

На правах рукописи



Пастушок Игорь Анатольевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
РЕСУРСОВ РАДИОКАНАЛА ДЛЯ АДАПТИВНОЙ ПОТОКОВОЙ
ПЕРЕДАЧИ ВИДЕОДАНЫХ**

Специальность 05.12.13 — «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Тюрликов Андрей Михайлович

Официальные оппоненты: **Парамонов Александр Иванович**
доктор технических наук, профессор кафедры «Сетей связи и передачи данных» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»
Муравьева-Витковская Людмила Александровна
кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительной техники» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук» («ИППИ РАН»), г. Москва**

Защита состоится 20 февраля 2018 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 212.233.05 в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67, ауд. 53-01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО ГУАП и на сайте www.guap.ru.

Автореферат разослан 15 января 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Овчинников Андрей Анатольевич
к.т.н., доцент

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящий момент времени огромной популярностью обладают сервисы хранения и передачи видео по протоколу прикладного уровня HyperText Transfer Protocol (HTTP). Данное явление вызвано множеством факторов, такими как бурное развитие мобильных устройств, увеличение аудитории социальных сетей и их плотная интеграция с сервисами хранения видеоконтента, рост популярности дистанционного обучения, видеокурсов, видеолекций и т. д. Подобная комбинация факторов приводит к доминированию передачи видеоданных в современных телекоммуникационных системах.

Важной особенностью передачи видео по протоколу HTTP является наличие двух технологий организации передачи видеоданных: неадаптивная (HTTP Progressive Download) и адаптивная (HTTP Adaptive Streaming), представленные в стандарте Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (DASH). В настоящее время пользователи обладают высокой мобильностью, что приводит к использованию беспроводных сетей связи в качестве носителя информации. Рост объемов видеотрафика приводит к экстремальным нагрузкам на беспроводную сеть, что проявляется в появлении эффектов деградации качества обслуживания абонентов: увеличение длительности ожидания начала воспроизведения и прерывание проигрывания видеоконтента при просмотре.

Общая производительность беспроводных централизованных сетей во многом определяется аспектами работы с беспроводным каналом связи, а именно алгоритмом распределения частотно-временных ресурсов между пользователями. В современных стандартах связи распределение ресурсов осуществляет алгоритм планирования (планировщик), установленный на канальном уровне базовой станции. Планировщики не регламентируются стандартами, и каждый производитель оборудования по собственному усмотрению выбирает принципы, в соответствии с которыми будет организовано распределение ресурсов радиоканала, что имеет непосредственное влияние на производительность системы в целом.

Таким образом, актуальной является задача исследования и разработки алгоритмов планирования для беспроводных централизованных сетей, которые обеспечивают высокую производительность и достаточный уровень качества восприятия при передаче видеоданных по протоколу HTTP.

Степень разработанности темы. В основе исследования производительности алгоритмов планирования в беспроводных централизованных сетях для передачи видеоданных использовалась теория замкнутых систем массового обслуживания с конечным числом абонентов, проработанная А. Scherr, L. Kleinrock, Б.С. Цыбаковым, В.М. Вишневым и А.И. Ляховым. Применение настоящей теории к исследованиям систем передачи видеоданных было представлено в ряде работ отечественных: Е.А. Бакин, Г.С. Евсеев, А.И. Парамонов, и зарубежных авторов: А. El Essaili, О. Ouyman, V. Ramamurthi, исследующих производительность алгоритмов планирования для передачи видеоконтента. В большинстве подобных работ рассматривается неадаптивная технология передачи и предлагаются подходы для увеличения производительности в соответствии с рассматриваемым критерием качества восприятия.

Целью настоящего диссертационного исследования является определение, вычисление и построение численных показателей максимально возможной производительности алгоритмов распределения ресурсов радиоканала при использовании адаптивной и неадаптивной технологии передачи видеоданных по протоколу НТТР, и разработка алгоритмов планирования распределения ресурсов беспроводного канала на базовой станции, производительность которых близка к максимально достижимой производительности.

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

1. Исследовать технологии адаптивной и неадаптивной передачи видеоданных по протоколу НТТР;
2. Исследовать методы и критерии оценки качества восприятия видеоряда для адаптивной и неадаптивной передачи видеоданных и выделить факторы, обладающие наибольшим влиянием на качество восприятия;
3. Ввести модель системы передачи видеоданных, включающую в себя модели компонентов системы передачи видео и беспроводной централизованной сети, и найти взаимосвязь между ее параметрами;
4. Предложить аналитические оценки максимально возможной производительности алгоритмов распределения ресурсов радиоканала для исследованных критериев качества восприятия при адаптивной и неадаптивной передаче видеоданных по протоколу НТТР;

5. Разработать алгоритм распределения ресурсов радиоканала, основанный на полученных аналитических результатах, и провести сравнение его производительности с существующими алгоритмами.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является беспроводная централизованная телекоммуникационная система с доминированием передачи видеоданных по протоколу НТТР.

Предмет исследования составляет алгоритм распределения частотно-временных ресурсов беспроводного канала связи на базовой станции при адаптивной потоковой передаче видеоданных по протоколу НТТР.

Методология и методы исследования. При получении основных результатов работы использовались общие методы теории вероятностей и математической статистики, теории случайных процессов, методы математической оптимизации, в частности нелинейного и невыпуклого программирования, а также методы имитационного моделирования.

Научная новизна:

1. Построена трехкомпонентная модель системы передачи видеоданных по протоколу НТТР в беспроводных централизованных сетях связи, учитывающая изменчивость во времени характеристик радиоканала. Построенная модель позволяет провести аналитические исследования и сравнение производительности алгоритмов распределения ресурсов беспроводного канала;
2. Для построенной модели найдена взаимосвязь между характеристиками сети передачи данных и воспроизведением видеоряда при передаче видео по НТТР протоколу;
3. Предложен алгоритм вычисления нижней границы нормированного отношения длительностей буферизации и просмотра при неадаптивной передаче видеоданных;
4. Предложен и реализован алгоритм планирования, обладающий большей производительностью, чем ранее известные алгоритмы, для критерия нормированного отношения длительностей буферизации и просмотра при неадаптивной передаче видеоданных;
5. Предложен алгоритм вычисления нижней границы отношения длительностей буферизации и просмотра с учетом средней битовой скорости видеопотока при адаптивной передаче видеоданных.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы. Полученные в диссертационной работе результаты позволяют получить количественные оценки максимально возможной производительности беспроводных централизованных сетей и повысить производительность алгоритмов распределения ресурсов радиоканала для адаптивной потоковой передачи видеоданных. Полученные результаты могут быть использованы для формирования требований к разрабатываемым стандартам связи текущего и последующих поколений.

Степень достоверности. Результаты, полученные в диссертации, согласуются с известными исследованиями передачи видеоданных по протоколу НТТР в беспроводных сетях. Основные результаты опубликованы в рецензируемых журналах и доложены на крупных международных конференциях.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах в период с 2013 по 2017 гг.: на научных сессиях ГУАП; на конференции «СПИСОК-2014» на 15-й конференции «Conference of Open Innovations Association FRUCT»; на 15-м симпозиуме «Problems of Redundancy in Information and Control Systems».

Внедрение результатов. Результаты работы были использованы в рамках проекта «Разработка промышленной технологии создания программно-аппаратного комплекса для передачи данных, аудио- и видеоинформации по низкоскоростным и нестабильным каналам связи в реальном масштабе времени» ПАО «Интелтех». Кроме того, результаты работы используются в учебном процессе кафедры инфокоммуникационных систем и кафедры безопасности информационных систем ГУАП.

Личный вклад. Все результаты, представленные в тексте диссертационной работы, получены автором лично.

Публикации. Материалы, отражающие основное содержание и результаты диссертационной работы, достаточно полно опубликованы в 12 печатных работах. Из них 2 работы опубликованы в рецензируемых научных журналах, утвержденных в перечне ВАК, и 3 работы опубликованы в изданиях, индексируемых в Scopus.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модель беспроводной централизованной системы связи при передаче видеоданных по протоколу НТТР, учитывающая изменчивость

во времени характеристик радиоканала и позволяющая производить аналитические исследования алгоритмов распределения ресурсов радиоканала.

2. Взаимосвязь характеристик беспроводной централизованной сети и воспроизведения видеоряда при передаче видео по протоколу НТТР.
3. Алгоритм вычисления нижней границы нормированного отношения длительностей буферизации и просмотра при неадаптивной передаче видеоданных.
4. Алгоритм распределения ресурсов радиоканала, обладающий большей производительностью, чем ранее известные алгоритмы, для критерия нормированного отношения длительностей буферизации и просмотра при неадаптивной передаче видеоданных.
5. Алгоритм вычисления нижней границы отношения длительностей буферизации и просмотра с учетом средней битовой скорости видеопотока при адаптивной передаче видеоданных.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списков литературы, иллюстративного материала и таблиц, и четырех приложений. Полный объем диссертации составляет 143 страницы с 29 рисунками и 11 таблицами. Список литературы содержит 52 наименований.

Содержание работы

Во *введении* обоснована актуальность исследования алгоритмов распределения ресурсов радиоканала при передаче видео по протоколу НТТР в беспроводных централизованных сетях связи, представлена научная новизна диссертационной работы и ее практическая ценность сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В *первом разделе* рассматриваются особенности организации передачи видеоданных по протоколу НТТР в современных телекоммуникационных сетях, обзревается существующие технологии передачи видеоданных и методологии оценки качества восприятия видеоданных при их прохождении через сеть передачи данных. На основе проведенного обзора формируются модели системы передачи видеоданных и критерии качества восприятия видеопотоков.

Производительность телекоммуникационных систем при передаче видеоданных определяется удовлетворенностью пользователей воспроизведением видеоданных при их прохождении через сеть. Удовлетворенность пользователя возможно охарактеризовать критериями качества восприятия (Quality of Experience), которые позволяют на основе некоторого массива объективных показателей работы сети оценить субъективное восприятие пользователем качества обслуживания. Общепринятым подходом к оценке качества восприятия является Mean Opinion Score (MOS) – семейство сложных функций, позволяющее оценить удовлетворенность пользователя по шкале от одного до пяти в зависимости от огромного массива статистик воспроизведения видеопотока и технологии передачи видео: **адаптивной** (автоматически адаптирует битовую скорость видеопотока под условия канала связи) и **неадаптивной**. В результате обзора известных видов функций MOS и их аппроксимаций были выделены основные факторы, влияющие на качество восприятия видеоданных в зависимости от технологий передачи:

- Фактор длительности ожидания (буферизации) в течении просмотра видеопотока: **Неадаптивная** и **Адаптивная** технологии;
- Средняя битовая скорость видеопотока: **Адаптивная**.

Было установлено, что удовлетворенность пользователя просмотром, и, как следствие, производительность телекоммуникационной системы, обратно пропорциональна значению фактора буферизации и прямо пропорциональна средней битовой скорости потока. Известны два критерия качества восприятия, характеризующие фактор буферизации для конкретного пользователя i :

- *Нормированное отношение длительностей буферизации и просмотра:*

$$g_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{b_i^T}{w_i^T + b_i^T}, \quad (1)$$

где b_i^T – общая длительность буферизации пользователя i за время T ,
 w_i^T – общая длительность просмотренного видео пользователем i за время T ,

- *Отношение длительностей буферизации и просмотра:*

$$q_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{b_i^T}{w_i^T}. \quad (2)$$

В настоящее время широко исследована производительность беспроводных систем при использовании неадаптивной технологии для критерия качества (2), однако, для критерия (1) отсутствуют исследования производительности беспроводных систем связи при передаче видеоданных по протоколу НТТР.

Далее в диссертационном исследовании проводится анализ производительности беспроводной системы связи для критерия качества (1) при использовании неадаптивной технологии передачи видеоданных, и критерия качества (2) при адаптивной технологии передачи видеоданных.

Во *втором разделе* предлагается модель беспроводной централизованной сети передачи видеоданных по протоколу НТТР, позволяющая провести аналитический анализ производительности подобных систем.

Рассматриваемая модель системы описывает работу беспроводной централизованной телекоммуникационной сети с конечным числом абонентов, равным N , подключенных к одной базовой станции по радиоканалу (рисунок 1). Настоящая модель системы включает в себя несколько локальных моделей:

Видеосервер хранит набор видеопоследовательностей, разделенных на сегменты равной длительности. При получении запроса от пользователя i на сегмент j сервер осуществляет последовательную отправку $P_{i,j}$ пакетов равного размера.

Поведение пользователя. Пользователь просматривает последовательность видеороликов. В начале каждого ролика видеоплеером осуществляется начальная буферизация видеопотока, после чего начинается демонстрация пользователю загруженных данных. Если скорость получения данных ниже выбранной битовой скорости потока, то пользователь будет наблюдать прерывания воспроизведения, вызванные повторными буферизациями. По окончании просмотра видеоролика пользователь выбирает следующий ролик для просмотра через случайную паузу с конечным математическим ожиданием и дисперсией.

Беспроводная система передачи данных. Все время работы настоящей системы разделено на периоды (слоты) равной длительности. В каждом слоте на базовой станции производится разделение частотно-временных ресурсов радиоканала между пользователями. Модель такой системы определяется двумя локальными моделями: *беспроводного канала* и *планировщика ресурсов беспроводного канала*.

Определяющий вклад в производительность беспроводных систем вносит алгоритм планирования распределения ресурсов беспроводного канала на базовой станции. Именно данный компонент системы принимает решение о выделении ресурсов радиоканала пользователям, что имеет непосредственное влияние на скорость передачи данных, и, как следствие, удовлетворенность пользователя качеством обслуживания.

Пользовательское устройство. Программно-аппаратный комплекс с установленным видеоплеером, который осуществляет последовательную загрузку сегментов видеоданных с **Видеосервера**.

Ниже представлены основные допущения, используемые в настоящих моделях.

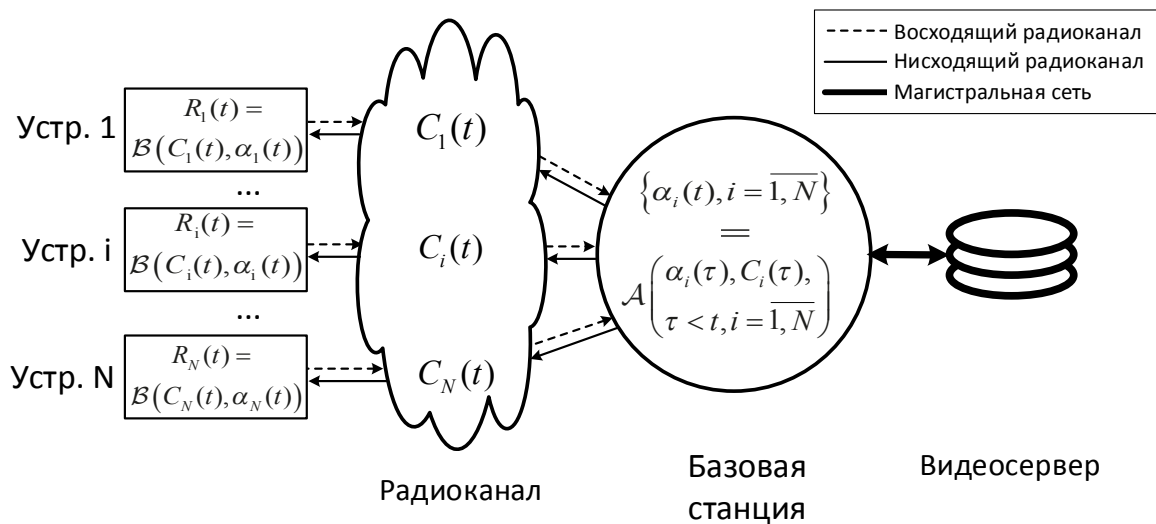


Рис. 1 — Структура модели передачи видеоданных в централизованных беспроводных сетях

Видеосервер. Каждый сегмент видеоданных j представлен в непрерывном отрезке битовых скоростей: $R_{i,j} \in [R_{min}, R_{max}], i = \overline{1, N}$.

Модель поведения пользователя характеризуется коэффициентом разреженности видеопотока пользователя i – отношение суммы длительностей просмотра и пауз к длительности просмотра пользователя i за интервал времени $T \rightarrow \infty$:

$$\gamma_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{w_i^T + p_i^T}{w_i^T}.$$

Пользователь является активным в момент времени t , если он осуществляет загрузку в данный момент, иначе, пользователь считается неактивным.

Беспроводная система передачи данных. В беспроводном канале связи затухание сигнала при распространении происходит одинаково по всей ширине полосы передачи данных для конкретного пользователя в одном моменте времени. Введем в рассмотрение величину $C_i(t)$, равную скорости передачи данных по беспроводному каналу, если все доступные ресурсы были выделены i -му пользователю в момент времени t , которую далее будем называть максимально достижимой скоростью канала.

Используемые допущения для модели *беспроводного канала*:

- При передаче одного пакета k из сегмента j пользователем i в нисходящей линии связи максимально достижимая скорость радиоканала постоянна:

$$C_i(t) = C_{i,j,k}, t_{i,j,k} \leq t \leq t_{i,j,k} + \Delta t_{i,j,k},$$

где $t_{i,j,k}$ – момент времени начала загрузки пользователем i пакета k из сегмента j , $\Delta t_{i,j,k}$ – длительность загрузки пользователем i пакета k из сегмента j , $C_{i,j,k}$ – максимально достижимая скорость канала пользователя i в течении загрузки пакета k из сегмента j .

- Последовательности случайных величин: $C_{i,1}^{-1}, C_{i,2}^{-1}, \dots, i = \overline{1, N}$, где $C_{i,j}^{-1} = \frac{1}{P_{i,j}} \sum_{k=1}^{P_{i,j}} \frac{1}{C_{i,j,k}}$, формируют эргодические случайные процессы с конечными математическими ожиданиями $E[C_i^{-1}]$ и коэффициентами вариации ν_i^C соответственно.

В каждый момент времени t , *алгоритм планирования* распределяет доли ресурсов канала $\alpha_i(t)$ для всех пользователей: $A(t) = \{\alpha_i(t), i = \overline{1, N}\}$. Очевидным ограничением на работу алгоритма планирования является конечность объема доступных ресурсов:

$$\forall t : \sum_{i=1}^N \alpha_i(t) \leq 1.$$

Для решения задачи распределения ресурсов планировщику доступна информация о предыстории, а именно доли выделенных ресурсов канала, значения максимально достижимых скоростей канала и объем переданных данных для каждого пользователя:

$$A(t) = \mathcal{A}(\alpha_i(\tau), C_i(\tau); \tau < t, i = \overline{1, N}),$$

где $\mathcal{A}(\cdot)$ является алгоритмом планирования.

Используемые допущения для модели *алгоритма планирования*:

- Планировщик распределяет все доступные ресурсы канала в каждый момент времени;
- Планировщик не выделяет ресурсы неактивным пользователям;
- В любой момент времени каждому активному пользователю гарантируется минимальная доля ресурсов канала.

Пользовательские устройства. При заказе видеоплеером нового сегмента видеоданных решается задача выбора битовой скорости для заказываемого сегмента, которая представлена следующим выражением:

$$R_{i,j} = \mathcal{B}(R_{i,k}, C_i(\tau), \alpha_i(\tau); k < j, \tau < t_{i,j}),$$

где $\mathcal{B}(\cdot)$ является алгоритмом вычисления битовой скорости j -го сегмента пользователя i , $R_{i,j}$ – битовая скорость j -го сегмента пользователя i , $t_{i,j}$ – момент времени заказа пользователем i сегмента под номером j .

Используемые допущения:

- Частота переключений битовой скорости ограничена:

$$\forall i : \frac{\sigma[R_i]}{E[R_i]} \leq \nu_i^R,$$

где $E[R_i] = \lim_{j \rightarrow \infty} E[R_{i,j}]$, $\sigma[R_i] = \lim_{j \rightarrow \infty} \sigma[R_{i,j}]$.

- Последовательности $R_{i,1}, R_{i,2}, \dots, i = \overline{1, N}$ формируют эргодические случайные процессы с конечными математическими ожиданиями $E[R_i]$ и коэффициентами вариации не превышающими значений ν_i^R соответственно.

Представленная аналитическая модель описывает важнейшие компоненты и параметры реальной системы передачи видеоданных по протоколу НТТР. Основываясь на данной модели вводится и доказывается утверждение 1.

Утверждение 1. Для всевозможных алгоритмов планирования и адаптации видеоряда, удовлетворяющих допущениям, истинно следующее неравенство:

$$\sum_{i=1}^N (1 - \nu_i^R \nu_i^C) \frac{E[R_i] E[C_i^{-1}]}{q_i + \gamma_i} \leq 1.$$

Результат, представленный в утверждении 1, описывает взаимосвязь между всеми характеристиками сети передачи видеоданных от особенностей модели поведения пользователя (γ_i, q_i) и характеристик видеопотока $(E[R_i])$, до аспектов работы радиоканала $(E[C_i^{-1}])$ для всех пользователей в сети. Полученное выражение используется в последующих разделах в качестве ограничения на доступный объем ресурсов радиоканала при оптимизации передачи видеоданных в беспроводных централизованных сетях.

Третий раздел посвящен исследованию и разработке алгоритмов распределения ресурсов радиоканала при передаче неадаптивных видеопотоков для критерия нормированного отношения длительностей буферизации и просмотра g_i (выражение 1).

Рассмотрение передачи неадаптивных видеопотоков приводит к изменению допущения, описывающего выбор битовой скорости для сегментов видеоданных следующим образом: значение битовой скорости видеопотока для каждого конкретного абонента неизменно во времени и равняется: $R_i, i = \overline{1, N}$, следовательно, алгоритм адаптации видеоряда \mathcal{B} является вырожденным и значение $\nu_i^R = 0, i = \overline{1, N}$. В рамках настоящего раздела считается, что коэффициент разреженности видеопотока γ_i для всех пользователей имеет равное значение: $\gamma_i = \gamma, i = \overline{1, N}$.

Производительность алгоритмов планирования предлагается оценивать как среднее значение нормированного отношения длительностей буферизации и просмотра:

$$\bar{g}(A) = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N g_i(A) \right),$$

где A – конкретный алгоритм планирования, установленный на базовой станции.

Задача определения максимально возможной производительности алгоритмов распределения ресурсов радиоканала при передаче неадаптивных видеопотоков сводится к нахождению нижней границы нормированного отношения длительностей буферизации и просмотра:

$$G = \inf_{A \in \mathcal{A}} \bar{g}(A). \quad (3)$$

Данная задача может быть представлена в виде оптимизационной задачи нелинейного программирования (4), решение которой определяет нижнюю

границу нормированного отношения длительностей буферизации и просмотра по множеству алгоритмов \mathcal{A} .

$$\begin{aligned} & \text{Минимизировать: } G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_i \\ & \text{При условии:} \\ & \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N \frac{K_i(1-g_i)}{g_i + \gamma(1-g_i)} \leq 1 \\ g_i \in [0, 1], i = \overline{1, N} \end{array} \right. , \end{aligned} \quad (4)$$

где $K_i = R_i E[C_i^{-1}]$.

Оптимизационная задача (4) удовлетворяет критерию жадного выбора и была сведена к обобщенной непрерывной задаче о рюкзаке, в котором целевая функция представлена суммой монотонно возрастающих выпуклых функций. Алгоритм нахождения решения для обобщенной непрерывной задачи о рюкзаке представлен в третьем разделе.

Далее предлагается **алгоритм распределения ресурсов радиоканала**, обладающий большей, чем известные ранее алгоритмы, производительностью для критерия G при передаче неадаптивных видеопотоков. Научная новизна предлагаемого планировщика заключается в использовании концепции *совместного планирования*. Совместное планирование реализуется путем использования решения оптимизационной задачи (4) на основе оценок характеристик системы в момент времени t для каждого пользователя i : $\hat{R}_i(t)$ – оценка битовой скорости просматриваемого потока и $\hat{C}_i(t)$ – оценка максимально достижимой скорости канала. Предлагаемый планировщик представлен алгоритмом 1.

Алгоритм 1 : Распределения ресурсов радиоканала в момент времени t

- 1: Вычисление оценок параметров системы передачи видеоданных для множества активных пользователей $\mathcal{U}(t) : \hat{R}_i(t), \hat{C}_i(t), i \in \mathcal{U}(t)$;
- 2: Нахождение решения оптимизационной задачи (4) для множества пользователей $\mathcal{U}(t) : \hat{G}(t) = \{\hat{g}_i(t), i \in \mathcal{U}(t)\}$, при $K_i = \hat{R}_i(t)/\hat{C}_i(t)$ и $\gamma = 1$;
- 3: Вычисление долей беспроводного канала:

$$\alpha_i(t) = \begin{cases} \frac{\hat{R}_i(t)(1-\hat{g}_i(t)) + S^{min}}{\hat{C}_i(t)}, & i \in \mathcal{U}(t) \\ 0, & i \notin \mathcal{U}(t) \end{cases}, i = \overline{1, N},$$

где S^{min} – минимально гарантированная скорость получения данных;

- 4: Распределение ресурсов радиоканала с учетом значений $\alpha_i(t), i = \overline{1, N}$.
-

Полное описание планировщика приведено в третьем разделе диссертационного исследования. Предложенный алгоритм планирования обладает вычислительной сложностью $O(N \log_2 N)$, $N \rightarrow \infty$ и может быть реализован в режиме реального времени на базовой станции.

Для демонстрации производительности предложенного алгоритма планирования в среде моделирования NS-3, соответствующей стандарту связи LTE, был реализован полный комплекс моделей, введенных во втором разделе, и проведено моделирование типового сценария работы одной соты. В данном сценарии пользователи просматривали последовательность роликов с битовой скоростью 1 Мбит/с, со случайными паузами между ними, абоненты были расставлены на прямой линии по удалению от базовой станции. Была построена зависимость значения критерия качества восприятия G от числа пользователей в соте для разных планировщиков (рисунок 2). Производительность предложенного алгоритма планирования превосходит известные решения на 7 – 14% по числу удовлетворенных пользователей в соте при зафиксированном значении критерия G . Производительность предложенного планировщика близка к найденной нижней границе.

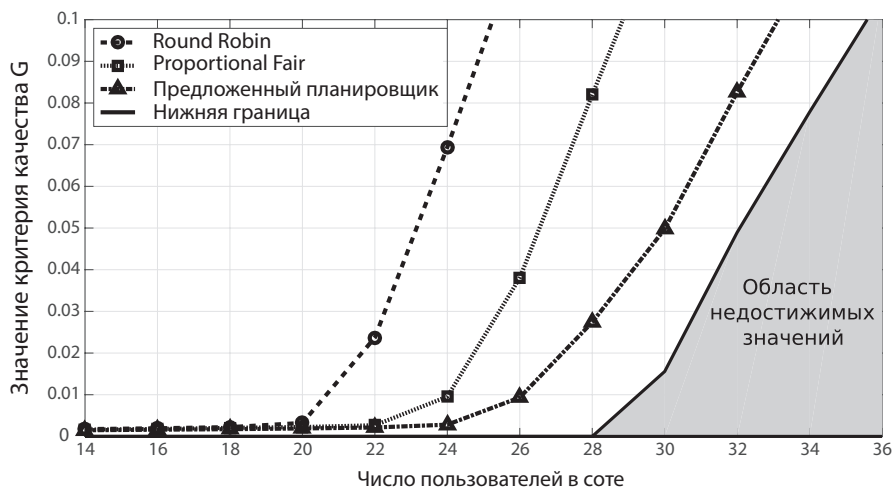


Рис. 2 — Сравнение предложенного алгоритма планирования с известными планировщиками и найденной нижней границей

Четвертый раздел посвящен исследованию алгоритмов распределения ресурсов радиоканала при передаче адаптивных видеопотоков для критерия качества отношение длительностей буферизации и просмотра q_i (выражение 2), с учетом средней битовой скорости просматриваемого потока.

Важно отметить, что ввиду наличия адаптации видеопотока к условиям работы беспроводного канала на фактор буферизации оказывают влияние алгоритмы планирования распределения ресурсов A и адаптации видеоряда B , принадлежащие множествам \mathcal{A} и \mathcal{B} соответственно.

В соответствии с проведенным исследованием критериев качества восприятия в первом разделе предлагается оценивать производительности системы по двум критериям:

- Среднее значение отношения длительности буферизаций к длительности просмотра:

$$\bar{q}(A, B) = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N q_i(A, B) \right).$$

- Среднее значение битовой скорости просматриваемого видеопотока:

$$\bar{R}(A, B) = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N E[R_i(A, B)] \right).$$

Основная задача настоящего раздела заключается в нахождении нижней границы по всевозможным алгоритмам планирования и адаптации видеоряда, удовлетворяющим допущениям введенным во втором разделе, среднего отношения длительностей буферизации и просмотра по всему множеству абонентов в системе, при условии, что средняя битовая скорость просматриваемого потока по всем пользователям не меньше заданного значения R_{avg} (5).

$$Q = \inf_{A, B: \bar{R}(A, B) \geq R_{avg}, A \in \mathcal{A}, B \in \mathcal{B}} \bar{q}(A, B). \quad (5)$$

Задача нахождения нижней границы критерия качества восприятия Q может быть представлена в виде оптимизационной задачи (6).

Минимизировать: $Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_i$

При условии:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \left(1 - \nu_i^R \nu_i^C \right) \frac{\tilde{R}_i \tilde{C}_i^{-1}}{q_i + \gamma_i} - 1 \leq 0 \\ -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{R}_i + R_{avg} \leq 0 \\ \tilde{R}_i \in [R_{min}, R_{max}], i = \overline{1, N} \\ -q_i \leq 0, i = \overline{1, N} \end{cases}, \quad (6)$$

где $\tilde{R}_i = E[R_i]$ и $\tilde{C}_i^{-1} = E[C_i^{-1}]$.

Нелинейная оптимизационная задача (6) относится к классу невыпуклых задач с ограничениями общего вида. К сожалению, для данного класса задач не существует стандартных методов решения, поэтому в настоящем разделе было предложено решение задачи (6), основанное на двухступенчатой оптимизации:

- Введение промежуточной оптимизационной задачи, которая имеет известный алгоритм решения;
- Нахождение взаимосвязи между решениями оптимизационной задачи и промежуточной;
- Постановка оптимизационной задачи с ослабленными ограничениями и нахождение ее решения.

В заключении четвертого раздела предлагается алгоритм решения оптимизационной задачи (6) и производится сравнение производительности существующих эвристик распределения ресурсов беспроводного канала по критерию Q с найденной границей для адаптивных видеопотоков с известной нижней границей и существующими эвристиками для неадаптивного видео (рисунок 3). В сценарии, описанном в третьем разделе, было зафиксировано число пользователей в сети и произведено моделирование эвристических алгоритмов планирования при передаче адаптивного видео. Моделирование эвристик при передаче неадаптивного видео было выполнено в предположении, что битовая скорость видеопотоков, просматриваемых всеми пользователями, равняется R_{avg} .

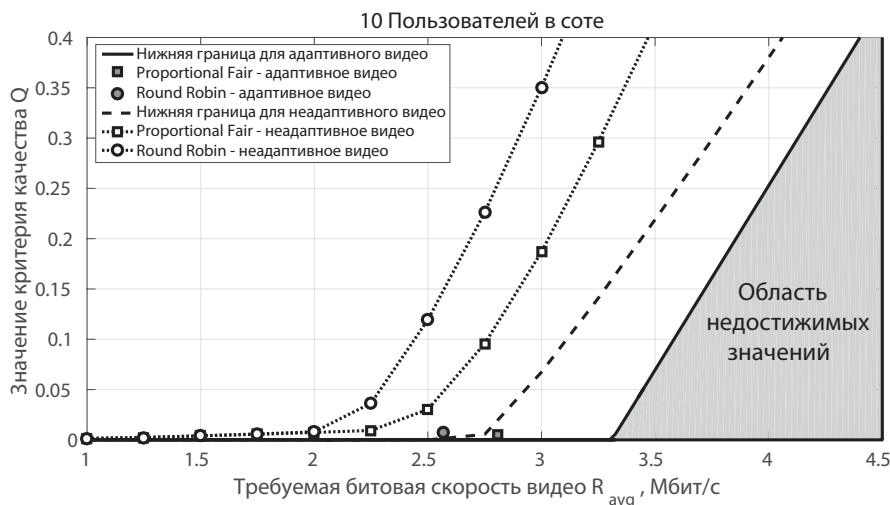


Рис. 3 — Сравнение производительности известных алгоритмов планирования при передаче адаптивного видео с нижней границей

Использование адаптивной технологии передачи видео позволяет достичь большей производительности алгоритмов планирования и, как следствие, сети передачи данных в целом. Планировщик *Proportional Fair* обладает большей производительностью в сравнении с алгоритмом *Round Robin*, и демонстрирует производительность близкую к нижней границе критерия качества Q (рисунок 3).

В *заключении* приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты работы

1. Предложена модель беспроводной централизованной сети связи при передаче видеоданных по протоколу HTTP. Найдена взаимосвязь между объективными характеристиками сети и качеством воспроизведения видео. Предложенная модель и найденная взаимосвязь позволяют осуществить аналитические исследования производительности беспроводных централизованных сетей при доминировании передачи видеоданных.
2. Предложены алгоритмы вычисления граничных значений максимально возможной производительности беспроводных централизованных сетей для следующих критериев качества восприятия:
 - Нормированное отношение длительностей буферизации и просмотра при передаче неадаптивных видеопоследовательностей;
 - Отношение длительностей буферизации и просмотра с учетом средней битовой скорости видео при передаче адаптивного видео.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве опорных значений при разработке новых алгоритмов планирования, учитывающие тип передаваемого трафика и требования к его обслуживанию, для существующих и последующих стандартов беспроводной связи.

3. Разработан алгоритм распределения ресурсов радиоканала, обладающий на 7 – 14% большей производительностью, чем ранее известные алгоритмы, для критерия нормированного отношения длительностей буферизации и просмотра при неадаптивной передаче видеоданных.

Основное содержание работы достаточно полно опубликовано в следующих публикациях (статьи 1-2 опубликованы в изданиях, включенных в перечень ВАК, работы 3-5 индексируются в Scopus).

Публикации автора по теме диссертации

1. *Пастушок, И.А.* Анализ эффективности использования беспроводных централизованных сетей для передачи неадаптивного видео по протоколу HTTP / И.А. Пастушок, А.М. Тюрликов // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление.* — 2017. — Сентябрь. — Т. 10, № 3. — С. 18–31.
2. *Пастушок, И.А.* Обзор передачи и оценок качества восприятия видеоданных при использовании технологии адаптивной передачи видео по протоколу HTTP / И.А. Пастушок // *Информационно-управляющие системы.* — 2017. — Июнь. — Т. 3, № 88. — С. 75–88.
3. *Pastushok, I.* On Interrelation of Video Streaming Characteristics in Centralized Wireless Networks / I. Pastushok, E. Bakin // *IEEE Wireless Communications Letters.* — 2017. — 30 October. — doi: 10.1109/LWC.2017.2767597.
4. *Pastushok, I.* Lower bound and optimal scheduling for mean user rebuffering percentage of HTTP progressive download traffic in cellular networks / I. Pastushok, A. Turlikov // 2016 XV International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY). — 2016. — Sept. — Pp. 105–111.
5. *Bakin, E.* Analysis of capacity of picocell with dominating video streaming traffic / E. Bakin, A. Borisovskaya, I. Pastushok // Proceedings of 15th Conference of Open Innovations Association FRUCT. — 2014. — April. — Pp. 3–8.
6. *Пастушок, И.А.* Решение обобщенной задачи о непрерывном рюкзаке / И.А. Пастушок // Сборник докладов Научной сессии ГУАП. — 2017. — С. 315–321.
7. *Пастушок, И.А.* Эвристический алгоритм выбора подоптимальных значений характеристик видео потока и параметров алгоритма распределения

- ресурсов радиоканала / И.А. Пастушок, А.В. Борисовская // Сборник докладов Научной сессии ГУАП. — 2015. — С. 209–219.
8. *Пастушок, И.А.* Обзор способов вычисления MOS для различных видов трафика / И.А. Пастушок, А.В. Борисовская // Сборник докладов Научной сессии ГУАП. — 2015. — С. 204–209.
 9. *Пастушок, И.А.* Оценка эффективности алгоритмов распределения ресурсов в системе моделирования NS-3 / И.А. Пастушок, А.В. Борисовская // Сборник докладов Научной сессии ГУАП. — 2014. — С. 145–152.
 10. *Пастушок, И.А.* Алгоритм планирования ресурсов на базовой станции с учетом требований к качеству обслуживания пользователей / И.А. Пастушок, А.В. Борисовская // Сборник докладов конференции СПИСОК. — 2014. — С. 224–234.
 11. *Пастушок, И.А.* Способы ускорения моделирования движения абонента при анализе характеристик сотовых сетей / И.А. Пастушок, Н.В. Матвеев // Сборник докладов Научной сессии ГУАП. — 2014. — С. 180–185.
 12. *Пастушок, И.А.* Анализ задержек в системах M2M построенных на основе современных стандартов мобильной передачи данных / И.А. Пастушок, М.А. Гранкин // Сборник докладов Научной сессии ГУАП. — 2013. — С. 83–86.