

Аналитический метод расчета эффективности сетей передачи мультимедийного контента

П. А. ПРИСТАВКА^{1,*}, Б. Я. РЯБКО²

¹Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, Россия

²Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

*Контактный e-mail: ppa.official@gmail.com

Предложен основанный на теоретико-информационном подходе метод оценки эффективности сетей передачи данных. Метод позволяет получить априорную оценку эффективности проектируемой сети на основе информации о ее параметрах, так как для получения оценки не требуется наличия действующей сети и данных, получаемых в процессе ее эксплуатации. Дано описание метода, а также приведены примеры его использования для оценки эффективности сетей доставки контента и сетей на базе peer-to-peer-технологии.

Ключевые слова: сети доставки контента, CDN, peer-to-peer, оценка эффективности, энтропийная эффективность, теория информации.

Введение

В настоящее время большое развитие и распространение получили различные телекоммуникационные услуги и технологии, значительную часть которых составляют системы и сервисы для хранения, обработки и трансляции мультимедийных данных. Недавние исследования компании Cisco показывают существенную долю подобных данных в объеме глобального IP-трафика, значительное количество конечных потребителей контента и, что более важно, прогнозы крайне динамичных темпов роста указанных показателей. Так, ожидается, что к 2020 г. ежегодный глобальный IP-трафик достигнет отметки в 2.3 зетабайта, при этом 82 % от него будут составлять видеоданные, демонстрируя трехкратный рост по отношению к 2015 г. Прогнозируется к 2020 г. ежесекундная передача по сетям одного миллиона минут видео. Ожидается, что количество подключенных к сетям физических устройств составит 26.3 млрд, увеличившись, таким образом, на 10 млрд по сравнению с 2015 г. [1]. Согласно данным [2], по состоянию на март 2017 г. общая численность Интернет-аудитории составляет чуть более 3.7 млн пользователей. Вследствие важности указанного сегмента телекоммуникационных услуг задачей создания и улучшения различных средств доставки контента до конечного пользователя занимается большое количество исследователей и разработчиков. Среди существующих современных решений в первую очередь следует отметить сети доставки контента, представляющие сейчас один из наиболее распространенных способов дистрибуции данных. Так, согласно [1], на долю CDN по состоянию на 2015 г. приходилось 45 % всего Интернет-трафика, а прогнозируемое на 2020 г. значение этого показателя составляет 64 %, т. е. около двух третей от общего объема. Другим значимым классом реше-

ний, используемых для доставки мультимедийного контента, являются сети, построенные на базе технологии peer-to-peer (P2P). Такие сети нашли широкое применение на практике и используются, в частности, для передачи более половины всего трафика, соответствующего обмену файлами [3].

Особое внимание в силу большой значимости технических решений для доставки мультимедийного контента уделяется исследованию их эффективности (см., например, [4–6]). Однако, несмотря на предпринимаемые попытки создать единую методику для оценки эффективности различных средств передачи контента, на сегодняшний день отсутствует общепринятый объективный подход. Применяемые сегодня на практике решения предполагают либо анализ показателей, полученных в процессе эксплуатации уже существующих CDN, либо анализ только отдельных свойств или компонентов сети. Как пример характеристики, анализируемой в рамках первого подхода, можно указать коэффициент попадания в кэш или осознаваемое клиентами время отклика для сетей доставки контента, использующих технику кэширования. Примерами анализируемых в рамках второго подхода показателей служат количество узлов и общий объем предоставленных для загрузки ресурсов в сетях на базе технологии P2P.

Данная работа посвящена описанию и исследованию аналитического подхода для оценки эффективности сетей передачи контента с различными априорными вероятностями обращения к файлам. В отличие от применяемых сегодня методов, этот подход предоставляет комплексную оценку эффективности всей сети как единого целого и не предполагает обязательного наличия готового образца функционирующей системы. Оценка показателя эффективности вычисляется на основе информации о параметрах проектируемой системы — ее типа, количества и емкости серверов, числа пользователей, скорости соединений между ними и других характеристик. Исследование предложенного метода производилось на примере сетей передачи мультимедийного контента двух рассмотренных выше типов ввиду их распространенности.

В статье приведено общее описание модели и метода вычисления оценки эффективности, рассмотрен вопрос приложения метода к оценке характеристики CDN- и P2P-сетей, дано общее заключение по результатам исследований.

1. Общее описание модели и методов вычисления

В работе [7] показано, как теоретико-информационный подход может быть использован для определения оценки эффективности процессоров с учетом характера выполняемых на них задач. Это направление развито в [8], где было предложено, как данные идеи можно также использовать для определения эффективности сетей передачи данных с различными вероятностями обращения к файлам контента.

Опишем метод, представленный в [8]. Пусть ω — узел некоторой сети Ω , на который загружаются файлы $F = \{f_1, \dots, f_n\}$, $n \geq 0$, в соответствии с заданным распределением вероятностей. Определим такую величину, как энтропийная эффективность, которая будет использоваться для характеристики производительности (эффективности) сети. В рамках данной задачи введем предположение, что для каждого узла ω последовательность файлов f_1, f_2, \dots , которые на него будут загружены, генерируется стационарным и эргодическим процессом. Приведем далее необходимые определения, основываясь на теории информации. Пусть стационарный и эргодический источник z порождает буквы из конечного алфавита A . Энтропия порядка n по Шеннону, а также предел данной энтропии определяются следующим образом [9]:

$$h_n(z) = -\frac{1}{n+1} \sum_{u \in A^{n+1}} P_z(u) \log P_z(u), \quad h_\infty(z) = \lim_{n \rightarrow \infty} h_n(z),$$

где $n \geq 0$, а $P_z(u)$ — вероятность того, что $z_1 z_2 \dots z_{|u|}$. Отметим, что мы рассматриваем случай, когда сообщения порождаются независимо и с одинаковым распределением вероятностей (так называемый i.i.d.-источник).

Теперь определим энтропийную эффективность. Пусть для каждого узла $\omega \in \Omega$, где Ω — сеть передачи данных, последовательность загружаемых файлов f_1, f_2, \dots порождается стационарным и эргодическим источником φ_ω , и пусть $\tau_\omega(f)$ — время загрузки файла f узлом ω . Тогда энтропийная эффективность узла определяется как

$$c(\omega, \varphi_\omega) = \frac{h_\infty(\varphi_\omega)}{\sum_{f \in F} P_{\varphi_\omega}(f) \tau_\omega(f)}.$$

Здесь P_{φ_ω} — вероятность того, что на узел ω загружается файл f . Энтропийная эффективность сети Ω вычисляется как

$$c(\Omega, \hat{\varphi}) = \sum_{\omega \in \Omega} c(\omega, \varphi_\omega),$$

где $\hat{\varphi} = (\varphi_{\omega_1}, \varphi_{\omega_2}, \dots, \varphi_{\omega_{|\Omega|}})$.

По сути, энтропийная эффективность сети — характеристика скорости роста числа файлов, которые могут быть переданы в сети за время t при его увеличении. Точнее, количество передаваемых в сети файлов как функции времени описывается формулой $N(t) = 2^{c(\Omega, \hat{\varphi}) t}$. Таким образом, энтропийная эффективность сети является оценкой показателя ее производительности.

Как следует из определения энтропийной эффективности узла, отличительной способностью предлагаемого подхода является возможность учета различных вероятностей обращений к файлам контента. Для моделирования указанного распределения вероятностей использован закон Ципфа [10]. Изначально эта закономерность сформулирована при исследовании частоты встречаемости слов в текстах на естественных языках, однако позже было показано, что она выполняется и для многих социальных и экономических явлений, к числу которых относится, например, распределение доходов между группами общества или плотность заселенности городов. Одно из объяснений закона Ципфа, основанное на корреляционных свойствах аддитивных марковских цепей (со ступенчатой функцией памяти), дано в 2005 г. [10].

Закон Ципфа, устанавливающий зависимость между номером элемента в упорядоченной последовательности и частотой его использования, применительно к рассматриваемой задаче может быть использован следующим образом. Пусть F — множество всех возможных файлов, доступных для загрузки пользователями сети, состоящее из N элементов (файлов), пронумерованных от 1 до N . Тогда

$$P(f_i) = \frac{1/i}{\sum_{j=1}^N 1/j}.$$

Здесь $P(f_i)$ — вероятность обращения пользователя к i -му файлу. Подчеркнем, что выполнение закона Ципфа для частот обращения к различным данным (книгам, статьям и подобным объектам) подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями.

2. Оценка эффективности сетей доставки контента

Сетью доставки контента (Content Delivery Network, CDN) называется сетевая инфраструктура географически распределенных серверов, предназначенная для обработки запросов пользователей с целью получения содержимого. Приведем основной принцип устройства CDN [11–15]. Данные, размещенные на оригинальном сервере и представляющие собой уникальный контент Интернет-ресурса, доступ к которому подвергается оптимизации, частично или полностью реплицируются на периферийных серверах, географически расположенных в различных местах, и поддерживаются в актуальном состоянии. При обращении пользователя к файлам Интернет-ресурса специальная служба инфраструктуры CDN перенаправляет запрос на обладающий требуемыми данными доступный узел, который согласно специальной метрике считается оптимальным для отдачи требуемых данных. Методика выбора кэширующего сервера для отдачи контента варьируется в различных системах. В качестве подобного узла могут быть выбраны, например, наименее топологически удаленный сервер (т. е. узел, расстояние до которого содержит минимальное количество транзитных участков), сервер, связанный с клиентом каналом, имеющим наибольшую скорость передачи данных, наиболее пригодный с точки зрения серверной производительности узел или, если производится стоимостная оптимизация, сервер в регионе присутствия с наименее дорогой стоимостью передачи трафика. Отметим, что здесь и далее в наших расчетах под скоростью передачи данных будем понимать наибольшую возможную скорость передачи по каналу пользовательских данных.

Целью проводимых экспериментальных вычислений является демонстрация возможности анализа влияния характеристик сетей доставки контента на ее эффективность. Предполагается, что на основе данного анализа могут быть априорно количественно оценены результаты различных вариантов оптимизации системы и с учетом ресурсных затрат для внесения соответствующих изменений принято решение о перечне реализуемых действий. Для проведения вычислений разработан программный комплекс, моделирующий работу сети доставки контента, ориентированной на дистрибуцию видеофайлов, и на основе метода, представленного в разд. 1, вычисляющего оценку ее эффективности в заданном состоянии. В рамках модели состояние сети определяется набором следующих параметров: количество кэширующих серверов, число клиентов, емкость дискового пространства кэширующего сервера (предполагается равной для всех кэширующих серверов), количество различных видеофайлов, доступных в сети, размер файлов контента (предполагается равным для всех файлов), характеристика каналов между клиентами и различными кэширующими серверами, характеристика каналов между клиентами и оригинальным сервером. При моделировании использовалась схема кэширования, предполагающая размещение максимально возможного количества самых востребованных файлов на каждом из соответствующих серверов. Предполагается, что требуемый файл будет загружаться с узла, соединенного с клиентом каналом с наибольшей скоростью передачи данных. Значения параметров, определяющих начальное состояние сети, приведено в табл. 1.

Значения параметров модели CDN (кроме характеристики каналов):

- количество кэширующих серверов 100 шт.;
- количество клиентов 1000 шт.;
- емкость дискового пространства кэширующего сервера 10 ТБ;
- количество различных файлов, доступных в сети, 5000 шт.;
- размер файлов контента 10 ГБ.

Т а б л и ц а 1. Характеристика каналов модели CDN

Назначение каналов	Скорость передачи данных, Мбит/с	Доля от общего количества каналов, %
Клиент — кэширующий сервер	10	20
	5	60
	2	20
Клиент — оригинальный сервер	1	100

Из сказанного выше и табл. 1 видно, что количество различных файлов в сети, доступных для скачивания, равно 5000, а размер одного файла равен 10 ГБ, что соответствует фильму хорошего качества. В табл. 1 содержится информация о заданных значениях скорости передачи данных каналов модели CDN. Из нее следует, что для 60 % каналов скорость передачи данных между клиентами и кэширующими серверами составляет 5 Мбит/с, а канал между любым из клиентов и оригинальным сервером обладает скоростью передачи данных, равной 1 Мбит/с.

Производился анализ влияния на оценку эффективности двух характеристик — емкости дискового пространства кэширующих серверов и доли каналов с наибольшей скоростью передачи данных. Предполагается, что повышение в процентном отношении количества каналов с наибольшей скоростью передачи данных соответствует введению дополнительных точек присутствия (points of presence), так как установка новых платформ, по сути, приводит к созданию каналов для доступа к реплицированному контенту с более высокой скоростью передачи данных.

Таким образом, вычисления были направлены на анализ двух возможных путей повышения эффективности CDN — увеличение емкости дискового пространства кэширующих серверов и введение в эксплуатацию дополнительных платформ. Первая часть вычислительного эксперимента осуществлялась следующим образом. Для параметров, определяющих начальное состояние CDN, произведена оценка эффективности сети. Далее, параметру емкости дискового пространства кэширующего сервера поочередно присваивались новые, увеличенные, значения и при сохранении прежних значений всех остальных параметров состояния сети вычислялись соответствующие оценки эффективности CDN. Расчеты в рамках второй части вычислительного эксперимен-

Т а б л и ц а 2. Результаты увеличения емкости дискового пространства кэширующих серверов

Емкость дискового пространства, ТБ	Энтропийная эффективность, бит/с
10	0.312561
11	0.320883
12	0.328918
13	0.336713
14	0.344305
20	0.38695
30	0.453011
40	0.518798
50	0.588478

Т а б л и ц а 3. Результаты изменения скорости передачи данных в каналах между клиентами и кэширующими серверами

Доля от общего количества каналов, %			Энтропийная эффективность, бит/с
10 Мбит/с	5 Мбит/с	2 Мбит/с	
20	60	20	0.312561
30	50	20	0.322692
40	40	20	0.332823
50	30	20	0.342954
60	20	20	0.353085

та производились аналогично, с тем отличием, что варьированию подвергалось число каналов со скоростью передачи данных 10 и 5 Мбит/с — доля первых от общего количества каналов между клиентами и кэширующими серверами увеличивалась, а доля вторых — уменьшалась.

Результаты вычислений представлены в табл. 2 и 3. В табл. 3 показана доля в процентах от общего количества каналов между пользователями и кэширующими серверами соединений со скоростями передачи данных 10, 5 и 2 Мбит/с, а также характеристика эффективности при заданных параметрах модели.

Анализ данных табл. 2 и 3 не только ожидаемо показывает улучшение характеристики эффективности CDN при соответствующих изменениях параметров, но и позволяет произвести количественную оценку данного показателя.

3. Оценка эффективности файлообменных сетей P2P

Децентрализованная компьютерная сеть P2P основана на равноправном положении участников. Узлы, входящие в состав сети P2P, выполняют как клиентские, так и серверные функции. Каждый из участников (узлов), входящих в сеть P2P, обладает возможностью связаться с любым другим участником и отправить ему запрос на получение требуемых ресурсов в пределах данной сети, выступая как клиент. В качестве сервера каждый узел сети должен быть способен принимать такие запросы, обрабатывать их и отправлять требуемые ресурсы. Дополнительно каждый узел должен обеспечивать выполнение вспомогательных административных функций (например, хранить и поддерживать актуальным список участников сети). Ресурсами, которые требуют или предоставляют участники сети, являются вычислительная мощность, объем диска или пропускная способность. Применение сетей P2P при создании различных прикладных систем обеспечивает им ряд существенных преимуществ, к числу которых относятся, например, более высокая отказоустойчивость при потере связи с несколькими узлами и увеличение производительности с ростом числа участников. Благодаря указанным свойствам сети P2P сегодня лежат в основе большого количества технических решений в таких областях, как распределенные вычисления, аудио- и видеосвязь, платежные системы.

Наиболее распространенной областью применения сетей P2P является создание файлообменных систем, включая ориентированные на дистрибуцию мультимедийного контента. Общее устройство подобных систем может быть описано следующим образом. Каждый узел предоставляет другим участникам сети доступ к определенному набору

файлов путем помещения его в специальную директорию своей файловой системы. При необходимости осуществить загрузку некоторого предоставленного другими участниками файла узел средствами инфраструктуры сети P2P отправляет соответствующий запрос, получает список источников, обладающих необходимым файлом, и производит его копирование на собственное дисковое пространство. Файлообменные P2P-сети позволяют производить загрузку одного необходимого файла параллельно с нескольких узлов за счет копирования с каждого из источников различных сегментов требуемого контента. Подробное описание сетей P2P, предназначенных для дистрибуции файлов, дано в [16, 17].

Вычисления на данном этапе работы производились с целью демонстрации возможности анализа соотношения ресурсных затрат к количественно оцененному приросту эффективности сети P2P. Также для проведения исследований был реализован программный комплекс, моделирующий упрощенно, но с соблюдением основных принципов работу объекта исследования, предназначенного для обмена видеофайлами, и вычисляющий оценку его эффективности в заданном состоянии. Набор параметров, определяющих состояние программной модели сети P2P, включает в себя количество участников (узлов), количество файлов, представляющих потенциальные ресурсы сети, размер файлов контента (предполагается равным для всех представленных файлов), характеристику типов профилей участников, характеристику каналов между узлами. Заполнение узлов ресурсами, предоставленными другим участникам для загрузки, моделируется следующим образом.

На основе данных о количестве потенциальных ресурсов сети формируется распределение вероятностей востребованности файлов и в соответствии с ним на рабочем отрезке $[0; 1]$ располагаются точки таким образом, что длины образованных отрезков равняются вероятностям обращения к файлам сети. Предполагается, что каждый такой отрезок будет соответствовать одному конкретному файлу. Данная процедура аналогична соответствующим действиям, производимым при арифметическом кодировании [18]. Далее путем генерации случайного числа из диапазона $[0; 1]$ и определения участка рабочего отрезка, которому оно принадлежит, производится выбор соответствующего файла. Для каждого узла сети на основе информации о его профиле программный модуль производит выбор и помещение необходимого количества файлов в список ресурсов, предоставляемых соответствующим участником. Очевидно, что чем выше заданная вероятность обращения к файлу, тем чаще он будет встречаться на различных узлах сети, что соответствует более частой встречаемости популярных файлов, а также, в обратном случае, существованию редких ресурсов. Предполагается, что при необходимости загрузки файла он будет скачиваться участником параллельно со всех узлов, обладающих требуемым контентом. При этом дополнительно вводится программное ограничение в 10 Мбит/с на максимально возможную скорость загрузки файла, что соответствует присутствию физических ограничений при использовании каналов реальных файлообменных P2P-сетей.

Отдельным вопросом при моделировании стало определение значения скорости загрузки узлом файла, находящегося на собственном жестком диске участника. В качестве значения данной величины предлагается использовать либо скорость записи данных на жесткий диск узла, либо любое значение, искусственно обеспечивающее выполнение логического условия, что “загрузка” собственных файлов будет всегда происходить для узла быстрее, чем при параллельном обращении ко всем остальным участникам сети. Для упрощения вычислений использовался второй подход и значение указанной вели-

Т а б л и ц а 4. Характеристика типов профилей модели сети P2P

Номер профиля	Количество файлов узла, шт.	Доля от количества узлов, %
1	1024	25
2	102	50
3	10	25

Т а б л и ц а 5. Характеристика моделируемых каналов передачи данных сети P2P

Скорость передачи данных, Мбит/с	Доля от общего количества каналов, %
5	20
1	60
0.5	20

чины определялось равным 30 Мбит/с. Отметим, что особенность загрузки файла по протоколу P2P как возможность копирования с узла неполного файла, а лишь части составляющих его сегментов может быть учтена при моделировании путем установки значения размера файла контента равным размеру сегмента. Для упрощения демонстрации при моделировании загрузка полного файла определялась при обращении узла. Значения параметров, определяющих начальное состояние сети, приведено ниже и в табл. 4, 5. Параметры модели сети P2P (кроме характеристики типов профилей и каналов):

- количество узлов 500 шт.;
- количество потенциальных файлов контента 10 000 шт.;
- размер файла контента 10 ГБ.

Видно, что в созданной модели сети 50 % участников предоставляют для загрузки другим узлам сети ресурсы в объеме 102 файла, что соответствует примерно 1 ТБ информации. В табл. 5 содержатся данные о процентном отношении количества каналов с заданной скоростью к общему количеству каналов.

Вычисления были направлены на анализ таких путей повышения эффективности сети P2P, как улучшение скорости передачи данных по каналам между узлами, изменение количества участников, а также увеличение объема личных ресурсов, предоставляемых узлами для загрузки другим участникам сети. Все экспериментальные вычисления состояли из трех этапов, каждый из которых выполнялся по общей схеме — сначала производилась оценка эффективности сети с параметрами, определяющими ее началь-

Т а б л и ц а 6. Результаты улучшения характеристики каналов передачи данных между узлами сети P2P

Характеристика каналов, %			Энтропийная эффективность, бит/с
5 Мбит/с	1 Мбит/с	0.5 Мбит/с	
20	60	20	0.708737
30	50	20	0.734925
40	40	20	0.749348
50	30	20	0.763792
60	20	20	0.774719

Т а б л и ц а 7. Результаты изменения числа участников сети P2P

Количество узлов	100	500	1000	5000
Энтропийная эффективность, бит/с	0.0777277	0.708737	1.61038	8.19785

Т а б л и ц а 8. Результаты увеличения количества предоставляемых участниками ресурсов сети P2P

Доля от общего количества участников, %			Энтропийная эффективность, бит/с
Профиль 1	Профиль 2	Профиль 3	
25	50	25	0.708737
25	55	20	0.716464
25	60	15	0.725072
25	65	10	0.735312
25	70	5	0.742396

ное состояние (см. табл. 4, 5), затем указанная характеристика некоторое число раз вычислялась с различными значениями анализируемого на данном этапе параметра. Результаты полученных при моделировании вычислений представлены в табл. 6–8.

В табл. 6 приведены результаты вычислений с увеличением числа каналов со скоростью передачи данных 5 Мбит/с за счет уменьшения количества соединений, обеспечивающих загрузку со скоростью 1 Мбит/с. В первых трех столбцах приведена доля каналов между участниками в процентах от их общего количества со скоростями передачи данных 5, 1 и 0.5 Мбит/с соответственно, в четвертом — характеристика эффективности при заданных параметрах модели. В табл. 7 представлены результаты моделирования с изменением числа участников сети P2P. Отметим, что добавление или исключение новых участников в рамках модели не влияло на заданное изначальное количественное отношение каналов с различными скоростями передачи данных.

В табл. 8 приведена информация о результатах вычисления характеристики эффективности при увеличении количества предоставляемых участниками сети ресурсов. В рамках исследования моделировалось увеличение доли участников, предоставляющих для загрузки другим участникам ресурсы в объеме 102 файла, т. е. примерно 1 ТБ информации. Иными словами, моделирование предполагало увеличение доли узлов со вторым, самым распространенным типом профиля за счет уменьшения доли участников с типом профиля 3, характеризующимся наименьшим объемом предоставляемых ресурсов. Первые три столбца содержат количественную долю участников с соответствующим типом профиля, четвертый столбец — характеристику эффективности при заданных параметрах модели. Аналогично результатам, приведенным в предыдущем разделе, анализ данных табл. 6–8 не только показывает повышение эффективности сети P2P при улучшении соответствующих параметров, но и позволяет произвести количественную оценку данного показателя.

Заключение

Исследован теоретико-информационный метод для аналитической оценки эффективности сетей передачи данных. Отличительной особенностью метода является возможность производить априорную количественную оценку эффективности проектируемой сети на основе информации о ее предполагаемых параметрах. Два приведенных примера при-

менения предлагаемого метода — оценка CDN и файлообменной сети P2P — не только свидетельствуют об эффективности предлагаемого подхода, но и представляют самостоятельный интерес для разработчиков таких сетей. Точнее, анализ результатов программного моделирования показывает адекватность получаемых значений оценки эффективности характеру вносимых в параметры моделей изменений и свидетельствует о том, что предложенный подход может быть использован в качестве инструмента для выбора наиболее перспективных путей развития инфраструктуры сетей передачи мультимедийного контента с целью увеличения их эффективности.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-07-01851).

Список литературы / References

- [1] The Zettabyte Era — Trends and Analysis — Cisco. Available at: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html> (accessed: 11.04.2017)
- [2] Internet growth statistics. Available at: <http://www.internetworldstats.com/emarketing.htm> (accessed: 11.04.2017)
- [3] Application Usage & Threat Report. Available at: <http://researchcenter.paloaltonetworks.com/appusage-risk-report-visualization/> (accessed: 11.04.2017)
- [4] **Triukose, S., Wen, Z., Rabinovich, M.** Measuring a commercial content delivery network // Proc. of the 20th Intern. Conf. on World Wide Web. ACM, 2011. P. 467–476.
- [5] **Qiu, D., Srikant, R.** Modeling and performance analysis of BitTorrent-like peer-to-peer networks // Comput. Communication Rev. 2004. Vol. 34, No. 4. P. 367–378.
- [6] **Veglia, P., Rossi, D.** Performance evaluation of P2P-TV diffusion algorithms under realistic settings // Peer-to-Peer Networ. and Appl. 2013. Vol. 6, No. 1. P. 26–45.
- [7] **Ryabko, B.** An information-theoretic approach to estimate the capacity of processing units // Performance Evaluation. 2012. No. 69. P. 267–273.
- [8] **Ryabko, B.** Using information theory to study the efficiency and capacity of caching in the computer networks. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1310.3482.pdf> (accessed: 12.04.2017).
- [9] **Cover, T.M., Thomas, J.A.** Elements of information theory. Wiley, 2006. 792 p.
- [10] **Kechedzhy, K.E., Usatenko, O.V., Yampol'skii, V.A.** Rank distributions of words in additive many-step Markov chains and the Zipf law. Available at: <https://arxiv.org/pdf/physics/0406099.pdf> (accessed: 12.04.2017).
- [11] **Gupta, M., Kumar, D.** State-of-the-art of Content Delivery Network // Intern. J. of Comput. Sci. and Inform. Technologies. 2014. Vol. 5, No. 4. P. 5441–5446.
- [12] **Gustavson, F.G.** Cache blocking // Lecture Notes in Comput. Sci. 2012. Vol. 7133. P. 22–32. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-642-28151-8_3
- [13] **Ji, M., Caire, G., Molisch, A.F.** Wireless device-to-device caching networks: Basic principles and system performance. Available at: <http://arxiv.org/abs/1305.5216> (accessed: 12.04.2017).
- [14] **Niessen, U., Shah, D., Wornell, G.** Caching in wireless networks // Proc. IEEE Intern. Symp. Inform. Theory. 2009. P. 2111–2115.

- [15] **Shanmugam, K., Golrezaei, N., Dimakis, A.G. et al.** FemtoCaching: Wireless content delivery through distributed caching helpers // IEEE Trans. Inform. Theory. 2012. Vol. 59, No. 12. P. 8402–8413.
- [16] **Navimipour, N.J., Milani, F.S.** A comprehensive study of the resource discovery techniques in Peer-to-Peer networks // Peer-to-Peer Network. and Appl. 2015. Vol. 8, No. 3. P. 474–492.
- [17] **Androutsellis-Theotokis, S., Spinellis, D.** A survey of peer-to-peer content distribution technologies // ACM Comput. Surveys (CSUR). 2004. Vol. 36, No. 4. P. 335–371.
- [18] **Witten, I.H., Neal, R.M., Cleary, J.G.** Arithmetic coding for data compression // Communications of the ACM. 1987. Vol. 30, No. 6. P. 520–540.

Поступила в редакцию 25 мая 2017 г.

An analytic method of efficiency estimation of multimedia content distribution networks

PRISTAVKA, PAVEL A.^{1,*}, RYABKO, BORIS YA.²

¹Siberian State University of Telecommunications and Computer Sciences, Novosibirsk, 630120, Russia

²Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia

*Corresponding author: Pristavka, Pavel A., e-mail: ppa.official@gmail.com

Purpose. Development and investigation of the method for analytical estimation for the efficiency of data transmission networks basing on the details of the supposed network parameters. This method allow us to evaluate a priori comprehensive estimation of efficiency of the network being designed without the necessity of collecting and analyzing real world network operational data.

Methodology. A set of files to be downloaded by the network node is considered as a subsequence of letters generated by stationary and ergodic process. Basing on the fundamentals of Information theory the entropy efficiency was defined to characterize a capacity of data transmission network. Informally, the value actually indicates the growth rate of the amount of files that can be transmitted via the network depending on a certain unit of time. To model the distribution of the probability of access to files, Zipf's law was used.

Findings. A general description of a method for efficiency estimation of data transmission networks was presented in the paper. Detailed guidelines to apply the method to the estimation of multimedia content delivery networks and file sharing P2P networks, i. e. systems of two wide spread classes, were shown. The method was also investigated on the software models of the systems to show the possibility of using the method as a tool for optimal selection of network parameters.

Originality/value. The suggested information-theoretic method is aimed to analytically estimate the efficiency of the data transmission networks. It can be used as a strong tool to construct both new multimedia data transmission systems and optimization of the existing services.

Keywords: content delivery networks, CDN, peer-to-peer, efficiency estimation, entropy efficiency, information theory.

Acknowledgements. This research was partly supported by RFBR (grant No. 15-07-01851).

Received 25 May 2017