

# 大规模P2P TV会话时长与用户分类研究

姜志宏, 王 晖, 李 沛, 樊鹏翼

JIANG Zhihong, WANG Hui, LI Pei, FAN Pengyi

国防科技大学 信息系统与管理学院, 长沙 410073

College of Information Systems and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

JIANG Zhihong, WANG Hui, LI Pei, et al. Research on session length and user categorization in large scale P2P TV network. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(23): 6-12.

**Abstract:** P2P TV system is getting more and more popular as a new TV service. In contrast with traditional cable and satellite TV system, the Internet-based P2P TV is more interactive, more open, and has wider sphere of influence. While getting some new experience that is different from traditional TV system, P2P TV users have exhibited some new characters of viewing behavior. In this work, it performs an in-depth study on session length of P2P TV user by analyzing the real data collected from the self-developed measuring tool named TVCrawler. According to the distribution characters of user session length, it puts P2P TV users into three categories: light viewers with 3~5 minutes of mean session length, medium viewers with 20~50 minutes of mean session length, and heavy viewers with 120~200 minutes of mean session length. It analyzes online number and arrival rate for different categories of users.

**Key words:** peer-to-peer based TV; crawler; network measurement; user session length

**摘 要:** P2P TV已经成为一种越来越普及的新型电视服务平台。与传统有线电视相比较,基于互联网的P2P TV在影响范围、交互性和开放性等方面都具有巨大的优势。P2P TV用户在感受到不同于传统电视的收看体验的同时,也表现出了不同于传统电视用户的收看行为。在利用自主研发的测量工具——TVCrawler获取实际系统数据的基础上,对P2P TV用户的会话时长进行了深入研究。按照P2P TV用户会话时长的分布特点,将其分为轻度收看者、中度收看者和重度收看者三类,对应的平均会话时长分别为3~5分钟,20~50分钟和120~200分钟,并进一步分析了在各被测频道中,三类用户各自的在线人数和到达率。

**关键词:** P2P网络电视; 爬行器; 网络测量; 用户会话时长

**文章编号:** 1002-8331(2012)23-0006-07 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP393

近年来,随着宽带互联网的迅速发展,P2P TV网络电视用户量、市场份额以及传播影响力一直持续稳定快速增长,显示出巨大的市场前景。从用户人数和覆盖率上来看,P2P TV已经成为名符其实的大众媒体。在每次媒体和社会的“大事件”中,P2P TV都发挥了极其重要的传播作用,同时国内主流P2P TV系统的传播影响也已经通过互联网辐射到了包括北美、欧洲、台湾等国家和地区。主流的P2P

TV系统(如PPLive,PPStream和UUSee等)提供数百个网络电视频道,吸引了数百万的用户在线观看,而根据节目内容编排和热门程度的不同,其单个频道的同时在线人数则从几十人到数千,甚至数万不等,说明了基于P2P技术的网络电视已经具备了提供大规模网络视频服务的技术能力。目前的主流P2P TV系统大多采用类Gossip方式维护节点间的连接关系并形成覆盖网络,同时采用基于数据驱动(Data-

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863)(No.2008AA01Z407)。

**作者简介:** 姜志宏(1975—),男,博士生,讲师,主要研究方向为复杂网络与P2P流媒体;王晖(1968—),男,博士,教授,博士生导师,CCF会员,主要研究方向为信息系统工程、多媒体网络;李沛(1981—),男,博士,讲师,主要研究方向为社会传感网络与博弈理论;樊鹏翼(1983—),男,博士生,主要研究方向为复杂网络与舆论传播。E-mail: jonathan.jiang@263.net

**收稿日期:** 2011-12-27 **修回日期:** 2012-03-26 **CNKI出版日期:** 2012-07-03

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2012.23.002 <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20120703.1516.008.html>

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

Driven)的视频流数据分发机制,具有高度的动态性和自组织性,因而用户会话时长等行为特征对系统将产生巨大的影响和作用。针对大规模P2P TV系统中基于行为特征的用户分类方法进行分析 and 研究,不仅有助于设计出更符合真实网络应用环境的系统或协议,也是实现对P2P TV进行监测、引导、控制等方面的重要依据和基础。

1 相关研究及本文工作

与P2P文件共享系统相比较,P2P TV系统的数据传输实时性要求更高,用户动态性也更强,而且主流P2P TV系统的通信协议大部分都是私有协议,这些都增加了测量和分析研究的难度。CoolStreaming<sup>[1]</sup>是最早在互联网上大规模部署的P2P TV系统,其开发人员Zhang<sup>[2]</sup>等人在系统中增加了一个P2P报告机制用于采集测量数据,对CoolStreaming的在线人数、用户行为和用户的地理分布等进行了分析和研究,他认为CoolStreaming系统中,除了热点节目时期会突然吸引大量用户长期在线以外,平常时期用户的到达近似于泊松分布。Li等人<sup>[3]</sup>也利用上述报告机制,对CoolStreaming运行日志数据进行了进一步分析,包括在线人数的时间演化,并认为CoolStreaming中的节点失效率与节点到达率及离开率高度正相关,而与在线人数无直接关系。Wu等人<sup>[4]</sup>与悠视网合作,通过在UUSee客户端中增加日志和报告功能,采集了大量实际运行数据,对UUSee系统的在线人数、用户行为、用户分布等进行了统计分析。Liu<sup>[5]</sup>采用同样的数据集,研究了UUSee冷门频道中用户会话时长及其影响因素。Hei等人<sup>[6-7]</sup>通过主动爬行的方式研究了PPLive的用户行为,包括频道在线人数和系统在线人数变化,用户动态性等,认为PPLive用户在收看时间习惯上与传统电视用户一致,即主要在业余时间收看,而且在人数高峰期时,用户到达率和离开率都相应达到峰值。Vu等人<sup>[8-9]</sup>也设计了PPLive协议爬行器,对PPLive进行了测量研究,发现PPLive的频道在线人数变化具有时间敏感(Time-sensitive),自重复(Self-repeated)和事件相关(Event-dependent)的特点,同时对其用户会话时长分布拟合建立了指数分布模型。Silverston等人<sup>[10]</sup>采用嗅探的方式研究和比较了PPLive、PPStream、SOPCast和TVAnts等四个P2P TV系统的平均包大小、节点吞吐量、节点会话时长等特征,并采用威布尔曲线对节点会话时长分布进行了拟合。此外,与本文工作相关较高的还有Qiu等人<sup>[11]</sup>针对美国国内基于机顶盒的IPTV系统进行的用户行为分析和建模研究。

本文采用协议爬行器的方式,对PPLive、PPStream和UUSee等三个P2P TV系统的多个频道进行测量,并比较和分析各个系统中不同频道的用户会话时长,进而研究其用户分类方法,以及不同类型用户的在线人数、到达率等特征演化规律及其相互关系。

2 P2P TV测量数据集

针对主流P2P TV系统在软件结构和协议设计上的相似性,设计和实现了一个多协议的P2P TV爬行器——TVCrawler<sup>[12]</sup>,实现对国内的主流P2P TV系统PPLive、PPStream和UUSee的主动测量<sup>[13]</sup>。本文选取三个典型频道A、B和F作为研究对象,其中A和B为两个国内的老牌地方卫视频道,A频道热门度较高,在线用户数量比较多,而B频道热门度较低,日常在线用户数也较低。F频道则是国内影响较大的财经类频道。三个P2P TV系统都提供三个频道的24小时直播服务。

部署了三套TVCrawler系统对三个P2P TV系统中的A、B和F频道分别进行了长时间的测量。每套TVCrawler采用1台服务器运行爬行控制器,2台网络终端运行爬行终端,测量环境的互联网出口带宽为100 Mb/s。测量开始时间为2009年12月9日,实验持续5周,先后对A、B和F每一个频道,同时测量其在三个不同P2P TV系统中的实际运行情况,获得了总容量近20 GB的测量数据,由一系列连续的频道快照组成,快照获取的时间间隔长度取决于网络规模,通常约为2~5分钟。这些快照序列提供了被测量频道的在线用户数量人数、P2P网络拓扑等一系列时间相关的演化关系,作为本文研究的数据集。由于三个P2P TV系统的主要用户都来自中国,因此本文采用北京时间(GMT+8)对数据集进行分析。

3 用户会话时长分布

P2P TV用户会话时长(session length),是指用户一次加入频道至离开频道的时间,反映了用户一次停留在频道中的时间长度,是用户行为特征研究的重要内容。本文的测量数据集是一系列在时间上连续的快照集 $S=\{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ ,  $N$ 表示快照总数, $s_i$ 表示第*i*张快照。对测量得到的每一个用户*p*,查找对应的快照子序列 $S_p=\{s_n, s_{n+1}, \dots, s_{n+i}\}$ ,表示在第*n*张快照中首次发现用户*p*,并在随后的连续*i*张快照中都包含用户*p*,直至快照 $s_{n+i+1}$ 该用户消失。将快照序列 $S_p$ 的总时长 $T_s$ 作为用户的会话时长。

对于退出频道后再次加入的用户,同样当作新用户加入处理。实际上,由于存在快照测量时长和测量间隔时长,  $T_s$  只是用户实际会话时长的近似值,偏差最大时约为连续两张快照形成的间隔时间。同时,由于存在动态网络地址和网络地址转换等原因,无法区分一个实际用户的多次收看过程,而是将其视为两个不相关的用户会话。

图1是各被测频道中的用户会话时长的互补累积概率分布(Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF),可以看出地方卫视频道A和B的用户会话时长分布较为接近,而财经频道F的分布函数则区别较大。从分布曲线上看,在PPLive系统中,F频道中包含相对更多的长会话用户,而在PPStream和UUSee系统中,F频道中的用户会话时长在整体上明显高于其他两个地方卫视频道,从图2中也看出F频道的用户平均会话时长,在三个系统中都高于其他两个频道,说明财经频道F中用户通常有更长的会话时间。

Vu等人<sup>[14]</sup>在研究PPLive的测量数据时认为其中的用户会话时长符合指数分布。而早期工作中表明频道F的用户会话时长分布实际上具有广延指数分布(Stretched Exponential Distribution, SED)的特征。尽管广延指数分布对测量数据的拟合优度要高

于简单指数分布,但是拟合结果不具备明显的物理意义,而且也不能帮助进一步解释用户的动态行为。在传统电视用户和数字电视用户行为分析中,通常按照会话时长将用户分为不同类型进行研究,Qiu等人<sup>[11]</sup>在研究基于机顶盒的IPTV用户行为时,认为用户会话时长具有指数分布特点,但又不完全遵循简单指数分布,因而采用复合指数拟合,并按照单个指数分布的 $\lambda$ 参数对不同类型用户进行了定义。本文采用类似的方法对用户会话时长分布进行分解。P2P TV系统的频道用户可分为若干种类型,并以用户连续收看时长(即在频道中的用户会话时长)的概率分布作为分类的依据。已有研究<sup>[8-9, 14]</sup>认为P2P TV用户会话时长具有指数分布的特点,那么指数分布的不同率参数 $\lambda$ 就反应了不同的用户类型。此时会话时长的整体分布就应该是多种用户的会话时长分布的复合结果。考虑到总会话的时长分布具有类指数分布的特点(见图1),采用如公式(2)所示的复合指数分布对其进行拟合研究。

$$p(x)=\sum_{i=1}^K a_i \frac{1}{\mu_i} e^{-\lambda_i x}, 0 < a_i < 1, \sum_{i=1}^K a_i = 1$$

(1)

其中,  $\lambda_i = 1/\mu_i$  为第  $i$  个指数分布的率参数,  $a_i$  为第  $i$  个指数分布的复合系数,  $K$  表示复合的阶数。分别选取2、3、4和5作为复合阶数,对会话时长分布进行

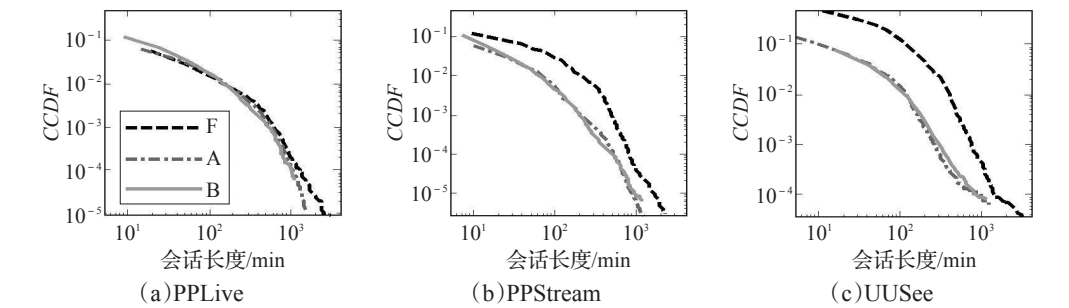


图1 频道用户会话时长累积分布

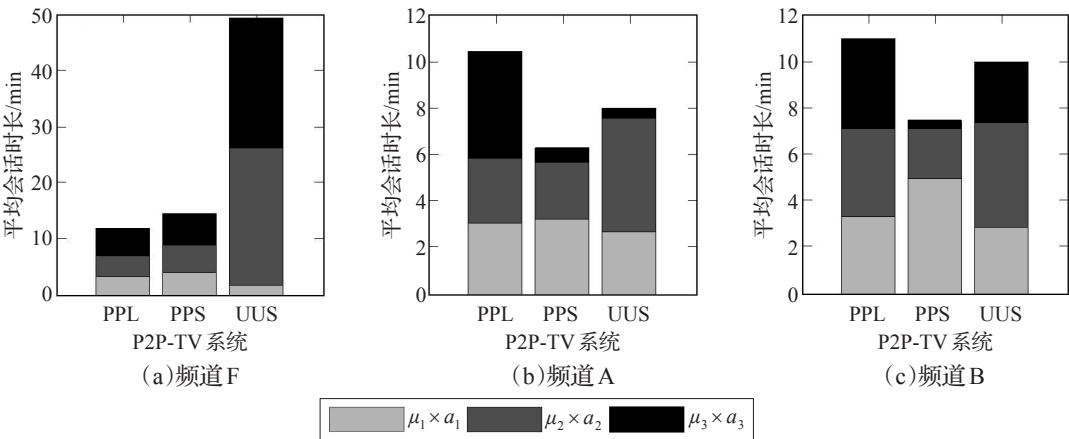


图2 频道中整体用户平均会话时长

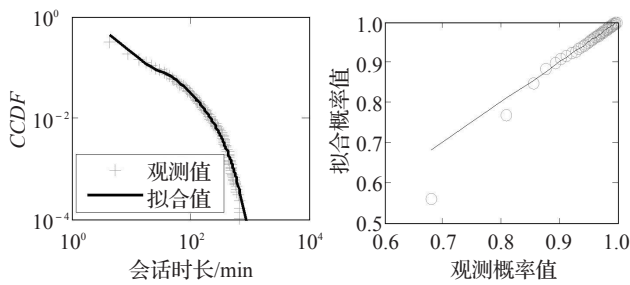
(PPL:PPLive系统;PPS:PPStream系统;UUS:UUSee系统)



最大似然法拟合实验。通过反复设定和实验,在综合考虑拟合优度和计算复杂度的前提下,选取了合适的复合阶数为3,会话时长分布函数为:

$$p(x)=a_1\frac{1}{\mu_1}e^{\frac{(-x)}{\mu_1}}+a_2\frac{1}{\mu_2}e^{\frac{(-x)}{\mu_2}}+(1-a_1-a_2)\frac{1}{\mu_3}e^{\frac{(-x)}{\mu_3}} \quad (2)$$

以PPStream系统中频道F为例,图3(a)是测量分布和分布拟合曲线的比较,图3(b)是拟合结果的P-P图,都可以看出3阶复合指数能够取得较为理想的拟合程度。



(a)测量分布和分布拟合曲线的比较 (b)拟合结果的P-P图

图3 会话时长分布的复合指数拟合

采用同样的方法对所有其余被测频道进行复合指数拟合,得到的拟合参数 $\mu_i, a_i$ 及其在置信水平0.95上的置信区间见表1。可以看出所有参数的置信区间都较短,说明复合指数拟合得到的 $\mu_i, a_i$ 参数估计值具有较高的可信程度。

4 基于会话时长的用户分类

4.1 P2P TV用户分类模型

公式(2)所示的复合指数分布具有明显的物理意义,整体的用户会话时长由三个独立分布复合而成,其中第*i*个复合项是一个平均会话时长为 $\mu_i$ 的指数分布。因此,可认为P2P TV的用户分为三类,其会话时长分别服从于平均会话时长为 $\mu_i$ 的指数分布。根据 $\mu$ 参数取值大小,分别将这三类用户称为

表1 频道用户在线时长的分布拟合参数

		PPLive	PPStream	UUSee
频道F	$\mu_1$	3.73±0.01	4.43±0.01	5.36±0.06
	$\mu_2$	26.94±0.19	48.02±0.27	49.07±0.79
	$\mu_3$	197.36±1.77	148.76±0.82	147.84±3.22
	$a_1$	0.835±0.001	0.859±0.000	0.348±0.003
	$a_2$	0.141±0.000	0.103±0.000	0.493±0.007
频道A	$\mu_1$	3.42±0.01	3.48±0.004	2.97±0.01
	$\mu_2$	33.51±0.32	31.91±0.08	46.42±0.37
	$\mu_3$	174.51±1.62	132.62±0.37	202.06±4.09
	$a_1$	0.890±0.001	0.918±0.000	0.892±0.000
	$a_2$	0.084±0.000	0.077±0.000	0.106±0.000
频道B	$\mu_1$	3.80±0.02	5.19±0.01	3.43±0.02
	$\mu_2$	31.90±0.77	39.43±0.30	31.11±0.81
	$\mu_3$	145.25±4.53	136.31±1.79	91.15±3.78
	$a_1$	0.854±0.002	0.942±0.001	0.825±0.002
	$a_2$	0.119±0.001	0.055±0.000	0.147±0.003

轻度收看者、中度收看者和重度收看者。相应地,总体分布的平均会话时长为:

$$\mu_{\text{mixed}} = \sum_{i=1}^K a_i \mu_i \quad (3)$$

从表1中可以看到,轻度收看者(light-watchers)的平均会话时长在3~5分钟,用户表现出频道浏览行为,在频道中停留的时间较短。Qiu等人<sup>[11]</sup>对Cable TV用户的频道浏览行为的测量表明其平均会话时长为30秒,远低于本文的测量值,一个可能的原因是P2P TV与基于机顶盒的Cable TV相比较,前者具有大得多的频道启动延迟和频道切换延迟,从而在整体上增加了用户的频道浏览行为的平均会话时长。中度收看者(medium-watchers)的平均会话时长在20~50分钟,此类用户主要是有选择地收看单个节目甚至是节目中的重要片段。重度收看者(heavy-watchers)的平均会话时长在120~200分钟之间,此类用户因为某种原因长时间停留在频道中,例如在财经类频道F中,部分用户长时间在线以便随时收看滚动新闻或点评。图4是被测频道中的各类用户平均

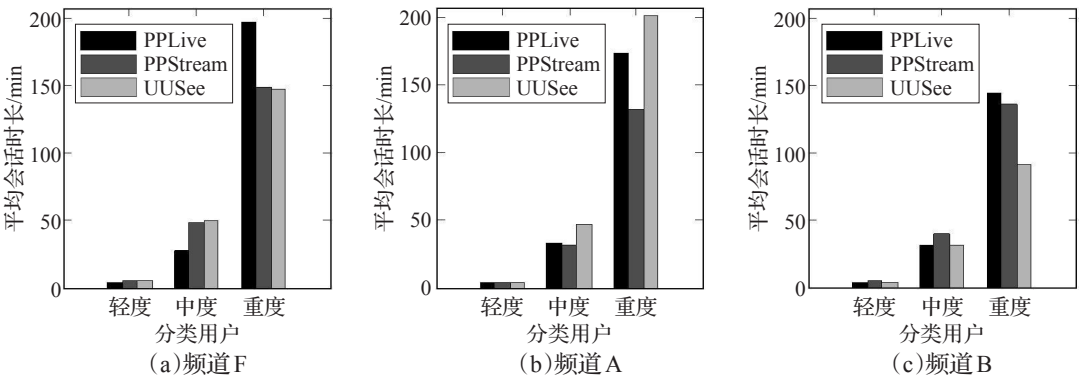


图4 频道中分类用户的平均会话时长比较

会话时长比较,可以看出即使是同一频道,不同系统的各类用户的平均会话时长有着较大区别,说明用户会话时长并不完全由频道内容的编排所决定。图2对每个被测频道给出了整体平均用户会话时长 $\mu_{\text{mixed}}$ ,以及每种用户类型 $User_i$ 对总平均会话时长的贡献程度 $\mu_i \times a_i$ 。其中UUSEE系统频道F的平均会话时长远高于其他系统,原因在于UUSEE系统频道F中拥有更高的重度和中度收看者比例。

4.2 分类用户的人数

表1给出了各频道中轻度收看者、中度收看者和重度收看者三种类型用户的平均会话时长,本节仍然通过复合指数分布拟合的方法,分析被测频道中各类型用户在不同时刻的在线数量。分析的具体方法是将表1中的 $\mu_i$ 代入公式(2),将 $a_i$ 作为待估计参数,对每个快照所包含的在线用户的会话时长分布进行拟合,得到 $a_i$ 参数的估计值 $\hat{a}_i$ , $\hat{a}_i$ 实际上表示在每个快照中各类型用户所占比例。图5给出了被测量频道在线人数中各类型用户所占比例在24小时内(工作日)的演化。其中显示出,尽管在表1的拟合结果表明相对于全体收看用户而言,重度收看者所

占的比例通常较低( $1-a_1-a_2$ ),但是由于重度收看者在线时间长,因此在大部分时刻的频道当前在线用户中,重度收看者仍然占据较大比例。大量的重度收看者节点的存在,为流媒体数据的平稳分发起到了关键作用。同时,与热门频道不同的是,在冷门频道B中,当总体在线人数增加时,重度收看者人数增加相对不明显,而会话时间相对较短的中度收看者和轻度收看者则明显增加,从一定程度上减弱了P2P网络数据分发的平稳性,这与Liu等人<sup>[5]</sup>等人发现冷门频道中在线人数越多P2P TV收看质量反而降低这一现象是一致的。

从图5也可以初步推断,重度收看者对频道整体拥有强烈的兴趣,其在线数量的变化反应了总体人数曲线的大致波动趋势,解释了总体在线人数演化曲线中的低频部分。中度收看者则是对频道的特定节目保持高度兴趣,其在线人数的变化增强了总体人数曲线在特定时间段范围内的波动,代表了总体在线人数演化曲线中的高频部分,而轻度收看者的变化则表现出更加强烈的随机倾向,解释的是总体在线人数演化曲线中的随机部分。

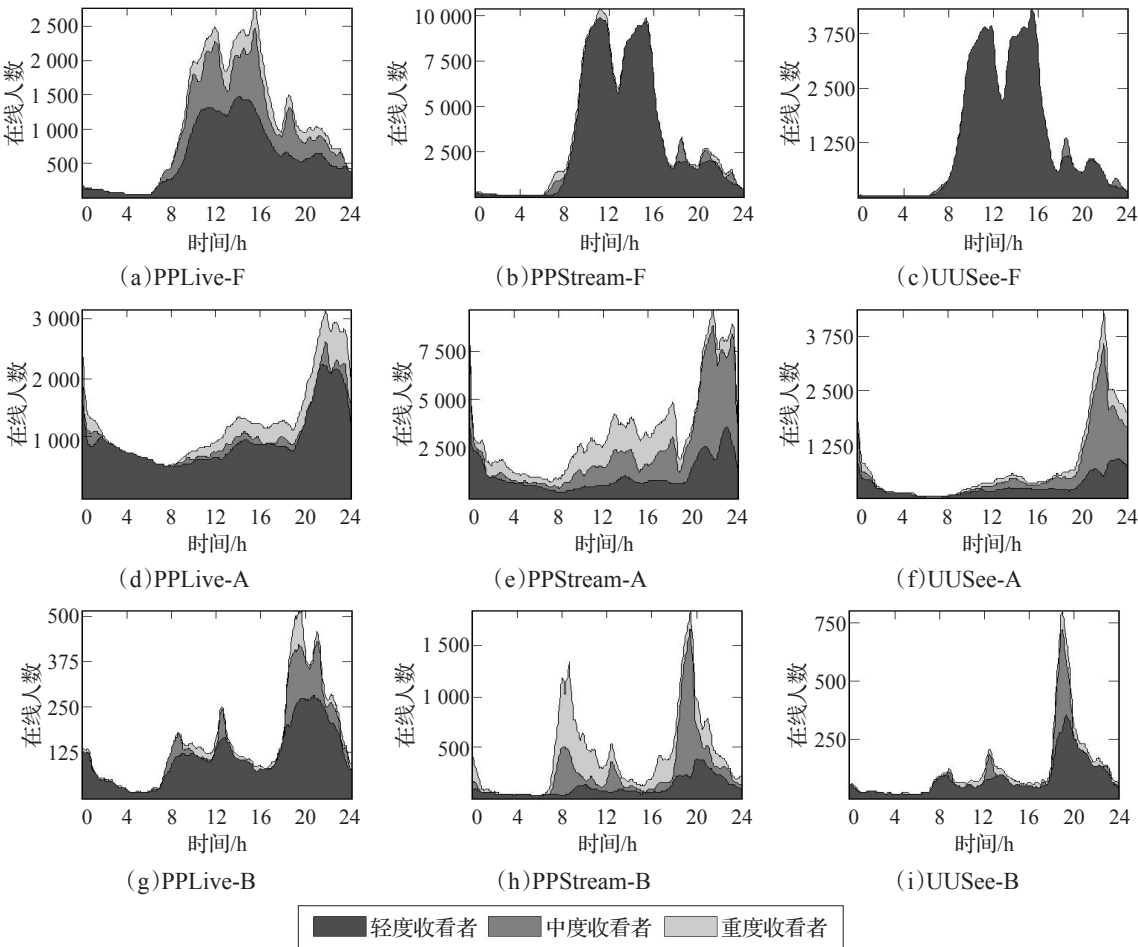


图5 三类用户在线人数的时间演化

4.3 分类用户的到达率

用户到达率(arrival rate)是指在P2P TV网络中,单位时间内加入P2P网络的数量。用户到达率是研究P2P网络动态性和用户行为的重要指标。定义 $t$ 时刻的用户到达率如公式(4):

$$A_t = \frac{N_{t+1} - N_t}{T_{t+1} - T_t}$$

(4)

其中 $T_t$ 表示第 $t$ 个快照的获取时间, $N_t$ 是第 $t$ 个快照中的用户数。在本文研究中时间间隔以分钟为单位,即 $A_t$ 表示每分钟内的用户到达率。Zhang<sup>[2]</sup>等人从CoolStreaming系统中用户对节目的订阅时长分布,推断用户到达近似于泊松过程。但实际上在P2P TV系统中,用户到达行为是与频道的节目编排高度相关的,当频道开始播放热门节目时,通常会在短时间产生大量用户到达事件,引发了所谓的Flash crowd现象。这些用户到达事件之间显然存在着高度相关性,并不满足独立性假设。因此认为在P2P TV系统中,用户到达事件并非独立随机事件,不能简单采用基于概率的到达模型(如泊松到达)进行分析。而且不同的用户类型,从收看行为上表现出不

同的特征,因此对各类型用户单独进行到达率的分析更加具有实际意义。

仍然采用与4.2节相同的方法,对轻度收看者、中度收看者和重度收看者三类用户各自的到达率进行分析。图6给出了被测频道中的分类用户到达率在24小时内(工作日)的演化,图中虚线表示对应的频道在线人数变化。尽管在凌晨时段,频道在线人数达到波谷时,各类用户的到达率都接近于0,但是从全天看不同类型用户的到达率仍然具有明显区别。其中,在所有时间点上,新到达用户中大部分都是轻度收看者。

中度收看者和重度收看者的到达率则具有时间聚类特性,多集中在特定时间段出现。以图6(b)和图6(c)所示的频道F为例,在上午的8:00-10:00和下午12:30-14:00两个时间段上,到达的用户中有较多的重度收看者,在随后的时间段上在线人数出现了波峰,此时到达的用户中中度收看者明显增加。说明对频道F的节目内容拥有强烈兴趣的重度收看者通常在工作时段之前,例如刚进入工作场所时开始收看,直至下班为止。而中度收看者则是在工作时

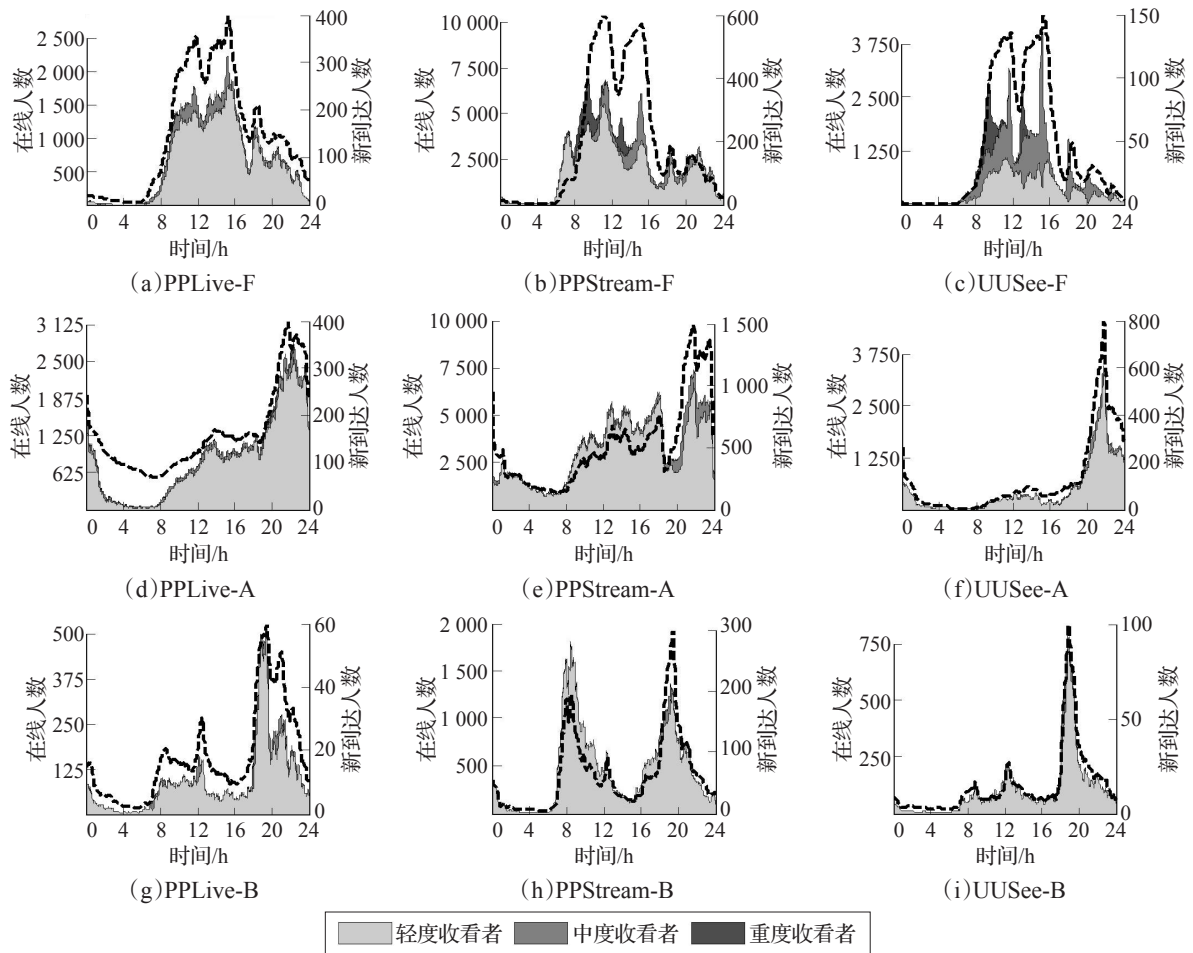


图6 三类用户到达率的时间演化

段中加入频道,仅收看自己感兴趣的某一个节目。从图6(a)~(d)还可看出,虽然考虑到频道F和A、B的节目内容不同,其中的中度和重度收看者到达的时段并不一致,但是就频道F与频道A、B比较而言,前者显示出更高的中度和重度收看者到达率,说明财经频道F拥有比地方卫视频道A、B更多的重度收看者。同时,还可看出,重度收看者用户一般都在在线人数曲线出现波峰之前到达,而中度收看者则集中在在线人数出现波峰的时段中到达。

## 5 结论

随着网络技术的发展,各种新型P2P应用不断涌现,P2P TV的使用也越来越普及,大量的用户通过PPLive、PPStream和UUSee等P2P TV软件收看互联网电视。本文采用自行设计的P2P TV爬行器TVCrawler,对PPLive、PPStream和UUSee三个系统的多个直播频道进行测量,并根据采集的数据集对P2P TV的用户会话时长进行了实例分析。采用复合指数拟合的方法,发现P2P TV用户的会话时长,分别服从于平均会话时长为3~5分钟,20~50分钟和120~200分钟的指数分布,对应地将其分为轻度收看者、中度收看者和重度收看者三类,并进一步分析了在被测频道中,三类用户各自的在线人数和到达率。下一步的研究工作将分为两步,首先以用户行为的统计分析结论为基础,建立用户行为模型,用于支持P2P TV系统的细粒度仿真研究,然后基于用户行为模型,研究P2P TV用户行为的异常定义和检测,并为P2P TV的内容监管辅助提供依据和合理假设。

## 参考文献:

- [1] Coolstreaming website[EB/OL].(2009-05).<http://www.coolstreaming.us/>.
- [2] Zhang X, Liu J, Li B. On large scale peer-to-peer live video distribution: coolstreaming and its preliminary experimental results[C]//MMSP2005: Proceedings of the IEEE 7th International Workshop on Multimedia Signal Processing, Piscataway, NJ, USA, 2005.
- [3] Li B, Xie S, Qu Y, et al. Inside the new coolstreaming: principles, measurements and performance implications[C]//Proceedings of the 27th IEEE Conference on Computer Communications, Piscataway, NJ, USA, 2008: 1031-1039.
- [4] Wu C, Li B, Zhao S. Exploring large-scale peer-to-peer live streaming topologies[J]. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMCCAP), 2008, 4(3).
- [5] Liu Z, Wu C, Li B, et al. Why are peers less stable in unpopular P2P streaming channels[C]//NETWORKING'09: Proceedings of the 8th International IFIP-TC 6 Networking Conference, Berlin, 2009: 274-286.
- [6] Hei X, Liang C, Liang J, et al. Insights into PPLive: a measurement study of a large-scale P2P IPTV system[C]//Proceedings of the IPTV Workshop, International World Wide Web Conference, New York, 2006.
- [7] Hei X, Liang C, Liang J, et al. A measurement study of a large-scale P2P IPTV system[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2007, 9(8): 1672-1687.
- [8] Vu L, Gupta I, Liang J, et al. Measurement of a large-scale overlay for multimedia streaming[C]//Proceedings of the 16th International Symposium on High Performance Distributed Computing, New York, 2007: 241-242.
- [9] Vu L, Gupta I, Nahrstedt K, et al. Understanding overlay characteristics of a large-scale peer-to-peer IPTV system[J]. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications, 2010, 6(4).
- [10] Silverston T, Fourmaux O. Measuring P2P IPTV systems[C]//NOSSDAV'2007: Proceedings of the 17th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio & Video, New York, 2007.
- [11] Qiu T, Ge Z, Lee S, et al. Modeling user activities in a large IPTV system[C]//IMC'09: Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement Conference, New York, NY, USA, 2009: 430-441.
- [12] 姜志宏, 王晖, 樊鹏翼, 等. 一个P2P IPTV多协议爬行器——TVCrawler[J]. 计算机应用, 2010, 30(3): 715-718.
- [13] 姜志宏, 王晖, 樊鹏翼. 基于爬行器的大规模P2P IPTV测量研究[J]. 软件学报, 2011, 22(6): 1373-1388.
- [14] Vu L, Gupta I, Liang J, et al. Measurement and modeling of a large-scale overlay for multimedia streaming[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness Workshops, New York, 2007.