

УДК 621.39

Построение и анализ модели воспроизведения каналов вещательного телевидения в P2P сети

Амину Адаму, Ю. В. Гайдамака, А. К. Самуйлов

*Кафедра систем телекоммуникаций
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Макляя, д. 6, Москва, Россия, 117198*

В статье построена вероятностная модель просмотра каналов вещательного телевидения пользователями одноранговой сети (от англ. peer-to-peer, P2P — равный к равному). Поведение отдельного пользователя представлено в терминах замкнутой экспоненциальной сети массового обслуживания. Стационарное распределение вероятностей состояний модели функционирования P2PTV-сети представлено в мультипликативном виде по числу телеканалов и числу пользователей системы. С учётом популярности телеканалов получены формулы для анализа основного показателя качества функционирования P2PTV-сети на уровне пользователя (QoE, Quality of Experience) — вероятности всеобщей передачи (от англ. universal streaming), т.е. качественного приёма видеопотока всеми пользователями.

Ключевые слова: одноранговая сеть, вещательное телевидение, сеть массового обслуживания, модель поведения отдельного пользователя, вероятность качественного приёма.

1. Введение

Пиринговая, или одноранговая сеть, — это любая распределённая архитектура сети, участники которой делают часть своих ресурсов (таких как вычислительный ресурс, объём памяти, пропускная способность и пр.) доступными другим пользователям этой сети без необходимости централизованной координации. Каждый пользователь такой сети, называемый «пиром» (от англ. peer — равный), выступает в роли как клиента, так и сервера, т.е. по мере потребления ресурсов сети пользователь способен предоставлять новые ресурсы, например, отдавать другим пользователям видеопоток одного из телеканалов. В этом заключается преимущество перед традиционной клиент-серверной моделью, где источником ресурсов является только сервер. Это позволяет P2P-сети сохранять работоспособность практически при любом количестве и любом сочетании доступных узлов. P2P-сети обычно организуют динамическую наложенную сеть прикладного уровня поверх имеющейся топологии базовой сети. Эти наложенные сети используются для индексирования и поиска пиров, в то время как данные передаются по базовой сети.

P2P-сети нашли применение, например, при распределённых вычислениях, но особенно широко они стали использоваться для обмена данными. По разным подсчётам общий трафик, генерируемый P2P-сетями, составляет до 60% всего трафика Интернет. Кроме того, в последние годы был внедрён ряд крупномасштабных P2P-сетей, предназначенных для передачи потокового видео — CoolStreaming, PPLive, PPStream, UUSee, Sopcast и другие [1–4]. В этих сетях сотни тысяч пользователей имеют возможность одновременно просматривать множество телеканалов. Известен ряд исследований, посвящённых анализу показателей качества функционирования одноранговых сетей, предназначенных для передачи потокового видео, в том числе вещательного телевидения (далее P2PTV-сеть). В этих исследованиях используются различные методы — измерения, имитационное и аналитическое моделирование. Обратим внимание на работу К. Росса [5], где построена аналитическая модель P2PTV-сети с применением аппарата экспоненциальных сетей массового обслуживания (СеМО) и введено понятие вероятности всеобщей передачи как вероятности качественного воспроизведения телеканала оборудованием пользователя.

В большинстве функционирующих в настоящее время крупномасштабных динамических P2PTV-сетей применяется единый принцип распространения информации: пользователи, просматривающие один и тот же телеканал, объединяются в одну группу, а внутри этой группы пользователи обмениваются друг с другом пакетами видео данных, соответствующих содержанию телеканала. Авторы [5] называют такой механизм обмена данными системой изолированных телеканалов (isolated channel) или сокращённо — системой ISO P2P. Отметим, что использование этой системы может приводить к нестабильности просмотра телеканалов пользователями. Недавние исследования показали, что ISO-подобная система PPLive имеет несколько фундаментальных проблем производительности, таких как большие задержки при переключении телеканалов, прерывание воспроизведения, а также низкое качество воспроизведения малопопулярных телеканалов.

На рис. 1 изображён видеосервер, транслирующий телеканалы 1 и 2, и группы просматривающих их пользователей.

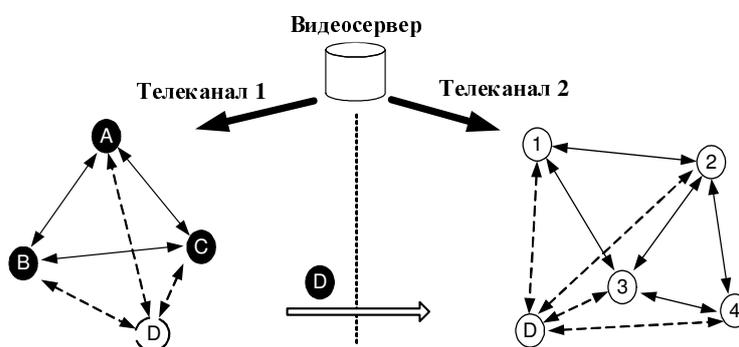


Рис. 1. Пример переключения телеканала пользователем P2PTV-сети

Пользователь в каждой группе может получить пакеты видеоданных от сервера, а также от своих соседей по группе. В соответствии с системой ISO при переключении пользователя D с телеканала 1 на телеканал 2 он прекращает отправлять видеоданные своим соседям по группе. В этом случае соседи должны найти другие источники данных, чтобы поддерживать воспроизведение телеканала. В свою очередь в группе телеканала 2 вновь присоединившийся пользователь D должен найти соседей, которые имеют возможность (достаточную скорость отдачи) отправлять ему видеоданные. Видеопотоки пользователя D показаны на рис. 1 пунктирными стрелками.

На сегодняшний день в международных стандартах не нормированы требования к качеству предоставления услуги вещательного телевидения в P2PTV-сетях. Традиционно показателем качества обслуживания в мультисервисных сетях является, например, вероятность блокировки запроса пользователя на предоставление услуги [6–8]. Для P2PTV-сетей интересно рассмотреть такой показатель качества обслуживания, как вероятность того, что все пользователи, запросившие услугу, получают её с гарантированным качеством, определённым в соглашении об уровне качества предоставления услуги (англ. SLA — Service Level Agreement). В [5] эта вероятность качественного приёма видеопотока всеми пользователями принята за основную показатель качества трансляции видеоканала в P2PTV-сети и называется вероятностью всеобщей передачи. В данной статье по сравнению с [5] предложен новый подход к построению модели функционирования P2PTV-сети, основанный на представлении процесса просмотра телеканалов отдельным пользователем в виде процесса блуждания заявки по замкнутой экспоненциальной CeMO. Этот подход позволяет исследовать модель с конечным числом пользователей и затем получить искомый результат для переменного числа пользователей предельным переходом, устремляя число пользователей к бесконечности.

2. Модель поведения пользователей Р2РТV-сети

Будем считать, что телеканал удовлетворяет требованиям соглашения об уровне качества предоставления услуги, если все без исключения пользователи, просматривающие этот телеканал, получают услугу с гарантированным качеством. Задача состоит в анализе показателей качества обслуживания пользователей в Р2РТV-сети.

Построим модель поведения отдельного пользователя Р2РТV-сети в виде однородной замкнутой экспоненциальной СеМО, в которой множество \mathcal{M} ($M = |\mathcal{M}|$) узлов соответствует множеству телеканалов, а единственная заявка, блуждающая по узлам сети, описывает процесс переключения телеканалов пользователем. Пусть $\Theta = (\theta_{ij})_{i,j \in \mathcal{M}}$ — стохастическая матрица переходных вероятностей рассматриваемой СеМО и вектор-строка $\rho = (\rho_m)_{m \in \mathcal{M}}$ является решением системы уравнений $\rho = \rho\Theta$. Предположив $\sum_{m=1}^M \rho_m = 1$, можно считать, что θ_{ij} соответствует вероятности переключения пользователя с i -канала на j -канал, а величина ρ_m — популярности m -канала, $i, j, m \in \mathcal{M}$. Пусть все узлы СеМО представляют собой системы массового обслуживания типа IS (Infinite Server), причём среднее время обслуживания μ_m^{-1} в m -узле соответствует среднему времени просмотра m -канала пользователем, $m \in \mathcal{M}$.

Обозначим $y_m \in \{0, 1\}$ состояние пользователя, просматривающего m -канал, и $\mathbf{y} = (y_m)_{m \in \mathcal{M}}$ вектор состояния системы. Из теоремы Гордона–Ньюэлла [8] для случая $N = 1$ (один пользователь в системе) вытекает следующее утверждение.

Утверждение 1. Для модели СеМО, описывающей поведение отдельного пользователя Р2РТV-сети, стационарное распределение вероятностей состояний имеет вид:

$$P(\mathbf{y}) = \prod_{m \in \mathcal{M}} \rho_m^{y_m}, \quad \mathbf{y} \in \{\mathbf{y} : y_m \in \{0, 1\}, \sum_{m \in \mathcal{M}} y_m = 1\}. \quad (1)$$

Далее аналитическая модель строится в предположении, что $N > 0$ ($N = |\mathcal{N}|$) пользователей Р2РТV-сети функционируют независимо друг от друга в соответствии с моделью поведения, определённой в утверждении 1. Обозначим $x_{nm} \in \{0, 1\}$ состояние n -пользователя на m -канале, т.е. $x_{nm} = 1$, если пользователь смотрит m -канал, и $x_{nm} = 0$ в противном случае. Тогда состояние сети описывается матрицей

$$\mathbf{X} = (x_{nm})_{n \in \mathcal{N}, m \in \mathcal{M}}, \quad (2)$$

а пространство состояний модели имеет вид

$$\mathcal{X} = \left\{ \mathbf{X} : x_{nm} \in \{0, 1\}, \sum_{m \in \mathcal{M}} x_{nm} = 1, \quad n \in \mathcal{N} \right\}. \quad (3)$$

Утверждение 2. Вероятность состояния \mathbf{X} модели Р2РТV-сети с $N < \infty$ пользователями определяется формулой

$$P(\mathbf{X}) = \prod_{n \in \mathcal{N}} \prod_{m \in \mathcal{M}} \rho_m^{x_{nm}}, \quad \mathbf{X} \in \mathcal{X}. \quad (4)$$

Формула (4) очевидным образом вытекает из предположения о независимости пользователей и утверждения 1.

Заметим, что в матрице \mathbf{X} сумма $x_m = \sum_{n \in \mathcal{N}} x_{nm}$ по m -столбцу соответствует числу пользователей сети, просматривающих m -канал, когда сеть находится в состоянии \mathbf{X} .

Множество состояний сети, когда m -канал просматривают ровно k пользователей, имеет вид

$$\mathcal{X}_m(k) = \{\mathbf{X} \in \mathcal{X} : x_m = k\}, \quad k = \overline{0, N}, \quad m \in \mathcal{M}. \quad (5)$$

Тогда маргинальное распределение $P_m(k)$ числа пользователей, просматривающих m -канал, определяется формулой

$$P_m(k) = P\{\mathbf{X} \in \mathcal{X}_m(k)\} = \sum_{\mathbf{X} \in \mathcal{X}_m(k)} P(\mathbf{X}), \quad k = \overline{0, N}, \quad m \in \mathcal{M}. \quad (6)$$

Утверждение 3. В случае $N < \infty$ маргинальное распределение числа пользователей Р2РТV-сети, просматривающих m -канал, имеет вид

$$P_m(k) = \binom{N}{k} \rho_m^k (1 - \rho_m)^{N-k}, \quad k = \overline{0, N}, \quad m \in \mathcal{M}. \quad (7)$$

В [5] случай модели с бесконечным числом пользователей представлен открытой экспоненциальной СеМО. Мы предлагаем исследовать этот случай путём предельного перехода от модели с конечным числом к модели с бесконечным числом пользователей. Положим $\rho_m(N)$ — популярность m -канала, когда в сети присутствуют N пользователей.

Утверждение 4. В случае $N = \infty$ маргинальное распределение числа пользователей Р2РТV-сети, просматривающих m -канал, имеет вид

$$P_m(k) = e^{-\gamma_m} \frac{\gamma_m^k}{k!}, \quad k \geq 0, \quad m \in \mathcal{M}, \quad (8)$$

где $\gamma_m = \lim_{N \rightarrow \infty} N \rho_m(N)$.

Доказательство утверждения 4 следует из известного предельного перехода от биномиального распределения к распределению Пуассона.

Можно показать, что величина γ_m соответствует среднему числу пользователей, просматривающих m -канал, а представив эту величину в виде $\gamma_m = \lambda_m / \mu_m$, можно считать, что интенсивность потока запросов пользователей на просмотр m -канала равна λ_m . Пронормировав величины γ_m так, что $\rho_m = \frac{\gamma_m}{\sum_{l \in \mathcal{M}} \gamma_l}$, можно считать, что величина ρ_m , как и ранее, соответствует популярности m -канала пользователями, $m \in \mathcal{M}$.

3. Анализ вероятности качественного приёма телеканала

Предположим, что в сети имеется видеосервер, для которого определена скорость отдачи видеопотока m -канала v_m [бит/с], а оборудование n -пользователя характеризуется скоростью отдачи видеопотока u_n [бит/с]. Таким образом, видеопоток, доступный пользователям, просматривающим m -канал, формируется из потока, отдаваемого видеосервером, и потоков, отдаваемых всеми пользователями m -канала. Следовательно, когда система находится в состоянии \mathbf{X} , величина $w_m(\mathbf{X})$ видеопотока, доступного пользователям m -канала, определяется по формуле

$$w_m(\mathbf{X}) = v_m + \sum_{n \in \mathcal{N}} x_{nm} u_n. \quad (9)$$

Пусть также определено требование r_m [бит/с] к качеству воспроизведения m -канала: для просмотра m -канала с гарантированным качеством необходимо, чтобы пользователь загружал соответствующий видеопоток на скорости не ниже r_m [бит/с].

Если выполнено неравенство

$$w_m(\mathbf{X}) \geq r_m \sum_{n \in \mathcal{N}} x_{nm}, \quad (10)$$

то можно считать, что скорость доступного видеопотока соответствует требованиям к качеству всех пользователей m -канала, а вероятность PU_m события

$$\mathcal{A}_m = \left\{ \mathbf{X} \in \mathcal{X} : v_m + \sum_{n \in \mathcal{N}} x_{nm} u_n \geq r_m \sum_{n \in \mathcal{N}} x_{nm} \right\} \quad (11)$$

и есть искомый показатель качества — вероятность качественного приёма m -канала пользователями:

$$PU_m = P(\mathcal{A}_m) = \sum_{\mathbf{X} \in \mathcal{X}} I(\mathcal{A}_m) P(\mathbf{X}), \quad (12)$$

где $I(\mathcal{A}_m) = \begin{cases} 1, & \text{если } \mathcal{A}_m \text{ истинно} \\ 0, & \text{в противоположном случае} \end{cases}$ — функция индикатор.

Заметим, что в [5] показатель (12) называется вероятностью всеобщей передачи телеканала.

Для определённости предположим, что в сети имеется всего два типа пользователей: с высокой скоростью u^h отдачи и с низкой скоростью u^l отдачи видеопотока. Обозначим соответствующие подмножества пользователей \mathcal{N}^h и \mathcal{N}^l ($\mathcal{N}^h = |\mathcal{N}^h|$, $\mathcal{N}^l = |\mathcal{N}^l|$). Тогда скорость отдачи видеопотока n -пользователем определяется формулой

$$u_n = \begin{cases} u^h, & n \in \mathcal{N}^h, \\ u^l, & n \in \mathcal{N}^l, \end{cases}$$

где \mathcal{N}^h и \mathcal{N}^l удовлетворяют соотношениям $\mathcal{N} = \mathcal{N}^h \cup \mathcal{N}^l$, $\mathcal{N}^h \cap \mathcal{N}^l = \emptyset$.

Введём обозначения аналогично тому, как это было сделано выше: в каждом состоянии сети \mathbf{X} величина $x_m^h = \sum_{n \in \mathcal{N}^h} x_{nm}$ обозначает число пользователей m -канала с высокой скоростью отдачи и $x_m^l = \sum_{n \in \mathcal{N}^l} x_{nm}$ — число пользователей с низкой скоростью отдачи, при этом верно равенство $x_m = x_m^h + x_m^l$, $m \in \mathcal{M}$.

С учётом введённых обозначений событие \mathcal{A}_m определяется формулой

$$\mathcal{A}_m = \left\{ \mathbf{X} \in \mathcal{X} : v_m + u^h x_m^h + u^l x_m^l \geq x_m r_m, \quad x_m^h \geq 0, \quad x_m^l \geq 0 \right\}, \quad (13)$$

причём справедливо следующее утверждение.

Утверждение 5. Вероятность качественного приёма m -канала пользователями в P2PTV-сети определяется формулой

$$PU_m = P(\mathcal{A}_m) = \sum_{x_m^h=0}^{\mathcal{N}^h} \sum_{x_m^l=0}^{\mathcal{N}^l} I(\mathcal{A}_m) P_m(x_m^h) P_m(x_m^l), \quad m \in \mathcal{M}, \quad (14)$$

где маргинальные распределения $P_m(x_m^h)$ и $P_m(x_m^l)$ определены утверждением 4.

Рассмотрим теперь пример расчёта вероятности качественного приёма телеканалов пользователями P2PTV-сети для исходных данных из [5]. Пусть $M = 20$

— число телеканалов, транслируемых видеосервером, все телеканалы имеют одинаковые требования к ширине полосы пропускания, которые совпадают со скоростью отдачи видеопотока сервером, т.е. $r_m = v_m = r$, $m \in \mathcal{M}$. Предполагается, что 50% пользователей имеют низкую скорость отдачи $u^l = 0,2r$ и 50% пользователей — высокую скорость отдачи $u^h = 3r$. Величины популярности телеканалов распределены по закону Цифа:

$$\rho_m = \frac{1}{m^z \sum_{i=1}^M \frac{1}{i^z}}, \quad m \in \mathcal{M}, \quad (15)$$

где z — параметр распределения. Это означает, что телеканалы перенумерованы по убыванию популярности. В примере рассмотрен случай $z = 1$.

На рис. 2 показаны графики вероятности качественного приёма для моделей со средним числом пользователей $\gamma = 1800$ и $\gamma = 200$, при этом среднее число пользователей, просматривающих m -канал, определяется по формуле $\gamma_m = \gamma \rho_m$, $m \in \mathcal{M}$. Сравнение графиков подтверждает очевидный качественный вывод: во-первых, чем больше в P2PTV-сети пользователей, тем выше вероятность качественного приёма телеканалов; во-вторых, с уменьшением популярности телеканала эта вероятность снижается.

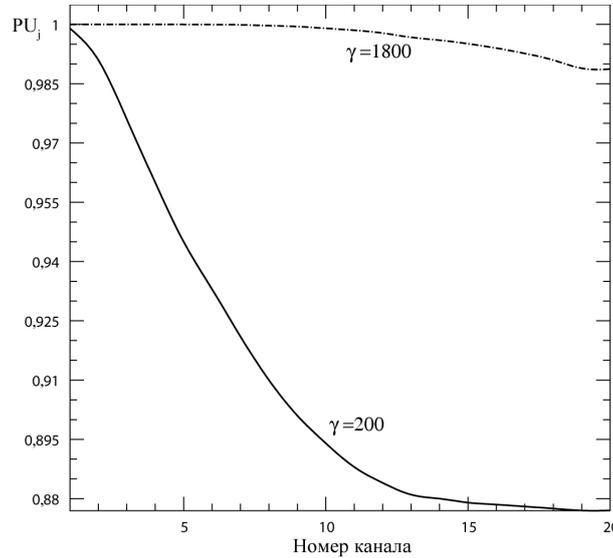


Рис. 2. Зависимость вероятности качественного приёма от популярности телеканала

4. Заключение

В статье предложен новый подход к анализу P2PTV-сети, основанный на модели поведения отдельного пользователя P2PTV-сети в виде замкнутой экспоненциальной СеМО с одной заявкой и последующем предельном переходе от модели с конечным числом пользователей к модели с бесконечным числом пользователей. Заметим, что построенная модель с бесконечным числом пользователей наиболее адекватно описывает функционирование P2PTV-сети, поскольку она позволяет учесть изменение числа пользователей, просматривающих телеканал, не только из-за их переключения с канала на канал, но и за счёт подключения пользователей к вещанию и отключения их от P2PTV-сети.

В дальнейшем предполагается исследовать, как такие характеристики телеканала, как скорость отдачи соответствующего видеопотока видеосервером, индивидуальные скорости пользователей, просматривающих телеканал, число пользователей, просматривающих телеканал, доля пользователей с высокой скоростью отдачи видеопотока и т.п., влияют на качество приёма видеопотока пользователями. Целью исследования является выявление характеристик P2PTV-сети, которые оказывают существенное влияние на функционирование сети.

Кроме того, интересно построить модель P2PTV-сети, в которой предусмотрена задержка воспроизведения телеканала оборудованием пользователя, и исследовать зависимость качества приёма видеопотока пользователями от значения этой задержки.

Поскольку отличительной чертой сетей следующего поколения является предоставление услуг с различными уровнями качества, ещё одной задачей дальнейших исследований может служить построение модели P2PTV-сети, каждый пользователь которой может выбрать уровень качества приёма видеопотока из нескольких уровней, предоставляемых сетью.

Литература

1. Сайт системы CoolStreaming P2PTV. — <http://www.coolstreaming.us>.
2. Сайт системы PPLive P2PTV. — <http://www.pplive.com>.
3. Сайт системы PPStream P2PTV. — <http://www.pps.tv>.
4. Cohen B. The BitTorrent Protocol Specification, vers. 11031. — Feb. 2008. — http://bittorrent.org/beps/bep_0003.html.
5. Wu D., Liu Y., Ross K. W. Modeling and Analysis of MultiChannel P2P Live Video Systems // IEEE/ACM Transactions on Networking. — 2010.
6. Башарин Г. П. Лекции по математической теории телетрафика: Учеб. Пособие. — 3-е, испр. и доп. издание. — М.: РУДН, 2009. — 342 с.
7. Наумов В. А., Самуйлов К. Е., Яржина Н. В. Теория телетрафика мультисервисных сетей. — М.: РУДН, 2007. — 191 с.
8. Плаксина О. Н. О двух системах массового обслуживания с «прозрачными» заявками и их применении к анализу услуг мультивещания. — 2010. — № 2, вып. 1. — С. 37–41.

UDC 621.39

Playback Model for Broadcast Television Channels in P2P Networks

Aminu Adamu, Y. V. Gaidamaka, A. K. Samouilov

*Telecommunication Systems Department
Peoples' Friendship University of Russia
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russia*

In this paper, we introduce a closed queueing network model with a single customer to analyze the behavior of a peer in P2P streaming systems. Then we use the passage to the limit when the number of peers approaches infinity in a closed queueing network model with limited population to analytically study the performance of multi-channel P2P streaming systems with the isolated channel (ISO) streaming design. The product-form solution for steady state probabilities and the expressions for the probability of universal streaming for a channel were derived. Some calculations for both models (when the number of peers is limited and when the number of peers approaches infinity) were conducted.

Key words and phrases: P2P network, broadcast television, queueing network, single user behavior model, popularity of TV-channel, probability of high quality video reception.