько станций могут начать передачу одновременно, что приведет к коллизии и необходимости повторных передач. Поэтому для передачи потоков, предъявляющих требования к качеству обслуживания, часто используются методы детерминиро-

ванного доступа, суть которых заключается в том, что для передатчика резервируются определенные интервалы времени, в течение которых он получает исключительное право на передачу данных, что позволяет избежать коллизий с другими станциями сети. Если положить, что одного такого интервала времени достаточно для одной попытки передачи пакета, то, на первый взгляд, число зарезервированных интервалов должно совпадать с числом имеющихся пакетов на передачу. Однако даже внутри зарезервированных интервалов попытки передачи могут быть неудачными из-за интерференции и шумов, характерных для беспроводной среды, что приводит к необходимости резервировать дополнительный каналный ресурс для осуществления повторных попыток передачи пакетов.

Чтобы зарезервировать каналный ресурс, т.е. установить резервирование, две станции— *владелец* резервирования (станция-передатчик данных) и *адресат* резервирования (станция-получатель данных) — должны выполнить процедуру установления резервирования, в процессе которой они обмениваются служебными кадрами и согласуют параметры нового резервирования. После этого владелец и адресат резервирования должны уведомить все станции в своем окружении об установленном резервировании, чтобы не допустить коллизий. Рассылка информации о резервировании осуществляется в биконах — периодически рассылаемых служебных кадрах, содержащих важную служебную информацию о сети и позволяющих синхронизовать время между станциями (см. рис. 1). При установлении или отмене резервирования возникает задержка вступления принятого решения в силу длительностью до 1 бикон-периода, так как информация о решении должна быть распространена среди соседей владельца и адресата при помощи биконов. Задержка приводит к тому, что на некотором промежутке каналный ресурс оказывается занят, но не может быть использован для передачи (см. рис. 1).

Чтобы снизить объем рассылаемой информации, в сетях Wi-Fi применяются периодические резервирования, при использовании которых зарезервированные интервалы времени имеют одинаковую длительность и расположены периодически. Для описания такого резервирования необходимо указать всего лишь три параметра: длительность зарезервированных интервалов, период их следования и смещение первого интервала относительно бикона.

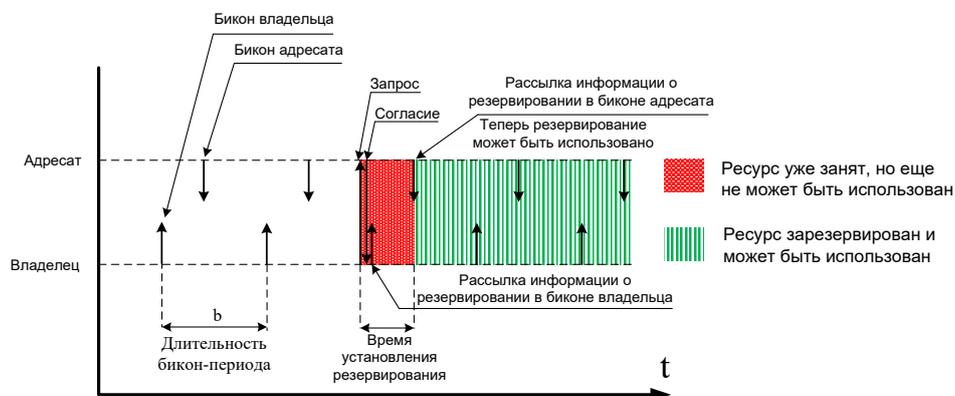


Рис. 1. Процесс установления резервирования.

Можно выделить два подхода к установлению резервирований: динамиче-

ский и статический. Использование динамического подхода подразумевает, что оценка качества канала для определения параметров резервирования проводится на ограниченном интервале времени, в результате чего в процессе передачи потока на очередном интервале могут устанавливаться новые резервирования, а старые резервирования могут быть отменены. Согласно статическому подходу параметры резервирования выбираются в начале передачи потока на основе допущения, что процесс передачи потока входит в некоторый стационарный режим.<sup>1</sup> Использование статического подхода позволяет снизить накладные расходы, которые возникают при частом установлении новых/отмене старых резервирований. Однако при передаче потоков переменной интенсивности с пульсирующей пиковой нагрузкой и жесткими ограничениями на время доставки пакетов и долю потерянных пакетов на некоторых временных промежутках требуется больший объем зарезервированного канального ресурса, чем на остальных промежутках. Так как статический подход подразумевает постоянство во времени зарезервированного объема канального ресурса, то на некоторых промежутках зарезервированный ресурс может оказаться излишним. Динамический подход позволяет резервировать ресурс по необходимости, как можно точнее определяя необходимый для выполнения требований к качеству обслуживания объем канального ресурса на данном промежутке. Однако и такой подход может не всегда оказаться рабочим: так как установление нового резервирования и распространение информации о нем среди соседних станций требует определенного времени, то при жестком ограничении на время доставки пакета для установления нового резервирования может просто не хватить времени.

**Во второй главе** рассматривается проблема кратковременных отказов канала при передаче видеопотоков реального времени по беспроводной сети. Рассмотрим сценарий, в котором источник (например, точка доступа Wi-Fi) ведет передачу  $N$  видеопотоков реального времени  $N$  клиентским станциям. Практический интерес представляет случай, когда пропускной способности сети достаточно для передачи всех видеопотоков в течение всего времени, кроме промежутков, на которых случаются кратковременные отказы канала, во время которых вероятность успешной попытки передачи пакета между источником и одним или несколькими получателями падает практически до нуля. В беспроводной сети, развернутой внутри большого помещения или на открытой местности, кратковременные отказы канала обычно локальны, определяются наличием интерференции в местоположении получателя и некоррелированы по различным получателям.

Если для одного из получателей случается отказ канала, то точка доступа начинает совершать повторные попытки передачи текущего пакета, число которых ограничено значением  $RL$  согласно стандарту Wi-Fi (IEEE 802.11). Если все  $RL$  попыток оказываются неуспешными, то пакет отбрасывается, а точка доступа переходит к обслуживанию следующего пакета в очереди. Таким образом, если

---

<sup>1</sup> Заметим, что если на основе собираемой во время передачи потока статистики будет выявлено, что стационарные характеристики процесса передачи *существенно* изменились, то может быть установлено резервирование с новыми параметрами, в то время как старое резервирование будет отменено.

длительность отказа канала оказывается больше, чем время, необходимое для совершения  $RL$  попыток передачи, то станция-получатель с отказом канала может потерять один или более пакетов, что приведет к ухудшению качества принимаемого видеопотока.

К сожалению, это не единственное отрицательное последствие кратковременного отказа канала. Так как обычно точка доступа Wi-Fi использует стандартную дисциплину FIFO обслуживания очереди, то длительное обслуживание пакетов для получателя с отказом канала приводит к потере актуальности и отбрасыванию пакетов, адресованных другим получателям, т.е. качество видеоизображения ухудшается для всех получателей.

Во второй главе для борьбы с последствиями кратковременных отказов канала предлагается использовать  $P$ -настойчивую дисциплину обслуживания очереди, в основу которой положены следующие идеи:

1. Чтобы не ухудшить качество передачи видеопотоков получателям, для которых не произошел отказ канала (назовем таких получателей «зелеными»), станция-источник не должна уменьшать объем канального ресурса, затрачиваемого на обслуживание этих получателей.

2. Чтобы минимизировать (или полностью избежать) потери качества передачи видеопотоков получателям, для которых произошел отказ канала (назовем таких получателей «красными»), станция-источник не должна отбрасывать пакет после совершения  $RL$  неудачных попыток передачи, а только если будет превышено ограничение на время доставки пакета.

В главе 2 предложены две версии  $P$ -настойчивой дисциплины обслуживания очереди: базовая, которая рассчитана на передачу потоков одинаковой интенсивности, и улучшенная, которая позволяет эффективно передавать потоки разной интенсивности как непосредственно во время отказа канала, так и сразу после его завершения, пока система еще не вернулась в нормальное состояние. Приведем краткое описание улучшенной  $P$ -настойчивой дисциплины.



Рис. 2. Состояния потока и возможные переходы между ними.

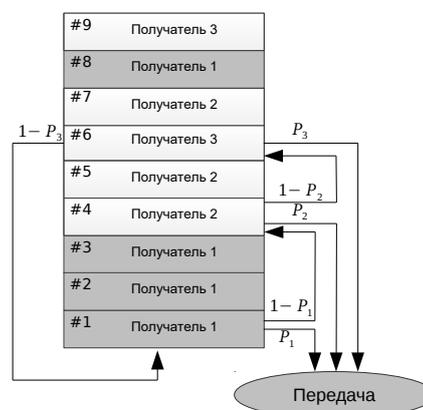


Рис. 3. Пример работы  $P$ -настойчивой дисциплины обслуживания очереди.

При необходимости выбрать из очереди пакет для передачи последовательно рассматриваются головные пакеты каждого потока. Каждый передаваемый поток может находиться в одном из трех состояний: нормальное обслуживание ( $H$ ), отказ канала ( $O$ ) и восстановление ( $B$ ) (см. рис. 2). Состояние  $H$  соответствует обычному режиму обслуживания потока. Если в качестве кандидата на передачу рассматривается пакет потока в состоянии  $H$ , то его передача осуществляется с вероятностью  $P = 1$ . При совершении подряд  $RL$  неудачных попыток передачи пакета потока в состоянии  $H$  детектируется отказ канала, и поток переходит в состояние  $O$ . Если в качестве кандидата на передачу рассматривается пакет потока в состоянии  $O$ , то с вероятностью  $P < 1$  осуществляется одна попытка передачи пакета, а с вероятностью  $1 - P$  в качестве претендента на передачу рассматривается пакет следующего потока в очереди (см. рис. 3). Если попытка передачи пакета потока в состоянии  $O$  оказывается успешной, то отказ канала считается завершенным и поток переходит в состояние  $B$ . Передача пакета потока в состоянии  $B$  осуществляется при условии, что она не приведет к недопустимым потерям (согласно предъявляемым требованиям к качеству обслуживания) в первой пачке пакетов потоков в состоянии  $H$ , в противном случае в качестве кандидата на передачу рассматривается пакет следующего потока в очереди. Все потоки, находящиеся в состоянии  $B$ , переходят в состояние  $H$ , когда возраст головного пакета в очереди становится меньше параметра  $T_F$ , что свидетельствует о полном преодолении последствий отказа канала.

Чтобы определить вероятность  $P$  выбрать для передачи пакет одного из потоков (без уточнения, какого конкретно) в состоянии  $O$ , потребуем, чтобы отказ канала не повлиял на распределение канального ресурса между потоками. В диссертации показано, что в предположении нахождения в очереди пакетов всех потоков, вероятность  $P$  должна вычисляться как:

$$P = \eta \sum_{i=1}^z \lambda_i t_i / \left( \sum_{i=z+1}^N \lambda_i t_i + \eta \sum_{i=1}^z \lambda_i t_i \right),$$

где  $\eta$  — отношение среднего времени обслуживания пакета вне интервала отказа канала к среднему времени совершения одной попытки передачи пакета,  $\lambda_i$  — среднее число пакетов  $i$ -го потока, поступающих в очередь за 1 секунду,  $t_i$  — среднее время обслуживания пакета  $i$ -го потока вне интервала отказа канала,  $z$  — число потоков в состоянии  $O$ .

Зная значение  $P$  вероятности выбрать на обслуживание пакет для *одного* из  $z$  потоков в состоянии  $O$ , определим значения вероятностей  $P_i, i = 1, \dots, z$ , выбрать на обслуживание пакет для каждого *конкретного* потока в состоянии  $O$ . В диссертации показано, что для предоставления всем потокам в состоянии  $O$  одинаковых шансов быть обслуженными вероятности  $P_i$  должны выбираться следующим образом:  $P_1 = P/z, P_i = P_{i-1}/(1 - P_{i-1}), i = 2, \dots, z$ .

Эффективность предложенной дисциплины была исследована с помощью имитационного моделирования в среде ns-3 передачи точкой доступа сети Wi-Fi нескольких реальных видеопотоков разным получателям в условиях кратковре-

менного отказа канала для одного из них. На рис. 4 представлена зависимость метрики MSE (от англ. Mean Squared Error — среднеквадратическая ошибка) оценки качества видеоизображения, определяемая как сумма MSE для всех его кадров, для «красного» и «зеленого» получателей в зависимости от длительности отказа канала при использовании различных дисциплин обслуживания очереди: FIFO,  $P$ -настойчивой дисциплины и адаптивного циклического планировщика (ARR), предложенного в литературе в качестве решения проблемы кратковременных отказов канала в сети Wi-Fi.  $P$ -настойчивая дисциплина позволяет почти полностью избежать ухудшения качества видеопотока для «зеленого» получателя и при этом осуществлять передачу видеопотока для «красного» получателя с малыми искажениями по сравнению как с дисциплиной FIFO, так и с ARR.

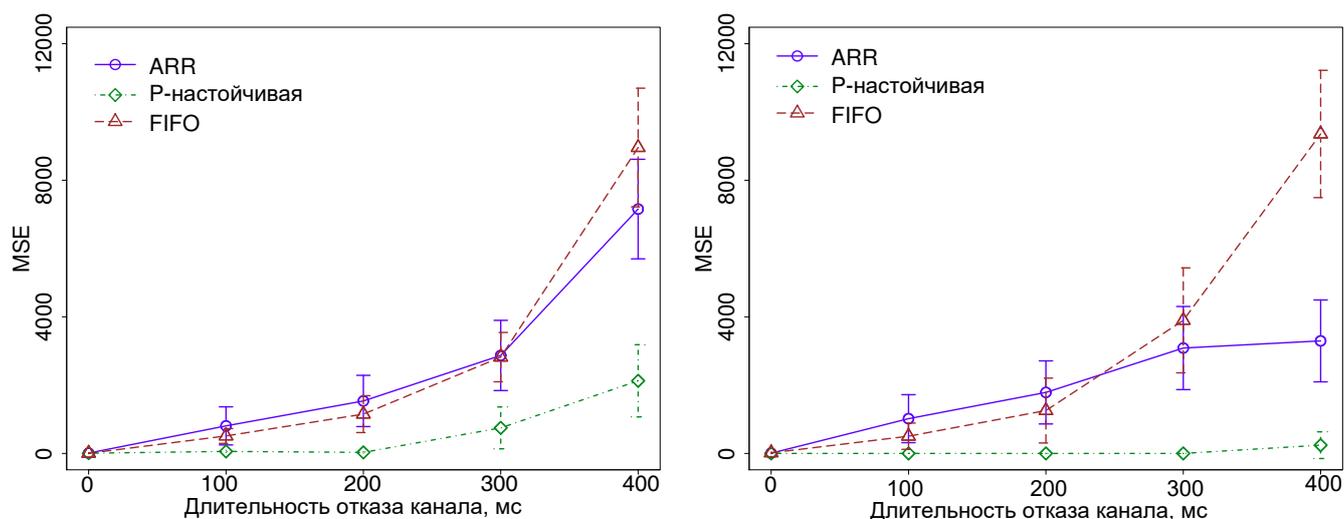


Рис. 4. Значение метрики MSE для «красного» (слева) и «зеленого» (справа) получателей.

Для корректной работы  $P$ -настойчивой дисциплины обслуживания очереди требуется задать значения входных параметров, для выбора которых в диссертации были предложены простые эмпирические алгоритмы. Чтобы оценить чувствительность дисциплины к ее параметрам, определить их оптимальные значения и оценить корректность выбора по эмпирическим алгоритмам, во второй главе была построена аналитическая модель рассматриваемой системы на основе цепи Маркова с дискретным временем.

Хотя оптимальные значения параметров  $P$ -настойчивой дисциплины обслуживания очереди не совпадают со значениями, полученными с помощью эмпирических алгоритмов, данное несоответствие приводит к незначительному различию в доле потерянных пакетов, что позволяет сделать вывод о возможности применения разработанных эмпирических алгоритмов в реальных устройствах. Аналитическое моделирование также подтвердило высокую эффективность  $P$ -настойчивой дисциплины обслуживания очереди по сравнению с дисциплиной FIFO.

**В третьей главе** рассматривается использование динамического подхода к установлению резервирований для передачи видеопотока реального времени, который представим в виде неординарного периодического потока  $G(t)$  переменной интенсивности, где  $G(t)$  — число пакетов в пачке, которая поступает в очередь в момент времени  $t$ . Так как интенсивность потока изменяется со временем, то

также изменяется и необходимый для передачи данного потока с выполнением требований к качеству обслуживания объем канального ресурса. Если для передачи потока устанавливается одно резервирование, то при изменении интенсивности потока необходимо сначала установить новое резервирование, а только после этого отменить старое, чтобы не нарушить выполнение требований к качеству обслуживания. Так как установление/отмена резервирования осуществляется с задержкой (см. рис. 1), то в ряде случаев такая стратегия может привести практически к удваиванию фактически занятого канального ресурса на интервале  $(t_0, t_2)$ , как показано на рис. 5 слева. Чтобы избежать подобной ситуации, можно устанавливать несколько малых резервирований, резервируя ресурс небольшими квантами, как показано на рис. 5 справа. Такой подход оказывается более гибким, позволяет уменьшить объем фактически занятого ресурса и рассматривается далее.

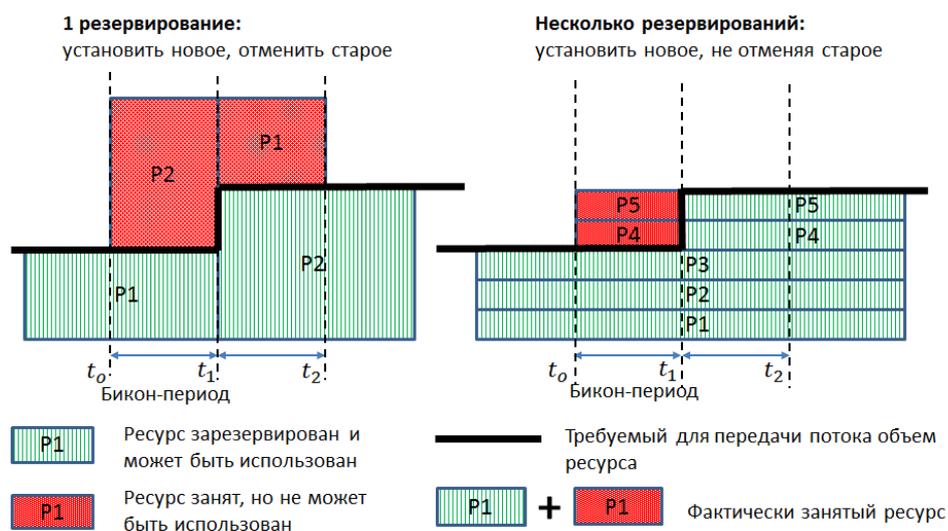


Рис. 5. Два подхода при динамическом резервировании ресурса.

Итак, пусть для передачи видеопотока станция-источник устанавливает множество резервирований, при этом период зарезервированных временных интервалов внутри каждого резервирования совпадает с периодом поступления в очередь пачек пакетов видеопотока. Временной интервал  $[t, t + 1)$  между поступлениями пачек назовем слотом с порядковым номером  $t$  (см. рис. 6). Длительности каждого зарезервированного временного интервала достаточно для осуществления одной попытки передачи пакета и получения кадра подтверждения доставки. Если пакет не доставлен за время  $D^{QoS}$  (далее значение  $D^{QoS}$  выражено целым числом слотов  $D = \lfloor D^{QoS} / \sigma \rfloor$ , где  $\sigma$  — длительность слота), он будет отброшен. Отметим, что из-за случайных помех в беспроводном канале и интерференции от удаленных станций даже внутри резервирований вероятность успешной попытки передачи  $p < 1$ , и иногда требуются повторные передачи, чтобы доля отброшенных пакетов внутри каждого бикон-периода не превышала ограничение  $PLR^{QoS}$ . Таким образом, возникают два вопроса: как резервировать ресурс, чтобы выполнить требования к качеству обслуживания и при этом как можно меньше занимать канал, а также как часто при этом надо рассылать биконы с информацией о резервированиях?

Чтобы ответить на данные вопросы, в третьей главе разрабатывается анали-

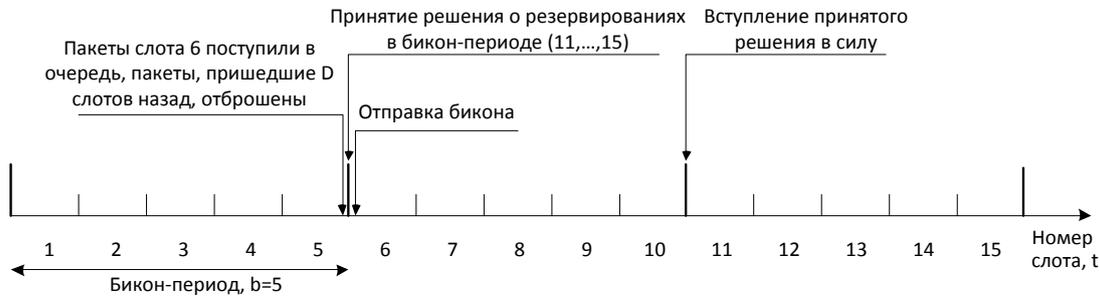


Рис. 6. Временная диаграмма.

тическая модель передачи видеопотока с помощью динамически устанавливаемых резервирований. Решение об установлении нового или об отмене существующего резервирования (т.е. решение об изменении величины  $u(t)$  — числа зарезервированных временных интервалов в слоте  $t$ ) принимается алгоритмом динамического резервирования ресурса непосредственно перед отправкой бикона (см. рис. 6), причем из-за задержки вступления решения в силу зарезервированный ресурс может быть использован только со следующего бикон-периода. Таким образом, процесс установления нового резервирования или отмены существующего занимает один бикон-период, длительность которого составляет  $b$  слотов, а значение  $u$  изменяется только на границе бикон-периода и одинаково во всех слотах бикон-периода.

Рассмотрим стохастический процесс последовательных изменений состояний системы от слота к слоту при передаче потока  $G(t)$ . Состояние системы в начале каждого слота  $t$  описывается двумя параметрами: размером очереди  $q$  и числом  $u$  зарезервированных интервалов в текущем слоте. Зная распределение вероятностей  $P_t^{q,u}$  состояний  $(q, u)$  в слоте  $t$ , можно найти распределение вероятностей  $P_{t+1}^{q',u'}$  различных состояний  $(q', u')$ , в которых система окажется в слоте  $t+1$ , в зависимости от вероятности  $p$  успешной попытки передачи в пакета в зарезервированном интервале, числа  $G(t)$  пакетов, поступающих в слоте  $t$ , и числа  $n(t)$  пакетов, время жизни которых истекает в данном слоте. Значение  $n(t)$  несложно определить, зная  $q(t)$ ,  $D$  и  $G(\tau|\tau \leq t)$ . Разработанная аналитическая модель позволяет вычислить среднюю долю потерянных пакетов и средний объем фактически занятого ресурса в каждом бикон-периоде и сравнить таким образом эффективность различных алгоритмов динамического резервирования ресурса.

Рассмотрим предложенные в третьей главе алгоритмы динамического резервирования ресурса, задача которых, как было упомянуто ранее, — в первом слоте  $t$  текущего бикон-периода зафиксировать число  $\hat{u}$  зарезервированных интервалов в каждом из слотов следующего бикон-периода, чтобы обеспечить выполнение требований к качеству обслуживания и при этом, по возможности, уменьшить объем фактически занятого канального ресурса, который из-за задержки при установлении и отмене резервирования, как показано в диссертации, определяется как максимум зарезервированного ресурса в данном бикон-периоде и двух соседних.

*Алгоритм 1.* Обозначим за  $d(t, u)$  среднее число потерянных пакетов в слоте  $t$  при условии, что в слоте зарезервировано  $u$  временных интервалов. Выражение для  $d(t, u)$  приведено в диссертации. Пусть в первом слоте  $t$  бикон-периода

$(t, \dots, t+b-1)$  система находится в состоянии  $(q(t), u(t))$ . Определим минимальное число временных интервалов  $\hat{u}_{t+b}$ , которое необходимо зарезервировать в каждом слоте бикон-периода  $(t+b, \dots, t+2b-1)$  для выполнения ограничения на долю потерянных пакетов:  $\hat{u}_{t+b} = \min \{u \in V \mid PLR(t+b, \dots, t+2b-1|u) < PLR^{QoS}\}$ , где  $PLR(t+b, \dots, t+2b-1|u) = \frac{\sum_{i=b}^{2b-1} d(t+i, u)}{\sum_{i=b}^{2b-1} G(t+i-D+1)}$  — доля потерянных пакетов в бикон-периоде  $(t+b, \dots, t+2b-1)$  при условии, что в каждом его слоте зарезервировано  $u$  временных интервалов, а  $V$  — множество допустимых значений  $u$  (например, для определенности, множество неотрицательных целых чисел). Для этого найдем распределение вероятностей длины очереди в первом слоте следующего бикон-периода, после чего искомое значение  $\hat{u}_{t+b}$  может быть найдено перебором путем оценки доли потерянных пакетов в следующем бикон-периоде при различных значениях  $u$ .

Отметим, что такой алгоритм резервирует ресурс для передачи пакета непосредственно перед тем, как истечет время жизни пакета, что приводит к сильной флуктуации в объеме зарезервированного ресурса и, как следствие, к росту фактически занятого канального ресурса.

*Алгоритм 2.* В отличие от алгоритма 1, алгоритм 2, подробно изложенный в диссертации, планирует выделяемый ресурс заранее, т.е. как только пакеты поступили в очередь, и при этом стремится распределить резервируемый канальный ресурс более равномерно на интервале длительностью  $D$  слотов, что позволяет снизить объем фактически занятого канального ресурса. Однако для этого алгоритм 2 оценивает долю потерянных пакетов на больших интервалах, чем бикон-период, что иногда приводит к нарушению ограничения на долю потерянных пакетов в некоторых бикон-периодах.

Чтобы не допустить нарушения этого ограничения и при этом эффективно передавать поток с пульсирующей пиковой нагрузкой, алгоритм 3 использует гибридный подход: вначале объем ресурса, который необходимо выделить в следующем бикон-периоде, вычисляется согласно алгоритму 2, затем выполняется проверка выполнения ограничения на долю потерянных пакетов в следующем бикон-периоде. Если проверка оказывается неуспешной, то объем ресурса для следующего бикон-периода вычисляется повторно с помощью алгоритма 1.

С использованием аналитической модели в третьей главе проведено сравнение эффективности предложенных алгоритмов. Было показано, что использование алгоритмов 2 и 3 позволяет значительно снизить объем фактически занятого канального ресурса по сравнению с алгоритмом 1. Однако при использовании алгоритма 2 ограничение  $PLR^{QoS}$  иногда может быть нарушено, что показывает целесообразность использования алгоритма 3. Также было показано, что уменьшение длительности бикон-периода при использовании алгоритма 3 позволяет снизить объем фактически занятого канального ресурса, приближая его значение к теоретическому минимуму.

Кроме того, также было изучено влияние длительности бикон-периода на объем потребленного канального ресурса с учетом накладных расходов на пери-

одическую рассылку служебной информации о резервированиях. Показано, что существует оптимальное значение периода рассылки информации о резервированиях, использование которого позволяет выполнить требования к качеству обслуживания передаваемого потока и при этом минимизировать объем потребленного канального ресурса с учетом накладных расходов.

**В четвертой главе** рассматривается статический подход к установлению резервирования для передачи  $N$  видеопотоков реального времени. Если станции требуется передать  $N$  потоков, адресованных одному или нескольким получателям, она может либо установить индивидуальные резервирования для передачи каждого потока, либо установить единое общее резервирование для передачи всех потоков, т.е. для передачи мультиплексированного потока. Использование общего резервирования для передачи нескольких видеопотоков реального времени может снизить флуктуацию интенсивности мультиплексированного потока, а также позволит автоматически распределить имеющийся «запас» между различными потоками при необходимости осуществления дополнительных попыток передачи и таким образом уменьшить объем зарезервированного канального ресурса. Чтобы минимизировать объем зарезервированного канального ресурса, необходимо найти такой наибольший период общего резервирования, при котором требования к качеству обслуживания выполнены для каждого из передаваемых потоков. Для решения данной задачи в четвертой главе разрабатывается аналитическая модель передачи нескольких видеопотоков в условиях помех с помощью общего периодического резервирования, которая позволяет определить долю потерянных пакетов для каждого потока при ограничении на время доставки пакета и при заданном периоде резервирования. Несмотря на то что модель решает обратную задачу, как показано в диссертации, полученные результаты позволяют решить также и прямую задачу. Далее опишем рассматриваемый сценарий более подробно.

Как и ранее, пакеты каждого видеопотока поступают в очередь станции-источника пачками, каждая из которых соответствует отдельному видеокадру. Предполагается, что периоды  $T_{in}$  поступления в очередь пачек каждого видеопотока совпадают, что соответствует одинаковому периоду генерации видеок кадров в каждом из потоков. Такое предположение позволяет пронумеровать потоки в порядке поступления их пачек в очередь. Пусть  $Z_n$  — промежуток времени между поступлением в очередь пачки пакетов потока номер  $n$ ,  $n \in \overline{0, N-1}$ , и пачки пакетов следующего потока. Заметим, что  $\sum_{n=0}^{N-1} Z_n = T_{in}$ . Число пакетов в пачке задается дискретным распределением с ограниченным набором значений:  $p_n^m$ ,  $m \in \overline{1, M}$ , — вероятность того, что пачка пакетов потока номер  $n$  содержит  $m$  пакетов, где  $M$  — максимальное число пакетов в пачке.

Для каждого потока заданы требования к качеству обслуживания, которые представляют собой ограничение на долю потерянных пакетов  $PLR^{QoS}$ , а также ограничение на время доставки пакета  $D^{QoS}$ . Если пакет не доставлен за время  $D^{QoS}$ , то он отбрасывается. В четвертой главе исследуется случай, когда ограничение  $D^{QoS}$  одинаково для всех потоков, в то время как ограничения  $PLR^{QoS}$  могут

отличаться.

Для передачи потоков станция-источник резервирует периодические временные интервалы, период которых составляет  $T_{res}$ . Так как даже бесколлизийный доступ к каналу в зарезервированных интервалах не всегда может защитить передачу от интерференции и случайного шума, для каждого потока вводится вероятность  $q_n$  неуспешной попытки передачи пакета, которая определяется качеством беспроводного канала между источником и получателем данного потока и зависит от местоположения получателя. Получение пакета данных подтверждается с помощью отправки кадра подтверждения. Длительности зарезервированного интервала достаточно как для передачи пакета данных в прямом направлении, так и для передачи в обратном направлении кадра подтверждения. Станция-источник осуществляет повторные попытки передачи пакета данных до тех пор, пока либо не будет получен кадр подтверждения, либо не истечет время жизни пакета. Далее станция переходит к обслуживанию следующего пакета в очереди, если такой имеется.

Определим слот  $\tau$  как наибольший общий делитель  $T_{res}, Z_0, \dots, Z_{N-1}$  и будем выражать длительности всех временных интервалов в целом числе слотов:  $t_{res} = \frac{T_{res}}{\tau}, z_0 = \frac{Z_0}{\tau}, \dots, z_{N-1} = \frac{Z_{N-1}}{\tau}, t_{in} = \frac{T_{in}}{\tau}$ .

Разобьем временную ось на слоты  $\tau$  таким образом, что начало каждого из зарезервированных интервалов совпадает с началом одного из слотов. Пусть  $\xi$  — промежуток времени между поступлением пачки пакетов в очередь и началом ближайшего слота. Так как  $\tau$  является наибольшим общим делителем  $T_{res}, Z_0, \dots, Z_{N-1}$ , то  $\xi$  одинаков для всех пачек.

Тогда передачу видеопотоков можно описать с помощью цепи Маркова с дискретным временем, единица которого соответствует периоду резервирования  $t_{res}$ , т.е. моменты  $t$  и  $t+1$  модельного времени соответствуют началам двух последовательных зарезервированных временных интервалов. Очевидно, что  $t_{res} \leq t_{in}$ , так как каждая поступающая в очередь пачка пакетов содержит как минимум один пакет, для успешной передачи которого потребуется не менее одного зарезервированного временного интервала. В каждый момент  $t$  опишем состояние системы тройкой целых чисел:  $(h, n, m)$ .

Значение  $h$  показывает возраст головного пакета в очереди, выраженный в слотах. Если  $h < 0$ , то очередь пуста и  $|h|$  определяет время, выраженное в слотах, до поступления очередной пачки пакетов в очередь. Очевидно, что максимальное значение  $h$  определяется ограничением  $D^{QoS}$  на время доставки пакета и равняется  $d = \left\lfloor \frac{D^{QoS} - \xi}{\tau} \right\rfloor$ . Минимальное значение  $h$  составляет  $h_{min} = t_{res} - \max_n z_n$ .

Значение  $n$  определяет поток, которому принадлежит головная пачка пакетов в очереди, а  $m$  — число пакетов в данной пачке. Если  $h < 0$ , эти два параметра описывают пачку пакетов, которая должна поступить в очередь следующей.

В главе 4 определяются возможные переходы между состояниями цепи Маркова и находятся их вероятности, на основе которых определяются стационарные вероятности  $\pi_{(h,n,m)}$  нахождения системы в состоянии  $(h, n, m)$ .

Долю  $PLR_n$  потерянных пакетов для потока номер  $n$  определим как отноше-

ние среднего числа  $I_n^d$  пакетов потока номер  $n$ , которые отбрасываются из очереди за единицу модельного времени, к среднему числу  $I_n^{in}$  пакетов потока номер  $n$ , которые поступают в очередь за единицу модельного времени.

$$I_n^{in} = \sum_{m=1}^M m p_n^m \frac{t_{res}}{t_{in}}.$$

$$I_n^d = \sum_{h=d-t_{res}+1}^d \sum_{m=1}^M [q_n m + (1 - q_n)(m - 1)] \pi(h, n, m) + \sum_{h=d-t_{res}+1}^d \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \sum_{n'=n+1}^{n+N-1} p_n^m m \pi(h, n' \bmod N, m') 1[condition],$$

где  $[condition]$  — это  $\left[ h + t_{res} - \sum_{i=1}^{n'-n} z_{(n'+i-1) \bmod N} > d \right]$ , а  $1[condition]$  — индикатор, который равен 1, если условие  $[condition]$  выполнено, и 0 иначе.

Поясним выражение для  $I_n^d$ . Напомним, что пакеты отбрасываются из очереди, только если истекает их время жизни, что может случиться только в таких состояниях  $(h, n, m)$ , для которых  $d - t_{res} < h \leq d$ . В таких состояниях могут быть отброшены не только пакеты потока номер  $n$ , но также и пакеты следующих потоков. Для потока номер  $n$  с вероятностью  $q_n$  вся пачка из  $m$  пакетов будет отброшена, а с вероятностью  $1 - q_n$  один пакет из данной пачки будет успешно передан, а остальные  $m - 1$  пакетов будут отброшены. За это отвечает первое слагаемое. Пакеты потока номер  $n$  также могут быть отброшены в состояниях с  $n' \neq n$ , если интервал между поступлениями в очередь пачек пакетов потоков  $n$  и  $n'$  достаточно мал. За это отвечает второе слагаемое.

Таким образом, используя разработанную аналитическую модель, можно определить зависимость  $PLR(T_{res})$  и при заданном ограничении  $PLR^{QoS}$  выбрать наибольший период резервирования, при котором требования к качеству обслуживания выполнены для всех передаваемых потоков.

Разработанная аналитическая модель также позволяет оценить выигрыш в объеме зарезервированного канального ресурса от использования общего резервирования по сравнению с использованием индивидуальных резервирований. Например, при передаче  $N = 5$  одинаковых потоков и малом ограничении  $PLR^{QoS}$  применение общего резервирования позволяет почти в 2 раза снизить объем зарезервированного канального ресурса, как показано на рис. 7.

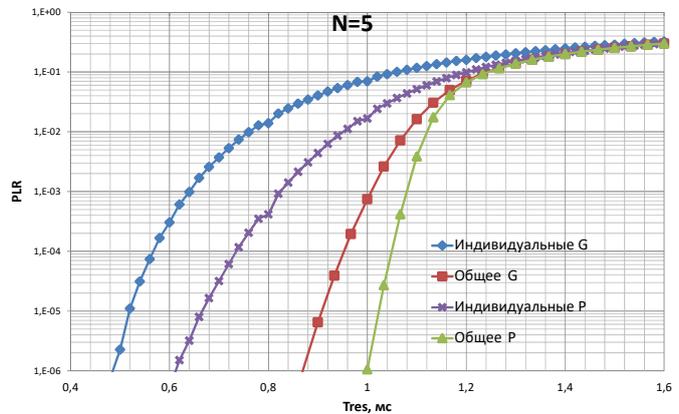


Рис. 7. Зависимость  $PLR$  от  $T_{res}$  для  $N = 5$  потоков с геометрическим (G) или пуассоновским (P) распределением размера пачки пакетов при использовании общего или индивидуальных резервирований.

Одними из входных параметров аналитической модели являются вероятности неуспешной попытки передачи пакета каждого из потоков. Так как оценочные значения этих вероятностей, подающиеся на вход модели, на практике могут отличаться от реальных значений, которые также могут флуктуировать с течением времени, в данной главе было проведено исследование чувствительности аналитической модели к данным параметрам. Было показано, что резервирование канального ресурса даже с небольшим запасом в размере 10% позволяет выполнить требования к качеству обслуживания передаваемых потоков даже при значительной ошибке в оценке вероятностей неуспешной попытки передачи пакета.

## Основные результаты

В диссертации проведены разработка и моделирование методов, применяемых на уровне доступа к каналу в сетях Wi-Fi для доставки видеопотоков реального времени с выполнением требований к качеству обслуживания. В частности:

1. Предложена и исследована дисциплина обслуживания очереди в условиях кратковременных отказов канала при передаче видеопотоков реального времени в сети Wi-Fi, которая позволяет почти полностью избежать ухудшения качества передачи видеопотоков для получателей без отказов канала и при этом осуществлять передачу видеопотоков для получателей с отказом канала с малыми искажениями по сравнению с дисциплиной FIFO, а также предложены эмпирические алгоритмы настройки параметров данной дисциплины.

2. Построена аналитическая модель передачи видеопотоков реального времени в сети Wi-Fi в условиях кратковременных отказов канала, позволяющая оценить чувствительность разработанной дисциплины обслуживания очереди к ее параметрам, определить их оптимальные значения и оценить корректность предложенных эмпирических алгоритмов настройки этих параметров.

3. Разработаны и исследованы новые алгоритмы динамического резервирования канального ресурса в сети Wi-Fi для передачи видеопотока реального времени в условиях помех, учитывающие задержку вступления решения в силу.

4. Построена аналитическая модель передачи видеопотока реального времени по сети Wi-Fi с использованием динамического резервирования канального ресурса, при помощи которой проведено сравнение эффективности предложенных в диссертации алгоритмов.

5. Разработана аналитическая модель передачи нескольких видеопотоков реального времени в условиях помех с помощью общего периодического резервирования, которая позволяет определить оптимальный период резервирования, а также оценить эффективность от применения общего резервирования для передачи нескольких видеопотоков по сравнению с использованием индивидуальных резервирований для каждого видеопотока.

## Список публикаций

1. Kiryanov A. G., Lyakhov A. I., Khorov E. M. Modeling of Real-Time Multimedia Streaming with Deterministic Access // Journal of Communications Technology

- and Electronics. 2014. Vol. 59, no. 12. Pp. 1501–1511.
2. Khorov E.M., Kiryanov A.G., Loginov V.A., Lyakhov A.I. Analytical Model of a P-Persistent Method of Queue Management for Multimedia Streaming over Wireless Networks // Journal of Communications Technology and Electronics. 2015. Vol. 60, no. 12. Pp. 1389–1402.
  3. Guschin Andrey, Khorov Evgeny, Kiryanov Anton, Lyakhov Andrey, Safonov Alexander. P-Persistent Queue Management to Overcome Channel Failures in IEEE 802.11 Networks for Real-Time Multimedia Streaming // Lecture Notes in Computer Science, Vol. 8072. 2013. Pp. 69–79.
  4. Khorov E., Kiryanov A., Loginov V., Lyakhov A. Head-of-line blocking avoidance in multimedia streaming over wireless networks // Proc. of 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication (PIMRC). 2014. Pp. 1142–1146.
  5. Khorov Evgeny, Kiryanov Anton, Lyakhov Andrey. QoS-aware Streaming With HCCA TXOP Negotiation in Overlapped Wi-Fi Networks // Proc. of IFIP Wireless Days. Toulouse, France: 2015.
  6. Khorov Evgeny, Kiryanov Anton, Lyakhov Andrey. Analysis of Multiplexed Streaming via Periodic Reservations of Wireless Channel // Proc. of IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom). Varna, Bulgaria: 2014. — June. Pp. 1142–1146.
  7. Кирьянов А.Г., Ляхов А.И., Хоров Е.М. Анализ алгоритмов децентрализованного динамического резервирования канальных ресурсов для передачи потоковых данных в сетях Wi-Fi // Информационные процессы. 2016. Т. 16, № 2. С. 207–222.
  8. А.Г. Кирьянов, В.А. Логинов, Е.М. Хоров. Модифицированная р-настойчивая политика обслуживания очереди для преодоления кратковременных отказов канала при передаче видеопотоков реального времени в сетях Wi-Fi // Труды конференции «Информационные технологии и системы». 2013. С. 455–462.
  9. А.Г. Кирьянов, А.И. Ляхов, Е.М. Хоров. Модель передачи мультимедийных потоков реального времени при помощи детерминированного метода доступа // Труды конференции «Информационные технологии и системы». 2014. С. 105–114.
  10. А.Г. Кирьянов, В.А. Логинов, Е.М. Хоров. Анализ методов борьбы с кратковременными помехами при передаче видеопотоков реального времени // Труды конференции «Информационные технологии и системы». 2014. С. 514–522.
  11. А.Г. Кирьянов, А.И. Ляхов, Е.М. Хоров. Аналитическая модель передачи мультимедийных потоков при помощи общих периодичных резервирований беспроводного канала // Труды конференции «Информационные технологии и системы». 2015. С. 596–612.
  12. А.Г. Кирьянов, В.А. Логинов, Е.М. Хоров. Анализ методов предотвращения блокирования очереди головным пакетом при передаче видеопотоков реального времени в сетях стандарта IEEE 802.11 // Труды конференции «Инжиниринг & Телекоммуникации». 2014. С. 85–86.