

DOI: 10.18721/JCSTCS.10302

УДК 621.391.28

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ НЕАДАПТИВНОГО ВИДЕО ПО ПРОТОКОЛУ HTTP

И.А. Пастушок, А.М. Тюрликов

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рост аудитории социальных сетей и их плотная интеграция с сервисами хранения и передачи видеоданных по протоколу HTTP приводит к колоссальному увеличению нагрузки на существующие телекоммуникационные системы. В связи с большой мобильностью современных пользователей настоящее явление наиболее актуально для беспроводных сетей связи, обладающих значительно меньшей производительностью по сравнению со стационарными аналогами. Большой объем видеоданных передается с использованием неадаптивной технологии передачи видео по протоколу HyperText Transfer Protocol (Facebook, трансляции в режиме реального времени и т. д.). Сочетание данных факторов приводит к необходимости исследования максимально возможной эффективности беспроводных сетей при передаче неадаптивного видеоконтента по протоколу HTTP. В статье рассмотрена модель беспроводной системы, позволяющая установить взаимосвязь между характеристиками сети и качеством воспроизведения неадаптивного видео при его передаче по протоколу HTTP. Описано нормированное отношение длительностей буферизации и просмотра, оказывающее критичное влияние на качество восприятия видеопотока. Для настоящего критерия найдена нижняя граница по всевозможным алгоритмам планирования распределения ресурсов беспроводного канала, характеризующая максимально возможную эффективность беспроводной системы при передаче неадаптивного видео по протоколу HTTP. На основе найденной границы предложен эвристический алгоритм распределения ресурсов беспроводного канала, реализующий концепцию совместного планирования, обладающий большей эффективностью по сравнению с существующими аналогами и близкой к найденной границе. Полученный результат может использоваться для формирования требований к алгоритмам планирования с учетом качества восприятия для существующих и последующих стандартов беспроводной связи.

Ключевые слова: передача видео по протоколу HTTP; DASH; беспроводные сети; эффективность; оптимизация; нижняя граница; планировщик.

Ссылка при цитировании: Пастушок И.А., Тюрликов А.М. Анализ эффективности использования беспроводных централизованных сетей для передачи неадаптивного видео по протоколу HTTP // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. Т. 10. № 3. 2017. С. 18–31. DOI: 10.18721/JCSTCS.10302

THE PERFORMANCE ANALYSIS OF CENTRALIZED WIRELESS NETWORKS FOR NON-ADAPTIVE HTTP-BASED VIDEO TRANSMISSION

I.A. Pastushok, A.M. Turlikov

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russian Federation

At the present time, the rise in the social network audience and their tight integration with HTTP-based video streaming services leads to a sharp increase in the load on the current telecommunication networks. Due to high mobility of users, this effect has the greatest influence on wireless networks, which have rather low performance compared to hard-wired systems. The greatest amount of video traffic is transmitted using non-adaptive technology by HyperText Transfer Protocol (Facebook, a real-time event, etc.). This combination necessitates the investigation of the maximal possible performance of wireless networks for non-adaptive HTTP-based video streaming. In the study, we consider the wireless network model and propose the interrelation of its parameters and the streaming of non-adaptive HTTP-based video content. As the main performance criterion, we use the rebuffering percentage, which has a great influence on the user's Quality-of-Experience. For this criterion, we found the lower bound for all possible schedulers. In addition, based on the found lower bound, we proposed a heuristic scheduler that has a greater performance compared to the existing heuristic schedulers, close enough to the lower bound. The obtained result can be used as a baseline for the requirements to QoE-aware schedulers in the current and future wireless network generations.

Keywords: HTTP-based video; DASH; wireless networks; performance; optimization; lower bound; QoE-aware scheduler.

Citation: Pastushok I.A., Turlikov A.M. The Performance Analysis of Centralized Wireless Networks for Non-Adaptive HTTP-based Video Transmission. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems. 2017, Vol. 10, No. 3, Pp. 18–31. DOI: 10.18721/JCSTCS.10302

Введение

В настоящее время в телекоммуникационных сетях доминирует передача видеоданных. По оценкам ведущих компаний-производителей телекоммуникационного оборудования в 2016 г. видеотрафик составил 55 % от всего объема трафика, а к 2021 г. достигнет 60–75 % [1]. Подобное разделение объемов трафика приводит к специфичным требованиям к сетям передачи информации. Рост аудитории социальных сетей, плотно интегрированных с сервисами передачи и хранения неадаптивного видео по протоколу HyperText Transfer Protocol (HTTP), приводит к колоссальному росту нагрузки на уже существующие сети. В современных реалиях пользователи обладают высокой мобильностью, что приводит к актуальности рассмотрения беспроводных сетей связи в качестве носителей информации. В свою очередь беспроводные сети обладают значительно меньшей производительностью по сравнению со стационарными аналогами ввиду наличия беспроводного канала. Беспроводной канал характеризуется меньшими скоростями и высокими задержками при передаче информации. Более того, его состояние изменчиво во времени.

Важной задачей является оценка максимально возможной эффективности беспроводных сетей для передачи неадаптивных видеопотоков по протоколу HTTP. В работе [2] предложен критерий для оценки эффективности сетей передачи информации: нормированное отношение длительностей буферизации и просмотра (rebuffering percentage). Однако для данного критерия отсутствуют исследования максимально возможной эффективности беспроводных сетей при передаче видеоданных по протоколу HTTP.

Цель настоящей работы – нахождение количественной оценки максимально возможной эффективности беспроводных сетей связи для нормированного отношения длительностей буферизации и просмотра при передаче неадаптивного видео по протоколу HTTP.

Передача неадаптивных видеопоследовательностей в беспроводных сетях по протоколу HTTP

Последним этапом развития беспроводных систем связи являются беспроводные централизованные сети передачи информации. Под централизацией понимается на-

личие устройства (базовой станции), управляющего передачей данных абонентов, находящихся в зоне его ответственности. В настоящее время такие сети представлены в стандартах связи третьего и четвертого (LTE, LTE-A) поколений, также стандарты беспроводной связи пятого поколения будут централизованными.

В свою очередь передачу видео по протоколу HTTP регламентирует стандарт Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (DASH) [3]. В качестве основных моментов стандарта DASH следует отметить его инвариантность к сети передачи информации. Модель системы передачи видеоданных по протоколу HTTP в беспроводных сетях связи представлена тремя основными компонентами (рис. 1):

- видео контент сервер – обеспечивает хранение и доступ к видеоданным;
- сеть передачи информации (магистральная сеть, базовая станция, радиоканал) – телекоммуникационная сеть, построенная на произвольном физическом принципе, обеспечивающая корректную работу протокола HTTP;
- воспроизводящие устройства – программно-аппаратные комплексы, обеспечивающие загрузку и демонстрацию видео с контент сервера. В модели каждое устройство характеризуется уникальным номером $i = \overline{1, N}$, где N – общее число воспроизводящих устройств в системе.

Стандарт DASH описывает две технологии организации передачи видео: адаптивную и неадаптивную. В рамках настоящей статьи описано исследование неадаптивной технологии (HTTP Progressive Download), т. к. большие объемы видеотрафика передаются с использованием данной технологии (Facebook, трансляции в режиме реального

времени и т. д.).

Далее в статье производится формализация компонентов модели путем введения основных понятий и допущений.

Формат представления видеоданных. При передаче видео по протоколу HTTP все видеопоследовательности представляются набором сегментов одинаковой длительности, равной d секунд. Длительность видео является независимой случайной величиной с конечным математическим ожиданием и дисперсией. Каждый сегмент, запрашиваемый пользователем i , характеризуется порядковым номером j и представлен в дискретном наборе битовых скоростей $\forall i, j : R_{i,j} \in \{R_{\min}, \dots, R_{\max}\}$.

При передаче сегмента j пользователем i он представляется последовательностью из P_{ij} пакетов равного объема, что обусловлено работой протокола транспортного уровня.

Модель поведения пользователя. При рассмотрении передачи неадаптивного видео каждый пользователь в начальный момент времени выбирает битовую скорость потока R_i , качество которой его абсолютно устраивает, и запрашивает все сегменты видео с выбранной битовой скоростью: $\forall i : R_{i,1} = R_{i,2} = \dots = R_i$.

Пользователь просматривает последовательность из роликов. В начале каждого ролика воспроизводящим устройством производится начальная буферизация, после чего начинается непосредственно демонстрация видео. Если скорость получения информации по каналу связи будет меньше битовой скорости запрашиваемого видео, то пользователь будет наблюдать прерывание воспроизведения потока, вызванное повторными буферизациями. После окончания просмотра ролика каждый пользова-

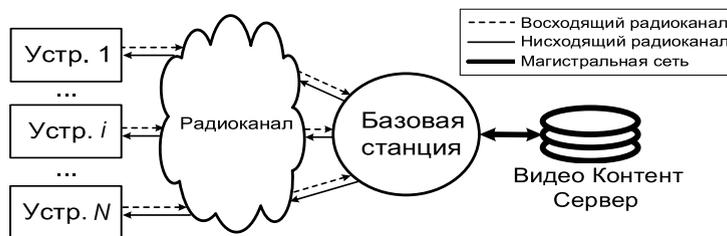


Рис. 1. Беспроводная централизованная система передачи видеоданных по протоколу HTTP

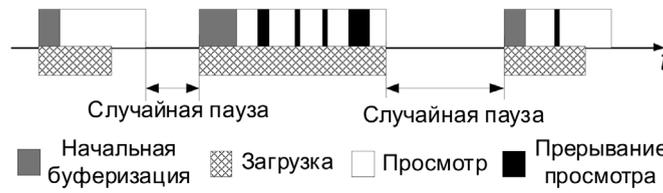


Рис. 2. Модель поведения пользователя при просмотре видео

тель i ждет случайную паузу перед заказом следующего, которая является независимой случайной величиной с конечными математическим ожиданием и дисперсией (рис. 2). В настоящей модели пользователь считается *активным* в момент времени t , если в данный момент он осуществляет загрузку данных, в противном случае он считается *неактивным*.

Подобную модель поведения для каждого пользователя i возможно охарактеризовать двумя величинами:

Коэффициент разреженности видеопотока – отношение суммы длительностей просмотра (w_i^T) и пауз между просмотрами (p_i^T) к длительности просмотра за длительное время T :

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

Нормированное отношение длительностей буферизации и просмотра – отношение общей длительности буферизации b_i^T (начальные буферизации и прерывания просмотра) к сумме длительностей буферизации и просмотра за продолжительное время T :

$$g_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{b_i^T}{b_i^T + w_i^T}.$$

В реальных системах при просмотре видео существует зависимость между длительностями просмотра и паузами между ними: после просмотра длительных и коротких роликов пользователь осуществляет длительную и короткую паузу соответственно. Следствием настоящего факта является равенство коэффициентов разреженности потоков для всех пользователей: $\forall i: \gamma_i = \gamma$.

Модель беспроводного канала. В данной статье рассматриваются беспроводные слотовые системы: все время работы подобных систем разделено на слоты рав-

ной длительности. В каждом слоте имеется ограниченное число частотно-временных ресурсов, зависящее от ширины доступной полосы передачи. В качестве исследуемой модели беспроводного канала связи рассматривается канал с плоскими замираниями: в каждый момент времени затухание распространения сигнала для каждого конкретного пользователя не зависит от частоты передачи, следовательно, в каждом частотно-временном ресурсе пользователь может передать одинаковый объем данных. В рамках настоящей работы предполагается, что настройки модуляции и помехоустойчивого кодирования подбираются так, что вероятность ошибки или потери пакета при передаче пренебрежимо мала. Таким образом, для каждого пользователя i в момент времени t состояние беспроводного канала связи возможно охарактеризовать *максимально достижимой скоростью передачи данных в канале* $C_i(t)$ – скорость передачи информации в беспроводном канале при условии, что все ресурсы канала в момент времени t были выделены пользователю i .

Предполагается, что состояние беспроводного канала изменяется таким образом, что в течение загрузки пакета k из сегмента j максимальная достижимая скорость канала пользователя i постоянна:

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

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 ; $C_{i,j,k}$ – максимальная достижимая скорость канала пользователя i в течение загрузки пакета k из сегмента j .

Введем дополнительное обозначение $C_{i,j}^{-1}$:

$$C_{i,j}^{-1} = \frac{1}{P_{i,j}} \sum_{k=1}^{P_{i,j}} \frac{1}{C_{i,j,k}}, \quad (1)$$

где $P_{i,j}$ – количество пакетов в сегменте j пользователя i .

На последовательность случайных величин $C_{i,1}^{-1}, C_{i,2}^{-1}, \dots, i = \overline{1, N}$ накладывается ограничение, что она формирует эргодический случайный процесс с конечным математическим ожиданием $E[C_i^{-1}]$.

Модель планировщика ресурсов беспроводного канала. Определяющий вклад в эффективность беспроводной системы в целом вносит алгоритм распределения ресурсов радиоканала на базовой станции, т. к. скорость передачи информации определяется скоростью передачи в самом узком месте, которым в настоящей системе является радиоканал. От того, каким образом будут распределяться ресурсы канала, будут зависеть скорости загрузки информации пользовательскими устройствами, удовлетворенность пользователя обслуживанием и, как следствие, эффективность системы в целом. Решением задачи распределения ресурсов беспроводного канала связи занимается алгоритм планирования распределения ресурсов на канальном уровне, называемый *планировщиком*.

При рассмотрении беспроводного канала с плоскими замираниями работу алгоритма планирования в каждый момент времени t возможно описать набором долей канала, выделенным пользователям:

$$A(t) = \{\alpha_i(t), i = \overline{1, N}\}.$$

Очевидным ограничением на возможные значения функций $\alpha_i(t)$ является следующее неравенство:

$$\forall t : \sum_{i=1}^N \alpha_i(t) \leq 1. \quad (2)$$

Неравенство (2) может быть интерпретировано следующим образом: в любой момент времени работы алгоритма планирования общий объем выделенных ресурсов не превышает доступного объема ресурсов для канала передачи информации. Следовательно, для любого пользователя i мгновенная

скорость передачи информации в нисходящем канале связи $S_i(t)$ может быть вычислена следующим образом:

$$S_i(t) = \alpha_i(t)C_i(t). \quad (3)$$

Алгоритм планирования в каждый момент времени решает задачу распределения ресурсов беспроводного канала. Для решения данной задачи ему доступна информация о предыстории, а именно доли выделенных ресурсов канала, значения максимально достижимой скорости и объем переданной информации для каждого пользователя:

$$A(t) = \mathcal{A}(S_i(\tau), C_i(\tau); \tau < t, i = \overline{1, N}), \quad (4)$$

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

В формуле (4) информация о предыстории выделенных долей беспроводного канала и объемах переданной информации для пользователя i агрегированы в значении $S_i(\tau)$, так как данные параметры задаются соотношением (3). На работу алгоритма планирования накладывается ряд допущений:

- алгоритм планирования выделяет частотно-временные ресурсы только активным абонентам;
- обеспечивает каждому активному абоненту минимальную долю ресурсов беспроводного канала, отличную от нуля в каждом интервале планирования;
- распределяет все доступные частотно-временные ресурсы.

Ввиду большого числа используемых обозначений в таблице агрегированы важные обозначения с расшифровками и единицами измерения.

Взаимосвязь между характеристиками системы передачи информации и воспроизведением видеоряда

В [4] представлена аналогичная модель системы передачи видеоданных в беспроводных системах и предложена взаимосвязь между характеристиками системы передачи информации и воспроизведением видеоряда, однако, в данной работе рассматривался канал связи, характеристики которого неизменны во времени. В настоящей статье

Используемые обозначения

Обозначение	Описание	Единица измерения
N	Число пользователей в системе	шт.
индекс i	Порядковый номер пользователя	шт.
индекс j	Порядковый номер сегмента видеоданных	шт.
индекс k	Порядковый номер пакета в сегменте	шт.
d	Длительность сегмента видеоданных	с
R_i	Битовая скорость, выбранная пользователем i	бит/с
P_{ij}	Число пакетов в сегменте j пользователя i	шт.
b_i^T	Длительность буферизаций пользователя i в течение времени T	с
w_i^T	Длительность просмотра пользователя i в течение времени T	с
p_i^T	Длительность пауз между просмотрами роликов пользователя i в течение времени T	с
g_i	Нормированное отношение длительностей буферизации и просмотра пользователя i	Безразмерная величина
γ	Коэффициент разреженности видеопотока	Безразмерная величина
C	Максимально достижимая скорость передачи данных в канале	бит/с
α	Выделенная доля ресурсов беспроводного канала	Безразмерная величина
S	Скорость передачи данных по беспроводному каналу	бит/с

предлагается обобщение модели и взаимосвязи, представленных в [4] для канала, характеристики которого изменяются во времени.

Утверждение. Для всевозможных алгоритмов планирования, удовлетворяющих системе допущений, следующее неравенство истинно:

$$\sum_{i=1}^N R_i E[C_i^{-1}] \frac{1 - g_i}{g_i + \gamma(1 - g_i)} \leq 1.$$

Доказательство. Рассмотрим передачу одного пакета k из сегмента под номером j пользователем i . При загрузке настоящего пакета через беспроводной канал было передано $\frac{R_i d}{P_{i,j}}$ бит видеоданных. Эта величина может быть вычислена на основе наблюдения за скоростью передачи информации в беспроводном канале:

$$\int_{t_{i,j,k}}^{t_{i,j,k} + \Delta t_{i,j,k}} S_i(t) dt = C_{i,j,k} \int_{t_{i,j,k}}^{t_{i,j,k} + \Delta t_{i,j,k}} \alpha_i(t) dt = \frac{R_i d}{P_{i,j}}.$$

Перенесем $C_{i,j,k}$ в правую часть последнего равенства и получим долю времени использования канала пользователем i при загрузке k -го пакета:

$$\int_{t_{i,j,k}}^{t_{i,j,k} + \Delta t_{i,j,k}} \alpha_i(t) dt = \frac{R_i d}{P_{i,j}} \frac{1}{C_{i,j,k}}.$$

Просуммировав левую и правую части по всем пакетам в сегменте, получим долю времени использования канала пользователем i при загрузке j -го сегмента:

$$\int_{t_{i,j}}^{t_{i,j} + \Delta t_{i,j}} \alpha_i(t) dt = R_i d \left(\frac{1}{P_{i,j}} \sum_{k=1}^{P_{i,j}} \frac{1}{C_{i,j,k}} \right),$$

где $t_{i,j}$ — время начала загрузки пользователем

лем i сегмента j ; $\Delta t_{i,j}$ – длительность загрузки пользователем i сегмента j .

Используя равенство (1), получим следующее выражение:

$$\int_{t_{i,j}}^{t_{i,j}+\Delta t_{i,j}} \alpha_i(t) dt = R_i C_{i,j}^{-1} d.$$

Тогда доля времени использования канала пользователем i за время T :

$$\int_0^T \alpha_i(t) dt = d \sum_{j=1}^{H_i^T} R_i C_{i,j}^{-1} + \Delta s_i, \quad (5)$$

где H_i^T – число полностью загруженных сегментов пользователем i в течение времени T ; Δs_i – доля времени использования канала пользователем i , затраченная на загрузку невоспроизведенного сегмента видео.

Просуммировав уравнение (5) для всех пользователей в системе ($i = \overline{1, N}$) и внося сумму под знак интеграла, получим следующее выражение:

$$\int_0^T \sum_{i=1}^N \alpha_i(t) dt = \sum_{i=1}^N d \sum_{j=1}^{H_i^T} R_i C_{i,j}^{-1} + \Delta s,$$

где Δs – доля времени использования канала всеми пользователями, затраченная на загрузку невоспроизведенных сегментов видео.

Так как в каждый момент времени t сумма выделенных долей канала пользователям не может превышать единицы, согласно условию (2), следовательно

$$\int_0^T \sum_{i=1}^N \alpha_i(t) dt \leq T :$$

$$d \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{H_i^T} R_i C_{i,j}^{-1} + \Delta s \leq T.$$

Разделим левую и правую части неравенства на T и внесем его под первый знак суммы. Так как $T > 0$, знак неравенства не изменится:

$$\sum_{i=1}^N \frac{d \sum_{j=1}^{H_i^T} R_i C_{i,j}^{-1} + \Delta s}{T} \leq 1.$$

Для каждого пользователя время пребывания в системе состоит из буферизаций, просмотров и пауз между просмотрами ви-

део $T = b_i^T + w_i^T + p_i^T$. Следовательно, последнее неравенство представляется в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^N \frac{d \sum_{j=1}^{H_i^T} R_i C_{i,j}^{-1} + \Delta s}{b_i^T + w_i^T + p_i^T} \leq 1.$$

Так как длительность просмотра равняется длительности всех загруженных сегментов, $w_i^T = H_i^T d$, $i = \overline{1, N}$:

$$\sum_{i=1}^N \frac{w_i^T}{H_i^T} \frac{1}{b_i^T + w_i^T + p_i^T} \sum_{j=1}^{H_i^T} R_i C_{i,j}^{-1} + \Delta s \leq 1.$$

Разделим числитель и знаменатель левой части полученного выражения на w_i^T и устремим время в бесконечность ($T \rightarrow \infty$). Для каждого абонента $i = \overline{1, N}$ воспользуемся определением g_i , свойствами эргодичности процессов $C_{i,j}^{-1}$, а именно существованием

предела $\lim_{H_i^T \rightarrow \infty} \left[(H_i^T)^{-1} \sum_{j=1}^{H_i^T} C_{i,j}^{-1} \right] = E[C_i^{-1}]$, и получим следующее выражение:

$$\sum_{i=1}^N R_i E[C_i^{-1}] \frac{1 - g_i}{g_i + \gamma(1 - g_i)} \leq 1.$$

Настоящий факт завершает доказательство.

Нижняя граница для нормированного отношения длительностей буферизации и просмотра при передаче неадаптивного видео

Важным аспектом настоящего исследования является выбор критерия эффективности системы. В современных реалиях эффективность телекоммуникационных сетей связана с удовлетворенностью пользователя, поэтому в данной статье будет проведен краткий анализ факторов, влияющих на удовлетворенность пользователя при просмотре видео по протоколу HTTP.

В работах [5, 6] выделено два основных фактора, влияющих на качество восприятия видео:

- битовая скорость потока, определяющая разрешение воспроизводимого видео [7–9];
- длительность буферизации, когда

пользователь ожидает начала или возобновления просмотра [2, 4, 10–13].

Так как в настоящей статье предполагается, что пользователь выбирает качество видеопотока исходя из собственных предпочтений, то на его удовлетворенность может оказывать влияние только длительность буферизации при просмотре видео. На основе проведенного обзора работ в настоящей предметной области сделан вывод о том, что удовлетворенность пользователя обратно пропорциональна длительности буферизаций.

В рамках этой работы за критерий качества восприятия для одного пользователя принято нормированное отношение длительностей буферизации и просмотра, предложенное в работе [2], а в качестве критерия эффективности системы в целом рассматривается среднее значение выбранного критерия по всему множеству пользователей.

На данную величину непосредственное влияние оказывает алгоритм планирования A , установленный на базовой станции, т. к. он определяет скорости передачи информации. Для каждого конкретного алгоритма планирования A возможно вычислить среднее значение нормированного отношения длительностей буферизации и просмотра:

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

Так как удовлетворенность пользователей в системе обратно пропорциональна значению $\bar{g}(A)$, то в настоящей работе будет найдена нижняя граница по всевозможным алгоритмам планирования A , удовлетворяющим системе допущений, характеризующая максимально возможную эффективность системы по введенному критерию:

$$G = \inf_{A \in \mathcal{A}} \bar{g}(A). \quad (6)$$

Задача нахождения нижней границы по всевозможным алгоритмам планирования сводится к нахождению решения оптимизационной задачи, основанной на утверждении и выражении (6), решение которой

характеризует максимально возможную эффективность беспроводной централизованной сети при передаче неадаптивного видео по протоколу НТТР:

$$\text{Минимизировать: } G = \sum_{i=1}^N g_i$$

При условии:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \frac{K_i(1-g_i)}{g_i + \gamma(1-g_i)} \leq 1, \\ g_i \in [0, 1], i = \overline{1, N} \end{cases} \quad (7)$$

где $K_i = R_i E[C_i^{-1}]$.

Оптимизационная задача является задачей нелинейного выпуклого программирования и может быть сведена к обобщенной задаче о непрерывном рюкзаке [14], в которой в качестве целевой функции выступает сумма монотонно возрастающих выпуклых функций:

$$\text{Максимизировать: } \sum_{i=1}^N f(x_i)$$

При условии:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N w_i x_i \leq W \\ W \in (0, \infty) \\ x_i \in [0, 1], \quad i = \overline{1, N} \\ w_i \in (0, \infty), \quad i = \overline{1, N} \end{cases} \quad (8)$$

где $f(x_i)$ – непрерывная, дважды дифференцируемая, строго монотонно возрастающая, выпуклая вниз функция, ограниченная сверху и снизу в области определения x_i .

Решение задачи (8) может быть получено с помощью алгоритма 1, обладающего низкой вычислительной сложностью ($O(N \log_2 N)$, $N \rightarrow \infty$) по сравнению со стандартными методами решения [15]. Данный факт является следствием того, что задача (8) обладает свойством жадного выбора, аналогично задаче о непрерывном рюкзаке [14].

Алгоритм 1: Решение задачи (8)

1. Сортировка предметов по возрастанию значений w_i и их нумерация в соответствии с сортировкой.

2. Нахождение предмета с индексом

$$j : \begin{cases} \sum_{i=1}^{j-1} w_i \leq W \\ \sum_{i=1}^j w_i > W \end{cases}$$

если $j \in \emptyset, j = N + 1$.

3. Нахождение оптимальных значений:

$$x_i = \begin{cases} 1, & i < j \\ \frac{1}{w_j} \left(W - \sum_{i=1}^{j-1} w_i \right), & i = j \\ 0, & i > j \end{cases}$$

В рамках настоящей работы задача (7) будет сведена к задаче (8) и предложен алгоритм нахождения нижней границы для критерия G .

Теорема. Решение задачи нелинейного программирования (7), характеризующее нижнюю границу нормированного отношения длительностей буферизации и просмотра при передаче неадаптивных видеопотоков, может быть получено с помощью алгоритма 2.

Алгоритм 2: Решение задачи (7)

1. Сортировка пользователей по возрастанию отношений $\left(\frac{K_i}{\gamma}\right)$ и их нумерация в соответствии с сортировкой.

2. Нахождение пользователя с индексом

$$j : \begin{cases} \sum_{i=1}^{j-1} \frac{K_i}{\gamma} \leq 1 \\ \sum_{i=1}^j \frac{K_i}{\gamma} > 1 \end{cases}$$

если $j \in \emptyset, j = N + 1$.

3. Нахождение оптимальных значений g_i :

$$g_i = \begin{cases} 0, & i < j \\ \frac{\gamma(1 - \xi)}{\xi + \gamma(1 - \xi)}, & i = j \\ 1, & i > j \end{cases}$$

где $\xi = \frac{\gamma}{K_j} \left(1 - \sum_{i=1}^{j-1} \frac{K_i}{\gamma} \right)$.

Доказательство. Произведем несколько преобразований системы (7). Изначально вынесем из знаменателя нелинейного ограничения γ :

$$\sum_{i=1}^N \frac{K_i(1 - g_i)}{g_i + \gamma(1 - g_i)} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{K_i}{\gamma} \right) \frac{(1 - g_i)}{\frac{g_i}{\gamma} + (1 - g_i)}$$

Далее произведем преобразование задачи (7) из задачи минимизации в задачу максимизации:

Максимизировать: $\sum_{i=1}^N (1 - g_i)$

При условии:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \left(\frac{K_i}{\gamma} \right) \frac{(1 - g_i)}{\frac{g_i}{\gamma} + (1 - g_i)} \leq 1 \\ g_i \in [0, 1], i = \overline{1, N} \end{cases}$$

Введем обозначение $x_i = (1 - g_i) / \left(\frac{g_i}{\gamma} + (1 - g_i) \right)$. Значение x_i монотонно зависит от величины g_i и может принимать значения в отрезке $[0, 1]$. Выразим значения g_i и $(1 - g_i)$ из x_i :

$$g_i = \frac{\gamma(1 - x_i)}{x_i + \gamma(1 - x_i)}; \quad 1 - g_i = \frac{x_i}{x_i + \gamma(1 - x_i)}$$

Основываясь на введенных обозначениях, оптимизационная задача (7) принимает следующий вид:

Максимизировать: $\sum_{i=1}^N \frac{x_i}{x_i + \gamma(1 - x_i)}$

При условии:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \left(\frac{K_i}{\gamma} \right) x_i \leq 1 \\ x_i \in [0, 1], i = \overline{1, N} \end{cases} \quad (9)$$

Легко показать, что целевая функция задачи (9) соответствует требованиям к целевой функции задачи (8). Основываясь на настоящем факте, решение задачи (9) может быть получено при использовании алгоритма 1, где $w_i = \left(\frac{K_i}{\gamma}\right), i = \overline{1, N}$ и $W = 1$. Таким образом, задача (7) сведена к задаче (8), а алгоритм 2 является адаптацией алгоритма 1 в обозначениях оптимизационной задачи (7) и взаимосвязи между значениями g_i и x_i . Данный факт завершает доказательство.

Обобщая сказанное ранее, в результате была найдена величина G , характеризующая максимально возможную эффективность алгоритмов распределения ресурсов радиоканала в централизованных беспроводных телекоммуникационных сетях при передаче неадаптивных видеопотоков.

Эвристический алгоритм планирования для минимизации нормированного отношения длительностей буферизации и просмотра

В настоящей статье предлагается концепция построения алгоритмов планирования распределения ресурсов беспроводного канала с учетом требований к качеству восприятия абонента: *совместное планирование*. В классических планировщиках: Round Robin, обеспечивающий равный доступ к ресурсам канала связи, и Proportional Fair, обеспечивающий равные скорости передачи информации пользователям, приоритет на частотно-временные ресурсы для каждого пользователя вычисляется незави-

симо, и далее пользователь с максимальным приоритетом получает данный ресурс. В рамках этого исследования предлагается разработать эвристический планировщик, который при вычислении приоритета будет учитывать характеристики беспроводного канала и загружаемого видеоряда всего множества абонентов в соте. Данная концепция позволяет увеличить эффективность алгоритмов планирования для передачи неадаптивных видеопотоков по протоколу HTTP.

В предлагаемом планировщике будет использован алгоритм 2, позволяющий произвести вычисление оценки нижней границы для критерия G на основе оценок параметров сети передачи информации и просматриваемых пользователями видеоданных. В результате работы алгоритма 2 будут доступны значения $\hat{g}_i, i = \overline{1, N}$, определяющие оценку минимально возможного значения критерия G . Используя данные значения, возможно вычислить рекомендуемые скорости передачи информации для каждого пользователя:

$$S_i^{rec}(t) = \begin{cases} \hat{R}_i(t), & \hat{g}_i(t) = 0 \\ \hat{R}_i(t)(1 - \hat{g}_i(t)), & \hat{g}_i(t) \in (0, 1), i = \overline{1, N}, \\ S^{\min}, & \hat{g}_i(t) = 1 \end{cases}$$

где S^{\min} – минимальная скорость передачи информации, обеспечиваемая алгоритмом планирования, обусловленная требованиями стандартов связи; $\hat{R}_i(t)$ – оценка битовой скорости просматриваемого видеопотока пользователем i в момент времени t , доступной от системы анализа трафика, встроенной в опорную сеть оператора.

Таким образом, появляется задача обеспечения рекомендуемых скоростей получения информации на базовой станции. Для решения настоящей задачи предлагается в каждом слоте оценивать две характеристики для каждого пользователя: максимально достижимую скорость канала и скорость передачи информации в каждый момент времени – $C_i^{avg}(t)$ и $S_i^{avg}(t)$ соответственно по следующим методикам:

$$C_i^{avg}(t) = \left(1 - \frac{1}{w_C(t)}\right) C_i^{avg}(t-1) +$$

$$+ \left(\frac{1}{w_C(t)}\right) C_i(t).$$

$$S_i^{avg}(t) = \left(1 - \frac{1}{w_S(t)}\right) S_i^{avg}(t-1) + \left(\frac{1}{w_S(t)}\right) \frac{P_i(t)}{\Delta t},$$

где $w_C(t) = \min(t - t_i^l + 1, \bar{w}_C)$, $w_S(t) = \min(t - t_i^l + 1, \bar{w}_S)$; t_i^l – последний момент времени, когда для пользователя i была информация для передачи; \bar{w}_C и \bar{w}_S – длительности интервалов усреднения для оценок C_i^{avg} и S_i^{avg} соответственно; $P_i(t)$ – количество бит, которое пользователь i передал в момент времени t ; Δt – длительность слота; $S_i^{avg}(0) = C_i^{avg}(0) = 0$.

Данные методики основаны на оценке среднего значения методом экспоненциального забывания с изменяемой длитель-

ностью усреднения. Так как пользователь делает паузы между просмотрами, то будем считать пользователя активным в момент времени t , если у него есть данные для передачи на базовой станции, иначе будем считать пользователя неактивным.

Для обеспечения рекомендуемой скорости передачи информации модифицируем метод вычисления приоритета планировщика Proportional Fair:

$$p_{r,i}(t) = 1\{S_i^{avg}(t) \leq S_i^{rec}(t)\} \frac{C_i^{avg}(t)}{S_i^{avg}(t)}, \quad (10)$$

где $p_{r,i}(t)$ – приоритет пользователя i на частотно-временной ресурс r в момент времени t , $1\{\}$ – индикаторная функция.

Подобная модификация не позволяет алгоритму планирования выделять ресурсы пользователю, чья оценка скорости передачи превышает рекомендуемую скорость получения информации. Такой подход позволяет обеспечить скорость получения информации пользователем, равную рекомендуемой.

На основе описанного выше предлагается алгоритм 3, который минимизирует значение критерия G .

Алгоритм 3. Совместное планирование распределения ресурсов радиоканала для минимизации критерия G в каждом слоте.

1. Определить список активных пользователей, у которых имеются данные для передачи на базовой станции.

2. Вычислить оценки нижней границы $\hat{g}_i, i = \overline{1, N}$ при $K_i = \hat{R}_i(t) / C_i^{avg}(t)$ и $\gamma = 1$ (алгоритм 2).

3. Для каждого активного пользователя вычислить рекомендуемые скорости передачи информации, используя вычисленные значения оценки нижней границы на Шаге 2.

4. Для каждого частотно-временного ресурса найти активного пользователя с максимальным приоритетом в соответствии с выражением (10).

5. Выделить пользователям с максимальным приоритетом частотно-временные ресурсы.

6. Обновить значения C_i^{avg} и S_i^{avg} для $i = \overline{1, N}$.

Численный пример. Для демонстрации эффективности предложенного планировщика в сравнении с существующими эвристическими и нижней границей было проведено моделирование в низкоуровневой системе моделирования NS-3, полностью соответствующей стандарту LTE. В данной системе моделирования был имплементирован комплекс оконечных устройств, реализующий передачу видеоданных по протоколу DASH [3, 16].

Пользователи расставлены на линии по удалению от базовой станции с равным расстоянием между соседними устройствами с максимальным удалением от базовой станции равным 700 м. Затухание при распространении сигнала описывается моделью городской застройки Окамура-Хата. Плоские замирания канала обусловлены движением окружения со скоростью 3 км/ч. Все пользователи смотрят ролики длительностью 300 с с битовой скоростью 1 Мбит/с. Паузы между роликами распределены по усеченному экспоненциальному закону с математическим ожиданием 30 с в отрезке [15,45] с. Алгоритм планирования гарантирует каждому пользователю скорость получения информации не менее 100 Кбит/с.

В представленном сценарии увеличивалось число пользователей и анализировалась эффективность алгоритмов планирования (рис. 3). Из результатов, представленных на рисунке, следует, что предложенный алгоритм планирования обеспечивает меньшие значения критерия G по сравнению с существующими аналогами и значения, близкие к найденной нижней границе. Также при зафиксированном значении критерия качества предложенный планировщик обеспечивает на 7–14 % больше удовлетворенных пользователей относительно известных эвристик и, как следствие, обладает большей эффективностью.

Заключение

В статье рассмотрена модель передачи неадаптивного видео по протоколу HTTP в беспроводных централизованных системах, в которой условия беспроводного канала связи изменяются во времени. Для дан-

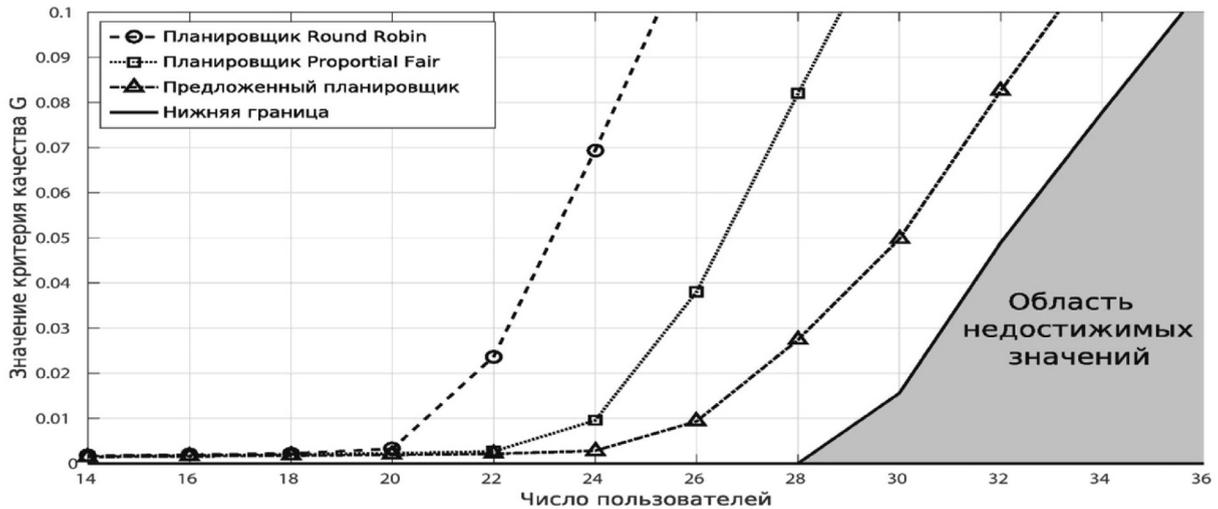


Рис. 3. Сравнение эффективности алгоритмов планирования с найденной нижней границей

ной модели предложена взаимосвязь между характеристиками системы передачи информации и воспроизведением видеоряда. Основываясь на найденной взаимосвязи, найдена нижняя граница по всевозможным алгоритмам планирования распределения ресурсов беспроводного канала, удовлетворяющим введенной модели, для нормированного отношения длительностей буферизации и просмотра.

Предложен эвристический алгоритм планирования, обладающий эффективностью на 7–14 % больше, чем известные эвристики. Эффективность предложенного

планировщика близка к найденной нижней границе.

Полученный результат позволяет увеличить эффективность беспроводных систем для передачи видеоданных по протоколу HTTP и сформировать требования к алгоритмам планирования, учитывающие качество восприятия контента, для текущего и последующих поколений беспроводных сетей.

Работа выполнена в рамках инициативного научного проекта № 8.8540.2017/БЧ «Разработка алгоритмов передачи данных в системах IoT с учетом ограничений на сложность устройств».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2016–2021 White Paper. 2017 // URL: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html> (Дата обращения: 01.04.2017).
2. Oyman O., Singh S. Quality of Experience for HTTP Adaptive Streaming Services // IEEE Communication Magazine. 2012. No. 4. Pp. 20–27. DOI: 10.1109/issn0163-6804
3. 3GPP TS 26.247 v14.0.0. Transparent End-to-End Packet Switched Streaming Service (PSS); Progressive Download and Dynamic Adaptive Streaming Over HTTP (3GP-DASH) // 3GPP. 2016. 104 p.
4. Bakin E., Evseev G., Turlikov A. Lower Bound of Mean user Waiting/Watching Time Ratio in Wireless Video Streaming Network // IEEE Global Communications Conf. Austin TX, 2014. Pp. 1170–1175.
5. Video as a Basic Service of LTE Networks: Mobile vMOS Defining Network Requirements // URL: <http://www.huawei.com/minisite/4-5g/en/industryjsdc-j.html> (Дата обращения: 01.04.2017).
6. P.1201. Amendment 2, Parametric Non-intrusive Assessment of Audiovisual Media Streaming Quality Amendment 2: New Appendix III Use of ITU-T P.1201 for Non-adaptive, Progressive Download Type Media Streaming. ITU-T, 2013. 23 p.
7. Essaili A.E., Schroeder D., Staehle D. et al. Quality-of-Experience Driven Adaptive HTTP Media Delivery // IEEE ICC 2013 – Communication QoS, Reliability and Modeling Symp. Budapest, 2013. Pp. 2480–2485.
8. Pu W., Zou Z., Chen C.W. Video Adaptation

Proxy for Wireless Dynamic Adaptive Streaming over HTTP // Proc. of 19th Intern. Packet Video Workshop. Munich, 2012. Pp. 65–70.

9. **Chen Y.C., Chang J.W., Wei H.Y.** A Multi-level QoE Framework for Smartphone Video Streaming Applications // 2014 Globecom Workshops. Austin TX, 2014. Pp. 225–230.

10. **Bui N., Valentin S., Widmer J.** Anticipatory Quality-Resource Allocation for Multi-user Mobile Video Streaming // IEEE Conf. on Computer Communications Workshops. Hong Kong, 2015. Pp. 245–250.

11. **Khan A., Sun L., Jammeh E., Ifeachor E.** Quality of Experience-Driven Adaptation Scheme for Video Applications over Wireless Networks // IET Communications. 2010. No. 11. Pp. 1337–1347. DOI: 10.1049

Статья поступила в редакцию 03.07.2017

REFERENCES

1. *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2016–2021 White Paper. 2017.* Available: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html> (Accessed: 01.04.2017).

2. **Oyman O., Singh S.** Quality of Experience for HTTP Adaptive Streaming Services. *IEEE Communication Magazine*, 2012, No. 4, Pp. 20–27. DOI: 10.1109/issn0163-6804

3. 3GPP TS 26.247 v14.0.0. Transparent End-to-End Packet Switched Streaming Service (PSS); Progressive Download and Dynamic Adaptive Streaming Over HTTP (3GP-DASH). *3GPP*, 2016, 104 p.

4. **Bakin E., Evseev G., Turlikov A.** Lower Bound of Mean user Waiting/Watching Time Ratio in Wireless Video Streaming Network. *Proc. of the IEEE Global Communications Conf.*, Austin TX, 2014, Pp. 1170–1175.

5. *Video as a Basic Service of LTE Networks: Mobile vMOS Defining Network Requirements.* Available: <http://www.huawei.com/minisite/4-5g/en/industryjsdc-j.html> (Accessed: 01.04.2017).

6. P.1201. Amendment 2, Parametric Non-intrusive Assessment of Audiovisual Media Streaming Quality Amendment 2: New Appendix III Use of ITU-T P.1201 for Non-adaptive, Progressive Download Type Media Streaming. *ITU-T*, 2013. 23 p.

7. **Essaili A.E., Schroeder D., Staehle D. et al.** Quality-of-Experience Driven Adaptive HTTP Media Delivery. *IEEE ICC 2013 – Communication QoS, Reliability and Modeling Symp.*, Budapest, 2013, Pp. 2480–2485.

Received 03.07.2017

12. **Hosek J., Ries M., Vajsar P. et al.** Mobile web QoE Study for Smartphones // IEEE Globecom Workshops. Atlanta, 2013. Pp. 1157–1161.

13. **Hosek J., Vajsar P., Nagy L. et al.** Predicting user QoE satisfaction in current mobile networks // IEEE Intern. Conf. on Communications. Sydney, 2014. Pp. 1088–1093.

14. **Cormen T.H., Leiserson, C.E., Rivest R.L., Stein C.** Introduction to Algorithms. 3rd. MIT Press and McGraw-Hill.

15. **Моисеев Н.Н., Иванилов Ю.П., Столярова Е.М.** Методы оптимизации. М.: Наука, 1978. 351 с.

16. Dash Industry Forum // URL: <https://github.com/Dash-Industry-Forum/dash.js/wiki> (Дата обращения: 01.04.2017).

8. **Pu W., Zou Z., Chen C.W.** Video Adaptation Proxy for Wireless Dynamic Adaptive Streaming over HTTP. *Proc. of 19th Intern. Packet Video Workshop*, Munich, 2012, Pp. 65–70.

9. **Chen Y.C., Chang J.W., Wei H.Y.** A Multi-level QoE Framework for Smartphone Video Streaming Applications. *2014 Globecom Workshops*, Austin TX, 2014, Pp. 225–230.

10. **Bui N., Valentin S., Widmer J.** Anticipatory Quality-Resource Allocation for Multi-user Mobile Video Streaming. *Proc. of the IEEE Conference on Computer Communications Workshops*, Hong Kong, 2015, Pp. 245–250.

11. **Khan A., Sun L., Jammeh E., Ifeachor E.** Quality of Experience-Driven Adaptation Scheme for Video Applications over Wireless Networks, *IET Communications*, 2010, No. 11, Pp. 1337–1347. DOI: 10.1049

12. **Hosek J., Ries M., Vajsar P. et al.** Mobile web QoE Study for Smartphones. *2013 IEEE Globecom Workshops*, Atlanta, 2013, Pp. 1157–1161.

13. **Hosek J., Vajsar P., Nagy L. et al.** Predicting user QoE Satisfaction in Current Mobile Networks. *Proc. of the IEEE Intern. Conference on Communications*, Sydney, 2014, Pp. 1088–1093.

14. **Cormen T.H., Leiserson, C.E., Rivest R.L., Stein C.** Introduction to Algorithms, 3rd., MIT Press and McGraw-Hill.

15. **Moiseev N.N., Ivanilov U.P., Stolyarova E.M.** *Metody optimizatsii [Optimization methods]*. Moscow: Nauka Publ., 1978, 351 p. (rus)

16. Dash Industry Forum. Available: <https://github.com/Dash-Industry-Forum/dash.js/wiki> (Accessed: 01.04.17).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ПАСТУШОК Игорь Анатольевич

PASTUSHOK Igor A.

E-mail: i.pastushok@vu.spb.ru

ТЮРЛИКОВ Андрей Михайлович

TURLIKOV Andrey M.

E-mail: turlikov@vu.spb.ru