УДК 519.157.1

Салпагаров С.И., Исаев Ю.Д.

Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ДАННЫХ P2P-ТЕЛЕВИДЕНИЯ НА ГИПЕРГРАФАХ*

Аннотация

В статье описана проблема распределения потоков данных в одноранговых сетях передачи потокового видео. Рассмотрен случай просмотра телевизионных каналов множеством пользователей в P2P сетях. Известны вероятностные постановки указанной задачи, которые определяют различные показатели качества построение одноранговой сети, например, вероятность всеобщей передачи, при которой непопулярные каналы, наряду с популярными каналами, также доступны для просмотра пользователями сети с определенной вероятностью. В нашей работе предложена дискретная постановка данной задачи. Определяется множество зрителей, множество каналов для просмотра и множество потоков, на которые можно распределить каналы. Каждый пользователь, который принимает некоторые потоки, назначается на просмотр определенного канала. Результатом этого назначения потоков по пользователям должно стать повышение уровня производительности системы телевещания, в частности, качество обслуживания непопулярных каналов не должно быть значительно хуже качества обслуживания каналов, которые являются более популярными. Математическая модель описана на языке теории гиперграфов в двухкритериальной постановке. Критерии имеют вид MINMAX, которые позволяют одновременно учитывать показатели эффективности по времени переключения между каналами и прерывания изображения.

Ключевые слова

Гиперграф; сочетания на гиперграфах; P2P-телевидение; распределение потоков данных; векторная целевая функция; многокритериальность.

Salpagarov S.I., Isaev Yu.D.

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

AN OPTIMIZATION MODEL OF DISTRIBUTION OF P2P-TV DATA STREAMS ON HYPERGRAPHS

Abstract

This article describes the problem of the distribution data streams process in P2P video streaming systems. It also discusses the case of watching TV channels by a lot of users in P2P system. Known probabilistic statements of this problem, which determine the various quality indicators the construction of a peer-to-peer network, for example, the probability of universal transmission. In our work, we propose a discrete formulation of this problem. It defines a lot of viewers, a lot of channels for viewing and a lot of streams, to which you can distribute channels. Each user that receives some streams is assigned to view a particular channel. The result of this assignment of streams by users should be the increase in the level of performance of the broadcasting system, in particular, the quality of servicing unpopular channels should not be much worse than the quality of service of channels that are more popular. The mathematical model is described in the language of the hypergraph theory in a two-criterion formulation. The criteria are MINMAX, which allow taking into account the performance indicators such as the time of switching between channels and the interruption of the image at the same time.

Keywords

Hypergraph; combinations on hypergraphs; P2P-TV; distribution of data flows; vector objective function; multicriteria.

---

* **Труды II Международной научной конференции «Конвергентные когнитивно-информационные технологии» (Convergent'2017), Москва, 24-26 ноября, 2017**

Proceedings of the II International scientific conference "Convergent cognitive information technologies" (Convergent'2017), Moscow, Russia, November 24-26, 2017

Введение

Сегодня во многих областях деятельности человека широко используются пиринговые сети (P2P). Прежде всего они используются для обмена данными и передачи потокового контента. Как известно, общий трафик, генерируемый пиринговыми сетями, составляет более половины всего интернет-трафика. Если рассматривать систему потокового мультимедиа, в частности, потоковое видео, то для передачи потокового видео во всем мире был внедрен целый ряд крупномасштабных P2P-сетей [1-3]. В этих сетях множество телевизионных каналов одновременно просматриваются большим числом пользователей. Целый ряд исследований [4-7] посвящены анализу показателей качества функционирования одноранговых сетей передачи потокового видео (P2PTV). При этом используются различные методы исследования, такие как построение и анализ аналитических моделей [8], которые используют аппарат теории экспоненциальных сетей массового обслуживания [9].

Современное состояние системы P2PTV

Наиболее широкое распространение получили несколько схем P2PTV [4]. Одной из них является механизм обмена данными системой изолированных каналов (Isolated Channel) – ISO P2P. Наряду с преимуществами [4], организация обмена данными по этой схеме, в случае небольшого числа пользователей, имеет некоторые недостатки, в частности, низкое качество воспроизведения непопулярных каналов [4], задержки при переключении каналов, прерывание воспроизведения просматриваемых каналов. Указанные недостатки предлагает решать с помощью системы разделения просмотра-загрузки (VUD – View-Upload Decoupling) [4,8]. Работа модели VUD основана на разделении загружаемых пользователем потоков данных на два типа: потока для собственного просмотра, соответствующего телевизионному каналу, зрителем которого он является, и потока (одного или нескольких) другого телевизионного канала, исключительно для раздачи другим пользователям. Как правило, последние – это потоки телевизионных каналов с низкой популярностью, принудительное распространение которых обеспечивает стабильность многоканальной системы.

Цель исследования

В механизме VUD четко разделяется, что пользователь загружает и что просматривает, благодаря чему достигается стабильность многоканальной системы и появляется возможность разделять ресурсы между каналами. Каждому пользователю назначены один или несколько каналов независимо от того, что пользователь просматривает. Пользователь загружает и рассылает другим пользователям все данные назначенных ему каналов.

Таким образом, для каждого канала создается собственная группа распространения. Схема VUD требует отправки дополнительной сигнальной информации, поскольку теперь пользователь должен загружать данные не только своей группе, но и пользователям вне ее, т.е. тем пользователям, которые хотят просматривать назначенный ему канал.

Целью настоящей работы является построение математической модели эффективной организации распределения потоков данных между пользователями P2P-сетей для схемы VUD. Использование этой модели позволит находить решения задачи, в которых как время переключения между каналами, так и время прерывания воспроизведения просматриваемых каналов будут минимальными.

Основная часть

Объектами для построения математической модели передачи данных являются:

1. $U = \{u\}$ – множество пользователей, получающих услугу;
2. $C = \{c\}$ – множество каналов, доступных пользователю;
3. $F = \{f\}$ – множество потоков, на которые можно распределить каналы.

Математическая постановка рассматриваемой задачи сформулирована следующим образом. Каждый пользователь $u_i \in U$ принимает потоки $f \in F$ канала $c \in C$ от пользователей $u_j \in U$, причем $u_i \cap u_j = \emptyset$. Результатом такого распределения потоков каналов между пользователями должно стать повышение уровня производительности системы телевещания, в частности, качество обслуживания непопулярных каналов не должно быть значительно хуже качества обслуживания каналов, которые являются более популярными.

Математическая модель, рассматриваемой в настоящей работе, задачи базируется на 3-дольном 3-однородном гиперграфе $G = (V, E) = (V_1, V_2, V_3, E)$ [10,11], который строится следующим образом. Вершины первой доли, т.е. $v \in V_1$, взаимно однозначно соответствуют элементам множества пользователей U. Каждой вершине $v \in V_1$, соответствующей пользователю $u \in U$, приписано число $m(v)$, определяемое числом потоков, которое будет передавать пользователь. Каждая вершина второй доли $v \in V_2$ однозначно соответствует некоторому элементу из множества потоков F, распределенных по пользователям. Вершины третьей доли $v \in V_3$ взаимно однозначно соответствуют элементам множества каналов C. Для построения множества рёбер $E = \{e\}$ рассматриваем всевозможные тройки вершин (v_1, v_2, v_3) такие, что $v_1 \in V_1$, $v_2 \in V_2$, $v_3 \in V_3$. Всякую такую тройку называем допустимой, если пользователь v_1 имеет возможность передавать поток данных v_2 канала v_3. Множество всех рёбер $E = \{e\}$ определяется как множество всех допустимых троек $e = (v_1, v_2, v_3), v_i = V_i, i = \overline{1,3}$.

В рассматриваемой задаче для гиперграфа $G = (V_1, V_2, V_3, E)$ выполняются следующие условия:

1. В каждом ребре $e = (v_1, v_2, v_3) \in E$ выделена пара вершин v_1, v_3, называемых концевыми для этого ребра;
2. Вершины $v \in V_2$ являются внутренними вершинами, и множество V_2 состоит из непустых попарно непересекающихся множеств $V_2(v_3)$, $v_3 \in V_3$, причем каждый элемент $v \in V_2(v_3)$ однозначно соответствует некоторому потоку $f \in F$;
3. Концевые вершины $v_3 \in V_3^Z$ являются висячими вершинами (степени 1);
4. Для каждой вершины v из V_1 указано число $m(v)$, которое является параметром следующего условия: принадлежащая допустимому покрытию звезда с центром в вершине $v \in V_1$ имеет степень $r(v) = m(v)$ и при этом выполняется равенство $\sum_{v \in V_1} m(v) = |V_3|$.

Через $X = X(G) = \{x\}$ обозначим множество всех допустимых решений (МДР) задачи покрытия гиперграфа G звездами.

Каждому ребру $e \in E$ гиперграфа $G = (V, E)$ приписаны два веса $w_1(e)$ и $w_2(e)$, которые означают следующее: $w_1(e) = f_1(v_1, v_2, v_3)$ – задержка доступа при переключении пользователя $v_1 \in V_1$ на канал $v_3 \in V_3$, для передачи которого был использовал поток $v_2 \in V_2$, и $w_2(e) = f_2(v_1, v_2, v_3)$ – время прерывания при воспроизведении изображения в том же случае.

Качество допустимых решений этой задачи $x \in X$ оценивается с помощью векторной целевой функции

$$F(x) = (F_1(x), F_2(x)), \tag{1}$$

вида MINMAX

$$F_i(x) = max\, w_i(e) \to \min, i = 1,2, \tag{2}$$

что означает $F_1(x)$ – ожидаемый уровень времени переключения каналов в заданном решении x; $F_2(x)$ – изменение прерывания воспроизведения в решении x.

В качестве примера была рассмотрена следующая ситуация. В системе находится пять каналов $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5\}$. В результате предварительного анализа каналов, между пользователями разделяются потоки $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4\}$. В системе будут находиться два пользователя $U = \{u_1, u_2\}$, причем u_1 будет раздавать потоки двум каналам, а u_2 – трем, и при этом принято решение, что пользователи $u_1(u_2)$ должны обязательно раздавать потоки каналам c_1 и c_5.

Опишем процесс построения гиперграфа $G = (V_1, V_2, V_3, E)$. Доля $V_1 = \{v_1, v_2\}$ $(V_3 = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\})$ поставлена во взаимно однозначное соответствие множеству $U(C)$. Доля V_2 поставлена во взаимно однозначное соответствие множеству F, элементы которого занесены в таблицу 1.

Таблица 1.

Каналы	Потоки
c_1	f_1
c_2	$f_1 f_3$
c_3	f_4
c_4	$f_2 f_4$
c_5	f_3

Построим множество ребер.

$e_1 = (u_1, f_1, c_1)$	$e_7 = (u_2, f_1, c_2)$
$e_2 = (u_1, f_1, c_2)$	$e_8 = (u_2, f_3, c_2)$
$e_3 = (u_1, f_3, c_2)$	$e_9 = (u_2, f_4, c_3)$
$e_4 = (u_1, f_4, c_3)$	$e_{10} = (u_2, f_2, c_4)$
$e_5 = (u_1, f_2, c_4)$	$e_{11} = (u_2, f_4, c_4)$
$e_6 = (u_1, f_4, c_4)$	$e_{12} = (u_2, f_3, c_5)$

Веса ребер $w_v \geq 0$, $v = 1,2$, заданы таблицей 2.

Таблица 2.

	$w_1(e)$	$w_2(e)$
e_1	13	14
e_2	25	13
e_3	13	10
e_4	21	18
e_5	17	12

e_6	21	23
e_7	14	19
e_8	11	15
e_9	7	12
e_{10}	18	15
e_{11}	20	8
e_{12}	9	11

Представим все элементы МДР $X = \{x\}$ рассматриваемой задачи.

$x_1 = (e_1, e_2, e_9, e_{10}, e_{12})$,
$x_2 = (e_1, e_2, e_9, e_{11}, e_{12})$,
$x_3 = (e_1, e_3, e_9, e_{10}, e_{12})$,
$x_4 = (e_1, e_3, e_9, e_{11}, e_{12})$,
$x_5 = (e_1, e_4, e_7, e_{10}, e_{12})$,
$x_6 = (e_1, e_4, e_7, e_{11}, e_{12})$,
$x_7 = (e_1, e_4, e_8, e_{10}, e_{12})$,
$x_8 = (e_1, e_4, e_8, e_{10}, e_{12})$,
$x_9 = (e_1, e_5, e_7, e_9, e_{12})$,
$x_{10} = (e_1, e_5, e_8, e_9, e_{12})$,
$x_{11} = (e_1, e_6, e_8, e_9, e_{12})$,
$x_{12} = (e_1, e_6, e_7, e_9, e_{12})$.

На рис.2 представлено одно из допустимых решений x_4.

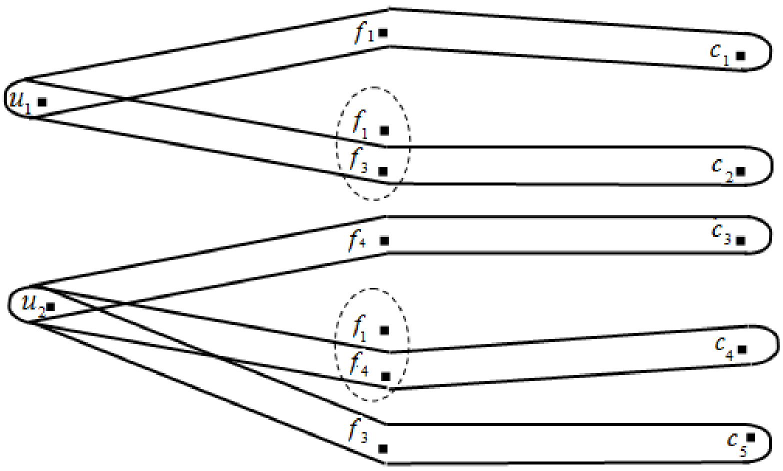

Рис. 2. Допустимое решение x_4

Запишем в таблицу 3 значения критериев ВЦФ:

Таблица 3.

	$F_1(x)$	$F_2(x)$
x_1	25	15
x_2	25	14
x_3	18	15
x_4	20	14
x_5	21	19
x_6	21	19
x_7	21	15
x_8	21	18
x_9	17	19
x_{10}	18	15
x_{11}	21	23
x_{12}	21	23

Математическое моделирование реальных задач зачастую приводит к многокритериальным постановкам, для которых понятие «оптимальное решение» отсутствует. В условиях многокритериальности возникает необходимость вместо оптимума искать множество альтернатив [12,13].

Среди различных постановок векторных задач в обзоре [14] рассмотрим многокритериальную задачу, в которой качество допустимых решений $x \in X$ оценивается векторной целевой функцией (ВЦФ) (1) с критериями вида (2).

ВЦФ (1) – (2) определяет в МДР X паретовское множество (ПМ) $\tilde{X}$, состоящее из паретовских оптимумов (ПО) $\tilde{x}$ [13,15]. В случае если одинаковые по значению ВЦФ решения $x', x'' \in X$ считаются эквивалентными (неразличимыми), то из ПМ X выделяется полное множество альтернатив (ПМА) X^0.

Подмножество $X^0 \subseteq \tilde{X}$ называется ПМА, если оно имеет минимальную мощность $|X^0|$ и при этом выполняется равенство $F(X^0) = F(\tilde{X})$, где $F(X^*) = \{F(x): x \in X^*\} \forall X^* \subseteq X$, таким образом, ПМА X^0 представляет собой максимальную систему векторно несравнимых ПО из $\tilde{X}$, $X^0 \subseteq \tilde{X}$. Для представленного выше примера $X^0 = \{x_3, x_4, x_9\}$.

Наиболее целесообразное решение выбирается из ПМА с помощью процедур теории выбора и принятия решений [15].

Полученные результаты

В результате проведенной работы построена двухкритериальная модель на гиперграфах, с помощью которой решена задача эффективного распределения потоков данных между пользователями P2P-сетей для схемы VUD. Эта модель позволяет находить решения задачи, для которых время переключения между каналами и время прерывания воспроизведения просматриваемых каналов являются минимальными.

Заключение

В данной работе описано решение задачи оптимизации процесса распределения потоков в P2PTV с использованием понятий и объектов теории гиперграфов. Применение этой теории в сочетании с элементами теории многокритериальной оптимизации позволяет учесть в системном единстве сложную организацию внутренних взаимосвязей элементов рассматриваемых задач. Примерами успешного применения такого подхода может служить ряд задач, решенных авторами и их коллегами в различных предметных областях [16]. Авторы полагают, что указанный в данной работе подход будет использоваться при решении оптимизационных сетевых задач.

Благодарности

Авторы выражают благодарность д.т.н. профессору, заведующему Самуйлову К. Е. и д.ф.-м.н. профессору Гайдамака Ю. В. кафедры прикладной информатики и теории вероятности РУДН за поддержку в написании и публикации данной работы.

Литература

1. Сайт системы P2PTV PPLive [Электронный ресурс]. http://www.pptv.com/. (дата обращения 11.10.2017).
2. Сайт системы P2PTV Tribler [Электронный ресурс]. https://www.tribler. org/. (дата обращения 11.10.2017).
3. Сайт системы P2PTV PPS.tv [Электронный ресурс]. https://www.pps.tv/. (дата обращения 11.10.2017).
4. Wu D., Liu Y., Ross K. Queuing Network Models for Multi-Channel P2P Live Streaming Systems // IEEE INFOCOM. 2009. Pp. 73-81.
5. Гайдамака Ю.В., Самуйлов А.К. Анализ стратегий заполнения буфера оборудования пользователя при предоставлении услуги потокового видео в одноранговой сети // T-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. 2013. № 11. С. 77-81.
6. Самуйлов А.К., Бобрикова Е.В. Простейшая жидкостная модель файлообменной P2P-сети // T-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. 2012. № 7. С. 180-184.
7. Адаму А., Гайдамака Ю.В. Аппроксимация нормальным законом вероятностных характеристик модели сети P2P TV // Вестник РУДН. Серия: Математика. Информатика. Физика. 2011. № 3. С. 63-68.
8. Гайдамака Ю.В., Медведева Е.Г., Салпагаров С.И., Бобрикова Е.В. Анализ модели многоканальной одноранговой сети вещательного телевидения для схемы с разделением видеопотока // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». – М.: Изд-во РУДН. – 2017. – № 2. – С. 123-132.
9. Башарин Г.П. Лекции по математической теории телетрафика: учеб. пособие. изд. 3-е, испр. и доп. – М.: РУДН, 2009. – 342 с.
10. Емеличев В.А., Мельников О.И., Сарванов В.И., Тышкевич Р.И. Лекции по теории графов. – М.: Наука, 1990. – 384 с.
11. Зыков А.А. Гиперграфы//Успехи Матем. наук. – 1974. – Т. 29. вып.6. – С. 89-154.
12. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. –М.: Наука, 1982. – 256 с.
13. Сергиенко И.В., Перепелица В.А. К проблеме нахождения множеств альтернатив в дискретных многокритериальных задачах //Кибернетика. –1987. – №5. – С. 85-93.
14. Емеличев В. А., Перепелица В. А. Сложность дискретных многокритериальных задач // Дискретная математика. –1994. – Т.6, №1.-С.3-33.
15. Сакович В.А. Исследование операций. –Минск.: Вышэйшая школа, 1984. -256 с.
16. Салпагаров С.И., Омельченко Г.Г. Моделирование на гиперграфах. – М.: РУДН, 2010. – 64 с.

References

1. Sajt sistemy P2PTV PPLive [электронный ресурс]. http://www.pptv.com/. (data obrashhenija 11.10.2017).
2. Sajt sistemy P2PTV Tribler [электронный ресурс]. https://www.tribler. org/. (data obrashhenija 11.10.2017).
3. Sajt sistemy P2PTV PPS.tv [электронный ресурс]. https://www.pps.tv/. (data obrashhenija 11.10.2017).
4. Wu D., Liu Y., Ross K. Queuing Network Models for Multi-Channel P2P Live Streaming Systems // IEEE INFOCOM. 2009. Pp. 73-81.
5. Gajdamaka Ju.V., Samujlov A.K. Analiz strategij zapolnenija bufera oborudovanija pol'zovatelja pri predostavlenii uslugi potokovogo

video v odnorangovoj seti // T-Comm – Telekommunikacii i Transport. 2013. № 11. S. 77-81.
6. Samujlov A.K., Bobrikova E.V. Prostejshaja zhidkostnaja model' fajloobmennoj P2P-seti // T-Comm – Telekommunikacii i Transport. 2012. № 7. S. 180-184.
7. Adamu A., Gajdamaka Ju.V. Approksimacija normal'nym zakonom verojatnostnyh harakteristik modeli seti P2P TV // Vestnik RUDN. Serija: Matematika. Informatika. Fizika. 2011. № 3. S. 63-68.
8. Gajdamaka Ju.V., Medvedeva E.G., Salpagarov S.I., Bobrikova E.V. Analiz modeli mnogokanal'noj odnorangovoj seti veshhatel'nogo televidenija dlja shemy s razdeleniem videopotoka // Vestnik RUDN. Serija «Matematika. Informatika. Fizika». – M.: Izd-vo RUDN. – 2017. – № 2. – S. 123-132.
9. Basharin G.P. Lekcii po matematicheskoj teorii teletrafika: ucheb. posobie. izd. 3-e, ispr. i dop. – M.: RUDN, 2009. – 342 s.
10. Emelichev V.A., Mel'nikov O.I., Sarvanov V.I., Tyshkevich R.I. Lekcii po teorii grafov. – M.: Nauka, 1990. – 384 s.
11. Zykov A.A. Gipergrafy//Uspehi Matem. nauk. – 1974. – T. 29. vyp.6. – S. 89-154.
12. Podinovskij V.V., Nogin V.D. Pareto-optimal'nye reshenija mnogokriterial'nyh zadach. –M.: Nauka, 1982. – 256 s.
13. Sergienko I.V., Perepelica V.A. K probleme nahozhdenija mnozhestv al'ternativ v diskretnyh mnogokriterial'nyh zadachah //Kibernetika. –1987. – №5. – S. 85-93.
14. Emelichev V. A., Perepelica V. A. Slozhnost' diskretnyh mnogokriterial'nyh zadach // Diskretnaja matematika. –1994. –T.6, №1.-S.3-33.
15. Sakovich V.A. Issledovanie operacij. –Minsk.: Vyshjejshaja shkola, 1984. -256 s.
16. Salpagarov S.I., Omel'chenko G.G. Modelirovanie na gipergrafah. – M.: RUDN, 2010. – 64 s.

Об авторах:
Салпагаров Солтан Исмаилович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий факультета физико-математических и естественных дисциплин, Российский университет дружбы народов, salpagarov_si@pfur.ru
Исаев Юрий Дмитриевич, студент 2-го курса магистратуры факультета физико-математических и естественных наук, направление «Фундаментальная информатика информационные технологии», специализация «Управление инфокоммуникациями и интеллектуальные системы», Российский университет дружбы народов, ydisaev@mail.ru

Note on the authors:
Salpagarov Soltan I., Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of information technologies faculty of Physico-Mathematical and Natural Sciences, Peoples' Friendship University of Russia, salpagarov_si@pfur.ru
Isaev Yury D., 2-nd year student of magistracy, faculty of Physico-Mathematical and Natural Sciences, major «Fundamental informatics and information technologies», speciality «Infocommunications Management and intelligent systems», Peoples' Friendship University of Russia, ydisaev@mail.ru