

应用网络编码的 P2P 流媒体技术研究进展

徐 进 李晓峰 傅志中 鲜海滢

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 611731)

摘 要 P2P 流媒体是一种极具潜力的流媒体内容分发技术。在 P2P 流媒体系统中采用网络编码,有利于进一步提升系统整体性能。针对目前流行的基于数据驱动覆盖网络的 P2P 流媒体系统框架,根据直播和点播这两种流媒体播送模式,深入讨论和分析了具有代表性的网络编码 P2P 流媒体技术方案的实现机制及其优缺点。最后,对该方向的研究趋势进行了展望。

关键词 P2P 流媒体,网络编码,直播,点播,DONet

中图分类号 TP393, TN919.8 **文献标识码** A

Recent Advances in P2P Streaming with Network Coding

XU Jin LI Xiao-feng FU Zhi-zhong XIAN Hai-ying

(School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract P2P streaming is a promising media content distribution technology. Network coding can be adopted into a P2P streaming system to further improve its overall performance. Focused on currently popular data-driven overlay network based P2P streaming system framework and based on two streaming modes, i. e., live streaming and on-demand streaming, the implementation mechanisms, merits and drawbacks of the typical P2P streaming schemes using network coding were discussed in detail. At last, the open issues of this research direction were presented.

Keywords P2P streaming, Network coding, Live streaming, On-demand streaming, DONet

1 引言

传统的流媒体系统通常采用客户/服务器(Client/Server, C/S)架构,系统可扩展性差,服务器常常成为系统的瓶颈。虽然采用 IP 组播技术或部署内容分发网络(Content Distribution Network, CDN)可以部分解决可扩展性问题,但是同时存在着其他方面的局限性,如 IP 组播技术并没有在 Internet 中得到广泛的支持,CDN 方案需要高昂的部署成本等。对等网络(peer-to-peer, P2P)技术的发展,为解决大规模流媒体内容分发提供了一种新的技术路线。基于 P2P 技术的流媒体系统(简称 P2P 流媒体系统),可以充分利用 peer 节点的计算、存储以及带宽等资源减轻服务器的负担,极大地提高了系统的可扩展性。同时, P2P 流媒体系统不需要架设特殊的网络基础设施,也不需要 IP 组播的支持,具有广泛的应用前景。P2P 流媒体系统的上述优点吸引了国内外众多高校、研究机构及公司等对此进行广泛的研究,取得了丰富的研究成果^[1-3],相继涌现出了以 CoolStreaming、PPLive、PP-Stream、GridMedia、UUSee 等为代表的一大批 P2P 流媒体系统,它们显示出了巨大的生命力。P2P 流媒体系统尽管取得了令人瞩目的发展,但是依然面临着许多需要解决的问题,如启动延迟偏长、播放质量不稳定、网络负载不均衡、数据调度

策略复杂、易受污染攻击等。因此,除了继续从理论分析和建模、优化设计、实验测试等多个方面对现有 P2P 流媒体系统进行研究外,还迫切需要引入新的理论、方法和技术来提升 P2P 流媒体系统的整体性能和服务质量。

在 P2P 流媒体技术兴起的同时,网络编码(Network Coding, NC)作为一种新型网络通信技术,也引起了人们广泛的关注。网络编码突破了传统网络通信模式中网络节点只能进行存储转发(store and forward)的限制,允许网络节点对接收到的多个数据包先进行编码处理再转发(coded and forward)。研究表明,网络编码在提高网络吞吐量、均衡网络负载、增强网络鲁棒性等诸多方面均显示出优越性^[4],可广泛应用于无线网络、P2P 内容分发、分布式存储和网络安全等领域。特别地,微软研究院 C. Gkantsidis 等^[5]利用网络编码设计了一个大规模 P2P 内容分发系统 Avalanche,取得了优于传统 P2P 内容分发系统(如 BitTorrent) 2~3 倍的下载速度,并且即使原始种子节点较早退出,其他节点也能顺利下载到完整的数据。受此鼓舞,国内外学者开始将网络编码技术应用到 P2P 流媒体系统中,试图利用网络编码的优势提升 P2P 流媒体系统的整体性能,目前已经取得了积极的研究成果。虽然国内学者较早涉足这个研究方向,经过持续不断的研究,取得了不错的研究成果,但是无论从广度还是深度上,

到稿日期:2011-04-06 返修日期:2011-07-04 本文受国家自然科学基金(61075013),中国博士后科学基金(20100471671)资助。

徐 进(1971-),男,博士,讲师,CCF 会员,主要研究方向为视频编码和通信、网络编码、P2P 流媒体等, E-mail: jinxu@uestc.edu.cn; 李晓峰(1963-),男,教授,主要研究方向为多媒体通信、无线通信系统等; 傅志中(1970-),男,博士,副教授,主要研究方向为多媒体通信、模式识别等; 鲜海滢(1974-),男,博士后,主要研究方向为多媒体通信、图像处理等。

和国外同行相比尚有不小差距。本文旨在跟踪、总结网络编码在 P2P 流媒体系统中应用这一国际热点课题的最新研究进展,希望国内更多的学者和工程技术人员了解到网络编码具有进一步提高 P2P 流媒体系统整体性能的巨大潜力。同时,期望本文可以抛砖引玉,促进国内学者对该研究课题目前尚存在着的问题提出创新见解,实现相关理论和技术突破,以期进一步推动网络编码技术在 P2P 流媒体系统中更广泛的应用。

2 研究背景

2.1 P2P 流媒体

P2P 流媒体系统按照其播送方式可分成直播和点播两种系统。目前 P2P 流媒体相关研究主要集中在直播系统上,这是因为在流媒体直播系统中用户交互性要求低、技术实现相对简单,而且众多用户观看同一节目内容时可以充分利用 P2P 技术的协作传输能力,这最能体现 P2P 技术的价值。相对于直播业务,点播业务交互性要求更高,需要对不同用户的异步 VCR(video cassette recoding)播放操作(如快进、快退以及随机搜索等)请求做出快速响应,再加上 P2P 网络的自组织性,使得实现高质量的 P2P 流媒体点播极具挑战性,其发展速度也相应比较缓慢。

一般而言,P2P 流媒体系统可以分为覆盖网络(overlay network)构建和流媒体调度两个部分。前者负责为每个 peer 节点选择其合适的邻居节点(亦称伙伴节点),从而形成一个覆盖网络拓扑;后者则负责在建立起来的覆盖网络上进行有效的流媒体传输。早期的 P2P 流媒体研究主要建立在应用层组播技术的基础上,采用了路径驱动的覆盖网络拓扑,首先需要构造可以覆盖全部节点的数据分发路径(这些路径可以具有单树^[6]/多树拓扑^[7],或更复杂的网-树 mesh-based tree 拓扑^[8]),然后沿着路径的方向以推送(push)的方式分发流媒体数据。这类系统的优点是可以在静态网络环境下实现高效、低延迟的流媒体分发,然而其缺点也很突出,如树状拓扑的叶子节点带宽资源得不到有效利用,网-树拓扑的构建过于复杂导致可扩展性极差,动态网络环境下服务质量不能保证以及覆盖网络维护成本过高等。这类系统由于自身的缺陷,目前已经基本上被淘汰。

目前主流的 P2P 流媒体系统是建立在由香港科技大学 Zhang Xinyan 等^[9]率先提出的数据驱动覆盖网络(Data-driven Overlay Network, DONet)之上。DONet 利用 gossip 协议构建连接度较高的无结构覆盖网络,节点之间不存在固定的父-子关系或上下游关系,节点之间的数据分发流向由每个节点的可用数据信息动态决定。每个节点和若干相邻节点动态地构成一组伙伴,相互之间周期性交换各自缓存的可用数据信息(每个节点用缓存映射 Buffer Map 表示其缓存状况),然后以拉取(pull)的方式获取所需的数据。由于 DONet 中每个节点无需依赖于某个特定的父节点获取缺失的数据,而是从随机选取的多个伙伴节点处并发获取,因此基于 DONet 框架实现 P2P 流媒体不但有利于提高系统的健壮性和扩展性,而且能充分利用网络带宽和具有良好的异构网络适应性,然而其付出的代价是具有较高的播放启动延迟。为了验证这种技术方案的有效性,他们同时开发了原型系统 CoolStreaming,在 PlantLab 网上进行的实验取得了成功,这标志着 P2P 流媒

体研究取得了突破性进展。目前绝大多数在互联网上部署的 P2P 流媒体系统(如 PPLive、PPStream 等)都是基于 DONet 框架实现的。

2.2 网络编码

网络编码最先由 R. Ahlswede 等在 2000 年提出。他们在经典文献^[10]中指出,如果允许组播网络中某些节点对接收到的信息进行编码转发,则可以使得组播网络的吞吐量达到理论上的最大流限。网络编码理论的划时代意义在于推翻了独立的比特不能再被压缩的经典结论,指出网络信息流可以被压缩,从而可进一步提升网络吞吐量。网络编码理论一经提出,便受到前所未有的关注。最初的研究大多集中在理论研究^[11,12],如构造各种逼近网络容量极限的网络编码方案,在理想的网络模型中分析其渐进性能等。早期的网络编码方案通常需要知道整个网络的拓扑信息,难以应用到实际的网络中。直到 2003 年,Ho 和 P. Chou 先后提出随机线性网络编码(Randomized Linear Network Coding, RLNC)及其实现技术——实用网络编码(Practical Network Coding, PNC)后,才为网络编码的实用化奠定了坚实的理论和技術基础。Ho 等^[13]提出的 RLNC 指出:对于除信宿以外的每个网络节点,在进行线性网络编码时,只要在一个足够大的有限域 $F(q)$ 中随机、独立、均匀地选择编码向量,就可以保证信宿能以极大的概率成功译码出原始数据。显然,RLNC 具有分布式特性,无需事先获知整个网络的拓扑信息,这为网络编码走向应用提供了坚实的理论基础。在 RLNC 的基础上,P. Chou 等^[14]进一步提出了一种可在实际网络中应用的网络编码方案 PNC。除了采用 RLNC 技术之外,它还采用了另外两项关键技术:(1) 采用分“代”(generation)(亦称为段 segment 或批 batch)的编码及缓存技术;(2) 利用数据包头部携带全局编码向量,在编码转发过程中,全局编码向量会不断被更新。PNC 不但可以有效消除网络的异步传输影响,而且易于分布式实现。PNC 的提出为网络编码实用化提供了关键性的技术支撑。随后,网络编码的研究重点逐渐由理论研究转向应用研究。特别地,由于目前 P2P 网络通常是由联网的计算机组成,因此具备充足的计算、存储以及带宽等资源,满足网络编码的应用条件,使得近年来 P2P 领域成为了网络编码应用研究的热点方向之一。

3 网络编码给 P2P 流媒体带来的机遇和挑战

网络编码可以给 P2P 流媒体系统带来显而易见的好处。首先,带宽不足是影响目前 P2P 流媒体系统性能的重要因素之一,而通过网络编码可以有效提高 P2P 流媒体系统的网络吞吐量,有利于保证流媒体流畅播放所需的高带宽。其次,每个网络编码生成的编码包含有多个原始数据包的信息,具有相同的重要性,只要 peer 节点收到某一“代”足够多的 innovative 数据包(即编码向量线性无关的编码包,源数据包也可以看作是具有特殊编码向量的编码包),就可以恢复出该“代”的所有原始数据包。这一特点不但有利于简化流媒体调度和均衡网络负载,而且可以弱化节点退出或失效对其他节点完整获取流媒体数据的影响,提高 P2P 流媒体系统的抗干扰能力,有利于获得稳定的播放质量,因而网络编码可以帮助解决甚至避免目前 P2P 流媒体系统遇到的若干问题,如带宽不足、播放质量不稳定、数据调度策略复杂、网络负载不均衡等。

然而,在 P2P 流媒体系统中引入网络编码,也会带来一些新问题。首先,网络编码会增加 P2P 流媒体数据分发的延迟,而 P2P 流媒体是一种实时性业务,具有严格的时延要求。网络编码使用较小的“代”,可以适当减小延迟,但又不能充分发挥其优势。因此,需要在编码效率和延迟之间找到较好的均衡点。其次,网络编码使得流媒体数据误码隐藏更困难。当接收节点无法完成网络解码时,会造成连续的原始视频数据丢失,难以实施有效的误码隐藏,将严重影响播放质量。此外,网络编码会使得 P2P 流媒体系统的安全性更难保证。例如,当 P2P 流媒体系统中有恶意节点注入伪造数据或篡改数据时,网络编码会使得系统更易受到污染攻击(pollution attack):网络编码将非法数据和合法数据结合在一起,并通过不断的编码转发加快数据污染的扩散速度,最终使得大部分节点无法解码,恢复合法的原始数据,严重影响系统性能。

因此,在 P2P 流媒体系统中应用网络编码,机遇和挑战并存。总的来说,机遇要多于挑战。

4 网络编码在 P2P 流媒体系统中的应用研究现状

近年来,国内外学者对应用网络编码的 P2P 流媒体(简称网络编码 P2P 流媒体)技术展开了积极深入的研究,取得了丰富的研究成果。针对早期基于路径驱动的 P2P 流媒体系统框架,学者们曾提出了相应的网络编码应用策略。代表性的研究成果有 J. Guo 等提出的 CodedStream 方案^[13]和 J. Zhao 等提出的 LION 方案^[16]。CodedStream 方案结合了多描述编码(Multiple Description Coding, MDC)和网络编码,它首先利用 MDC 从原始视频流生成 k 个互补而独立的子描述流,再借助中继节点在服务器节点与接收节点之间构造 k 冗余组播覆盖网络,传送经网络编码的子描述流,使得每个节点可以从 k 个不同路径接收到含有不同子描述流的编码数据包。该方案可以增强 P2P 流媒体直播的鲁棒性并获得较高的网络吞吐量,但是需要事先知道全局拓扑才能确定优化组播路由以及相应的网络编码方案,实用性不强。LION 方案则结合了分层编码和网络编码,它首先对原始视频流进行分层编码,然后采用和 Narada 协议^[17]一样的策略在节点间建立多层覆盖网络,源节点将每层视频数据推送到对应的覆盖网络上,每个节点根据其可用带宽加入不同数量的覆盖网络。而在每层覆盖网络中,每个节点对从多个上游节点接收到的同一分层数据包进行随机网络编码后再转发到多个下游节点。LION 方案在少量增加传输延迟与网络资源消耗的同时,可以明显提升异构网络中各节点的平均组播吞吐量,不足之处是对节点加入/退出比较敏感,仅适用于较小规模的静态覆盖网络。

由于目前基于路径驱动的 P2P 流媒体系统框架(亦称为基于应用层组播的 P2P 流媒体)日渐式微,本文不继续深入讨论网络编码在这类 P2P 流媒体系统中的应用。下面按直播和点播分类,重点讨论网络编码在目前流行的基于数据驱动覆盖网络的 P2P 流媒体系统中的应用研究现状。

4.1 P2P 流媒体直播

最初的研究集中于如何在目前流行的基于 pull 模式的 P2P 流媒体直播系统中有效应用网络编码。在以 CoolStreaming、PPLive 等为代表的基于 pull 模式的 P2P 流媒体直播系统中,节点间具有较复杂的关系(每个 peer 节点既可以作为

消费者从多个伙伴节点处获得所需数据,也可以作为供应者将其可用数据提供给多个伙伴节点),而节点间交换的数据又是各不相同的原始流媒体数据块,这使得需要设计较复杂的流媒体调度机制才能取得较好的性能。应用网络编码后,对属于同一段的编码包而言,其重要性是一样的,只要节点能从多个伙伴节点拉取到足够多的当前段编码包,就可以通过解码恢复出该段包含的所有原始流媒体数据。因此,通过网络编码,可以用粗粒度的流媒体调度(基于段)代替原来的细粒度流媒体调度(基于独立的原始数据包),从而大大简化 P2P 流媒体调度。刘亚杰等^[18]较早地在 DONet/CoolStreaming 系统框架的基础上提出了一种网络编码 P2P 流媒体直播方案。该方案首先以图像组(group of pictures, GOP)为单位对流媒体数据进行网络编码(每个 GOP 平分为 N 个数据包,网络编码仅局限于同一 GOP 的数据包之间进行),然后每个节点基于 round-robin 轮询调度的策略完成网络编码流媒体数据调度:它对播放缓存中含有的 GOP 按其播放先后顺序依次调度;对于每个 GOP,如果已缓存编码包对应的编码向量矩阵的秩 r 小于 N ,则根据邻居节点对应当前 GOP 的编码向量信息依次从邻居节点请求数据(如果和邻居节点联合组成的编码向量矩阵的秩大于 r ,则表示邻居节点有可用数据),直到其编码向量矩阵的秩达到 N 或邻居节点轮询完为止。为了获得稳定的播放质量,该方案还引入了邻居节点淘汰机制:每个节点定时统计其邻居节点的被请求次数,如果某个邻居节点的被请求次数小于某个阈值,它将被其他邻居节点所代替。仿真实验表明,该方案可以使得 peer 节点的流媒体播放质量得到普遍增强。M. Wang 等^[19,20]提出的 Lava 方案和上述方案的基本思想类似,但允许每个节点并发地从多个邻居节点获取播放缓存中缺失的多个编码段数据包,同时通过搭建试验床系统验证了网络编码对基于 pull 模式的 P2P 流媒体直播系统具有积极贡献。为了进行公平的性能对比,他们利用由 44 个双核 CPU 服务器组成的集群(Cluster)搭建了两种类型的 P2P 流媒体直播试验床系统:一种是采用常规 pull 模式的纯 P2P 流媒体直播系统(称为 Vanilla),和目前实际流行的 P2P 流媒体系统相仿;另一种则是在 Vanilla 基础上对每个节点添加了网络编码插件(plugin)实现的 P2P 网络编码流媒体直播系统(称为 Lava)。除了具备网络编码功能之外,Lava 其余部分与 Vanilla 完全相同,如具有一样的协议、配置参数及设计策略。通过对比试验,他们得出如下主要结论:其一是网络编码可以使流调度更加细粒度化,并能减少数据重复带来的带宽消耗;其二是网络编码使得 P2P 流媒体系统具有更好的动态网络适应性,各个节点缓存的数据包数量总能保持在一个稳定的水平上,能有效减少流媒体回放停顿的频度。他们特别指出,当网络带宽刚刚符合流媒体传输要求时,网络编码可能是获得稳定 P2P 流媒体直播质量的最有效手段。为了降低网络编码引入的复杂度和延迟,Lava 还对常规分代 RLNC 方案进行了改进,主要通过如下 3 个技术途径:产生稀疏编码矩阵,减少中间节点等待时间以及采用渐进式网络解码。武广柱等^[21]提出了一种自适应随机网络编码 P2P 流媒体分发方案 ARLNCStream,它根据节点的平均下载速度及其缓存流媒体数据量,动态调整编码窗口(Coding Windows, 亦即 NC 的“代”)的大小。对于那些下载速度较高并且具有足够多可供播放片段的节点,选择较大的编码窗口,反之,采

用较小的编码窗口。为了避免编码窗口大小过于分散,采用了自适应模 2 窗,即估算出窗口大小后,取离其最近的且为 2 倍数的整数作为实际的窗口大小。仿真结果表明,自适应编码窗口策略可以大大减轻服务器的负载压力,并使得系统具有较好的可扩展性。

虽然在数据驱动的无结构覆盖网络中进行基于 pull 模式的网络编码 P2P 流媒体调度具有易于实现、鲁棒性高、带宽利用率高等优点,但是其被动的请求/发送数据传输机制容易引入较大的播放延迟。相比较而言,另一种常用的调度方法——push 模式由于其内在的主动性,更有利于降低 P2P 流媒体的播放延迟。虽然早期的 P2P 流媒体系统曾采用过基于 push 模式的 P2P 流媒体分发机制,但其需要事先构建好流媒体分发的拓扑结构(如树状拓扑)。M. Wang 等^[22]首先提出了一种适合数据驱动覆盖网络的基于 push 模式的网络编码 P2P 流媒体直播方案 R^2 (Random push with Random network coding)。它同样通过在伙伴节点间交换各自的 Buffer Map,获知相互间的可用数据信息,那些已完整获得某一编码段的节点相对其邻居节点而言就成为种子节点,动态构成临时的供应者-消费者关系(或上下游关系)。对于某一个节点 n ,它可能存在多个种子节点,这些种子节点分别从节点 n 尚未完全接收的若干个数据段中随机选取一个进行编码推送。 R^2 方案要求种子节点在进行随机 push 时,优先考虑即将播放的数据段。 R^2 方案将播放缓存中位于当前播放点 t 秒后的区域定义为优先区域。如果下游节点尚未完全恢复优先区域的数据段,种子节点则随机均匀地从优先区域选择一个数据段进行编码推送;反之,则根据特定的概率分布函数从优先区域之后的数据段中随机选择一个数据段进行编码推送。通过上述方法,可以保证优先区域以及靠近优先区域的数据段能得到优先的解码回放。 R^2 方案需要解决的一个关键问题是:种子节点什么时候应该停止推送某一数据段?直观的办法是通过交换 Buffer Map 可以判断下游节点是否已经获得足够的该数据段,但利用这种办法需要更频繁地交换 Buffer Map 信息,产生更多的通信开销。如果不能及时获取伙伴节点的 Buffer Map 信息,种子节点会在下游节点完成解码后仍进行盲目的推送。另一种办法是下游节点收到当前段满秩数量的数据块时,主动向其种子节点返回停止发送的反馈信息,但在种子节点收到反馈信息之前,也会继续推送当前段的数据块。为了减少不必要的编码数据推送造成的带宽浪费,他们提出了一种针对随机 push 的预刹车策略:当下游节点即将接收到满秩数量的当前段编码数据块时,不同种子节点根据其其与下游节点间的可用带宽大小从低到高依次停止推送相关编码数据块。为了实现随机 push, R^2 方案要求每个节点具有较大的播放缓存容纳多个数据段。K.-H. Chan 等^[23]提出了另一种适应数据驱动覆盖网络的网络编码 P2P 流媒体直播方案 SPANC,旨在优化源节点到 peer 节点的传输延迟。和 R^2 方案相比,它不要求每个节点具有较大的播放缓存。它由两部分组成:子流(substream)推送以及基于网络编码的子流丢包修复。它首先利用数据包交织技术将原始流媒体数据分成多个子流,然后每个节点根据其多个上游节点(即种子节点)的可用带宽及拥有的数据段,优化每个上游节点的子流分配策略,将之转换成最大权二部图匹配求解问题,使得子流推送具有最小的调度延迟;在进行子流推送的过程中,每

个上游节点根据其到下游节点链路的丢包率并行推送一定数量的编码包,补偿推送过程丢失的子流数据包,保证下游节点能及时恢复出原始流媒体数据。该方案的局限性是网络自适应性不太好;当网络状态因节点扰动、带宽变化等因素发生显著变化时,需要相应调整其每个节点的调度策略。

R^2 是迄今为止在系统综合性能指标上表现较佳的一种代表性 P2P 网络编码流媒体直播方案,因此激发了其他学者在其基础上展开进一步的研究。结合 pull 模式的优点,王晖等^[24]对 R^2 进行了改进,提出了一种采用推拉结合数据调度策略的网络编码 P2P 流媒体方案 custom R^2 ,其主要思想是当 peer 节点某个数据段所需的编码数据块将要接收完成时,通知它的种子节点停止向它推送该数据段的编码数据块,转而向它的种子节点定制拉取剩下的编码数据块,从而可以有效减少冗余编码数据块的产生。受 R^2 的启发,X. Chen 等^[25]提出了一种实用化的网络编码 P2P 流媒体直播方案 Sonic-Stream,它除了采用 R^2 的主要机制保证节点的播放质量之外,还通过一种延迟感知的伙伴节点管理策略,优化 P2P 覆盖网络的构建,降低服务器到 peer 节点之间的直播延迟以及不同频道之间的切换延迟,提供了更佳的用户体验。此外,针对 R^2 方案基于纯随机网络拓扑进行编码推送时容易产生线性相关编码包的问题,陈伟涛等^[26]提出了一种基于 small-world 网络模型的拓扑构造优化技术,通过调节网络拓扑的随机性和疏密性,使之具有高集聚度和短链的特性,可以有效阻止下游节点收到线性相关编码包。

学者们还通过构建不同的模型,研究了网络编码对 P2P 流媒体直播系统的性能增益。C. Feng 等^[27]利用概率论和连续时间马尔可夫过程对 R^2 进行建模分析,验证了该方案有利于提高 P2P 流媒体直播多方面的性能,如播放启动延迟、播放连续性、动态网络适应性以及网络带宽的利用率等。Le Chang 等^[28]利用一种简单的分析模型,研究了 NC“代”大小、服务器容量以及节点编码主动性等 3 种参数对网络编码 P2P 流媒体系统性能的影响,其仿真结果是较小的“代”以及较大的服务器容量,有利于取得较好的系统性能,而节点编码主动性对系统性能的影响不大。Bernardini 等^[29]基于顺序统计理论建立了一种全局延迟模型,分析了网络编码 P2P 流媒体直播系统延迟抖动性能;假设 N 是当前节点的上游节点数量, K 是“代”的大小,当 N/K 保持恒定,当前节点恢复每一“代”原始数据的延迟抖动和 $1/\sqrt{N}$ 成正比关系,即较大的 N 有利于降低延迟抖动。

上述方案均是针对单层编码视频流进行网络编码 P2P 流媒体直播。为了更好地适应异构网络环境下 P2P 流媒体直播的要求,学者们相继研究了结合分层编码视频和网络编码的 P2P 传输技术。Kien Nguyen 等^[30]首先提出了一种适合异构网络 P2P 流媒体直播的分层网络编码(Hierarchical Network Coding, HNC)技术,其基本思想是:对属于同一“代”的分层视频数据,首先由最重要的基本层视频数据单独进行网络编码,然后由基本层视频数据与次重要的第一增强层视频数据一起进行网络编码,依次类推。显而易见,通过发送更多的由基本层单独编码或由基本层和第一增强层联合编码的数据包,就可以保证重要的分层视频数据以较高的概率优先被解码。该研究的不足是仅利用简单的多服务器-单客户端传输模型来测试 HNC 的优先解码能力,缺乏基于实际分层视

频数据的验证,和实际的 P2P 流媒体传输系统相差甚远。A. T. Nguyen 等^[31]提出了一种自适应 P2P 网络编码流媒体直播方案 Chameleon,它有机吸收了 R² 方案的优点,并结合可伸缩视频编码 SVC 与异构网络的特点进行改进,具有较强的实用性。该方案首先应用了一种适合 SVC 的分段分块网络编码方法:(1)以整数个 GOP 为单位对 SVC 视频流进行分段;(2)每段中的所有 NAL 单元根据空域(时域或质量)伸缩性进行重组,封装到不同的数据包中(如果 SVC 编码生成 n 层子流,每个段就封装成 n 个数据包);(3)重组生成的不同类型数据包等分为不同数量的分块进行网络编码。然后对 P2P 流媒体系统中 peer 节点的多个功能模块进行了重新设计(如采用基于平均播放质量的伙伴节点选择策略、采用基于分层的数据调度策略等),同时每个 peer 节点还增加了播放质量自适应调整模块,使其能够根据自身的播放缓存状况和下行带宽大小,自适应调整当前播放质量层次。最后,利用两种简单的度量(播放跳过率和平均质量满意度)评估了该方案的性能;在带宽波动的情况下,Chameleon 方案不但可以充分利用各个节点的上下行带宽,而且可以保证每个节点获得较流畅的播放连续度和较稳定的平均质量满意度。然而,仅通过上述两种简单的度量难以正确反映 P2P 流媒体传输质量。Mirshokraie 等^[32]提出了另一种结合 SVC 和网络编码的异构 P2P 流媒体直播方案,它采用了和 Chameleon 方案类似的分段分块网络编码方法。不同的是,它无需基于节点的平均播放质量来选择邻居节点,而是通过周期性交换节点 BM 信息选择合适的邻居节点。他们利用美国 Arizona 州立大学提供的典型 SVC 视频 trace 数据^[33]进行了仿真验证,仿真结果表明在异构、动态的 P2P 网络环境下,他们提出的方案可以明显提高每个 peer 节点的播放质量(通过峰值信噪比 PSNR 衡量),并且每个 peer 节点可获得稳定的播放质量。Li Yushian 等^[34]在 SVC 码流分段分块网络编码的基础上,提出了 3 种 P2P 流媒体直播调度策略,分别是基于播放启动申请的调度、基于分层优先级申请的调度以及基于分层优先级响应的调度。其中第一种调度策略在 peer 节点加入系统时调用,它仅申请调度 SVC 码流播放所必需的基本层数据,使得新节点能尽快进行播放,缩短播放启动延迟;后两种调度策略在节点正常播放时调用,使得节点能获得最佳的播放质量以及保证播放的流畅性。

目前大多数网络编码 P2P 流媒体直播方案都采用了随机网络编码。除此之外,学者们还研究了基于其他网络编码技术的 P2P 流媒体直播方案。Wu Chuan 等^[35]提出了一种基于 LT 码的 P2P 流媒体直播方案 rStream。LT 码^[36]属于无率码(Rateless code)(亦称喷泉码 Fountain code),是一种新型纠错码技术,和传统的纠错码(如 Reed-Solomon 码、Tornado 码)不一样,它可以由一组源数据包生成任意数量不同的编码包(RLNC 也具有这种特性,因而也是无率码),因而也可以用来简化 P2P 流媒体调度。为了适应流媒体传输要求,他们重新设计了 LT 码的解码过程,使其可以实现渐进解码:每当接收到一个编码包,其包含的编码信息依次添加到 LT 码的解码图中,一旦收到略多于原始包数量的编码包,即可马上恢复出全部原始包。然而,为了避免 peer 节点可能从不同上游节点那里收到重复的编码包,rStream 要求每个 peer 节点在进行 P2P 传输前需对接收到的编码包先解码再编码,这

无疑会增加传输延迟和系统实现的复杂性。针对 rStream 方案的缺点,Marco Grangetto 等^[37]提出了一个改进方案:每个节点在接收到编码包后,随即将其转发到下游节点,同时将其缓存起来准备解码;当获得足够多编码包时,再进行类似 rStream 方案的解码/重编码操作。这种改进方案的优点是可以降低传输延迟,但其局限性是需要构造无环的拓扑结构才能避免传输重复编码包。进一步,Nikolaos Thomos 等^[38]利用 3GPP 标准采用的一种无率码——非系统(non-systematic)Raptor 码^[39],提出了一种基于选择性网络编码的 P2P 流媒体传输方案,其主要思想是:首先在服务器节点利用 Raptor 码对源视频包进行编码,增强其容错性能;然后在 peer 节点有选择性地对接收到随机成对的 Raptor 编码包进行网络编码,补偿传输过程的丢包,增强流媒体系统的性能。该方案之所以采用非系统 Raptor 码而不是系统 Raptor 码,是因为后者能避免下游节点收到重复的数据包,提高传输分集,从而提高目的节点获得满秩生成矩阵并成功解码的概率。和基于随机网络编码的方案一样,采用非系统 Raptor 码的代价是一旦解码失败,将很难实施有效的误码隐藏。由于 Raptor 码具有较低的编、解码复杂度,以及 peer 节点采用了选择性网络编码策略,和 rStream 方案以及基于随机网络编码的方案相比,该方案具有较低的传输延迟和计算复杂度。如何选择合适数量的编码节点,是影响该方案性能的关键因素。过多的编码节点将会产生较多的冗余编码包,影响系统总体性能。Tabatabaie 等^[40]提出了一种基于 XOR 网络编码的 P2P 流媒体直播方案 LiveCod,它建立在经典的异构性拓扑自适应 P2P 系统模型 Gia^[41](Gia 是对 Gnutella 系统的改进,可充分利用节点异构性,动态调整 Overlay 结构和路由策略)基础上。它有机结合了 XOR 网络编码、前向纠错 FEC 以及基于内容的缓冲 CCache 3 种技术,使得 peer 节点能更快地从合适的邻居节点那里获得其所需要的高优先级分层视频数据。为了分析 LiveCod 方案的性能,他们在 Gia 的基础上还实现了采用随机网络编码的 P2P 流媒体直播方案 GIA-RNC。和 GIA-RNC 方案相比,LiveCod 方案具有更低的启动播放延迟、更高的网络吞吐量和带宽利用率。LiveCod 方案的局限性是 peer 节点需要较准确地获知邻居节点的 CCache 信息,以便进行有针对性的 XOR 网络编码,保证网络解码后能获得其所需要的视频数据。

当 P2P 网络中存在多个 P2P 直播流共存传输时,每个直播流使用一个覆盖网络,不同覆盖网络可能存在重合的 peer 节点(例如,通过同一个网关观看不同直播节目的多个用户终端可以抽象成一个同时观看多个直播节目的 peer 节点,因而它同时存在于多个覆盖网络中)。由于 P2P 网络总的传输带宽有限,因此需要给不同的流覆盖网络(streaming overlay)分配合理的带宽,使得整体性能最佳。Wu Chuan 等^[42]提出了一种多个 P2P 直播流共存传输优化方案。它首先利用动态带宽拍卖算法为每个直播流所属覆盖的网络分配传输带宽,有效解决多个流覆盖网络的带宽竞争和公平性问题,然后在每个流覆盖网络中,利用分配到的带宽进行网络编码 P2P 流媒体传输。

最近,网络编码 P2P 流媒体直播系统安全问题也得到了初步的研究。Wang Qi-yan 等^[43]提出了一种面向网络编码 P2P 流媒体直播系统的恶意节点识别方案 MIS,它利用单向

哈希函数(one-way hash functions)设计了一种轻量级的不可抵赖(non-repudiation)传输协议,一旦恶意节点往系统中注入第一个非法数据包,即可快速将之识别并隔离开来,使得网络编码污染攻击的影响仅持续很短一段时间,随后的流媒体传输不再受其影响。和已有网络编码污染攻击的解决方案(这些方案均针对常规数据业务)相比,MIS的计算复杂度低,它要求 peer 节点对接收或发送的编码包进行少量简单的哈希计算,仅引入很小的计算延迟,就能适应 P2P 流媒体的实时性要求。除此之外,它还有另外两个优点:1) 每个节点的验证信息与数据内容无关;2) 每个编码包仅需携带 20 个字节的证据码(evidence code),通信开销显著小于已有方案。该方案的有效实施依赖于服务器节点是可信的。如果服务器节点受到攻击,整个系统的安全性将受到严重的威胁。

4.2 P2P 流媒体点播

为了实现用户的异步 VCR 播放请求,P2P 流媒体点播会话主要由两个步骤组成:(1) 根据当前节点的播放偏移量(play offset)寻找具有相近播放进度的伙伴节点,与之组成局部 P2P overlay;(2) 利用伙伴节点中的缓存数据对当前节点进行 P2P 传输。基于网络编码的 P2P 流媒体点播在第(2)步中应用网络编码。

S. Annapureddy 等^[44,45]较早研究了在 P2P 流媒体点播系统中采用网络编码的可行性,并通过原型系统证明了网络编码同样可为实现高质量的 P2P 流媒体点播提供有力的支持。其技术方案的主要思想是:首先利用一种中心控制器 tracker(它知道当前系统中每个节点正在播放什么节目及其相应播放进度)来为当前节点(新加入节点或进行 VCR 操作节点)寻找合适的伙伴节点,一起组成一个局部覆盖网络。然后采用了 worst-seeded-first 段调度策略,优先传输具有最少种子节点的编码段,使之能支持伪顺序(pseudo sequential)的分段网络编码 P2P 流媒体传输。由于 P2P 流媒体点播系统的性能与局部 P2P overlay 的构造机制(亦即节点搜索定位机制)密切相关,学者们基于不同的局部 P2P overlay 的构造机制,提出了多种网络编码 P2P 流媒体点播实现方案。D. Wang 等^[46]提出了一种基于 DSL overlay 的网络编码 P2P 流媒体点播方案(简称 DSL_NC),它首先根据每个节点的播放偏移量,将所有节点组织成动态跳表(Dynamic Skip List, DSL)覆盖网络,使得在节点加入/退出以及进行各种 VCR 操作时能方便找到多个伙伴节点,然后利用基于网络编码的多伙伴数据调度算法完成所需流媒体数据的并行推送。该方案不但具有较高的可扩展性,而且能以较低的计算复杂度及带宽消耗实现相当流畅的流媒体点播回放。H. Chi 等^[47]提出了一种基于缓存协助搜索(buffer-assisted search, BAS)覆盖网络的网络编码 P2P 流媒体点播方案(简称 BAS_DNC),它首先利用缓存不重叠的节点构成较小的索引覆盖网络,用以提高伙伴节点搜索效率,然后采用播放截止时间感知的网络编码(Deadline-aware Network Coding, DNC)技术进行多伙伴数据调度。DNC^[48]是一种适合时延敏感流媒体业务的网络编码方案,其基本思想是在进行网络编码时,节点可以根据其伙伴节点个数以及播放截止时间动态调整编码窗口大小,其值可由伙伴节点个数与距当前播放截止时间所剩时间片数目的乘积决定。因此,应用基于 DNC 的多伙伴数据调度策略,有利于在播放截止时间前接收到尽可能多的有用流媒体

数据,并能减少总的调度时间。L. Yu 等^[49]提出了一种视频分割辅助的网络编码 P2P 视频点播系统 SonicVOD,它由 tracker、数据服务器以及若干 peer 节点组成,其中数据服务器是一个超级 peer 节点,除了分发常规视频流之外,还分发离线生成的关键帧视频流。与常规视频流相比,关键帧视频流数据量要小得多,每个新加入节点能很快从数据服务器或邻居节点接收完。用户通过操作已存在本地的关键帧视频流,可以直观选择感兴趣的场景,触发播放请求发给 tracker。tracker 再根据播放请求为当前节点选择合适的伙伴节点一起构成局部 P2P overlay,利用基于网络编码的随机 push 技术完成点播节目片段的正常播放。

学者还从不同方面研究了应用网络编码的 P2P 流媒体点播分布式优化策略。X. Chu 等^[50]提出了一种基于拍卖机制的最小代价网络编码 P2P 流媒体点播分布式设计方案,它可以根据当前节点与其不同伙伴节点之间的链路状况,决定相应的编码数据获取速率(如链路状况较好的节点对之间可以多交换数据)。该方案首先将所有节点按其播放进度构成一个无环的覆盖网络,然后通过流量拍卖算法确定上下游伙伴节点之间的编码流速率,最后由网络编码模块按分配到的速率进行实际的编码传输。该方案的优点是易于实现随机搜索、暂停等交互性操作,能以较低代价实现可扩展的分布式 P2P 流媒体点播。He Yi-feng 等^[51]提出了一种异构网络中基于网络编码的可伸缩视频 P2P 点播吞吐量最大化的分布式算法,它首先利用基于随机网络编码的优先级编码传输(Priority Encoding Transmission, PET)^[52]消除可伸缩 H. 264 视频流不同层视频流之间的依赖性,使得 peer 节点随着接收到的可用编码包数量增多,重要性高的分层视频数据能依次被解码,然后在一种混合缓存转发(buffer-forwarding)和存储转发(storage-forwarding)的 P2P 视频点播框架上,利用一种分布式算法最大化每个 peer 节点的吞吐量,使其获得最佳的播放质量。Wang Hui 等^[53]提出了一种基于网络编码的分布式缓存机制,它可以显著降低大规模 P2P 视频点播系统中服务器的带宽消耗,其主要思想是每个节点在完成当前段的播放后,不是直接缓存原始视频包,而是缓存由其生成的网络编码包,从而提高缓存的分集特性,减小 peer 节点直接从服务器获取数据的概率。

最近,学者还对网络编码在大规模 P2P 流媒体点播运营系统中的应用性能进行了初步的测试和分析。UUSee 视频点播系统是首个实际部署了网络编码的流媒体点播运营系统^[54]。它同样通过 tracker 服务器为每个点播节点构造具有相近播放进度的局部 P2P overlay,然后利用 R² 方案的机制完成 P2P 流媒体传输。为了适应实际大规模 P2P 流媒体系统的要求,它采用了大数据段、小数据块的策略,每个数据段包含 300 到 500 个数据块,每个数据块 1kB,使之能独立封装在一个 UDP 包中,并为上传带宽较小的种子节点贡献其带宽资源创造必要条件。由于采用了大数据段、小数据块的策略,如果按照常规的网络编码策略在数据包头嵌入编码向量,编码向量最多将占整个数据包大小的 50%,这将引入很大的通信开销。UUSee 的解决措施是采用伪随机数生成器来产生编码系数,使得每个编码数据包只需携带 4 字节的随机种子即可。这种方法的副作用是每个 peer 节点在接收完当前段数据块之前,不能作为种子节点为其他节点提供该段的数据。

采用较大的数据段有两个额外好处:其一是可以减小随机 push 时由冗余编码包产生的通信开销(对于同等数量的冗余编码包,如采用较大的数据段,其占的比例更小);其二是可以减小节点间交换 Buffer Map 时产生的另一种通信开销(每个数据段用 1 位表示,同样数量的流媒体数据采用较大的数据段,相应的 Buffer Map 也较小)。为了全面了解网络编码对 UUSee 视频点播系统的性能贡献,Z. Liu 等^[54]对该系统应用于 2008 年北京奥运会期间收集到的海量视频点播 trace 数据进行分析,验证了网络编码有利于提高大规模实时 P2P 流媒体点播系统多方面的性能,如提高播放流畅度、减少播放缓冲延迟、降低服务器带宽消耗等,但是也发现基于网络编码的随机推送容易引入较大的数据传输冗余(在大规模的 P2P 流媒体系统中,即使每个种子节点仅产生少量的冗余编码包,由于通常有多个种子节点同时向同一节点推送编码包,累加起来的冗余编码包也相当可观),因此需要研究更为有效的解决方案。

结束语 尽管目前应用网络编码的 P2P 流媒体技术研究取得了令人鼓舞的进展,但总的来说还处于初级阶段,还存在着若干尚未解决的问题或尚未探索的研究方向,主要有以下几个方面:

(1)网络编码在大规模 P2P 流媒体系统中的性能研究。目前应用网络编码的 P2P 流媒体研究大多仍局限于仿真研究或基于简化试验床的验证研究,对网络编码在大规模 P2P 流媒体系统中可能付出的代价以及性能增益的评估还不够全面和深入,需要进一步研究。

(2)网络编码在无线 P2P 流媒体中的应用。随着 WiMax、UWB 以及 3G 等宽带无线技术的蓬勃发展,基于无线网络进行 P2P 流媒体传输逐渐成为可能。由于无线网络具有不同于有线网络的特性,如传输带宽波动性、拓扑结构高动态、节点能量受限以及高误码率等,需要研究更具针对性的网络编码 P2P 流媒体传输技术。

(3)安全性问题。尽管已有学者初步研究了网络编码 P2P 流媒体直播系统的污染攻击问题,但这仅仅涉及了网络编码 P2P 流媒体系统安全性的一个方面,其他安全性相关问题(如保密性、隐私性、可信性等)的研究还没有展开。因此,如何充分利用网络编码在网络安全领域的研究成果,提高网络编码 P2P 流媒体系统的安全性,也是未来需研究的关键内容之一。

(4)激励机制问题。在 P2P 流媒体系统中采用网络编码,要求每个节点贡献更多的自身资源,“搭便车”(free-riding)的行为(即只愿意从其它用户获取服务而不愿意贡献其空闲资源为其他用户服务)将更明显。而较多的 free-riding 用户存在,将严重影响 P2P 流媒体系统的整体性能。因此,如何设计有效的激励机制,既考虑公平性,又考虑节点能力的差异性,鼓励更多的用户主动最大化贡献其资源,协助进行基于网络编码的流媒体数据分发,是未来值得研究的方向。

参 考 文 献

- [1] Li B, Yin H. Peer-to-peer live video streaming on the Internet: Issues, existing approaches, and challenges [Peer-to-peer multimedia streaming] [J]. IEEE Communications Magazine, 2007, 45(6): 94-99
- [2] Huang Y, Fu T Z J, Chiu D-M, et al. Challenges, design and analysis of a large-scale p2p-vod system [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38: 375-388
- [3] 彭雪娜, 李佳, 闻英友, 等. 面向 P2P 流媒体直播的数据分发机制研究进展 [J]. 计算机科学, 2010, 37 (5): 15-20
- [4] Fragouli C, Le Boudec J-Y, Widmer J. Network coding: An instant primer [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006, 36 (1): 63-68
- [5] Gkantsidis C, Rodriguez P R. Network coding for large scale content distribution [C]//IEEE INFOCOM. Miami, FL, United States, 2005
- [6] Tran D A, Hua K A, Do T. ZIGZAG: An efficient peer-to-peer scheme for media streaming [C]//IEEE INFOCOM. San Francisco, CA, United States, 2003
- [7] Castro M, Druschel P, Kermarrec A-M, et al. SplitStream: High-bandwidth multicast in cooperative environments [C]//The 19th ACM Symposium on Operating Systems Principles. Lake George, NY, United States, 2003
- [8] Venkataraman V, Yoshida K, Francis P. Chunkspread: Heterogeneous unstructured tree-based peer-to-peer multicast [C]//14th IEEE International Conference on Network Protocols. Santa Barbara, CA, United States, 2006
- [9] Zhang X, Liu J, Li B, et al. CoolStreaming/DONet: A data-driven overlay network for peer-to-peer live media streaming [C]//IEEE INFOCOM. Miami, FL, United States, 2005
- [10] Ahlswede R, Cai N, Li S-Y R, et al. Network information flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46 (4): 1204-1216
- [11] Li S-Y R, Yeung R W, Cai N. Linear network coding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49 (2): 371-381
- [12] Sanders P, Egner S, Tolhuizen L. Polynomial time algorithms for network information flow [C]//Annual ACM Symposium on Parallel Algorithms and Architectures. San Diego, SA, United States, 2003
- [13] Ho T, Kottter R, Medard M, et al. The benefits of coding over routing in a randomized setting [C]//IEEE International Symposium on Information Theory. Yokohama, Japan, 2003
- [14] Chou P A, Wu Y, Jain K. Practical network coding [C]//The 41st Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing. Monticello, IL, USA, 2003
- [15] Guo J, Zhu Y, Li B. Codedstream: Live media streaming with overlay coded multicast [C]//Multimedia Computing and Networking (MMCN). San Jose, CA, United States, 2004
- [16] Zhao J, Yang F, Zhang Q, et al. LION: Layered overlay multicast with network coding [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2006, 8(5): 1021-1031
- [17] Yang-Hua C, Rao S G, Seshan S, et al. A case for end system multicast [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(8): 1456-1471
- [18] 刘亚杰. P2P 流媒体内容分发关键技术研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学, 2005
- [19] Wang M, Li B. Network coding in live peer-to-peer streaming [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2007, 9(8): 1554-1567
- [20] Wang M, Li B. Lava: A reality check of network coding in peer-to-peer live streaming [C]//IEEE INFOCOM. Anchorage, AK, United States, 2007

- [21] 武广柱,王劲林,齐卫宁. ARLNCStream:自适应随机网络编码流媒体系统 [J]. 电子与信息学报,2008,30(1):25-28
- [22] 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
- [23] Park K, Chang D, Kim J, et al. An analysis of user dynamics in P2P live streaming services [C]//2010 IEEE International Conference on Communications (ICC 2010). Cape Town, South Africa, May 2010
- [24] 王晖,陈伟涛,刘亚杰. 基于网络编码的 P2P 流媒体推拉结合数据调度方法 customR² [J]. 计算机应用, 2010, 30(2):285-288, 302
- [25] Zhang X, Chen X, Ren N, et al. Sonicstream: An implementation of a live P2P Media streaming system with improved playback lag [C]// International Conference on Consumer Electronics. Las Vegas, NV, United States, 2009
- [26] 陈伟涛,刘亚杰,王晖. 拓扑构造对基于网络编码的流媒体性能影响 [J]. 计算机工程, 2009, 35(14):130-131, 134
- [27] Feng C, Li B. On large-scale peer-to-peer streaming systems with network coding [C]// 16th ACM International Conference on Multimedia (MM '08). Vancouver, BC, Canada, October 2008
- [28] Chang L, Pan J. On the system parameters of peer-to-peer video streaming with network coding [C]// IEEE International Conference on Communications. Cape Town, South Africa, 2010
- [29] Bernardini R, Fabbro R C, Rinaldo R. Peer-to-peer streaming based on network coding decreases packet jitter [C]// ACM Workshop on Advanced Video Streaming Techniques for Peer-to-Peer Networks and Social Networking. Firenze, Italy, 2010
- [30] Nguyen K, Nguyen T, Cheun S-C. Peer-to-peer streaming with hierarchical network coding [C]// IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Beijing, China, 2007
- [31] Nguyen A T, Li B, Eliassen F. Chameleon: Adaptive peer-to-peer streaming with network coding [C]// IEEE INFOCOM. San Diego, CA, United States, 2010
- [32] Mirshokraie S, Hefeeda M. Live peer-to-peer streaming with scalable video coding and networking coding [C]// ACM SIGMM Conference on Multimedia Systems. Phoenix, AZ, United States, 2010
- [33] Auwera G, David P, Reisslein M. H. 264/SVC Video Trace Library [DB/OL]. <http://trace.eas.asu.edu/h264svc/>, 2009
- [34] Seedorf J, Niccolini S, Stiemerling M, et al. Quantifying operational cost-savings through ALTO-guidance for P2P live streaming [C]// 3rd Workshop on Economic Traffic Management (ETM 2010). Amsterdam, Netherlands, September 2010
- [35] Wu C, Li B. rStream: Resilient and optimal peer-to-peer streaming with rateless codes [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2008, 19(1):77-92
- [36] Luby M. LT codes [C]// The 34th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science. Vancouver, BC, Canada, 2002
- [37] Grangetto M, Gaeta R, Sereno M. Rateless codes network coding for simple and efficient P2P video streaming [C]// IEEE International Conference on Multimedia and Expo. New York, NY, United States, 2009
- [38] Thomos N, Frossard P. Network coding of rateless video in streaming overlays [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2010, 20(12):1834-1847
- [39] 3GPP. TS 26.346 V7.1.0. Technical Specification Group Services and System Aspects, Multimedia Broadcast/Multicast Service, Protocols and Codecs [S]. 2005
- [40] Tabatabaie H S A, Khansari M, Rabiee H R. LiveCod: A mesh-pull P2P live streaming system with XOR-based network coding [C]// IEEE Globecom Workshops. Miami, FL, United States, 2010
- [41] Chawathe Y, Ratnasamy S, Breslau L, et al. Making Gnutella-like P2P Systems Scalable [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2003, 33(4):407-418
- [42] Wu C, Li B, Li Z. Dynamic bandwidth auctions in multioverlay P2P streaming with network coding [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2008, 19(6):806-820
- [43] Wang Q, Vu L, Nahrstedt K, et al. MIS: Malicious nodes identification scheme in network-coding-based peer-to-peer streaming [C]// IEEE INFOCOM. San Diego, CA, United States, 2010
- [44] Annapureddy S, Guha S, Gkantsidis C, et al. Exploring VoD in P2P swarming systems [C]// IEEE INFOCOM. Anchorage, AK, United States, 2007
- [45] Annapureddy S, Guha S, Gkantsidis C, et al. Is high-quality vod feasible using P2P swarming? [C]// 16th International World Wide Web Conference. Banff, AB, Canada, 2007
- [46] Wang D, Liu J. A dynamic skip list-based overlay for on-demand media streaming with VCR interactions [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2008, 19(4):503-514
- [47] Chi H, Zhang Q, Jia J, et al. Efficient search and scheduling in P2P-based media-on-demand streaming service [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(1):119-130
- [48] Chi H-C, Zhang Q. Deadline-aware network coding for video on demand service over P2P networks [J]. Journal of Zhejiang University: Science, 2006, 7(5):755-763
- [49] Yu L, 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
- [50] Chu X, Zhao K, Li Z, et al. Auction-based on-demand P2P min-cost media streaming with network coding [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2009, 20(12):1816-1829
- [51] Jiao Wei-wei, Chen Can-feng, Xie Dong-liang, et al. Efficient data collection in wireless sensor networks by applying network coding [C]// IC-BNMT'09 2nd IEEE International Conference on. Beijing, China, 2009
- [52] Albanese A, Blomer J, Edmonds J, et al. Priority encoding transmission [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1996, 42(6):1737-1744
- [53] Wang H, Zhang Y, Li P, et al. The benefits of network coding in distributed caching in large-scale P2P-VoD systems [C]// 53rd IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2010). Miami, FL, United States, December 2010
- [54] Liu Z, Wu C, Li B, et al. UUSee: Large-scale operational on-demand streaming with random network coding [C]// IEEE INFOCOM. San Diego, CA, United States, 2010