

# Аналитическая оценка эффективности древовидных р2р-сетей для онлайн-трансляции видеоданных

П. А. Приставка

В работе предлагается теоретико-информационный метод определения эффективности р2р-систем для онлайн-трансляции видеоданных на основе одиночных и множественных деревьев. Представленный метод позволяет аналитически оценивать результаты работы алгоритмов по добавлению новых участников сети и поддержания ее целостности. В результате применения метода к моделям р2р-сетей на основе множественных деревьев с параметрами, соответствующими зафиксированным при функционировании реальных приложений, были получены оценки, согласующиеся с существующими описаниями исследованных алгоритмов построения древовидных р2р-сетей для онлайн-видеотрансляций.

*Ключевые слова:* peer-to-peer, древовидные сети, онлайн-видеотрансляции, загрузочная способность, теория информации.

## 1. Введение

С развитием средств вычислительной техники и телекоммуникационной инфраструктуры широкое распространение получили различные сервисы, связанные с дистрибуцией мультимедийного контента. Одной из ключевых задач, решаемых указанными приложениями, является передача данных от источника к потенциально неограниченному кругу конечных пользователей. Первые решения, заключающиеся в использовании простейшей клиент-серверной архитектуры или групповой адресации IP (IP multicast), не получили широкого применения из-за таких недостатков, как плохая масштабируемость и отсутствие должного развития и поддержки протоколов многоадресной маршрутизации на междоменном уровне соответственно [1, 2]. Среди современных решений указанной задачи следует выделить два подхода – использование сетей доставки контента (CDN) и дистрибуция на базе технологии р2р (peer-to-peer). В рамках использования инфраструктуры сетей доставки контента оригинальные данные реплицируются (кэшируются) с сервера, их содержащего, на платформы граничных серверов. Когда пользователь обращается к требуемому ресурсу, специальная служба инфраструктуры CDN перенаправляет его запрос от оригинального сервера к содержащему необходимые данные граничному серверу, обеспечивающему минимальную, согласно определенной метрике, стоимость загрузки. Аренда необходимого количества граничных серверов и пользование соответствующей инфраструктурой оплачивается обратившимся к провайдеру CDN за услугой оптимизации доступа к заданному ресурсу лицом. В качестве недостатка первого подхода указывается его способность лишь частично решить вопрос масштабируемости, так как увеличение востребованности контента приводит к необходимости развертывания новых платформ граничных серверов, что, кроме того, для небольших организаций может обладать признаками экономической неэффективности. В решениях на базе технологии р2р пользователи (пиры) формируют с помощью специального приложения оверлейную сеть, где каждый участник использует свою вычислительную мощность и доступную пропускную способность для того, чтобы как принимать данные от других узлов, так и передавать их другим участникам.

Масштабируемость систем на базе р2р-сетей является практически неограниченной. Сегодня решения на базе технологии р2р имеют широкое распространение и используются не только в файлообменных сетях, но и во многих других областях. Одним из указанных направлений является разработка систем для онлайн-трансляции видеоданных. Высокая востребованность направления привела к появлению большого количества р2р-приложений, базирующихся на различных алгоритмах обработки данных и имеющих, соответственно, различную производительность. Изучению вопроса эффективности систем для трансляции видео в настоящее время уделяется большое внимание. Существующие для оценки эффективности метрики можно условно разделить на две группы. К первой относятся показатели, ориентированные на оценку эффективности на уровне пира и характеризующие качество входящего потока данных. Во вторую категорию входят показатели, относящиеся к системному уровню и дающие оценку эффективности использования р2р-протоколом ресурсов, их доступности, а также влияния на систему факторов, связанных с физическим размещением узлов сети. Опишем далее основные существующие метрики обеих групп, но более подробно остановимся на характеристиках второй группы, так как представлению метрики именно такой направленности посвящена данная работа.

Среди основных метрик уровня участника выделяют следующие:

- отношение объема данных, не полученных пиром к моменту, когда они должны были быть воспроизведены, к общему объему данных, отправленных сервером;
- задержка начала воспроизведения, т.е. время между запросом участником начала трансляции и ее началом;
- задержка воспроизведения, т.е. временная разница между генерацией сервером блока данных и его воспроизведением у участника;
- запаздывание воспроизведения, к которому относится временная разница между началом воспроизведения одного и того же блока на разных пирах.

Перейдем теперь к описанию существующих системных метрик и рассмотрению их особенностей.

- Коэффициент использования пропускной способности, доступной узлам для отдачи контента, т.е. отношение пропускной способности, которая используется пирами для отдачи контента, к суммарной пропускной способности для отдачи в этой сети. Очевидно, что в данном случае оценивается лишь оптимальность использования доступных ресурсов участников, в то время как количественной оценки возможностей системы не производится. Кроме того, для р2р-систем на базе древовидной архитектуры данная метрика может оказаться необъективной, так как дерево с максимальной высотой и с минимальным количеством листьев, т.е. с большими задержками в воспроизведении, может иметь значение характеристики, равное показателю для более компактного дерева.
- Эффективность использования пропускной способности, которая показывает, насколько близко для заданного распределения пропускных способностей система приближается к оптимальной во время трансляции. В качестве оптимальной может считаться система, в которой сумма вкладов каждого участника (полезность) является максимальной при заданном распределении пропускных способностей. Использование данного подхода предполагает обработку показателей, полученных либо во время эксплуатации существующей системы, либо во время моделирования ее работы. Например, для вычисления значения функции полезности участника по определению требуется наличие получаемой в результате наблюдений вероятности воспроизведения на узле, т.е. вероятности того, что участник получает пакеты до момента необходимости их воспроизведения. Таким образом, указанная оценка не может быть отнесена к категории формируемых априорно.
- Осведомленность о состоянии сети – мера степени использования р2р-системой информации о физических свойствах (ограничениях) ее элементов и связей между ними при

построении сети на уровне приложения. Данный показатель обычно применяется в контексте учета системой информации о пропускной способности узлов для отдачи контента и локализации объектов. Учет пропускной способности узлов заключается в приоритизации пересылки видеотрафика на узлы с более высоким значением данного показателя. Использование осведомленности о локализации объектов отражается в способности системы при построении оверлейной сети анализировать информацию о стоимости пересылки трафика между узлами, а также физической длине маршрутов между ними. Использование данной метрики, безусловно, позволяет охарактеризовать алгоритмы формирования р2р-сети, однако не может быть использовано для получения количественной оценки возможностей системы с точки зрения ее производительности.

Как видно из описания системных метрик, существующие подходы не свободны от недостатков и задача разработки методов оценивания эффективности р2р-систем для онлайн-трансляций видеоконтента является актуальной. В работе [3] был предложен теоретико-информационный подход, позволяющий аналитически оценивать эффективность сетей передачи данных еще на этапе их проектирования на основе информации об узлах сети и связях между ними. Позже в работах [4, 5] был показан способ применения подхода для оценки сетей доставки контента, а также файлообменных р2р-сетей. Анализ результатов его использования на программных моделях объектов показал адекватность формируемых оценок эффективности и возможность его применения для получения количественных оценок данного показателя. Настоящая работа посвящена представлению метода оценки эффективности р2р-систем для онлайн-трансляции видеоконтента на основе древовидной архитектуры. В работе предлагается способ применения описанного в [3] подхода для формирования оценок эффективности объектов указанного типа. На моделях сети с параметрами, соответствующими зафиксированным при функционировании реальных систем, производится оценка алгоритмов централизованного построения деревьев и анализируются полученные результаты.

## **2. Архитектура р2р-приложений для передачи видеоданных на основе деревьев**

### **2.1. Онлайн-трансляции на основе одиночных деревьев**

Одним из первых решений для организации онлайн-трансляций стали приложения на основе одиночных деревьев [6]. Подобно принципу групповой адресации IP, реализованному на сетевом уровне, при данном подходе узлы объединяются в древовидную структуру, но уже на уровне приложения. Корнем дерева является сервер с источником видеофайла, а каждый участник сети присоединяется к дереву на определенном уровне. Пример дерева, образованного шестью участниками, приведен, например, на рис. 1. Находящийся на сервере файл сегментируется на некоторое число фрагментов, называемых блоками, которые поочередно передаются дочерним элементам. Родительский узел принимает данные от узла, находящегося выше по иерархии, и транслирует контент своим дочерним элементам. Количество дочерних элементов у узла ограничивается его пропускной способностью при отдаче контента. Существуют различные способы построения и организации одиночных деревьев, однако предпочтительными считаются те алгоритмы, в результате которых дерево имеет наименьшую длину. Структура сети в приложениях на основе одиночных деревьев обладает некоторыми недостатками. Один из главных заключается в том, что лишь некоторые из узлов участвуют в передаче трафика на нижние уровни иерархии, в то время как листья дерева не используют свои вычислительные ресурсы для улучшения качества воспроизведения на других узлах. Кроме того, выход из состава сети одного участника делает невозможным получение контента пирами, находящимися в его ветке ниже по иерархии, до тех пор, пока не произойдет перестроение де-

рева. Отметим, что системы с архитектурой на базе одиночных деревьев относятся к раннему этапу развития р2р-приложений для онлайн-видеотрансляций и рассматриваются в данной работе с целью апробации представляемого метода оценки эффективности на моделях простых систем.

## 2.2. Онлайн-трансляции на основе множественных деревьев

С целью рационализации использования вычислительных ресурсов узлов дерева р2р-сети была предложена архитектура на основе множественных деревьев. Согласно указанному решению участники сети формируют на уровне приложения не одно, а несколько деревьев, корнем каждого из которых является сервер, содержащий транслируемый видеофайл. Участник сети входит в состав каждого из деревьев, где либо является родительским узлом и, соответственно, участвует в передаче трафика, либо не содержит дочерних элементов, т.е. является листом. Поток данных, транслируемых с сервера, разделяется на несколько частей, каждая из которых независимо передается по разным деревьям. Благодаря тому, что каждый участник занимает различную позицию в каждом из деревьев, в общей структуре приложения существует несколько возможных маршрутов от сервера до заданного участника, что увеличивает устойчивость системы к выходу узлов из ее состава. Приведем далее общее описание процедуры построения деревьев и поддержания их целостности в системах с централизованной системой управления, которая является характерной для большого количества современных приложений. В подобных системах функции координации участников сети возлагаются на корневой узел. Когда новый участник хочет присоединиться к сети, он производит обращение к указанному элементу и получает в ответ идентификторы своих родительских узлов в каждом из деревьев и далее занимает соответствующие позиции в структуре сети. При выходе узла из сети (нормальном или аварийном) корневой узел для каждого из деревьев производит поиск новых родительских элементов для всех дочерних узлов выбывшего участника. Перейдем теперь к описанию процесса выбора родителей для заданного узла. В работе будут рассмотрены два распространенных алгоритма, реализующих случайное и детерминированное добавление узлов [1, 7]. Метод рандомизированного добавления направлен на создание дерева, содержащего различные маршруты от источника до заданного узла в каждом из деревьев с учетом ограничений, накладываемых пропускной способностью, доступной узлу для передачи контента. При данном подходе осуществляется нисходящий (т.е. направленный от источника вниз по иерархии) поиск уровня, на котором расположены один или несколько узлов, обладающих достаточной пропускной способностью для подключения к ним дочернего элемента. Среди узлов найденного уровня выбирается случайным образом родительский элемент для заданного участника. Для увеличения степени различности маршрутов авторами [1] предлагается выбирать родительский элемент на одном из уровней, отстоящих от первого найденного на некоторое небольшое значение (включая ноль).

Согласно основной идее алгоритма детерминированного добавления каждый участник сети может быть внутренним узлом (т.е. обладающим дочерними элементами) только в одном дереве, соответственно, являясь листом в оставшихся деревьях. Данный подход позиционируется его авторами как средство формирования деревьев, не только содержащих различные маршруты от источника до заданного узла, но и обладающих небольшой глубиной.

Детерминированный поиск происходит следующим образом. Когда будущий участник решает присоединиться к сети, то система осуществляет поиск дерева, в котором узел будет внутренним («fertile»). Узел будет листом («sterile») в оставшихся деревьях р2р-приложения. Система ведет учет количества внутренних узлов в каждом из деревьев и детерминированно выбирает дерево с минимальным значением указанного параметра, как то, в котором заданный узел станет внутренним. Целью данного способа выбора является примерное балансирование

количества внутренних узлов в каждом из деревьев. Для того чтобы определить позицию нового участника как внутреннего узла, производится нисходящий поиск от источника с целью определить уровень либо с узлами, обладающими достаточной для подключения дочернего элемента пропускной способностью, либо узлами с листьями. Если на определенном уровне найден узел, способный принять дочерние элементы, то он назначается родительским для нового участника. В противном случае родительским элементом назначается узел, обладающий листьями, новые родительские элементы которых назначаются согласно алгоритму, описанному ниже. В обоих случаях родительский элемент выбирается детерминированно (например, первый среди удовлетворяющих критерию узлов на уровне). Благодаря тому, что каждый узел является внутренним только в одном дереве, различность маршрутов от источника до заданного участника создается без необходимости специальной рандомизации.

Для вставки нового элемента в качестве листа дерева используется процедура, подобная описанной выше, за тем исключением, что в качестве родительских элементов рассматриваются только узлы, обладающие достаточной пропускной способностью для передачи данных. Так как вставляемый узел является листом, то замена им другого листа уровнем выше не принесет оптимизации использования вычислительных ресурсов участников. Результаты построения дерева с помощью алгоритмов случайного и детерминированного добавления узлов представлены ниже, на рис. 4 и рис. 5 соответственно.

Как было упомянуто выше, передаваемый с сервера поток данных разделяется на несколько частей, каждая из которых независимо передается по разным деревьям. Существующие способы реализации данного разделения включают слоевое кодирование (layered coding), кодирование множественных описаний (multiple description coding) и коды прямого исправления ошибок (forward error correcting code). В настоящей работе в целях конкретизации описания предлагаемого метода оценки эффективности и представленных примеров расчетов предполагается использование кодирования множественных описаний (MDC). Ниже приведем общее описание подхода [8]. MDC – это метод кодирования аудио- или видеосигнала в  $M > 1$  потоков, называемых описаниями (descriptions), при котором любое их полученное подмножество может быть декодировано. При этом степень искажения оригинального сигнала определяется количеством полученных описаний, т.е. большее их количество ведет к улучшению качества отображения. В последние годы было предложено большое количество схем, реализующих MDC-подход. В наиболее эффективных и практически применимых схемах [9] оригинальный аудио- или видеопоток разбивается на группы фреймов, каждой из которых соответствует некоторая продолжительность (например, 1 секунда). Каждая группа затем кодируется, защищается от ошибок и разбивается на  $M$  пакетов. Получение любого из  $m \leq M$  пакетов способно позволить восстановить оригинальные данные с некоторым уровнем искажения. Отметим, что архитектура р2р-приложений для онлайн-видеотрансляций на базе множественных деревьев является естественной для реализации схемы MDC для доставки данных участникам сети.

### **3. Метод оценки эффективности р2р-приложений для онлайн-видеотрансляций**

В работе [3] был предложен базирующийся на основах теории информации подход для оценки эффективности сетей передачи данных. Позже в работах [4, 5] по результатам исследования данного подхода на моделях сетей доставки контента, а также и файлообменных р2р-сетей была показана адекватность получаемых оценок и его применимость к объектам указанного типа. В настоящем разделе приводится краткое теоретическое описание подхода и способ его использования для оценки эффективности древовидных р2р-сетей для онлайн-

трансляции видеоданных. Пусть  $\omega$  – один из  $k$  узлов некоторой сети  $\Omega$ , на который загружаются файлы  $F = \{f_1, \dots, f_n\}, n \geq 0$ . Обозначим время загрузки файла  $f \in F$  узлом  $\omega_i$  с узла  $\omega_j, i, j = 1 \dots k$  как  $T_{ij}(f)$ . Предполагается, что требуемый файл будет загружаться с узла, позволяющего достичь минимального времени загрузки, т.е.  $T_{\omega_i}(f) = \min_j T_{ij}(f)$ . Последовательность файлов  $f_1, \dots, f_s, s \geq 1$ , загружаемую узлом  $\omega_i, i = 1, \dots, k$ , будем называть задачей  $f'$ , время выполнения которой будет равно сумме времен загрузки каждого файла указанной последовательности. Таким образом

$$T_{\omega_i}(f') = \sum_{z=1}^s T_{\omega_i}(f_z).$$

Пусть  $v_i$  – количество задач, которые могут быть выполнены узлом  $\omega_i$  за время  $T$ ,

$$T : v_i(T) = |\{f' : T_{\omega_i}(f') = T\}|.$$

Пусть для некоторого узла сети  $v(T) = N$ , а само множество задач, выполняемых за время  $T$ , состоит из различных последовательностей  $\{f'_1, f'_2, f'_3, \dots, f'_N\}$ . Тогда при больших  $T$  множество задач, выполняемых за время  $2T$ , может быть представлено как  $\{f'_1 f'_1, f'_1 f'_2, f'_1 f'_3, \dots, f'_2 f'_1, f'_2 f'_2, f'_2 f'_3, \dots, f'_N f'_N\}$ , где под результатом конкатенации задач понимается новая задача, полученная объединением соответствующих последовательностей. Иными словами, множество задач, выполняемых за время  $2T$ , представляет собой задачи, состоящие из всех возможных комбинаций последовательностей, выполняемых за первую половину временного интервала ( $T$ ), и последовательностей, выполняемых за вторую половину интервала (тоже  $T$ ). Таким образом, можно сделать вывод, что  $v(2T) = v^2(T)$ . Будем считать это нестрогим объяснением экспоненциального роста количества выполняемых узлом задач в зависимости от времени. Отметим, что дополнительно обоснование данного суждения может быть найдено в [3].

В англоязычной работе [3], описывающей рассматриваемый подход, автор для обозначения характеристики эффективности использует термин «sarcacity». Как было отмечено в [4], для избежания двусмысленности на русский язык его предлагается переводить как «загрузочная способность». Термин определяет специально вводимую характеристику эффективности сетей передачи данных, большее значение которой означает лучший результат.

Так как  $v_i(T)$  растёт экспоненциально, то определим загрузочную способность узла  $\omega_i$  как

$$C(\omega_i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\log_2 v_i(T)}{T} \text{ (бит за единицу времени).}$$

Загрузочная способность сети определяется как сумма загрузочных способностей всех её узлов:

$$C(\Omega) = \sum_{\omega \in \Omega} c(\omega).$$

Для нахождения загрузочной способности узла, т.е.  $C(\omega_i)$ , можно воспользоваться предложенным в [10] Шенноном теоретико-информационным методом, согласно которому для вычисления требуемой характеристики необходимо найти логарифм наибольшего положительного корня уравнения

$$\sum_{f \in F} X^{-T_{\omega_i}(f)} = 1.$$

Для вычисления времени загрузки файлов узлом необходимо использовать информацию о скорости передачи данных между узлами. Отметим, что в предлагаемом подходе под ней

подразумевается наибольшая возможная скорость передачи пользовательских данных. Таким образом, вычисляемая загрузочная способность сети – это оценка верхней границы эффективности сети передачи данных. Подробное описание рассматриваемого подхода может быть найдено в [3].

Как отмечалось выше, в [4, 5] был показан способ применения описанного подхода для оценки эффективности сетей доставки контента, а также файлообменных р2р-сетей. В настоящем разделе предлагается основанный на указанном теоретико-информационном подходе метод оценки эффективности р2р-приложений для онлайн-видеотрансляций на базе древовидной архитектуры. Очевидно, что одним из главных факторов, влияющих на величину оценки, является время загрузки файлов узлом. В отличие от сетей доставки контента, где файлы загружаются узлом с граничных платформ или напрямую с оригинального сервера и одноранговых р2р-файлообменных сетей, где файлы загружаются параллельно от нескольких участников, рассматриваемые системы имеют древовидную структуру и, следовательно, вычисление времени загрузки для них будет осуществляться иным способом. Ключевым отличием здесь является направленное вниз по иерархии движение трафика и, соответственно, возможность получить узлом данные только от родительского элемента. Иными словами, время загрузки файла узлом состоит из времени загрузки файла с родительского узла и времени, которое, в свою очередь, потратил его родительский узел, чтобы загрузить данные со своего родительского узла. Аналитически время выполнения узлом сети задачи  $f'$  может быть записано следующим образом.

Пусть  $D$  – множество деревьев сети, содержащей участников р2р-трансляции,  $R_{\omega}^t$  – это маршрут от источника до узла  $\omega$  в дереве  $t \in D$ , вершины которого  $v_j, j = 0, \dots, |R_{\omega}^t|$  последовательно пронумерованы в порядке их удаленности от источника трансляции, а  $T_{v_{j+1}v_j}(f_s)$  – время загрузки узлом  $v_{j+1}$  файла  $f_s$  с узла  $v_j$ . Тогда

$$T_{\omega_i}(f') = \sum_{s=1}^k \sum_{t \in D} \sum_{j=0}^{|R_{\omega_i}^t|-1} T_{v_{j+1}v_j}(f_s).$$

Для полноты объяснения в разделе ниже приведены конкретные примеры вычисления характеристики эффективности на простых моделях р2р-сетей для онлайн-видеотрансляций на базе одиночных и множественных деревьев.

## 4. Оценки эффективности структуры р2р-приложений для онлайн-видеотрансляций на простых моделях

### 4.1. Оценка эффективности р2р-приложений на основе одиночных деревьев

С целью наглядной демонстрации метода в данном разделе производится подробное описание процесса вычисления оценки эффективности для систем с различной структурой р2р-сети на основе одиночных деревьев, а также анализ полученных результатов. Перейдем к описанию выполняемых вычислений. Для проведения расчетов были реализованы три простые программные модели приложений для онлайн-видеотрансляций с архитектурой на основе гомотетических одиночных деревьев. Каждая сеть содержит один и тот же состав участников, включающий шесть узлов (пиров) и источник трансляции (сервер), но все сети имеют различную структуру. В рамках моделирования предполагалось, что сервер производит трансляцию одного файла размером 10 ГБ, что соответствует видеофильму в хорошем качестве. Передача исходного файла вниз по иерархии происходит блоками по 1 Мб. Максимальная скорость передачи данных при трансляции сервером, а также максимальная скорость передачи данных пирами составляет 2 Мб/с. Рассмотрим далее структуру каждой из трех моделей, а также

приведем подробное описание вычислений, необходимых для формирования оценки эффективности.

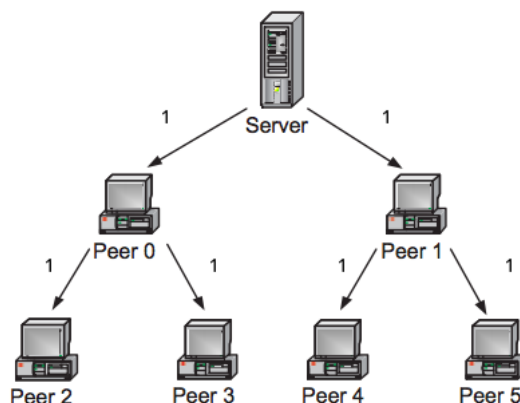


Рис. 1. Структура p2p-сети первой модели

На рис. 1 изображена структура сети первой модели, представляющая собой идеально сбалансированное дерево. Для обозначения участников сети здесь и на остальных рисунках данного раздела используются англоязычные обозначения («Server» – источник файла, «Peer» – остальные участники сети). Для упрощения расчетов максимальная скорость отдачи пиром данных по каналу получается в результате деления максимальной доступной ему скорости передачи данных на количество его дочерних элементов на уровень ниже. Число рядом со стрелкой, соединяющей узлы, обозначает минимальное время загрузки блока данных по соответствующему каналу. Характеристическое уравнение для определения загрузочной способности первого участника («Peer 0») будет иметь вид:

$$\frac{1}{X^1} + \frac{1}{X^1} + \dots + \frac{1}{X^1} = 1.$$

Общее количество слагаемых в характеристическом уравнении соответствует количеству блоков данных, на которые фрагментируется исходный файл, и равно 10240. Значение степени каждого из слагаемых означает минимальное количество времени, за которое узлом может быть загружен блок данных 1 Мб по каналу с максимальной скоростью передачи данных 1 Мб/с. После упрощения характеристическое уравнение примет вид:

$$\frac{10240}{X} = 1.$$

Решаем уравнение, например, методом половинного деления и определяем загрузочную способность первого узла:

$$C(\omega_1) = 13.32 \text{ бит/с.}$$

Характеристическое уравнение для второго узла будет таким же, как и для первого, соответственно,  $C(\omega_2) = C(\omega_1)$ . Для составления характеристического уравнения для третьего участника нужно определить время загрузки с сервера на него одного блока данных. Значение указанной величины образуется в результате суммирования времени загрузки третьим участником данных со своего родительского элемента (1 с) и времени, которое было потрачено на скачивание первым узлом данного блока с сервера (1 с). Таким образом, характеристическое уравнение для третьего участника будет выглядеть как:

$$\frac{10240}{X^2} = 1.$$



После решения уравнения определяем значение характеристики эффективности:

$$C(\omega_3) = 6.66 \text{ бит/с.}$$

Очевидно, что  $C(\omega_4) = C(\omega_5) = C(\omega_6) = C(\omega_3)$ . Определяем далее оценки эффективности р2р-сети как сумму загрузочных способностей ее узлов:

$$C(\Omega) = 13.32 + 13.32 + 6.66 + 6.66 + 6.66 + 6.66 = 53.28 \text{ (бит/с).}$$

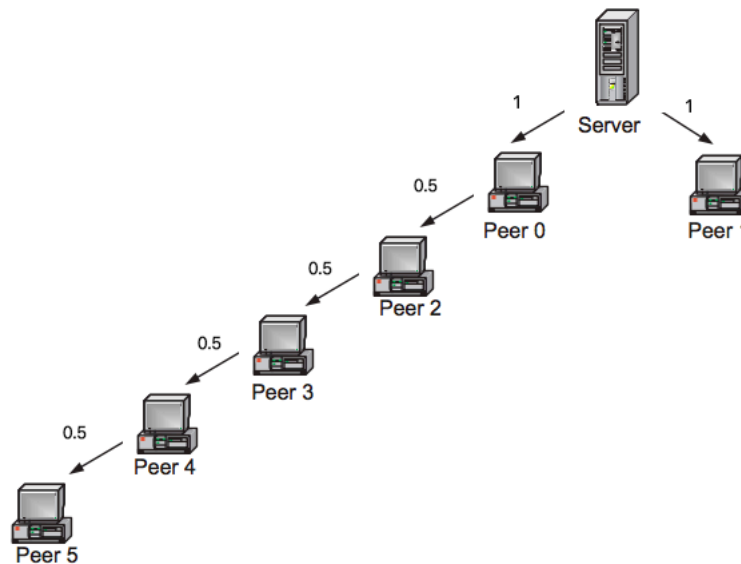


Рис. 2. Структура р2р-сети второй модели

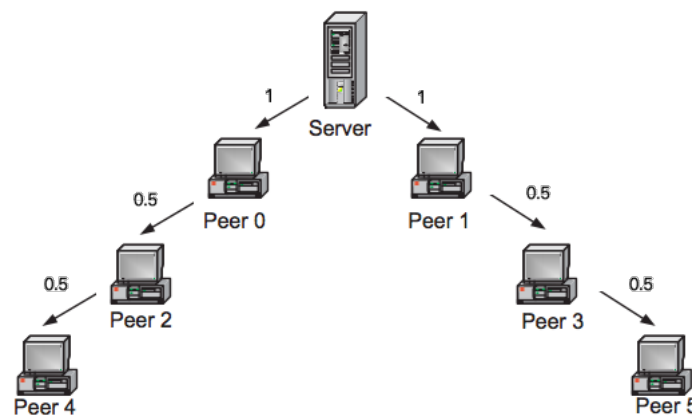


Рис. 3. Структура р2р-сети третьей модели

На рис. 2 изображена структура сети следующего примера. В отличие от идеально сбалансированного, данное дерево содержит ветви, существенно различающиеся по длине. Определим его загрузочную способность. Аналогично предыдущему случаю  $C(\omega_1) = C(\omega_2) = 13.32/c$ . Характеристические уравнения для узлов с третьего по шестой будут иметь вид:

$$\frac{10240}{X^{1.5}} = 1, \frac{10240}{X^2} = 1, \frac{10240}{X^{2.5}} = 1, \frac{10240}{X^3} = 1.$$

Следовательно, значения загрузочной способности для оставшихся узлов и общая оценка эффективности р2р-сети:

$$C(\omega_3) = 8.88 \text{ бит/с},$$

$$C(\omega_4) = 6.66 \text{ бит/с},$$

$$C(\omega_5) = 5.34 \text{ бит/с},$$

$$C(\omega_6) = 4.44 \text{ бит/с},$$

$$C(\Omega) = 38.63 \text{ бит/с}.$$

Как видно, результаты вычислений подтверждают интуитивное предположение, что эффективность р2р-приложения на базе идеально сбалансированного дерева должна быть выше, чем в случае, когда длины ветвей содержат существенно различное количество участников.

В завершение данного пункта рассмотрим интересный пример вычисления эффективности системы со структурой, изображенной на рис. 3. Представленное дерево также является несбалансированным, так как, например, для первого участника высота левого и правого под-деревьев различается больше чем на единицу. На основании расчетов из двух предыдущих примеров заметим, что

$$C(\omega_1) = C(\omega_2) = 13.32 \text{ бит/с} ,$$

$$C(\omega_3) = C(\omega_4) = 8.88 \text{ бит/с} ,$$

$$C(\omega_5) = C(\omega_6) = 6.66 \text{ бит/с} .$$

Следовательно, желаемая оценка  $C(\Omega) = 57.72 \text{ бит/с}$ .

Рассмотрим подробнее полученные результаты. Более высокая оценка загрузочной способности данного дерева по сравнению с моделью второй сети могла быть предположена изначально на основании его большей компактности, т.е. меньшей высоты. Однако примечательно, что полученная оценка оказалась выше даже по сравнению с идеально сбалансированным деревом. Нестрого это может быть объяснено тем, что в модели третьей сети четверо из шести участников, т.е.  $2/3$ , получают блоки данных быстрее, чем в приложении на базе первой модели. Таким образом, последний пример демонстрирует, что предлагаемая оценка эффективности р2р-сетей для онлайн-видеотрансляций зависит как от существующих между узлами связей, так и характеристик каналов передачи данных, а предпочтительность системы с точки зрения загрузочной способности не всегда может быть определена на основании визуального знакомства со структурой дерева.

#### 4.2. Оценка эффективности р2р-приложений на основе множественных деревьев

В данном пункте рассматривается применение метода к р2р-системам для онлайн-видеотрансляций с архитектурой на основе гомогенных множественных деревьев. Для проведения расчетов были реализованы программные модели двух р2р-сетей, образованных в результате работы случайного и детерминированного алгоритмов построения деревьев. Каждая сеть содержит один и тот же состав участников, включающий шесть узлов (пиров) и источник трансляции (сервер). Для передачи данных используется множественное кодирование описаний (MDC), описанное выше. В отличие от предыдущего пункта, где при определении значений параметров моделей прежде всего преследовалась цель наглядно продемонстрировать этапы

вычисления оценки эффективности, для выбора параметров моделей была использована информация о результатах исследований и измерений реально существующих р2р-приложений для онлайн-видеотрансляций [2]. Максимальная скорость передачи данных при трансляции сервером, а также максимальная скорость передачи данных пирами составляет 160 Кбит/с. Размер группы фреймов, на которые фрагментируется исходный файл, соответствует 1 с. Размер каждого из двух отправляемых в левое и правое деревья пакетов составляет 1250 байт. Предполагается, что общая длительность видеофайла равна 100 с.

На рис. 4 изображена структура сети первой модели. Согласно принятым в литературе обозначениям, несмотря на то, что корневой узел (сервер) является общим для всех деревьев, каждое из них в иллюстрациях отображают отдельным элементом. Определим загрузочные способности узлов. Так как данные транслируются сервером с помощью MDC, то для того, чтобы участник получил полный объем данных, ему необходимо получить пакеты каждой группы фреймов в левом и правом деревьях. Учитывая, что продолжительность видеофайла равна 100 с, а одной группе фреймов соответствует длительность 1 с, получаем, что всего таких групп будет 100. Так как каждая разбивается на два пакета, которые независимо отправляются в левое и правое деревья, то с учетом характеристик каналов для первого и второго узла имеем:

$$\frac{100}{X^{0.244}} + \frac{100}{X^{0.244}}, C(\omega_1) = C(\omega_2) = 31.32 \text{ бит/с.}$$

Аналогично составим характеристическое уравнение и вычислим загрузочные способности третьего и четвертого узлов:

$$\frac{100}{X^{0.366}} + \frac{100}{X^{0.366}}, C(\omega_3) = C(\omega_4) = 20.88 \text{ бит/с.}$$

Вычисляя загрузочные способности пятого и шестого узлов, получим  $C(\omega_5) = C(\omega_6) = 15.66$  бит/с. Суммируем характеристики узлов для получения оценки эффективности сети, образованной с помощью алгоритма случайного построения, и получаем  $C(\Omega) = 135.72$  бит/с.

На рис. 5 представлена структура сети, образованной в результате алгоритма детерминированного добавления узлов. Оценим ее загрузочную способность. Участники с первого по четвертый имеют различные позиции в левом и правом деревьях, однако на основе анализа рис. 5 видно, что их характеристические уравнения и, следовательно, загрузочные способности будут одинаковыми:

$$\frac{100}{X^{0.366}} + \frac{100}{X^{0.244}}, C(\omega_1) = C(\omega_2) = C(\omega_3) = C(\omega_4) = 27.76 \text{ бит/с.}$$

Построим характеристические уравнения оставшихся участников и вычислим их загрузочные способности:

$$\frac{100}{X^{0.366}} + \frac{100}{X^{0.366}}, C(\omega_5) = C(\omega_6) = 20.88 \text{ бит/с.}$$

Таким образом, итоговая оценка эффективности р2р-сети на основе множественных деревьев  $C(\Omega) = 152.8$  бит/с. Результаты вычислений подтверждают выводы авторов алгоритма детерминированного добавления узлов [1] о том, что данный способ следует рассматривать как улучшение алгоритма со случайным добавлением новых участников.

## 5. Заключение

Работа направлена на изучение возможности использования теоретико-информационного подхода для оценки сетей передачи данных. В качестве объектов исследования были выбраны р2р-сети для онлайн-трансляций видеоконтента на основе одиночных и множественных

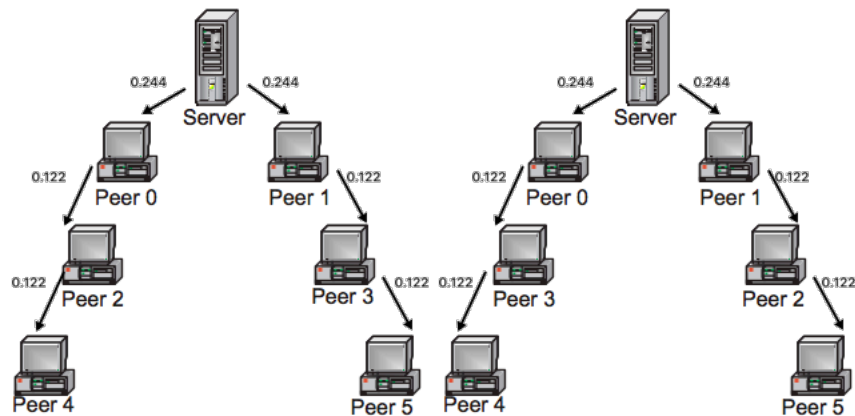


Рис. 4. Структура p2p-сети первой модели

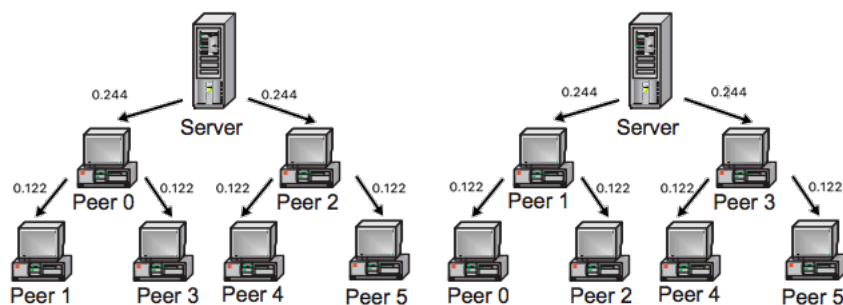


Рис. 5. Структура p2p-сети второй модели

деревьев. В работе подробно описан способ применения подхода к заданным объектам и приведены примеры вычисления оценок эффективности случайного и детерминированного добавления узлов в p2p-сети. Согласно с представленными авторами алгоритмов оценками результаты вычислений подтверждают возможность применения предложенного подхода для оценки эффективности древовидных p2p-сетей для онлайн-видеотрансляций.

## Литература

1. *Padmanabhan V. N., Wang H. J., Chou P. A.* Resilient peer-to-peer streaming // 11th IEEE International Conference on Network Protocols. 2003. Proceedings. P. 16–27.
2. *Chatzidrossos I.* Live Streaming Performance of Peer-to-Peer Systems: дис. KTH Royal Institute of Technology, 2012. 168 p.
3. *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: 12.08.2018).
4. *Приставка П. А., Ключникова О. А., Климова И. В.* Исследование аналитического метода оценки эффективности сетей доставки контента // Вестник СибГУТИ. 2016. № 4. С. 99–108.
5. *Приставка П. А., Рябко Б. Я.* Аналитический метод расчета эффективности сетей передачи мультимедийного контента // Вычислительные технологии. 2018. Т. 23. № 3. С. 81–91.

6. *PLiu Y., Guo Y., Liang C.* A survey on peer-to-peer video streaming systems // *Peer-to-peer Networking and Applications*. 2008. V. 1, № 1. P. 18–28.
7. *Magharei N., Rejaie R., Guo Y.* Mesh or multiple-tree: A comparative study of live p2p streaming approaches // *26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 2007. P. 1424–1432.
8. *Kazemi M., Shirmohammadi S., Sadeghi K. H.* A review of multiple description coding techniques for error-resilient video delivery // *Multimedia Systems*. 2014. V. 20, № 3. P. 283–309.
9. *Goyal V. K.* Multiple description coding: Compression meets the network // *IEEE Signal processing magazine*. 2001. V. 18, № 5. P. 74–93.
10. *Shannon C. E.* A Mathematical Theory of Communication // *The Bell System Technical Journal*. 1948. V. 27. P. 379–423, 623–656.

*Статья поступила в редакцию 27.08.2018;  
переработанный вариант – 30.10.2018.*

#### **Приставка Павел Анатольевич**

к.т.н., доцент кафедры прикладной математики и кибернетики СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86) тел. (383) 2-698-271, e-mail: ppa@ngs.ru.

#### **Analytic efficiency estimation of tree-based live video p2p streaming systems**

##### **P. Pristavka**

Information-theoretic method for estimation of the efficiency of tree-based systems for live video streaming was suggested in the paper. The method suggested allows us to evaluate analytically the results of different tree management algorithms. The result of estimations on multiple tree based network model with parameters obtained from real world p2p applications measurements agrees with the evaluations provided by authors of the investigated algorithms.

*Keywords:* peer-to-peer, tree-based stream, live video stream, capacity, information theory.