

На правах рукописи



Пастушок Игорь Анатольевич

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕДАЧИ ВИДЕОДАННЫХ В МОБИЛЬНЫХ
СЕТЯХ**

Специальность 05.12.13 — «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург — 2018

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Тюрликов Андрей Михайлович

Официальные оппоненты: **Кудряшов Борис Давидович**
доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий»

Зубакин Игорь Александрович
кандидат технических наук, доцент кафедры «Телевидение и видеотехника» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Ведущая организация: **Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт телевидения» (ОАО «НИИТ»)**, г. Санкт-Петербург

Защита состоится 15 марта 2016 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 2016 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, известным под сокращением DASH. Так же, в современных реалиях, пользователи обладают высокой мобильностью, что приводит к использованию беспроводных сетей связи в качестве носителя информации. Последним этапом развития беспроводных систем связи являются централизованные системы, позволяющие достичь высоких скоростей передачи информации и низких задержек в радиоканале. Однако, 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 методом распределения частотно-временных ресурсов между пользователями. В современных стандартах связи распределение ресурсов осуществляет алгоритм планирования (планировщик), установленный на уровне доступа к среде, базовой станции. Однако, ввиду обширности требований, 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 анализа производительности и создания алгоритмов планирования для беспроводных централизован-

ных сетей, которые обеспечивают высокую производительность и достаточный уровень качества восприятия при передаче видеоданных по протоколу HTTP.

При анализе производительности беспроводных централизованных сетей для передаче видео использовалась теория замкнутых систем массового обслуживания с конечным числом абонентов, проработанная А. Scherr, L. Kleinrock, В.М. Вишневым и А.И. Ляховым. Применение настоящей теории к анализу 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. Oyman, 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 качеством восприятия.

Целью настоящего диссертационного исследования является определение, вычисление и построение численных показателей максимально возможной производительности беспроводных централизованных телекоммуникационных систем при использовании адаптивной и неадаптивной технологии передачи видеоданных по протоколу HTTP, и предложение класса алгоритмов планирования распределения ресурсов беспроводного канала на базовой станции, производительность которых близка к максимально достижимой производительности беспроводных централизованных сетей.

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

1. Исследовать способы адаптивной и неадаптивной технологий передачи видеоданных по протоколу HTTP;
2. Исследовать методы 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 введенной модели телекоммуникационной систе-

мы для предложенных критериев качества восприятия адаптивной и неадаптивной передачи видеоданных по протоколу НТТР;

5. Разработать алгоритм планирования распределения ресурсов беспроводного канала связи на основе полученных аналитических результатов и продемонстрировать его производительность в сравнении с ними и существующими решениями.

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

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

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, позволяющая провести аналитические исследования и сравнение производительности алгоритмов распределения ресурсов беспроводного канала;
2. Найдена взаимосвязь между характеристиками системы передачи информации и проигрывания видеоряда при передаче видео по НТТР протоколу;
3. Предложен способ вычисления нижней границы по всевозможным алгоритмам планирования, удовлетворяющим введенной модели, для нормированного отношения длительности буферизации к просмотру при неадаптивной передаче видеоданных;
4. Предложен и реализован алгоритм планирования, минимизирующий нормированное отношение длительности буферизации к просмотру при неадаптивной передаче видеоданных;

5. Найдена нижняя граница для отношения длительности буферизации к просмотру с учетом средней битовой скорости потока при адаптивной передачи видеоданных по всевозможным алгоритмам планирования и адаптации видеоряда, удовлетворяющим введенной модели.

Практическая значимость диссертационной работы. Полученные в диссертационной работе результаты позволяют повысить производительность алгоритмов планирования распределения ресурсов беспроводного канала, и, как следствие, системы передачи информации в целом, для передачи видео по протоколу НТТР, что способствует увеличению емкости беспроводных систем. Так же полученные результаты могут быть использованы для формирования требований к разрабатываемым стандартам связи текущих и последующих поколений.

Достоверность. Результаты, полученные в диссертационной работе, 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 работы. 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 16-м симпозиуме «Problems of Redundancy in Information and Control Systems».

Внедрение результатов. Результаты работы были использованы в рамках проекта «Разработка технических решений по построению внутриобъектовой сети мобильной радиосвязи» ПАО «Информационные телекоммуникационные технологии». 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, опубликованы в 14 печатных работах. Из них 2 работы опубликованы в рецензируемых научных журналах, утвержденных в перечне ВАК, и 4 работ опубликованы в журналах, индексируемых в Scopus.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модель беспроводной централизованной системы связи при передаче видеоданных по протоколу НТТР, позволяющая производить аналитические исследования алгоритмов планирования распределения ресурсов беспроводного канала .
2. Взаимосвязь характеристик беспроводной централизованной сети и воспроизведения видеоряда при передаче видео по протоколу НТТР.
3. Нижняя граница для нормированного отношения длительности ожидания к просмотру по всевозможным алгоритмам планирования, удовлетворяющим введенной модели, при передаче неадаптивных видеопотоков.
4. Алгоритм планирования распределения ресурсов беспроводного канала для минимизации нормированного отношения длительности ожидания к просмотру при передаче неадаптивных видеопотоков.
5. Нижняя граница для отношения длительности буферизации к просмотру с учетом средней битовой скорости потока при адаптивной передаче видеоданных по всевозможным алгоритмам планирования и адаптации видеоряда, удовлетворяющим введенной модели.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 142 страницы с 28 рисунками и 7 таблицами. Список литературы содержит 66 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, а также приведено краткое содержание диссертационной работы по разделам.

В **первом разделе** рассматриваются особенности организации передачи видеоданных по протоколу НТТР в современных телекоммуникационных сетях, обобщаются существующие технологии передачи видеоданных и методологии оценки качества восприятия видеоданных при их прохождении через сеть передачи информации. На основе проведенного обзора формируются мо-

дели системы передачи видеоданных и критерии качества восприятия видеопотоков.

Производительность телекоммуникационных систем при передаче видео 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 пользователя обслуживания. Общепринятым подходом к оценке качества восприятия является Mean Opinion Score (MOS) – семейство сложных функций, позволяющее оценить удовлетворенность пользователя по шкале от 1 до 5-ти в зависимости от огромного массива статистик воспроизведения видеопотока и технологии передачи видео (адаптивной и неадаптивной). В результате обзора известных видов функций MOS и их аппроксимаций были выделены основные факторы, влияющие на качество восприятия пользователя в зависимости от технологии передачи видео:

- **Неадаптивная:** фактор длительности ожидания (буферизации) в течении просмотра видеопотока;
- **Адаптивная:** фактор длительности ожидания (буферизации) в течении просмотра и средняя битовая скорость просмотренного видео.

Так же 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 длительности буферизации к просмотру:*

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

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

- *Отношение длительности буферизации к просмотру:*

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

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 для передачи видео по протоколу НТТР.

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

Во *втором разделе* предлагается модель системы передачи видеоданных по протоколу НТТР через беспроводные централизованных телекоммуникационные сети, позволяющая провести аналитический анализ производительности подобных систем. В ходе настоящего раздела вводятся базовые определения, обозначения и система допущений. В завершении раздела находится основополагающая взаимосвязь между характеристиками беспроводной системы передачи информации и воспроизведением видеоряда.

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:

Видео контент сервер хранит набор видеопоследовательностей, разделенных на сегменты равной длительности. При получении запроса от пользователя i на сегмент j сервер осуществляет последовательную отправку $K_{i,j}$ 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 информации 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 информации. Все время работы настоящей системы разделено на периоды (слоты) равной длительности. В каж-

дом 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 информации, и, как следствие, удовлетворенность пользователя качеством обслуживания.

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

Ниже представлены основные допущения, используемые в настоящих моделях.

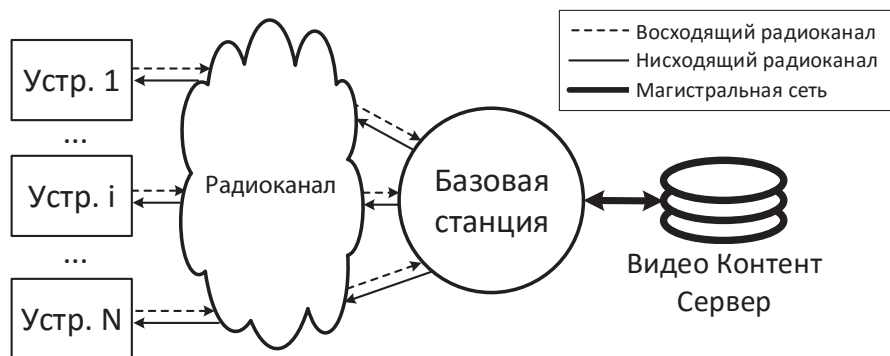


Рис. 1 — Структура модели передачи видеоданных в централизованных беспроводных сетях

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

Модель поведения пользователя характеризуется *коэффициентом разряженности 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 информации. В *беспроводном канале* связи затухание сигнала при распространении происходит одинаково по всей ширине полосы передачи информации для конкретного пользователя в одном моменте времени. Введем в рассмотрение величину $C_i(t)$, равную скорости передачи информации 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*:

- В течении передачи одного пакета k из сегмента j пользователем i в нисходящей линии связи максимально достижимая скорость канала постоянна:

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

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 $C_{i,j}^{-1} = \frac{1}{K_{i,j}} \sum_{k=1}^{K_{i,j}} \frac{1}{C_{i,j,k}}$, 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: $\bar{A}(t) = \{\alpha_i(t), i = \overline{1, N}\}$. 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 переданной информации

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 потока j -го сегмента пользователя i , $t_{i,j}$ – момент времени заказа пользователем i сегмента под номером j .

Используемые допущения:

- Частота переключения 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, 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 достижимый объем ресурсов радиоканала при оптимизации передачи видеоданных в беспроводных централизованных сетях.

Третий раздел посвящен комплексному исследованию производительности беспроводных централизованных сетей при передаче неадаптивных видеопотоков на основе нормированного отношения длительности буферизации к просмотру $g_i(1)$.

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: $R_{i,1} = R_{i,2} = \dots = R_i, i = \overline{1, N}$, следовательно, алгоритм адаптации видеоряда \mathcal{B} является вырожденным и значение $\nu_i^R = 0, i = \overline{1, N}$. Так же в рамках настоящего раздела считается, что коэффициент разряженности видеопотока γ_i для всех пользователей имеет равное значение: $\gamma_i = \gamma, i = \overline{1, N}$.

Таким образом, предлагается оценивать производительность системы передачи информации в целом следующим образом:

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

где \mathcal{A} – алгоритм планирования, установленный на базовой станции.

Основной целью настоящего раздела является нахождение максимально возможной производительности беспроводной централизованной системы при передаче неадаптивных видеопотоков по всевозможным алгоритмам планиро-

вания \mathcal{A} :

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

Данная задача может быть представлена в виде оптимизационной задачи нелинейного программирования (4), решение которой определяет нижнюю границу по алгоритмам \mathcal{A} .

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

где $K_i = R_i E[C_i^{-1}]$.

Решение задачи (4) может быть найдено на основе «жадного» алгоритма. В настоящем разделе задача (4) была сведена к решению обобщенной задачи о непрерывном рюкзаке, в котором целевая функция представлена суммой монотонно возрастающих выпуклых функций. Алгоритм нахождения решения для обобщенной задачи о непрерывном рюкзаке представлен в третьем разделе. Найденный алгоритм решения обладает низкой вычислительной сложностью, что позволяет на его основе сформировать алгоритм планирования.

Далее предлагается **алгоритм планирования для минимизации значения критерия G** при передаче неадаптивного видео. Основной идеей предлагаемого планировщика является использование 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. Обобщенное описание планировщика представлено алгоритмом 1, в котором S^{min} – минимально гарантированная скорость получения информации. Полное описание настоящего планировщика представлено в третьем разделе диссертационного исследования.

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

Алгоритм 1 : Планирование ресурсов для минимизации критерия G в каждый момент времени t

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

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

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

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 количества пользователей в сети для разных планировщиков (рисунок 2). Из результата сравнения следует отметить, что предложенный алгоритм планирования показывает выигрыш от 7-ми до 14-ти процентов по числу удовлетворенных пользователей в сети в сравнении с известными эвристиками, и показывает производительность близкую к найденной границе.

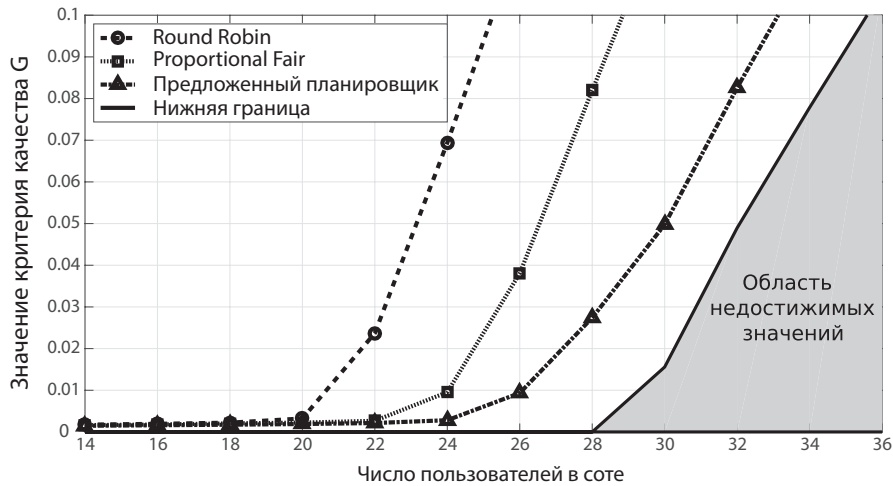


Рис. 2 — Сравнение предложенного алгоритма планирования с известными планировщиками и найденной нижней границей

Четвертый раздел посвящен анализу производительности беспроводных централизованных сетей связи при передаче адаптивных видеопотоков на основе отношения длительности буферизации к просмотру q_i (2), с учетом средней битовой скорости просматриваемого потока.

Важно отметить, что ввиду наличия адаптации видеопотока к условиям работы беспроводного канала связи возникает обратная связь между работой алгоритма планирования и алгоритма адаптации видеоряда на всех пользовательских устройствах: исходя из скорости передачи информации в беспроводном канале каждый конкретный видеоплеер выбирает битовую скорость запрашиваемого потока, что имеет непосредственное влияние на нагрузку беспроводного канала связи и, как следствие, на скорости передачи данных всех пользователей в сети. Таким образом, на фактор буферизации оказывают влияние алгоритмы планирования распределения ресурсов \mathcal{A} и адаптации видеоряда \mathcal{B} .

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

- Среднее значение отношения длительности буферизаций к просмотру:

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

- Среднее значение битовой скорости просматриваемого видеопотока:

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

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

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

Максимальная производительность беспроводной централизованной системы связи для критерия качества восприятия Q может быть найдена как решение оптимизационной задачи (6).

$$\begin{aligned}
 &\text{Минимизировать: } Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_i \\
 &\text{При условии:} \\
 &\left\{ \begin{aligned} &\sum_{i=1}^N (1 - \nu_i^R \nu_i^C) \frac{\tilde{R}_i \tilde{C}_i^{-1}}{q_i + \gamma_i} - 1 \leq 0 \\ &-\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{R}_i + R_{avg} \leq 0 \\ &\tilde{R}_i \in [R_{min}, R_{max}], i = \overline{1, N} \\ &-q_i \leq 0, i = \overline{1, N} \end{aligned} \right. , \tag{6}
 \end{aligned}$$

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, что затрудняет нахождение решения, так как для данного класса задач не существует стандартных методов решения.

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), обладающий высокой вычислительной сложностью, 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 настоящем сценарии было зафиксировано число пользователей в соте и произведено моделирование эвристических алгоритмов планирования при передаче адаптивного видео. В аналогичных условиях было произведено моделирование для эвристик при пе-

передаче неадаптивного видео, когда просматриваемая битовая скорость потоков всех пользователей равнялась значению R_{avg} . Из результатов, представленных

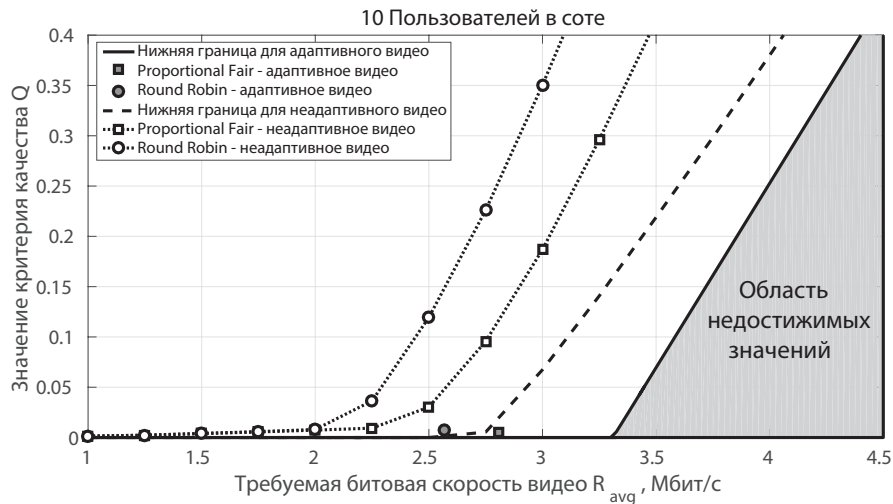


Рис. 3 — Производительность известных алгоритмов планирования при передаче адаптивного видео в сравнении с нижней границей

на рисунке 3, следует, что использование адаптивной технологии передачи видео позволяет достичь большей производительности беспроводной сети и планировщик *Proportional Fair* обладает большей производительностью в сравнении с алгоритмом *Round Robin*, и демонстрирует производительность близкую к нижней границе по критерию качества Q .

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 производить 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 длительности буферизации к просмотру при передаче неадаптивных видеопоследовательностей;
- Отношение длительности буферизации к просмотру 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. Предложен алгоритм планирования распределения ресурсов беспроводного канала, позволяющий минимизировать нормированное отношение длительности буферизации к просмотру при передаче неадаптивного видео. Предложенный алгоритм позволяет увеличить емкость соты на 7 – 14% в сравнении с известными решениями и демонстрирует производительность близкую к найденной аналитической границе.

Основное содержание работы изложено в следующих **публикациях** (статьи 1-2 опубликованы в изданиях, включенных в перечень ВАК, статьи 3-7 индексируются в Scopus):

Публикации автора по теме диссертации

1. *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. 1337–1347.
2. *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.

3. *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.
4. *Пастушок, И.А.* Решение обобщенной задачи о непрерывном рюкзаке / И.А. Пастушок // Сборник докладов Научной сессии ГУАП. — 2017. — С. SET ME!!!
5. *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.
6. *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.
7. *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.
8. *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.
9. *Пастушок, И.А.* Способы ускорения моделирования движения абонента при анализе характеристик сотовых сетей / И.А. Пастушок, Н.В. Матвеев // Сборник докладов конференции СПИСОК. — 2014. — С. 180–185.
10. *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.
11. *Пастушок, И.А.* Методика вычисления скорости передачи данных по восходящему каналу системы LTE / И.А. Пастушок // Сборник докладов 66-й международной студенческой сессии ГУАП. — 2013. — С. 334–338.