

基于网络编码的无线多媒体技术研究进展

徐 进 傅志中 李晓峰 鲜海滢

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 611731)

摘 要 近年来国内外学者积极研究了网络编码在无线多媒体传输系统中的应用,取得了积极的研究成果。首先分析了网络编码给多媒体传输带来的机遇和挑战,接着介绍了网络编码在多媒体传输中的常用应用机制,然后结合典型的无线多媒体应用场景,如无线多媒体组播/广播/单播、无线视频会议等,总结了基于网络编码的无线多媒体技术的最新研究进展,最后对其研究趋势进行了展望。

关键词 网络编码,多媒体传输,无线网络

中图分类号 TP393, TN919.8 **文献标识码** A

Recent Advances in Wireless Multimedia Technologies with Network Coding

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

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

Abstract In the recent years, researchers all around the world have actively studied wireless multimedia technologies using network coding and have achieved promising results so far. This paper first analysed the opportunities and challenges for networked multimedia streaming, and introduced the frequently-used mechanisms for multimedia streaming with network coding, and then summarized their latest research advances in typical wireless multimedia application scenarios, i. e., wireless multimedia multicasting/broadcasting/unicasting and wireless video conferencing. At last, the open issues of this research field were proposed.

Keywords Network coding, Multimedia transmission, Wireless networks

1 引言

网络编码是一种融合编码和路由的网络通信新技术^[1],允许网络节点对接收到的数据先进行编码处理再转发,可以增加单次传输的信息量,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其优越性^[2,3]。特别地,网络编码可以在提高网络传输系统整体性能的同时,避免使用复杂的路由算法或调度策略,降低控制开销,有利于设计易扩展的分布式优化传输机制。

继成功应用于无线网络^[4,5]、P2P 内容分发^[6]、分布式存储^[7]以及网络安全^[8]等领域之后,网络编码又引起了多媒体通信领域学者浓厚的研究兴趣^[9],他们期望能通过网络编码技术提高多媒体传输系统服务质量。网络编码上述优点虽然可为提升多媒体传输质量和效率提供有力的支持,但也会产生一些不利于多媒体传输的负面影响,如增加端到端延迟、加重节点的计算和缓存负担(对无线节点的影响尤其大)以及解码不成功时难以应用有效的误码隐藏等。因而,如何充分发挥网络编码的优势,克服或弱化其弱点,是网络编码技术能否在实际的多媒体传输系统中获得广泛应用的关键所在。

网络编码在多媒体传输系统中的应用充满着机遇和挑

战,吸引了国内外众多学者的浓厚研究兴趣。近年来,国外多所著名大学,如加拿大多伦多大学^[10-13]、瑞士洛桑理工学院^[14-17]、美国加州大学^[18-20]、南加州大学^[21-24]等,相继开展了网络编码在多媒体传输系统中的应用研究,并持续投入了极大的研究热情。研究范围也较宽,涉及到同构/异构有线网络视频组播^[13,25]、P2P 流媒体直播/点播^[10,26]、无线多媒体^[18,23,27,28]等多个应用方向。相对而言,国内这方面的研究尚处于起步阶段,而且多集中于研究网络编码在 P2P 流媒体系统^[29-31]或有线网络视频传输中的应用^[32,33],而有关基于网络编码的无线多媒体技术研究,无论从广度还是深度,与国外同行相比都尚有不小差距。本文旨在跟踪、总结网络编码在无线多媒体系统中应用这一国际前沿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对实现高质量的无线多媒体传输系统具有重要的学术意义和广阔的应用前景。同时期望本文可以抛砖引玉,促进国内学术界对该研究课题目前尚存在的问题提出创新的见解,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无线多媒体系统中的更广泛应用。

2 网络编码技术简介

长期以来,通信网络均采用存储转发式路由机制进行数

到稿日期:2010-12-01 返修日期:2011-03-10 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、无线网络等,E-mail:jinxu@uestc.edu.cn;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;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;鲜海滢(1974-),男,博士后,主要研究方向为多媒体通信、图像处理。

据传输。这是因为人们普遍认为,中间节点对传输数据进行加工处理不会带来任何收益。Ahlsweide 等^[1]于 2000 年提出的网络编码概念彻底颠覆了这个传统观点。网络编码是进入 21 世纪以来网络通信领域的一项重大突破,其核心思想是允许网络中的各个节点对接收到的数据进行编码后再转发出去,即中间节点除了具备路由功能之外,还扮演着编码器或信号处理器的角色。

网络编码的概念一经提出,就激起了国际学术界极大的研究热情。最初的研究大多集中在相关理论研究,如构造各种逼近网络容量极限的网络编码方案,以及在理想的网络模型中分析其渐进性能^[34,35]。2003 年,Ho 等^[36]提出了随机线性网络编码(Randomized Linear Network Coding, RLNC)技术,它为网络编码的实用化奠定了坚实的理论基础,有关网络编码的研究也逐渐从理论研究转向应用研究。RLNC 采用了随机选择编码向量的策略: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。理论上可证明:当有限域的大小为 $q=2^{16}$ 时,信宿至少可以 99.6% 的概率成功译码。在实际应用中,有限域的大小为 $q=2^8$ 就足够了。由于每个节点可以不依赖其他节点独立、随机地选择编码向量并进行编码,随机线性网络编码是一种分布式网络编码方案,非常适用于类似 Ad-hoc 网络这样的分布式网络。

进一步,P. Chou 等^[37]在 RLNC 的基础上,提出了第一种可在实际网络中应用的实用网络编码(Practical Network Coding, PNC)方案。除了采用 RLNC 之外,PNC 还应用了另外两项关键技术:其一是利用数据包头部捎带全局编码向量,随着数据包在网络中依次传输,它包含的编码数据及其相应的编码向量也不断被更新,该技术不但有利于网络编码和解码的分布式实现,而且能提高网络编码在动态变化网络中的适应性;其二是采用了基于“代”(generation)的编码及缓存技术,即信源将由同一组原始数据包生成的编码数据包归为“一代”,并在数据包头部添加“代”序号标志位,中继节点以“代”序号为索引缓存接收到的编码数据包,并对隶属于同一“代”的数据包进行重编码。通过应用上述 3 种关键技术,PNC 可以有效消除网络的异步传输影响,并易于分布式实现。实用网络编码 PNC 的提出对推动网络编码在各领域中的应用研究起到了关键的作用。

3 网络编码给多媒体传输带来的机遇与挑战

相对于目前已经广泛应用的路由技术,网络编码在多个方面显示出其优势。第一,网络编码不但能有效提高网络吞吐量(尤其是组播网络吞吐量),而且可以提高网络带宽资源利用率,若应用于无线网络,还能节省无线网络节点的能量消耗。第二,网络编码可以看作是一种特殊形式的信道编码,可以抵抗网络链路或节点的非各态历经失败对网络数据传输的影响,增强网络的容错性和鲁棒性。第三,网络编码可将网络流量分布于范围更广的通信链路上,从而均衡了网络负载,有助于解决网络拥塞等问题。第四,网络编码有利于降低寻找网络传输优化方案的计算复杂性,例如网络编码能将传统路由网络中的某些典型 NP 完全问题(如最小花费组播树问题)转化为更易求解的线性规划问题或凸规划问题。网络编码具

有的上述优点为提高和优化网络多媒体传输服务质量提供了有力的支持。

然而,与此同时,网络编码也会产生影响多媒体传输的若干负面因素,主要表现在如下几个方面:第一,采用网络编码会在网络传输系统中引入不可忽视的延迟(包括中间节点和目的节点的网络编解码延迟以及相应的缓存等待延迟),而且随着网络规模的扩大,端到端延迟有可能迅速变大。而较低的端到端延迟却是一个有效多媒体传输系统必须满足的条件之一。第二,目前常用的基于“代”的实用化网络编码方案解码具有一种“all-or-nothing”特性,即需要收到满秩(full rank)的线性无关编码数据包(亦称为 innovative 数据包)方能进行解码,恢复原始数据包,否则任何一个原始数据包都无法恢复。一旦目的节点在规定的时间内无法收到满秩的线性无关编码数据包,就无法完成解码,之前收到的同一“代”数据包也统统作废,不但浪费网络带宽资源,而且使得视频解码器难以进行有效的误码隐藏。第三,多媒体数据包具有不同的重要性(如包含 I 帧视频的数据包比包括 P 帧视频的数据包具有更高的重要性),而网络编码生成的所有编码数据包的重要性是一样的,这使得在采用网络编码的多媒体传输系统中不能直接采用传统的非均衡纠错(Unequal Error Protection, UEP)方案,需要根据其特性设计新的 UEP 方案。第四,采用网络编码还会增加节点的计算和缓存负担。虽然随着处理器与存储技术的迅速发展,目前的有线网络已具有足够的计算与存储能力支持网络编码,但是由于无线节点的计算与存储依然偏弱,在无线网络(尤其是无线传感器网络)中应用网络编码仍面临着很大的挑战。

因而,将网络编码有效应用到多媒体传输系统中并不是一件容易的事情,需要综合考虑多媒体传输的特性及要求,如端到端延迟受限、高带宽、时变的视频比特率、信道误码敏感以及多媒体数据重要性各异等,合理设计相应的网络编码方案,使得采用网络编码的多媒体传输系统可在延迟、复杂度、吞吐量以及鲁棒性等因素之间取得较好的权衡。

4 网络编码在多媒体传输中的常用应用机制

4.1 延迟优化的网络编码

多媒体传输是延迟受限的实时业务,而网络编码会增加端到端传输延迟。如何降低网络编码带来的传输延迟,是将其应用到多媒体传输系统中的一个重要前提。

对于基于“代”的网络编码方案,通常可以采用如下策略来减少端到端延迟:其一是选择较小的“代”,使得中间节点或目的节点在进行编码或解码时无需等待更多的数据包,有利于降低延迟和复杂度,但这是以降低其吞吐量和编码效率等方面的增益为代价;其二是采用渐进的解码策略^[38],即目的节点每当收到一个编码数据包,就对其编码向量及编码数据同时进行一次 Gaussian-Jordan 消除法操作,将当前编码向量转化成 RREF(reduced row echelon form)形式。一旦编码向量矩阵变成单位矩阵,属于当前“代”的原始数据包就可以全部解码恢复出来。而常规的块解码策略^[37]需要收到满秩的线性无关编码数据包方能开始解码。

借鉴信道编码中的系统码概念,将原始数据包和网络编码数据包组合在一起,构成系统网络编码(systematic network coding)^[39],也可以降低网络编码带来的延迟。原始数

据包可以看作是一种特殊的编码数据包,具有平凡编码矢量(trivial encoding vector),即对当前“代”中的数据包 B_i ($0 \leq i < N$, N 为“代”大小)而言,其 N 维编码矢量中的第 i 个分量为 1,其余分量均为 0。原始数据包若正确地到达目的节点,可以马上提交给应用层进行视频解码,以降低实时系统的端到端延迟。而网络编码生成的编码数据包相当于传统信道编码技术中的冗余校验信息,主要作用是与正确接收的原始数据包一起恢复丢失的原始数据包。系统网络编码方案的另一个好处是便于多媒体传输应用层进行误码隐藏。如果在解码截止时间之前目的节点无法接收到满秩的线性无关数据包(编码或未编码),可以利用正确接收到的原始数据包通过误码隐藏技术获得一定质量的重建视频图像。而常用的网络编码方案是一种非系统码,一旦解码失败,将导致接收到的当前“代”所有编码数据包也作废,不利于误码隐藏技术的应用。

此外,在满足一定的吞吐量和鲁棒性的前提下,通过尽量减少参与网络编码的节点数量,也有利于降低网络编码引入的延迟。N. Cleju 等^[16] 针对采用随机网络编码的 overlay 网络视频传输场景,给出了两种网络编码节点优化选择算法:某一个节点具有网络整体信息的集中式算法以及所有节点仅能感知网络局部信息的分布式算法。仿真结果表明,通过合理选择网络编码节点的位置,仅需较少数量的网络编码节点即可以较低的延迟获得与全网络编码系统(即所有节点参与网络编码)相当的吞吐量和鲁棒性,而且实用性更好的分布式算法可取得与理想化的集中式算法相当的性能,对于大多数网络拓扑两种算法甚至会选取一样的网络编码节点。减少网络编码节点的额外好处是有助于降低网络编码传输系统的复杂度。

4.2 支持 UEP 的网络编码

多媒体数据的重要性各异,而网络编码生成的数据包却具有相同的重要性。该特性虽然有利于简化网络编码多媒体数据的传输调度,但也使得传统的 UEP 技术不再适用于网络编码多媒体,需要研究新的 UEP 方案。

K. Nguyen 等^[40] 提出了分层网络编码(Hierarchical Network Coding, HNC)方案,使得重要的视频数据包能以较高的概率优先被解码。该方案的原理可通过如下简单例子加以说明。假设一个图像组(group of pictures, GOP)的视频数据包后生成多个数据包,每个数据包属于 A、B、C 3 类中的一类,其中 A 类最重要, B 类次之, C 类最不重要。进一步假设每类数据均由 2 个数据包组成,分别为 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 , 则 HNC 的编码构造方案如下:

$$N_1 = f_1^1 a_1 + f_2^1 a_2$$

$$N_2 = f_1^2 a_1 + f_2^2 a_2 + f_3^2 b_1 + f_4^2 b_2$$

$$N_3 = f_1^3 a_1 + f_2^3 a_2 + f_3^3 b_1 + f_4^3 b_2 + f_5^3 c_1 + f_6^3 c_2$$

式中, f_i^j 是有限域 $F(q)$ 中的非零随机系数。该方案中,首先由最重要的 A 类数据生成 N_1 类型的网络编码数据,然后由 A 类数据与次重要的 B 类数据一起生成 N_2 类型的网络编码数据,依次类推。显而易见,通过发送更多的 N_1 或 N_2 类型编码数据包,就可以保证重要的视频信息以较高的概率优先被解码。

另一种常用的方案是采用网络编码实现优先级编码传输(Priority Encoding Transmission, PET)(本文简称优先级网络编码)。PET 最早由 A. Albanese 等^[41] 提出,曾在传统的多

媒体传输中得到了较广泛的应用,主要用于为分层视频提供渐进细粒度的 UEP 保护。在传统 PET 方案中,UEP 保护采用了信道编码技术(如 Reed-Solomon 码)。P. Chou 等^[37] 利用随机网络编码的 rateless 纠错功能,提出了基于网络编码的 PET 实现思路。随后,不同的学者^[42,43] 相继给出了针对视频传输的具体实现方案,验证了该方法的有效性。基于网络编码的分层视频 PET 实现原理示意图如图 1 所示。从图 1 可以看出,该方案用“0”字节代替了传统方案中的信道编码冗余检验字节,为基于网络编码实现 PET 创造了便利。当目的节点收到两个线性无关 NC 数据包时,该方案可以保证恢复最重要的 L_1 层数据;随着收到的线性无关 NC 数据包数量增多,重要性较高的各个视频层数据依次获得解码恢复;当收到 k 个线性无关 NC 数据包时,就可以恢复全部视频分层数据,获得最佳的视频重建质量。因而,该方案具有部分解码以及优先解码重要视频数据的能力,可以解决常规实用化网络编码的“all-or-nothing”解码效应。然而,该方案也有缺点,主要表现在如下两个方面:其一,打包策略较复杂。它要求每个数据包容纳多个优先级的视频数据或冗余数据,导致数据包长度偏大,从而增加网络编码的复杂度,同时数据包头还需包含不同分层视频数据之间的分界点等信息。其二,灵活性不高。它需要在发送端根据信道状态先确定每个视频分层的网络编码冗余度,从而限制了其适应动态变化网络的能力。

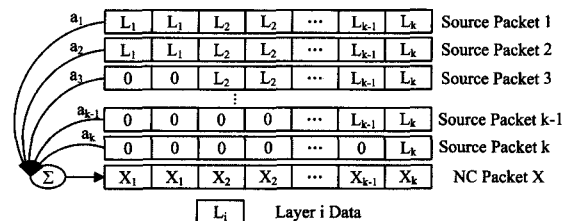


图 1 基于网络编码的分层视频 PET 实现原理示意图

5 网络编码在无线多媒体系统中的应用

无线网络的物理层广播特性非常适合使用网络编码。更重要的是,网络编码有利于优化无线网络传输系统的整体性能,如在提高网络吞吐量、节省无线节点能耗以及增强网络鲁棒性等多方面均显示出优越性^[44],可为无线网络多媒体传输系统提供有力的支持,使得基于网络编码的无线多媒体传输技术成为了近年来的研究热点之一。下面根据不同的无线多媒体应用场景,分别介绍这方面的最新研究进展。

5.1 无线多媒体组播

组播可以充分利用网络带宽资源,在流媒体业务(如 IPTV 等)中得到了广泛的应用,而网络编码又被证实有利于提高组播网络的吞吐量以及传输可靠性,这吸引了国内外学者进一步研究网络编码在流媒体组播中的应用机制。最初的研究主要集中在有线网络流媒体组播中,如 Guo Jiang 等^[13] 提出的一种混合了多描述编码 MDC 与网络编码的实时流媒体组播分发方案 CodedStream 以及 Zhao Jin 等^[25] 提出的分层网络编码流媒体组播方案 LION。然而,由于无线网络具有不同于有线网络的特性,不能直接应用面向有线网络的流媒体编码组播方案。

Li Zongpeng 等^[45] 针对无线 Ad-hoc 网络流媒体组播面临的两个主要困难(即低带宽及高误码率),提出了一种基于网络编码的优化组播模型,使之既可获得最大的组播速率,又

能获得及时的差错控制。其主要实现步骤如下:(1) 利用线性规划(linear programming, LP)模型(分别考虑了节点具有定向天线与全向天线两种情形)计算出编码组播网络的最大速率组播路由拓扑;(2) 源节点将源数据划分成 n 个原始数据流,并利用 FEC 技术生成 k 个冗余校验流;(3) 通过最大速率编码组播路由将这 $n+k$ 个流发送到接收节点;(4) 接收节点只要收到其中任意 n 个流,即可恢复 n 个原始数据流。针对移动 Ad-hoc 网络中的视频组播, Yao Yu 等^[46]提出了一种基于网络编码的组播方案,它利用基于节点移动性预测的上游节点选择策略动态构造显式的多树组播路由,然后在此路由上进行网络编码组播。该方案可以保证在节点高速移动情形下仍能实现有效的 Ad-hoc 网络组播,但缺乏进一步基于视频的仿真验证。为了支持无线 Ad-hoc 网络中的多媒体组播, J. -S. Park 等^[27]提出了另一种网络编码组播方案 CodeCast,它无需显式确定组播路由,而是利用启发式策略(即每个节点记录有距源节点的跳数值 dist,当前节点总是选择具有较大 dist 值的邻居节点作为下游节点)动态构造转发子图。该方案可以透明地实现局部化丢包恢复和路径分集(Path Diversity),同时可通过改变“代”大小以及“代”超时阈值调整端到端延迟,但和常规组播相比,延迟仍然偏大。CodeCast 采用的启发性转发策略容易引起网络拥塞,特别是在靠近源节点的区域。

学者们还研究了基于优先级网络编码的无线视频组播方案。Hui Wang 等^[21]利用多层、多人度的无线组播树模型,验证了优先级网络编码在无线视频分层组播系统中的有效性。He Yifeng 等^[43]则在对分层视频进行优先级网络编码的基础上,提出了一种适合无线 Ad-hoc 网络视频组播的分布式优化算法,它通过联合优化码率分配和多路径路由,最大化每个接收节点的可用带宽,使之能尽量接收到更多的编码包,获得更佳的视频传输质量。

5.2 无线多媒体广播

由于广播是组播的一种特殊形式,而且无线网络的物理层广播特性更易于实现流媒体的广播传输,因此如何利用网络编码优化无线流媒体广播服务质量,也获得学者们的较多关注。针对单跳无线网络中的实时多媒体广播, D. Nguyen 等^[47]提出一种混合 ARQ 和 RLNC 的广播方案。该方案利用反馈信息获知不同终端丢失的数据包后,不是直接重传丢失数据包本身,而是重传丢失数据包的线性编码组合。由于每个重传编码数据包可以用来恢复多个丢失数据包,因而该方案不但提高了鲁棒性,而且更有效利用了网络带宽资源。为了最大程度提高广播多媒体的质量,文献^[47]还给出了一种基于马尔可夫决策过程的优化调度算法。Liu Xin 等^[28]针对 multi-homed 移动终端(即同时具有 3G 和 802.11 接口的移动终端)的多媒体广播组播业务(Multimedia Broadcast/Multicast Services, MBMS),提出了一种基于网络编码的协作对等修复 NC-CPR(Cooperative Peer-to-Peer Repair)方案,用以提高 MBMS 业务的服务质量。其主要思想是:当一组邻近的 multi-homed 移动终端利用其 3G 接口通过无线广域网(Wireless Wide Area Networks, WWAN)观看广播视频节目时,由于每个终端的信道状况不一样,可能分别接收到不同的视频数据包;为了恢复每个终端丢失的数据包,这些终端首先利用其 802.11 接口构成一个局部无线 Ad-hoc 网络,然后每

个终端通过该局部网络对各自正确接收到的数据包进行基于网络编码的广播传输,协助邻居终端恢复其丢失的数据包。在进行基于网络编码的协作对等修复时,该方案采用了一种结构化网络编码(structured network coding, SNC)技术,它强制编码系数矩阵具有某种结构性(即通过强制某些编码系数为 0),使得终端在无法收到满秩的线性无关数据包时,仍能完成部分解码。为了优先修复重要性高的视频包,应进行两个层次的 SNC 编码策略优化:(1) 媒体源根据每个终端的平均接收状态以及 GOP 内各帧之间的解码依赖关系,确定率失真优化的全局 SNC 编码结构;(2) 在获得传输机会时,每个终端根据其局部信息(一跳范围内的邻居终端已收到的源视频包以及每种 SNC 包的实际数量)选择最佳的 SNC 包类型。Y. Kondo 等^[48]提出了一种网络编码 piggy-back(NCPB)方案,以提高移动 Ad-hoc 网络中实时多对多视频游戏的鲁棒性。NCPB 方案利用了视频游戏业务流量具有周期性的特点,每个节点在广播当前周期产生的数据包时,在其后部搭载由上一周期从邻居节点收到数据包生成的 RLNC 编码数据包,使得每个节点可以最大程度地恢复它在上一周期中丢失的数据包。

5.3 无线多媒体单播

除了无线网络组播/广播流媒体,通过网络编码也能提高无线网络单播流媒体服务质量。Katti 等^[4]针对无线 Mesh 网络中的多路单播数据流,提出了一种基于机会主义网络编码的数据转发协议 COPE,以显著提高无线网络的吞吐量。在 COPE 中,每个节点利用无线媒质的广播特性,侦听并保存其通信范围内某一段时间传输的数据包,同时通过定期状态广播通知其邻居节点它当前缓存的数据包信息。然后,当每个节点对流经它的多个单播流进行网络编码时,有针对性地选择合适的数据包进行编码,使得更多的邻居节点可以利用该编码数据包解码,获得其所需的原始数据包。H. Seferoglu 等^[18]在 COPE 协议的基础上,提出了一种视频感知机会网络编码(video-aware opportunistic network coding)技术,以提高无线网络中多路单播视频流的传输质量。其核心思想是:每个节点在对多路单播视频流进行网络编码时,不但考虑了生成编码数据包被多个邻居节点解码的概率,而且考虑到其中包含视频数据的重要程度及其解码截止时间,使得重要的视频数据或解码时间紧迫的视频数据能优先获得解码。针对该技术,作者给出了 3 种实现方案:NCV, NCVD 以及 NC-RaDio。NCV 为基准方案,不但可以取得与 COPE 相同的吞吐量增益,而且能优化视频传输质量,其主要原理是每个节点以其发送队列头部数据包为主数据包(primary packet),同时结合其相邻节点缓存的侦听数据包信息,选择能最大化传输吞吐量以及传输质量的网络编码方案。NCVD 是 NCV 的直接改进,可以进一步提高网络吞吐量和视频传输质量。在 NCVD 方案中,每个节点选择的主数据包具有更大的自由度,发送队列中的任一数据包都可以作为主数据包,不再局限于从发送队列头部选择,从而也相应增加了该节点可供选择的网络编码方案。NC-RaDio 方案则是通过扩展传统的流媒体率失真优化传输框架 RaDio^[49],使之能处理多路流媒体间的网络编码,从而为每个节点选出最优的网络编码方案。与上述两种方案相比,NC-RaDio 方案的性能最好,但是复杂度也最高。针对基于机会主义网络编码的无线网络多路视频传

输, H. Seferoglu 等^[20]还研究了网络编码感知的分布式码率控制与调度算法,使得不同流之间可以获得更多的网络编码机会,从而取得更好的视频传输效率和质量。Tao 等^[50]提出了一种能量优化的无线 Ad-hoc 网络多媒体多路径并行传输方案,它采用网络编码实现传输分集,有效降低了无线节点的传输能量消耗。Xu 等^[51]结合系统网络编码技术^[39]以及延迟受限的局部反馈机制,提出了一种适合无线多跳丢包网络中流媒体单播业务的网络编码传输方案,它能及时、自适应地应对无线多跳网络不稳定、时变的丢包率,以较低的传输冗余获得稳定的、可靠的高传输吞吐量,并有效降低了端到端传输延迟,取得了较均衡的整体性能。

无线网络编码还可为无线视频协作单播传输提供支持。Liu Yong 等^[52]面向相对稳定的无线 Mesh 网络,提出了一种基于网络编码的 H. 264/SVC 可伸缩编码视频流协作传输方案,它首先在源-目的节点对之间选择多条路由,重要性高的基本层视频流通过信道状况较好的路由传输,然后利用不在选定路由之上的空闲协作节点对侦听到的相邻层视频进行基于网络编码的局部重传,修复受损的相邻层视频,提高 SVC 视频传输的可靠性。Nikolaos Thomos 等^[14]则提出了一种基于网络编码的 overlay 网络多源视频协作传输方案,它对优化具有源分集和路径分集的分布式网络视频传输很有借鉴意义,其主要思想是利用一种基于非系统 Raptor 码的网络编码提高传输编码数据的分集特性。仿真实验表明,对于简单的规则或非规则 overlay 网络拓扑,该传输方案可以提高 overlay 网络中视频传输的性能。然而,如何利用无线信道广播特性,将该方案拓展到分布式无线网络,是一个值得研究的问题。

此外,无线网络中两个节点通过中间节点交换信息也可以看作为两个传输方向相反的单播会话。Wu Yunnan 等^[53]利用无线网络物理层的广播特性,提出了一种基于网络编码的无线节点信息交换方法,用以有效提高无线网络中的信息交换效率。他们同时指出通过适当的图转换,信息交换问题可以转化为信息组播问题。S. Karande 等^[54]结合跨层设计技术,将上述信息交换方法应用到无线视频,提出了一种高效的无线视频信息交换方案 CLIX。它不直接丢弃物理层受损的视频数据包,而是根据该数据包受损的位置以及受损程度有选择地将其上传到链路层或以上层进行网络编码。基于 H. 264 的无线视频传输实验表明,该方案不但可以提高网络吞吐量,而且能改善无线视频质量。V. Stankovic 等^[55]提出了一种基于网络编码的双向视频通信系统,即两个终端用户通过基站实现双向通信。该系统中,每个用户对视频信号经信源、信道编码与调制后再发送给基站,基站则采用物理层网络编码来减少实现双向通信所需的下行传输次数。该系统根据基站采用的信号中继模式 AF (amplify-and-forward) 和 DF (decode-and-forward),给出了相应的实现方案。在 AF 模式中,基站直接对接收到的信号进行网络编码并广播给两个用户;而在 DF 模式中,基站先对接收到的信号进行信道解码,再对解码后的信号重新调制进行网络编码。实验结果表明,无论对于 AF 模式还是 DF 模式,采用网络编码都有利于提高双向视频通信的效率与质量。

5.4 无线视频会议

Wang Hui 等^[23]提出了一种基于网络编码的高效、鲁棒

无线多方视频会议方案。该方案中,每个节点将自身产生的视频数据以及从邻居节点侦听到的视频数据结合在一起进行随机网络编码,并将生成的编码数据包发送给基站。如果某个节点发现仅通过侦听到的数据不足以解码恢复其他节点的源数据时,将向基站请求发送更多的数据协助解码。基站根据每个节点的请求数,计算出其最大值,由接收到的数据包重编码生成相应数量的数据包,广播给所有节点,使之能解码恢复出其他节点的源数据。这种联合节点和基站的网络编码策略可以有效保证多方传输信息的鲁棒性。同时,为了满足视频会议系统的严格时延要求,该方案利用各节点的双缓冲以及基站的单缓冲,设计了一种流水线解编码调度策略,它可使奇偶“代”的视频数据包依次在用户节点和基站完成编码、重编码以及解码操作,将端到端传输延迟控制为 $d=2T+2p$,其中 T 为一“代”视频数据持续的时间, p 为用户节点与基站之间的无线传播延迟,通常较小可以忽略不计。当 $T=1/30s$ 时,该系统的端到端传输延迟约为 66.7ms,可以满足视频会议的实时性要求。Zong Xiaofei 等^[56]提出了另一种基于网络编码的无线视频会议系统,其特点是采用了符号级网络编码 (symbol-level network coding)^[57],它是一种介于数据包级网络编码和物理层网络编码^[58]之间的网络编码技术,它以少量的比特序列(称为符号)为单位进行网络编码,在整个数据包出现误码时仍能有效使用。该系统设计了 3 种实施方案:基准方案以及两种增强方案。在基准方案中,每个节点仅能接收基站广播信息,不能侦听邻居节点的传输信息。两种增强方案则允许启用节点侦听功能,可进行节点间的机会网络编码。不同之处是增强方案一采用了简单的 XOR 网络编码,增强方案二则采用了 RLNC。增强方案一中的基站进行网络编码时,需要知道各个节点缓存的符号信息,而增强方案二中的节点和基站需根据接收到的符号好坏情况选择不同的编码策略:如果某个接收符号判决为“坏”符号(即该符号与最接近有效码字的汉明距离大于某个阈值),其相应的编码系数取为 0,否则为一随机数。实现结果表明,增强方案二性能最佳,增强方案一次之,基准方案最差。

6 研究展望

尽管目前基于网络编码的无线多媒体技术研究已取得令人鼓舞的进展,但还存在着若干尚未解决的问题或尚未探索的研究方向。在本文的最后,将结合相关技术领域的研究现状,对未来一段时间内网络编码在无线多媒体传输系统中的应用研究趋势进行展望。

(1) 如何进一步降低网络编码给无线多媒体传输系统带来的负面影响程度,如降低实现复杂度及传输延迟,仍是未来一个重要研究方向。通常网络编码对无线多媒体传输性能的提升随着其设计和实现复杂度的增加而增加,因而综合考虑性能增益和实现复杂度,实现最小代价的网络编码无线多媒体传输,仍是一个值得深入研究的问题。

(2) 如何在基于网络编码的无线多媒体系统中进行有效的跨层设计。跨层设计是无线多媒体系统中常用的一种传输优化技术,它通过在不同协议层之间交互信息,使各层协议能更好地根据时变的无线网络状态进行自适应的优化配置,以提高无线多媒体系统的整体性能。目前,面向网络编码无线

多媒体系统的跨层设计与优化研究还不多,相关应用机制还很不成熟。可以预见,如何利用跨层设计技术设计自适应优化的网络编码无线多媒体传输机制,将是未来的重要研究方向。

(3) 如何结合分布式信源编码设计分布信源-网络编码联合优化的无线多媒体传输机制。以分布式视频编码^[59]为代表的分布式信源编码是无线多媒体传感器网络中一种很有应用潜力的多媒体编码技术。与此同时,无线多媒体传感器网络具有高度的网络分集特性,也非常适合网络编码的应用。因而,如何对分布式信源编码和网络编码进行联合设计与优化,也是值得关注的方向。该方面的研究成果可望为实现高效的无线多媒体传感器网络提供有力的支持。

(4) 基于网络编码的无线多媒体系统安全性研究。网络编码允许中间节点参与编码,可能存在恶意中间节点添加破坏信息或非授权信息,导致用户节点无法完成正确解码,或无法接收到其期望的流媒体节目。因此,如何保证网络编码无线多媒体系统的安全性,是其走向实用化的重要前提之一,也是未来的重要研究方向。

总之,将网络编码应用到无线多媒体系统中,从理论到实际应用都处于不断完善和丰富阶段,需要展开全方位的系统研究。随着基于网络编码的无线多媒体技术研究的不深入,将会有越来越多的无线多媒体传输业务从中受益。可以预见,网络编码将极有希望成为新一代无线多媒体传输系统中的一项关键技术。

参 考 文 献

- [1] Swede R A, Cai N, Li S Y R, et al. Network information flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216
- [2] Fragouli C, Boudec J-Y L, Widmer J. Network coding: An instant primer [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006, 36(1): 63-68
- [3] 杨林, 郑刚, 胡晓惠. 网络编码的研究进展 [J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(3): 400-407
- [4] Katti S, Rahul H, Hu W, et al. XORs in the air: Practical wireless network coding [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(3): 497-510
- [5] 夏卓群, 陈志刚, 赵明, 等. 无线网状网中自适应网络编码的MPTCP研究与设计 [J]. 计算机科学, 2010, 37(4): 106-109, 124
- [6] Gkantsidis C, Rodriguez P R. Network coding for large scale content distribution [C] // IEEE INFOCOM. Miami, FL, United states, 2005
- [7] Dimakis A G, Godfrey P B, Wainwright M J, et al. Network coding for distributed storage systems [C] // IEEE INFOCOM. Anchorage, AK, United states, 2007
- [8] Yu Z, Wei Y, Ramkumar B, et al. An efficient signature-based scheme for securing network coding against pollution attacks [C] // IEEE INFOCOM. Phoenix, AZ, United States, 2008
- [9] Thomos N, Frossard P. Network coding and media streaming [J]. Journal of Communications, 2009, 4(9): 628-639
- [10] 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
- [11] Shojania H, Li B. Random network coding on the iPhone: Fact or fiction? [C] // Proceedings of the International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video(NOSSDAV). Williamsburg, VA, United States, 2009
- [12] 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
- [13] 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
- [14] Thomos N, Frossard P. Collaborative video streaming with Raptor network coding [C] // IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Hannover, Germany, 2008
- [15] Thomos N, Chakareski J, Frossard P. Randomized network coding for UEP video delivery in overlay networks [C] // IEEE International Conference on Multimedia and Expo. New York, NY, United States, 2009
- [16] Cleju N, Thomos N, Frossard P. Network Coding Node Placement for Delay Minimization in Streaming Overlays [C] // IEEE International Conference on Communications. Cape Town, South Africa, 2010
- [17] Thomos N, Frossard P. Raptor network video coding [C] // 1st ACM Workshop on Mobile Video. New York, NY 10036-5701, United States, 2007
- [18] Seferoglu H, Markopoulou A. Video-aware opportunistic network coding over wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(5): 713-728
- [19] Seferoglu H, Markopoulou A. Distributed rate control for video streaming over wireless networks with intersession network coding [C] // 17th International Packet Video Workshop. Seattle, WA, United States, 2009
- [20] Seferoglu H, Markopoulou A, Kozat U. Network coding-aware rate control and scheduling in wireless networks [C] // IEEE International Conference on Multimedia and Expo. New York, NY, United States, 2009
- [21] Wang H, Xiao S, Kuo C C J. Robust and flexible wireless video multicast with network coding [C] // IEEE Global Telecommunications Conference. New York, NY, United States, 2007
- [22] Wang H, Kuo C C J. Robust video multicast with joint network coding and AL-FEC [C] // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Piscataway, NJ 08855-1331, United States, 2008
- [23] Wang H, Chang R Y, Kuo C C J. Wireless multi-party video conferencing with network coding [C] // IEEE International Conference on Multimedia and Expo. New York, NY, United States, 2009
- [24] Wang H, Kuo C C J. Robust video multicast with joint network coding and video interleaving [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2010, 21(2): 77-88
- [25] 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
- [26] 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

- [27] Park J-S, Gerla M, Lun D S, et al. CodeCast: A network-coding-based ad hoc multicast protocol [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2006, 13(5):76-81
- [28] Liu X, Cheung G, Chuan C-N. Structured network coding and cooperative wireless ad-hoc peer-to-peer repair for WWAN video broadcast [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2009, 11(4):730-741
- [29] 刘亚杰, 窦文华. 基于网络编码的 P2P 流媒体 [J]. *计算机工程与科学*, 2006, 28(9):33-34, 38
- [30] 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
- [31] 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
- [32] 李成林, 熊红凯. SVC 分层视频流在有线网络中的多码率组播优化 [J]. *信息技术*, 2009, 10:1-5
- [33] 卢冀, 肖嵩, 吴成柯. 基于网络编码的 SVC 高效传输系统 [J]. *西安电子科技大学学报*, 2010, 37(3):405-411
- [34] Li S Y R, Yeung R W, Cai N. Linear network coding [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(2):371-381
- [35] 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
- [36] Ho T, Koetter 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
- [37] 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
- [38] Shojania H, Li B. Parallelized progressive network coding with hardware acceleration [C]// *IEEE International Workshop on Quality of Service*. Evanston, IL, United States, 2007
- [39] Yazdi A A, Sorour S, Valae S, et al. Optimum network coding for delay sensitive applications in WiMAX unicast [C]// *IEEE INFOCOM*. Rio de Janeiro, Brazil, 2009
- [40] Nguyen K, Nguyen T, Cheung S-C. Peer-to-peer streaming with hierarchical network coding [C]// *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*. Piscataway, NJ 08855-1331, United States, 2007
- [41] Albanese A, Blomer J, Edmonds J, et al. Priority encoding transmission [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1996, 42(6):1737-1744
- [42] Xiao S, Wang H, Kuo C C J. Priority ordering and packetization for scalable video multicast with network coding [C]// *Pacific Rim Conference on Multimedia*. Hong Kong, China, 2007
- [43] He Y, Lee I, Guan L. Video multicast over wireless Ad-hoc networks using distributed optimization [C]// *Pacific Rim Conference on Multimedia*. Heidelberg, D-69121, Germany, 2007
- [44] 熊志强, 黄佳庆, 刘威, 等. 无线网络编码综述 [J]. *计算机科学*, 2007, 34(3):6-9, 16
- [45] Li Z, Li B, Wang M. Optimization Models for Streaming in Multihop Wireless Networks [C]// *IEEE International Conference on Computer Communications and Networks*, 2007
- [46] Yu Y, Zhou Y, Du S. Video multicast over mobile Ad-hoc networks using network coding [C]// *International Conference on Management and Service Science*. Wuhan, China, 2009
- [47] Nguyen D, Tran T, Nguyen T, et al. Hybrid ARQ-random network coding for wireless media streaming [C]// *IEEE International Conference on Communications and Electronics*. Piscataway, NJ 08855-1331, United States, 2008
- [48] Kondo Y, Yomo H, Yamaguchi S, et al. Reliable wireless broadcast with random network coding for real-time applications [C]// *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. Budapest, Hungary, 2009
- [49] Chou P A, Zhou M. Rate-distortion optimized streaming of packetized media [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2006, 8(2):390-404
- [50] Tao X, Zhang C, Lu J. Network coding for energy efficient wireless multimedia transmission in ad hoc network [C]// *International Conference on Communication Technology Proceedings*. Guilin, China, 2006
- [51] Xu J, Li X, Fu Z, et al. A robust and delay-optimized network coding strategy for unicast streaming over multihop packet-lossy networks [C]// *IEEE International Conference on Computational Problem-Solving 2010*. Lijiang, China, 2010
- [52] Yong L, Lifeng S, Shiqiang Y. A network coding scheme for SVC streaming over wireless mesh network [C]// *Proceedings of the 2009 ACM International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*. Leipzig, Germany, 2009
- [53] Wu Y, Chou P A, Kung S-Y. Information Exchange in Wireless Networks with Network Coding and Physical-layer Broadcast [C]// *The 39th Annual Conference on Information Sciences and Systems*. Baltimore, MD, USA, 2005
- [54] Karande S, Misra K, Radha H. CLIX: Network Coding and Cross Layer Information Exchange of Wireless Video [C]// *IEEE International Conference on Image Processing*. Atlanta, GA, USA, 2006
- [55] Stankovic V, Fagoonee L, Moinian A, et al. Two-way video communication based on network coding [C]// *IEEE International Conference on Image Processing*. Piscataway, NJ 08855-1331, United States, 2006
- [56] Zong X, Men A, Yang B. Symbol-level network coding based wireless video conference system [C]// *International Symposium on Computer Network and Multimedia Technology*. Wuhan, China, 2009
- [57] Katti S, Katabi D, Balakrishnan H, et al. Symbol-level network coding for wireless mesh networks [J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2008, 38(4):401-412
- [58] Zhang S, Liew S C, Lam P P. Hot topic: Physical-layer network coding [C]// *Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. Los Angeles, CA, United States, 2006
- [59] Pereira F, Torres L, Guillemot C, et al. Distributed Video Coding, Selecting the most promising application scenarios [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2008, 23(5):339-352