

P2P 网络流媒体关键技术

秦丰林, 刘 琚

(山东大学信息科学与工程学院, 山东济南 250100)

摘 要: P2P 网络流媒体技术一直是学术界和产业界的研究热点. 本文围绕覆盖网络拓扑结构, 对现有的 P2P 流媒体系统作了全面的归类总结, 深入介绍和分析了覆盖网络构建、数据块调度策略等 P2P 流媒体核心技术, 并概要讨论视频编码、网络编码、覆盖网络拓扑优化、安全与激励机制等 P2P 流媒体相关增强技术. 对典型 P2P 流媒体系统的性能进行了比较, 指出了 P2P 流媒体技术研究面临的问题和挑战, 并对将来的研究方向作了展望.

关键词: P2P 网络; 流媒体; P2P 视频直播; P2P 视频点播

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 04-0919-09

Key Technologies in P2P Media Streaming

QIN Feng-lin, LIU Ju

(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract: Over the past decade, Peer-to-Peer (P2P) media streaming technology, as a promising solution for large-scale media streaming, has always been of a great research interest for both the academia and industrial communities, and a great variety of P2P streaming systems have been developed and widely deployed on the Internet. In this paper, we present a comprehensive and in-depth survey of existing typical P2P streaming systems, in which the core technologies, including overlay network construction and data scheduling mechanism, are detailed introduced and analyzed. We also briefly discuss the enhancement technologies such as video coding, network coding, overlay network topology optimization, and security and incentive mechanisms. Performances of several typical P2P streaming systems are also compared. Finally, we point out the open issues and challenges in P2P streaming research and comment on possible future research directions.

Key words: peer-to-peer; media streaming; P2P live streaming; P2P video-on-demand

1 引言

随着宽带互联网的普及和多媒体技术的发展, 向大规模用户提供流媒体服务已经成为互联网, 特别是下一代互联网的“杀手级”应用之一^[1]. 大规模网络流媒体应用面临着可扩展性和服务质量两个关键需求. 由于客户机/服务器(C/S)结构存在可扩展性问题、IP 组播面临发展困境的制约、内容分发网络(CDN)受制于昂贵的投资和成本等原因, P2P 网络流媒体技术已经成为大规模互联网流媒体应用最流行的实现方案.

P2P 网络流媒体技术是指将 P2P 技术引入到网络流媒体领域, 充分利用普通主机节点的计算、带宽和存储等资源, 节点在从其它节点获取流媒体数据的同时, 也向其它节点传送数据. P2P 流媒体技术具有 IP 组播的优点, 而又无需改变现有的互联网结构, 易于实现和部署, 因此一直是学术界和产业界的研究热点. 近年来, 诸如 PPLive、PPStream、SopCast、UUSee 等 P2P 流媒体系统均

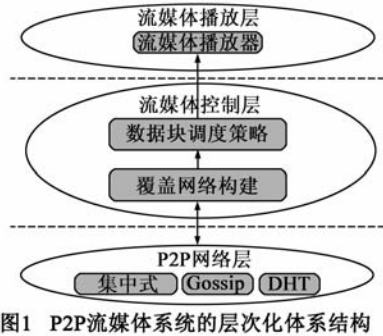
已在互联网上得到了大规模部署和应用, 2009 年, 中国国家网络电视台 CNTV 也基于 P2P 流媒体技术通过 CBox 客户端来提供大规模网络电视服务. 对 PPLive 的测量发现^[2], 2006 年初超过 20 万用户以 400 ~ 800Kbps 的速率同时收看 4 小时的春晚直播, 网络总聚合带宽达 100Gbps, 而据报道 2006 年底整个 Akamai 网络的总聚合带宽仅为 300Gbps 左右, 这进一步表明 P2P 流媒体技术所取得的巨大成功.

P2P 流媒体技术为解决当前大规模网络流媒体应用中的问题带来了新的机遇, 同时也带来了新的问题和挑战: 一方面, P2P 网络节点具有自治性、动态性和异构性的特点; 另一方面, 流媒体具有严格的顺序性和实时性要求, 节点需要在播放截止时间之前获得所需的流媒体数据. 因此, P2P 流媒体技术需要解决两个核心问题:

(1) 覆盖网络构建: 即节点按照何种拓扑结构来构建覆盖网络, 在提高可扩展性的同时, 减轻节点动态性、异构性所带来的影响;

(2)数据块调度策略:即节点如何选择所需的流媒体数据块,并采用何种传输方式获得该数据块.

图1显示了这两个核心问题在P2P流媒体系统的层次化体系结构中所处的位置,本文以典型的P2P流媒体系统为例,对它们作详细地介绍与分析,并概要讨论视频编码、网络编码、覆盖拓扑优化以及安全与激励机制等P2P流媒体增强技术,对典型P2P流媒体系统的性能进行了比较,并针对P2P流媒体应用面临的问题和挑战展望了今后的研究方向.



2 覆盖网络构建

P2P流媒体系统中观看同一视频流的节点及其相互之间的连接关系构成一个逻辑意义上的覆盖网络. 现有的P2P流媒体覆盖网络拓扑可分为单树结构、多

树结构、网状结构和混合结构四类,如图2所示.按照覆盖网络拓扑结构,表1对近十年来文献中的典型P2P流媒体系统/协议,包括P2P视频直播和P2P视频点播,作了全面的归类总结.可以看出,2003年以前研究者大多关注基于树形结构的应用层组播P2P流媒体系统,而2004年至今,网状结构P2P流媒体系统一直是学术界和产业界的研究重点,特别的,P2P视频点播系统的研究自2003年以后也逐渐发展起来.

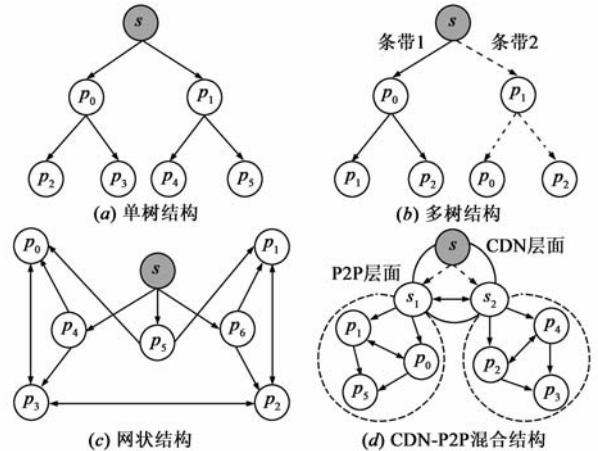


图2 P2P流媒体覆盖网络结构(s 表示源节点, p_0-p_6 表示普通节点, s_1-s_2 表示边缘服务器, 箭头表示数据流向)

表1 典型P2P流媒体系统/协议

时间	P2P 视频直播系统			P2P 视频点播系统	
	树形	网状	混合	树形	网状
2000	ESM ^[3]				
2001	ALMI ^[4] , CAN-Multicast ^[5]				
2002	CoopNet ^[6] , PeerCast ^[7] , NICE ^[8]				
2003	ZigZag ^[9] , SplitStream ^[10]			P2Cast ^[12]	PALS ^[13] , Promise ^[14]
2004		DONet ^[11]	CDN-P2P ^[15]	oStream ^[16] , P2Vod ^[17]	
2005		Anysee ^[18] , GridMedia ^[19]			
2006	Orchard ^[20]	Pulse ^[21] , SecureStream ^[22]	MP-CDN ^[23]	Ponder ^[24]	BitToS ^[25] , DagStream ^[26]
2007		PRIME ^[27] , NTUStreaming ^[28] , R2 ^[29]	TCMM ^[30] , mTreeBone ^[31]		LiveBT ^[32]
2008	TrustStream ^[33]	ContinuStreaming ^[34] , PALMS ^[35]			BitTube ^[36] , PPLive ^[37]
2009		GoalBit ^[38]			SonicVoD ^[39]
2010		Chameleon ^[40] , Contracts ^[41]			

2.1 单树结构

单树结构主要有集中式和分布式两种构建方法,根据控制拓扑和数据拓扑构建的先后顺序,分布式方法又细分为树优先、网优先和隐含方式三种方法^[42].

2.2.1 集中式算法

代表是ALMI^[4],由会话控制器集中管理系统中所有会话成员的位置关系和状态等信息,负责组播树的构建和维护,并周期性地计算和优化组播树结构.集中式算法具有较好的可靠性,易于保证组播树的效率和一致性,但由于存在全局控制节点,需要维护全局信息,存在单点故障和可扩展性问题.

2.1.2 分布式算法

(1)网优先 代表是ESM^[3],首先将组成员节点自组织成全连通的覆盖Mesh,每个节点需要维护其它所有组成员的信息,然后通过某种路由协议(如DVMRP)建立以源节点为根、涵盖所有节点的单独树.网优先算法通常显式地生成Mesh控制拓扑,而组播树的构建则依赖于该Mesh拓扑和选择的路由协议,因而组播树的性能和Mesh结构的选择直接相关.而且,节点的空间复杂度为 $O(N)$,可扩展性差,只适用于音视频会议等中小规模稀疏型组播应用.

(2)树优先 代表是PeerCast^[7],节点首先根据自身

的局部信息建立起一棵共享树,随后从网络中寻找非邻居节点,根据一定的算法建立并维护到这些节点的控制链路,使控制拓扑得以加强.与网优先结构不同,树优先结构中控制拓扑和组播树相分离,组播树不一定是 Mesh 的子集.树优先方式节点选择策略灵活,可以根据不同的应用需求来进行延迟或带宽的最优化,组播树更易于控制,但可能存在环路问题,检测和避免比较困难.

(3) 隐含方式 隐含方式中控制拓扑和数据拓扑的构建不存在严格的先后顺序,根据控制拓扑的生成方式,隐含方式又分为层次型和 P2P 路由型两种类型.层次型的代表是 NICE^[8]和 ZigZag^[9],两者均使用了分层与分簇的层次型结构作为控制拓扑,但其数据传输机制不同,NICE 中簇头同时负责节点管理和数据传输,ZigZag 则在簇中又选举一个副簇头,簇头用于节点管理,副簇头负责数据分发,实现了节点管理和数据传输的分离,具有更高的效率和性能.P2P 路由型的代表是 CAN-Multicast^[9],CAN-Multicast 是对 CAN 协议的扩展,不需要建立组播树,而是将每个会话组织为 CAN 子网络,组播报文通过洪泛的方法向邻居节点发送,可以减少节点维护的状态信息,提高数据传输的可靠性,但会产生大量冗余报文,造成网络带宽的浪费.

2.2 多树结构

代表是 CoopNet^[6]和 SplitStream^[10],两者的设计思想基本相同,每个节点参与到多棵组播树的构建,需要在节点之间同时维护多棵组播树,源节点使用多描述编码(MDC)将媒体文件编码成 N 个子媒体流(称为条带),每个条带沿其中一棵组播树传播,节点只需要接收到 N 个条带中的任意 M ($M \leq N$) 个就可完成解码.但两者组播树的构建方式有所区别,CoopNet 依赖于一个集中式服务器来构建组播树,SplitStream 则基于 Pastry 协议来实现组播树的构建,而且要求每个节点只在其中一棵组播树中作为中间节点负责数据转发,而在其它树中则只作为叶子节点接收数据.多树结构中节点可以从多个父节点接收数据,增强了系统的可靠性,并提高了节点带宽的利用率;但由于节点需要同时维护多棵组播树,控制开销较大,而且在多路同时传送机制下,条带数据的同步是一个难点.此外,MDC 编码效率比较低,对网络带宽的消耗比较大.

2.3 网状结构

代表是 DONet/CoolStreaming^[11]和 GridMedia^[19]等.为适应大规模网络流媒体应用上万级的节点管理需求,网状结构大多采用了集中式与 Gossip 协议相结合的覆盖网络构建策略.节点首先连接到一个集中式的节点列表服务器(称为 Tracker),从 Tracker 获得一个初始

节点列表并加入到覆盖网络,随后通过 Gossip 协议与邻居节点周期性地交换并更新成员节点信息.节点需要建立和维护一个成员节点列表,并根据某种节点选择策略从中选择若干个节点作为邻居节点,实现构建一个网状的无结构覆盖网络.数据转发也不再是沿着某个特定的方向,而是由数据的可用性来动态确定,节点根据数据的可用性信息从一个或多个邻居节点中获取自己缓存中缺失的数据,同时也将自己拥有的数据向需要的邻居节点发送.因此,网状结构能够很好地适应节点的动态性,具有高可扩展性、高效率、高健壮性且易于实现的优点.

网状结构中节点主要包含三个核心模块:(1)成员管理模块,负责获得网络中部分节点的信息,建立和维护成员节点列表;(2)邻居管理模块,负责建立和维护与其它节点的合作信息,定期从成员节点列表中选择一些更优的节点(拥有更高的带宽或更多的可用数据块)建立邻居关系,以提高系统效率和鲁棒性;(3)数据块调度模块,根据邻居节点的缓存映像(BM, Buffer Map)信息,用启发式调度算法来请求获得相应的数据块.

2.4 混合结构

2.4.1 树形网状混合结构

树形结构与网状结构具有各自的优缺点,故设计树形网状混合结构是很有效的改进策略,如 mTreeBone^[31]和 TCMM^[30]等.mTreeBone 的主要思想是首先将节点分为稳定和非稳定两类,将稳定节点组织成以源节点为根的骨干组播树,非稳定节点则附着在该骨干树上,然后再构建一个辅助性的 Mesh 网络,以提高系统可靠性,因此其关键问题是如何区分稳定节点和非稳定节点.TCMM 则将控制拓扑组织成树形结构来实现覆盖网络和底层物理网络的匹配,而数据则通过网状拓扑进行转发,保证了数据转发的高效性和可靠性.

2.4.2 CDN-P2P 混合结构

P2P 和 CDN 技术具有较强的技术互补性,因此设计 CDN-P2P 混合结构可结合两者的优势,是解决当前大规模网络流媒体应用所面临问题的有效途径.目前将两者相结合的研究工作尚处于初步阶段,已有的研究主要侧重于两种方式:一种是 CDN 叠加 P2P 的方式,如 PM-CDN^[23]将 P2P 技术引入到 CDN 骨干网络,使边缘服务器之间互相交换副本,以提高副本分发的效率;另一种是 CDN 支撑 P2P 的方式,如 CDN-P2P^[15]使 CDN 边缘网络节点既可从边缘服务器获得数据,也可使用 P2P 方式在节点之间相互提供数据上传服务;BitTube^[36]是一种基于 Web 的兼容 BitTorrent 的 P2P 视频点播系统,实现了 C/S 结构和 P2P 流媒体技术的无缝切换,可为 Youtube 等新兴视频网站提供视频发布加速服务.

3 数据块调度策略

3.1 数据块选择策略

数据块选择策略是指节点如何根据自身的局部信息来选择需要下载的数据块,相关研究分别提出了顺序策略、最少优先策略、最少紧急混合策略和锚点策略等.

3.1.1 顺序策略

顺序策略也称贪婪策略,是指节点优先选择距离当前播放时间最近的数据块进行下载,LiveBT^[32]、Ponder^[24]等采用了这一策略.顺序策略能提高流媒体播放的连续性,但会使各数据块副本的数量产生严重的偏态分布问题,如视频流靠近开始时的数据块副本很多而临近结束时的数据块副本很少,这使得节点在获取临近结束时的数据块时存在瓶颈,而且观看不同进度的两个节点很难互相为对方提供数据上传服务.

3.1.2 最少优先策略

最少优先策略是指节点首先统计各数据块拥有者的数量,然后优先选择拥有者数量最少的数据块进行下载,对于拥有者数量较多的数据块,则从带宽最高且距播放截止时间具有较长时间的节点来获取,DO.Net、Pulse^[21]等采用了这一策略.最少优先策略可提高系统的可扩展性,但会取得与顺序策略相反的效果,即节点一般会优先请求临近播放结束的数据块而忽略接近播放截止时间的数据块,在一定程度上会影响流媒体播放的连续性.

3.1.3 最少紧急混合策略

最少优先策略将拥有者数量最少的数据块的优先级设置为最高,忽视了邻近播放截止时间的数据块(称为紧急数据块),在一定程度上会影响流媒体播放的连续性.为此,提出了一种改进的最少紧急混合策略,如文献[43]提出一种有偏随机选择策略,为紧急数据块分配较高的优先级,文献[44]则将数据块的优先级用最少优先级 $P_R(*)$ 和紧急优先级 $P_E(*)$ 的加权和来表示.BitToS^[25]将缓存区分为高优先级和低优先级两部分,随着播放截止时间的临近,低优先级数据块会被提升到高优先级,而两个缓存区内部均采用最少优先策略.

3.1.4 锚点策略

P2P 视频点播系统中节点可能会执行快进、快退、跳转等 VCR 操作,增加了数据块选择的难度,为此文献[12]提出了一种锚点策略.锚点策略是在一个视频文件上定义若干个锚点,每个锚点用来表示一个播放时间段(如 10s),这些锚点以一定的时间间隔来覆盖整个视频文件.在节点要观看某一时间位置的视频时,如果该时间位置对应的数据块缺失,则可用距该时间最近的锚点上的数据块来代替.锚点策略虽然使 P2P 视频点播系统的 VCR 操作易于实现,但维护一些很少使用的

锚点会显著增加额外的维护开销.

3.2 数据块传输策略

数据传输策略是指如何在所构建的覆盖网络上实时传输流媒体数据.现有 P2P 流媒体系统主要基于四种数据传输策略:推策略、拉策略、推拉结合策略和混合结构数据块传输策略.

3.2.1 推策略

推策略是一种由源节点驱动的数据传输策略.树形结构 P2P 流媒体使用了这一策略,源节点作为树的根节点,将流媒体数据推送给其第一级子节点,第一级子节点接收到数据后继续向其下一级子节点推送,依此类推,直到最低一级子节点(叶子节点)接收到数据为止.树形结构中的子节点只从一个父节点接收数据(多树结构中节点也只从一个父节点接收一个条带),易受节点动态性的影响.为此,研究者提出了候选父节点^[17]、联合随机数据转发^[8]等辅助机制.另外,为支持树形结构 P2P 视频点播系统,研究者还提出了 Patch 流^[12]、缓存并转发^[16]等增强机制.

3.2.2 拉策略

拉策略是一种由接收节点驱动的数据传输策略.接收节点需要向邻居节点发出明确的数据下载请求,邻居节点根据接收到的下载请求后返回相应的数据,因此拉策略的关键在于发送节点的选择.文献[45]在分析 Promise 等现有节点选择策略不足的基础上,提出了一个多发送节点选择和最优速率及数据分配算法 MSR-DA,将多发送节点选择和发送速率分配问题建模成一个线性最优化问题,然后给出了求解该最优化问题的近似算法 MRA. MSRDA 算法根据到各发送节点链路的丢包率与链路的可用带宽比升序排序来选择多发送节点,实现发送速率和数据分配的最优化.

DO.Net/CoolStreaming 等网状结构 P2P 视频直播系统大多采用了基于数据驱动的拉策略,该策略取决于数据可用性信息、播放截止时间和节点可用带宽等参数,节点之间定期交换 BM 信息并统计各数据块的可用性信息,然后根据一定的数据块选择策略向相应的节点请求下载自身缺失的数据块.与推策略相比,拉策略可避免产生大量冗余数据,具有较高的带宽利用率,但节点之间需要交互 BM 信息和发送下载请求,不可避免地会增加控制开销,且数据传输延迟较高.

3.2.3 推拉结合策略

GridMedia^[19]采用了一种推拉结合的数据传输策略,节点通常只在有新节点加入或某个邻居节点退出后的下一个时间片内,使用拉策略向邻居节点请求下载数据,而在此后的时间片内则执行推策略:节点根据一定的规则(如对数据包序号作模运算后使用轮盘赌方法)向邻居节点分配数据.这样邻居节点在接收到新

数据包后,就可以根据定制的规则决定是否直接向该节点推送数据,而无需等待下载请求.文献[46]中提出了一种 Push-to-Peer 策略,将数据分发分为推阶段和拉阶段两个阶段;PRIME^[27]则把这两个阶段定义为扩散和聚群阶段.文献[47]与其它工作的不同之处在于其构建了一个基于前缀路由的结构化覆盖网络,并使用推拉结合策略来实现数据的尽快转发.推拉结合策略可以显著降低视频播放延迟,而且由于减少了冗余的 BM 消息和下载请求报文,控制开销也相应降低.正由于推拉结合策略具有明显的优势,新版本的 CoolStreaming^[63]也采用了该策略.

3.2.4 混合结构数据块传输策略

树形网状混合结构的数据传输需要实现推策略和拉策略的无缝切换.mTreeBone^[31]的实现方法是节点主要通过推策略从树形结构中的父节点来获取数据,而在期间由于树结构不稳定造成数据块丢失时,将丢失的数据块组织成网状-拉窗口,通过拉策略主动向邻居节点发送请求来获取数据,待树结构稳定后,再恢复使用推策略来获得数据.为避免产生数据冗余,网状-拉窗口一般位于树形-推指针之前,如图 3 所示.

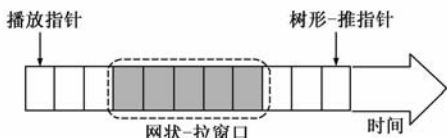


图3 推/拉策略切换缓存区设计^[31]

CDN-P2P^[15]混合结构的数据传输策略更为复杂,需要划分不同的时间段.在初始阶段,节点只能从 CDN 网络中获取流媒体数据,CDN 服务器同时记录访问节点的信息;对于后来的部分节点,CDN 服务器选择一部分节点为它们提供服务,这样就进入了 CDN-P2P 共存阶段(第 I 阶段);在第 II 阶段,CDN 服务器如果检测到 P2P 网络节点的聚合服务能力超出了流速率,则将后来的节点请求重导向到 P2P 网络中,完全由节点之间相互提供数据上传服务,此后 CDN 服务器只承担目录服务器的作用.因此,CDN-P2P 混合结构的数据传输策略需要解决的关键问题是如何确定切换时间 k_0 .

4 P2P 流媒体增强技术

4.1 视频编码技术

P2P 网络节点资源受限且具有明显的异构性,现有 P2P 流媒体系统大多采用 MDC 或分层编码等视频编码技术来解决这一问题.其中,CoopNet、SplitStream、PALMS^[35]等使用了 MDC 编码,PALS^[13]等使用了分层编码.NTUSstreaming^[28]提出了一种改进的 MDC-STHI 编码技术,使用空域和时域信息来进一步提高视频质量.对 MDC 编码和分层编码在 P2P 流媒体应用中各自的优缺

点,文献[48]作了详细的分析比较.另外,对由于节点的动态性而产生的包丢失或错误问题,SplitStream 和 Promise^[14]等提出采用前向纠错编码来减轻这种影响.

4.2 网络编码技术

网络编码也被称为网络信息流理论,其革命性的意义在于指出网络信息流可以被压缩,从而进一步提升网络吞吐量.文献[49]在 P2P 视频直播系统中提出了分层网络编码的概念,使用线性网络编码对不同优先级的数据块分别进行网络编码,以保证紧急且重要的数据快被优先解码.R2^[29]提出了一种基于随机网络编码的随机推策略,相比传统的拉策略在视频播放质量、降低服务器负载和增强对节点动态性的适应能力等方面均有明显的提高.Chameleon^[40]将网络编码与可伸缩视频编码相结合,提出了播放质量自适应、节点选择自适应等改进策略,可以适应网络环境的动态变化,具有稳定的播放质量.与上面工作侧重于协议设计不同,Feng 等人^[85]对基于网络编码的 P2P 流媒体系统作了建模研究,着重分析了瞬间拥塞和节点高动态场景下的播放连续度、启动延时及服务器带宽等系统性能参数,结果表明网络编码可使 P2P 流媒体系统在实际应用环境下取得近似最优的性能.对于 P2P 视频点播,文献[51]提出了一种播放截止时间感知的网络编码数据调度算法,使用编码窗的概念以缩短数据获取时间并减轻服务器压力,R2 将编码窗称为密度^[29],编码窗优化是网络编码研究的一个重要问题.SonicVoD^[39]将线性网络编码应用到基于推策略的网状结构 P2P 视频点播系统,对视频片段和段信息文件分别进行网络编码后传输,其中段信息文件用于支持 VCR 操作.

4.3 覆盖网络拓扑优化

P2P 流媒体应用会产生大量跨 ISP 流量,过度占用骨干网络带宽资源,这主要是由 P2P 流媒体覆盖网络与底层物理网络不匹配造成的.因此,优化覆盖网络拓扑使大多数邻居节点选择在同一 ISP 内部,可以减少跨 ISP 流量,同时也能降低节点间延迟,提高流媒体播放质量.研究者已经提出多种基于网络感知的覆盖网络拓扑优化方法,如 Promise 的拓扑感知算法^[14]、DagStream 的基于有向无环图的本地感知算法^[26]、Any-See 的位置感知拓扑匹配算法^[18]、基于网络断层扫描的层次化网络拓扑推断技术^[52]等.另一种覆盖网络拓扑优化方法是 P2P 流媒体系统与 ISP 开展合作,由 ISP 提供“Oracle”服务指导 P2P 流媒体系统的节点选择,目前正在开展的工作有 P4P^[53]等.

4.4 安全与激励机制

随着 P2P 流媒体应用的日益普及,安全问题逐渐成为影响其发展的重要要素.文献[22]指出 P2P 流媒体

系统面临覆盖网络攻击、DDoS 攻击、忽略攻击和污染攻击等威胁,并基于 Flyfires 环形拓扑结构提出了 Secure-Stream 安全 P2P 流媒体协议.文献[54]对 PPLive 的某个频道进行了污染攻击实验,结果发现攻击开始后用户数量很快从 3000 降低至 1000 以下,说明现有 P2P 流媒体系统并未采取任何污染攻击防御机制,为此作者提出应用三种策略:黑名单、数据块 HASH 验证和数据块签名来增强 P2P 流媒体系统的安全性.

P2P 网络节点具有自治、理性的特点,由此产生了严重的搭便车 (Free-riding) 问题,激励机制是促进节点间进行合作的有效途径. Su 等人^[55]对 P2P 流媒体系统的激励机制作了综述性介绍,主要有基于博弈论、信任和信誉机制以及市场理论的激励机制等. Orchard^[20]将 MDC 编码与 BitTorrent 的 Tit-for-Tat (TFT) 激励机制相结合,在组播树建立时节点之间需要首先交换条带,这样节点接收的条带数就不会超过其转发的条带数,可以有效地避免搭便车问题. PALMS^[35]采用了一种基于排名的节点选择策略,对节点作出的贡献打分并进行百分比排名,通过实现差分服务来激励节点进行合作. Contracts^[41]设计了一个适用于 PPLive 的激励机制,通过为全局有效贡献高的节点提供更高的可靠性来促使节点进行合作.

5 系统建模、比较和测量

在系统建模研究方面, Kumar 等人^[56]使用随机流体模型研究了节点带宽等参数对系统性能的影响; Zhou 等人^[57]使用概率模型比较了顺序策略、最少优先策略及混合选择策略等不同数据块选择策略对系统性能的影响; Liu 等人^[58]分析了不同节点选择策略下最小服务器带宽、最大流速率和最小树深度等系统性能的边界; Yue 等人^[59]使用广义流体模型对 P2P 视频点播系统的性能作了建模分析.

P2P 流媒体系统的比较主要在同一类型和不同类型之间进行. 在同一类型比较方面, Banerjee 等人^[42]对各种应用层组播流媒体系统作了综合比较, Agarwal 等人^[60]在一个受控网络测试平台上对三种商用 P2P 流媒体系统性能作了测量比较, Silverston 等人^[61]在 2006 世界杯期间对四种商用 P2P 流媒体系统作了对比性测量研究. 在不同类型比较方面, Zhang 等人^[11]基于 Planet-Lab 平台对树形结构和网状结构 P2P 流媒体系统的播放启动延迟、播放连续度等性能指标作了实验比较, Silverston 等人^[62]则通过仿真实验的方法比较了树形结构与网状结构流媒体系统的性能.

P2P 流媒体系统的测量是近年来一个研究热点,现有工作主要包括对 P2P 视频直播系统如 PPLive^[2]、Cool-Streaming^[63]、SopCast^[64]的测量,以及对 P2P 视频点播系

统如 PPLive^[37]、PfsVod^[65]、Joost^[66]的测量等. 研究者对 P2P 流媒体系统的一些具体特征,如覆盖网络拓扑^[67]、流量特征^[68]等也作了测量分析. 表 2 对部分典型 P2P 流媒体系统性能的测量结果作了比较.

表 2 典型 P2P 流媒体系统的性能比较

	缓冲区长度	播放延时	启动延时
DONet ^[11]	2min	1min	1min
SopCast ^[64]	1min	1min	1 ~ 5min
PPLive ^[2]	2min	1min	20s ~ 2min
AnySee ^[18]	40s	20 ~ 30s	20s

6 研究展望

理论分析和实际应用均表明 P2P 流媒体技术是一种高效的、可扩展的大规模网络流媒体应用的实现方案,但其仍然面临着许多开放性问题与挑战:

(1) 服务质量问题:表现在平均启动延迟过长, P2P 视频直播一般在 20s ~ 1min 之间,而 P2P 视频点播甚至达到 2 ~ 3min;支持的视频质量不高,流速率一般在 300 ~ 800Kbps 之间,而且视频播放质量不稳定,频繁出现停顿、跳帧等现象;特别是 P2P 视频点播对 VCR 操作支持严重不足;

(2) 管理和安全问题: P2P 流媒体应用仍处于无序发展的状态,缺乏有效的流量管理、内容管理和计费管理手段,且安全问题有逐渐增多的趋势,这对 P2P 流媒体应用的健康发展具有严重影响;

(3) 数字版权管理 (DRM) 问题: P2P 流媒体系统中存在大量盗版内容,缺乏与内容提供商的深层次合作,存在数字版权诉讼的风险;

(4) 新型网络应用问题:随着移动互联网的快步发展,移动 P2P 流媒体技术逐渐成为一个研究热点. 无线移动网络节点的带宽资源更低,动态性更高,且节点能量受到一定的限制. 测量研究表明 OctoShape、SopCast、TVAnts 等现有 P2P 流媒体系统均不适用于无线移动网络环境^[69],因此,移动 P2P 流媒体技术研究面临着新的机遇和挑战.

可见,虽然相关研究已经为现有 P2P 流媒体系统提供了良好的技术支持,但是很难克服上述问题和挑战,需要从理论技术、体系结构和新型网络应用等层面继续开展广泛而又深入的研究:

(1) 在理论技术层面,需要继续加强系统建模与理论分析研究工作,明确影响系统性能的关键参数,增强对 P2P 流媒体系统客观规律的认识,并为相关研究奠定良好的理论基础. 进一步深化覆盖拓扑构造、数据块调度策略等核心技术的研究,提高系统的服务质量水平;对于 P2P 视频点播系统,需要进一步与网络编码技术相结合,以更高效地为 VCR 操作提供支持. 针对日益突出的安全和搭便车问题,需要设计有效的安全机制,

并提出适用于 P2P 流媒体系统的激励机制,促进节点间的有效合作,提升系统的整体服务能力;

(2)在体系结构层面,需要继续发展和创新 P2P 流媒体系统的体系架构,以实现可信、可管、可控的 P2P 流媒体应用的最终目的. TrustStream^[33]基于分层编码和安全应用层组播技术提出了流媒体加密、密钥分发与 DRM 的体系架构,在安全性、DRM 等方面作出了一定的突破. IETF 的 PPSP 工作组^[70]正致力于推动制定开放、标准的 P2P 流媒体协议,以实现 P2P 流媒体应用的标准化架构,有利于 P2P 流媒体流量的管理和控制,得到了 GoalBit^[38]等 P2P 流媒体系统的积极参与. 欧盟第七框架构架计划项目 P2P-Next^[71]正在研究新一代完全去中心化无服务器的 P2P 流媒体系统架构,并将制定在互联网上传送电视节目到计算机和电视机顶盒的新标准,以实现新一代 IPTV 技术的突破性进展;

(3)在新型网络应用层面,需要继续加强移动 P2P 流媒体技术的理论研究,提高在移动互联网等新型网络环境下 P2P 流媒体应用的服务质量,促进移动 P2P 流媒体技术的发展和实际应用. 目前移动 P2P 流媒体技术的相关研究正处于起步阶段, Pelotalo 等人^[72]提出了一个基于 RTSP 协议的移动 P2P 流媒体系统,将移动节点组织成基于分层的可扩展覆盖网络,并使用子 RTP 流来提高数据调度效率,适用于低带宽、低分辨率的无线移动网络环境.

参考文献

- [1] 杨戈, 廖建新, 朱晓民, 等. 流媒体分发系统关键技术综述 [J]. 电子学报, 2009, 37(1): 137 - 145.
Yang Ge, Liao Jianxin, Zhu Xiaomin, et al. Survey of key technologies of the distribution system for streaming media [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(1): 137 - 145. (in Chinese)
- [2] Hei X J, 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.
- [3] Chu Y H, Rao S G, Zhang H. A case for end system multicast [A]. Proceedings of ACM SIGMETRICS [C]. Santa Clara: ACM, 2000. 1 - 12.
- [4] Pendarakis D, Shi S, Verma D, et al. ALMI: an application level multicast infrastructure [A]. Proceedings of USNIX Symposium on Internet Technologies and Systems [C]. San Francisco: USITS, 2001. 49 - 60.
- [5] Rtnasamy S, Handley M, Karp R, et al. Application-level multicast using content-addressable networks [A]. Proceedings of International Workshop on Networked Group Communication [C]. London: NGC, 2001. 14 - 29.
- [6] Padmanabhan V N, Wang H J, Chou P A. Distributing streaming media content using cooperative networking [A]. Proceedings of ACM NOSSDAV [C]. Miami: ACM, 2002. 177 - 186.
- [7] Bawa M, et al. Transience of peers & streaming media [R]. Technical Report, Stanford University, 2002.
- [8] Banerjee S, Bhattacharjee B, Kommareddy C. Scalable application layer multicast [A]. Proceedings of ACM SIGCOMM [C]. Pittsburgh: ACM, 2002. 205 - 217.
- [9] Tran D A, Hua K A, Do T T. ZigZag: an efficient peer-to-peer scheme for media streaming [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM [C]. San Francisco: IEEE, 2003. 1283 - 1293.
- [10] Castro M, Druschel P, Kermarrec A M, et al. SplitStream: high-bandwidth content distribution in cooperative environments [A]. Proceedings of International Workshop on Peer-to-Peer Systems [C]. Berkeley: IPTPS, 2003. 292 - 303.
- [11] Zhang X, Liu J, Li B, et al. DONet/CoolStreaming: a data-driven overlay network for live media streaming [R]. Technical Report, 2004.
- [12] Guo Y, Suh H, et al. P2Cast: P2P patching scheme for VoD service [A]. Proceedings of International Conference on World Wide Web [C]. Budapest: WWW, 2003. 301 - 309.
- [13] Rejaie R, Ortega A. PALS: peer-to-peer adaptive layered streaming [A]. Proceedings of NOSSDAV [C]. Monterey: ACM, 2003. 153 - 161.
- [14] Heefeda M, Habib A, Botev B, et al. Promise: peer-to-peer media streaming using collectcast [R]. Technical Report, Purdue University, 2003.
- [15] Xu D Y, Kulkarni S S, Rosenberg C, et al. A CDN-P2P hybrid architecture for cost-effective streaming media distribution [J]. Computer Networks, 2004, (44): 353 - 382.
- [16] Cui Y, et al. Ostream: asynchronous streaming multicast in application-layer overlay networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(1): 91 - 106.
- [17] Do T T, Hua K A, Tantaoui M. P2VoD: providing fault tolerant video-on-demand streaming in peer-to-peer environment [A]. Proceedings of International Conference on Communications [C]. Paris: ICC, 2004. 1467 - 1472.
- [18] Jin H, Zhang C, Deng D F, et al. Anysee: multicast-based peer-to-peer media streaming service system [A]. Proceedings of Asia-Pacific Conference on Communication [C]. Perth: APCC, 2005. 274 - 278.
- [19] Zhang M, Zhao L, Tang J, Yang S. Large-scale live media streaming over peer-to-peer networks through global Internet [A]. Proceedings of ACM International Workshop on Advances in Peer-to-Peer Multimedia Streaming [C]. Hilton: P2PMMS, 2005. 21 - 28.
- [20] Mol J D, Epema D J, Sips H J. The orchard algorithm: P2P multicasting without free-riding [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing [C]. Cambridge: P2P, 2006. 275 - 282.
- [21] Pianese F, Keller J, Biersack E W. Pulse: a flexible P2P live

- streaming system [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM [C]. Barcelona, 2006. 1 – 6.
- [22] Haridasan M, Renesse V R. Defense against intrusion in a live streaming multicast system [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing [C]. Cambridge: P2P, 2006. 185 – 192.
- [23] Zhang G M, Xing C Y, Chen M. A distributed multimedia CDN model with P2P architecture [A]. Proceedings of International Symposium on Communications and Information Technologies [C]. Bangkok: ISCIT, 2006. 152 – 156.
- [24] Guo Y, Mathur S, Ramaswamy K, et al. Ponder: providing commercial-quality video-on-demand service using peer-to-peer network [R]. Technical Report, Thomson Inc., 2006.
- [25] Vlavianos A, Iliofotou M, Faloutsos M. BiToS: enhancing BitTorrent for supporting streaming applications [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM [C]. Barcelona, 2006. 1 – 6.
- [26] Liang J, Nahrstedt K. DagStream: locality aware and failure resilient peer-to-peer streaming [A]. Proceedings of SPIE Multimedia Computing and Networking [C]. 2006. 1 – 15.
- [27] Nazanin M, Reza R. PRIME: peer-to-peer receiver-driven mesh-based streaming [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM [C]. Anchorage: IEEE, 2007. 1415 – 1423.
- [28] Lu M T, Wu J C, Peng K J, et al. Design and evaluation of a P2P IPTV system for heterogeneous networks [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2007, 9(8): 1568 – 1579.
- [29] Wang M, Li B. R2: random push with random network coding in live peer-to-peer streaming [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(9): 1655 – 1666.
- [30] Jin H, Tu X, Zhang C, et al. TCMM: hybrid overlay strategy for P2P live streaming services [A]. Proceedings of International Conference on Advances in Grid and Pervasive Computing [C]. Paris: GPC, 2007. 52 – 63.
- [31] Wang F, Xiong Y, Liu J. mTreeBone: a hybrid tree/mesh overlay for application-layer live video multicast [A]. Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems [C]. Toronto: ICDCS, 2007.
- [32] Lv J M, Cheng X Q, Jiang Q, et al. LiveBT: providing video-on-demand streaming service over BitTorrent systems [A]. Proceedings of International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies [C]. Adelaide: PDCAT, 2007. 501 – 508.
- [33] Yin H, Lin C, Zhang Q, et al. TrustStream: a secure and scalable architecture for large-scale Internet media streaming [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2008, 8(12): 1692 – 1702.
- [34] Li Z, Cao J, Chen G. ContinuumStreaming: achieving high playback continuity of gossip-based peer-to-peer streaming [A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing [C]. Miami: IPDPS, 2008.
- [35] Hoong P K, Matsuo H. Push-pull incentive-based P2P live media streaming system [J]. Wseas Transactions on Communications, 2008, 7(2): 33 – 42.
- [36] Liu B, Cui Y, Chang B, et al. BitTube: case study of a web-based peer-assisted video-on-demand system [A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Multimedia [C]. Berkeley: ISM, 2008. 242 – 249.
- [37] Huang Y, Fu Z, Chiu D-M, et al. Challenges, design and analysis of a large-scale P2P VoD system [A]. Proceedings of SIGCOMM [C]. Seattle: ACM, 2008. 375 – 388.
- [38] Bertinat M, Vera D, Padula D, et al. GoalBit: the first free and open source peer-to-peer streaming network [A]. Proceedings of International IFIP/ACM Latin American Conference on Networking [C]. Pelotas: ACM, 2009. 49 – 59.
- [39] Yu L J, Gao L, Zhao J, et al. SonicVoD: a VCR-supported P2P-VoD system with network coding [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(2): 576 – 582.
- [40] Nguyen A T, Li B, Eliassen F. Chameleon: adaptive peer-to-peer streaming with network coding [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM [C]. San Diego: IEEE, 2010. 1 – 9.
- [41] Piatek M, Krishnamurthy A, et al. Contracts: practical contribution incentives for P2P live streaming [A]. Proceedings of USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation [C]. San Jose: NSDI, 2010. 1 – 14.
- [42] Banerjee S, Bhattacharjee B. A comparative study of application layer multicast protocols [OL]. <http://www.cs.umd.edu/users/suman/pubs/compare.ps>, 2001.
- [43] Carlsson N, et al. Peer-assisted on-demand streaming of stored media using BitTorrent-like protocols [A]. Proceedings of IFIP/TC6 Networking [C]. Atlanta: Springer, 2007. 570 – 581.
- [44] Zhang M, Xiong Y, Zhang Q, et al. On the optimal scheduling for media streaming in data-driven overlay networks [A]. Proceedings of IEEE Global Communications Conference [C]. San Francisco: GlobalCom, 2006. 1 – 5.
- [45] 李泽平, 卢显良, 李梁. P2P 流媒体中的多发送端选择算法 [J]. 电子学报, 2010, 38(9): 1199 – 2204.
Li zeping, Lu xianliang, Li liang. Algorithm for multiple sender selection [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9): 1199 – 2204. (in Chinese)
- [46] Suh K, Varvello M, et al. Push-to-peer video-on-demand system: design and evaluation [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(10): 1706 – 1716.
- [47] Locher T, Meier R, Schmidt S, et al. Push-to-pull peer-to-peer live streaming [A]. Proceedings of International Symposium on Distributed Computing [C]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 388 – 402.
- [48] Shen Y, Liu Z, Panwar S, et al. Peer-driven video streaming: multiple descriptions versus layering [A]. IEEE International Conference on Multimedia and Expo [C]. Amsterdam:

- ICME, 2005. 1 – 13.
- [49] Nguyen K, Nguyen T, Cheung S. Peer-to-peer streaming with hierarchical network coding [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo [C]. Beijing: ICME, 2007. 396 – 399.
- [50] Feng C, Li B C. On large-scale peer-to-peer streaming systems with network coding [A]. Proceedings of ACM International Conference on Multimedia [C]. Vancouver: ACM, 2008. 269 – 278.
- [51] Chi H, Zhang Q. Deadline-aware network coding for video on demand service over P2P networks [J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2006, 7(5): 755 – 763.
- [52] 雍兴辉, 黄永峰. P2P 流媒体系统中层次化网络拓扑推断技术的研究 [J]. 电子学报, 2010, 38(1): 1 – 5.
Yong xinghui, Huang yongfeng. Network topology hierarchy inference on P2P media streaming systems [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(1): 1 – 5. (in Chinese)
- [53] Xie H Y, Yang Y, Krishnamurthy A, et al. P4P: provider portal for P2P applications [A]. Proceedings of SIGCOMM [C]. Seattle: ACM, 2008. 351 – 362.
- [54] Dhungel P, Hei X, Ross W K, et al. The pollution attack in P2P live video streaming: measurement results and defenses [A]. Proceedings of Workshop on Peer-to-Peer Streaming and IP-TV [C]. Kyoto: ACM, 2007. 323 – 328.
- [55] Su X, Dhaliwal S K. Incentive mechanisms in P2P media streaming systems [J]. IEEE Internet Computing, 2010, 14 (5): 74 – 81.
- [56] Kumar R, Liu Y, Ross K W. Stochastic fluid theory for P2P streaming systems [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM [C]. Anchorage: IEEE, 2007. 919 – 927.
- [57] Zhou Y, et al. A simple model for analyzing P2P streaming protocols [A]. Proceedings of International Conference on Network Protocols [C]. Beijing: ICNP, 2007. 226 – 235.
- [58] Liu S, Rui Z, Jiang W, et al. Performance bounds for peer-assisted live streaming [A]. Proceedings of ACM SIGMETRICS [C]. Annapolis: ACM, 2008. 313 – 324.
- [59] Yue L, Jan D M, et al. Analytical model for mesh-based P2PVoD [A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Multimedia [C]. Berkeley: ISM, 2008. 364 – 371.
- [60] Agarwal S, Singh J P, Mavlankar A, et al. Performance of P2P live video streaming systems on a controlled test-bed [A]. Proceedings of International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks & Communities [C]. Innsbruck: TridentCom, 2008. 1 – 10.
- [61] Silverston T, Fourmaux O. P2P IPTV measurement: a comparison study [R]. Technical Report, University Paris 6 C LIP6/NPA Laboratory, 2006.
- [62] Silverston T, Fourmaux O. Source vs data-driven approach for live P2P streaming [A]. Proceedings of International Conference on Networking, International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies (ICN/ICONS/MCL) [C]. Mauritius: IEEE, 2006. 99 – 99.
- [63] Li B, Qu Y, et al. Inside the new CoolStreaming: principles, measurements and performance implications [A]. Proceedings of INFOCOM [C]. Phoenix: IEEE, 2008. 1031 – 1039.
- [64] Sentinelli A, Marfia G, Gerla M, et al. Will IPTV ride the peer-to-peer stream? [J]. IEEE Communications Magazine, 2007, 45(6): 86 – 92.
- [65] Zheng Y, Chen C J, Li C X. Measurement, modeling and analysis of peer-to-peer VoD system [A]. Proceedings of International Conference on Communications and Mobile Computing [C]. Yunnan: CMC, 2009. 273 – 278.
- [66] Lei J, Shi L, Fu X M. An experimental analysis of Joost peer-to-peer VoD service [J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2010, 3(4): 351 – 362.
- [67] Wu C, Li B, Zhao S. Exploring large-scale peer-to-peer live streaming topologies [J]. ACM Transactions on Multimedia Computer Communication Applications, 2008, 4(3): 1 – 23.
- [68] Liu F, Li Z T. A measurement and modeling study of P2P IPTV applications [A]. Proceedings of International Conference on Computational Intelligence and Security [C]. Suzhou: CIS, 2008. 114 – 119.
- [69] Peltotalo J, Harju J, Jantunen A, et al. Peer-to-peer streaming technology survey [A]. Proceedings of International Conference on Networking [C]. Cancun: ICN, 2008. 342 – 350.
- [70] Peer to Peer Streaming Protocol (PPSP) [OL]. <http://data-tracker.ietf.org/wg/ppsp/charter/>. 2010.
- [71] P2P-Next [OL]. <http://www.p2p-next.org>. 2010.
- [72] Peltotalo J, Harju J, Vaatamoinen L, et al. RTSP-based mobile peer-to-peer streaming system [J]. International Journal of Digital Multimedia Broadcasting, 2010, 2010(2010): 1 – 15.

作者简介



秦丰林 男. 1978 年 10 月出生, 山东潍坊人. 2000 年和 2003 年分别获得山东工业大学工学学士和山东大学工学硕士学位, 现为山东大学信息科学与工程学院在读博士研究生, 主要研究方向是 P2P 网络与流媒体技术.
E-mail: qfl@sdu.edu.cn

刘璐 男. 1965 年 4 月出生, 山东临沂人. 教授, 博士生导师. 1986 年和 1989 年分别获得山东大学理学学士和理学硕士学位, 2000 年获得东南大学工学博士学位, 现为山东大学信息科学与工程学院学术委员会副主任、通信工程系主任, 主要研究方向包括: 盲信号处理理论与应用、多媒体通信与网络传输技术、无线通信中空时信号处理技术等. E-mail: juliu@sdu.edu.cn

