

DOI: 10.7652/xjtuxb201312003

用于无线多跳网络视频流传输的 优先级机会网络编码

崔华力¹, 钱德沛^{1,2}, 张兴军¹, 伍卫国¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 北京航空航天大学中德软件技术联合研究所, 100191, 北京)

摘要: 针对多视频流共享传输链路时存在的编码数据包不匹配问题, 提出一种用于无线多跳网络视频流传输的优先级机会网络编码方法。该方法对各传输流中优先等级不同的数据包执行不同的编码操作, 在源端对视频流分段进行流内编码, 并通过添加冗余增强传输可靠性; 在网络中间节点, 对优先等级高的数据包进行流内冗余编码, 对次优先等级数据包按队列次序与另一视频流进行流间编码, 对剩余数据包则直接传输或选择性丢弃。该方法能尽力保证视频流基本层数据被接收, 同时一定程度上减少了发送次数, 充分利用有限网络带宽资源。实验结果表明, 所提方法能够有效地提升视频传输质量, 较之已有的机会网络编码方法, 接收端视频质量平均值提高了 2 dB 以上。

关键词: 网络编码; 视频流传输; 不等差错保护

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)12-0013-06

Prioritized Opportunistic Network Coding for Video Streaming over Wireless Multi-Hop Networks

CUI Huali¹, QIAN Depei^{1,2}, ZHANG Xingjun¹, WU Weiguo¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Sino-German Joint Software Institute, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A prioritized opportunistic network coding scheme is proposed to solve the mismatch problem of coding opportunities between multiple streams. Packets with different priorities are treated differently. The generation-based intra-session coding with redundancy is performed at the source nodes to increase transmission reliability. At the intermediate nodes, the packets with highest priority are re-encoded with redundancy data within the generation, those with lower priority are performed XOR operation with the packets of another stream, and the remaining packets are forwarded directly or discarded selectively. This strategy ensures that the base layer packets of the streaming are received by the destination node with high probability and that the number of sending packets is reduced while taking full advantage of the limited network bandwidth. Experimental results show that the proposed scheme enhances the video quality effectively, and improves the average peak SNR by more than 2 dB in a comparison with the existing opportunistic coding scheme.

Keywords: network coding; video streaming; unequal error protection

收稿日期: 2013-04-25。 作者简介: 崔华力(1978—), 男, 博士生; 张兴军(通信作者), 男, 副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60673180); 国家科技支撑计划资助项目(2011BAH04B03); 国家高技术研究发展计划资助项目(2011AA01A204, 2012AA01A306)。

网络出版时间: 2013-09-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130922.0933.007.html>

在 Ad Hoc 和无线 Mesh 网等多跳无线网络存在着带宽资源有限、传输链路不稳定、突发丢包率高等问题,因此如何在无线多跳网络中对高带宽、低延迟需求的视频流传输应用提供服务保障面临着巨大挑战^[1]。为减少传输带宽需求,提高网络吞吐量,在多源数据流共享传输链路的情况下,通常采用对属于不同流的数据包进行编码组合后再进行传送的方法,这称之为流间(inter-session)网络编码^[2]。在流间网络编码中却存在着由于数据流速率不相同或因网络突发连续丢包带来的数据包编码不匹配问题,即面临某一时刻发送缓冲区中的数据包包只属于同一传输流的情形时,应对数据包执行何种操作的问题。网络中间节点接收缓冲区各队列中数据包排队情况如图1所示。

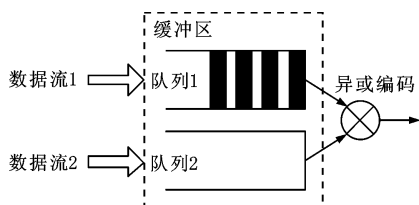


图1 网络中间节点编码缓冲区队列示意图

为解决这一问题,文献[3]提出了一个基于马尔可夫决策过程(Markov Decision Process, MDP)的解决策略。该方法通过计算数据包的传输代价和延迟代价,从理论上分析了在每一个时隙是否应该对当前缓冲区中的数据包包进行发送操作,但这一过程计算复杂度较大,并不适合在实际系统中使用。

COPE 协议^[4]是对流间网络编码的最早实现,对这一问题采取的是机会编码方式,在无编码机会时,对数据包采用传统的存储-转发策略进行处理。文献[5]将机会式网络编码应用到无线网络的广播重传中,从而提高了无线网络的数据包传输效率。与对数据包执行网络编码操作后再发送相比,机会编码方式增加了节点传输次数,从而在一定程度上降低了网络吞吐量。为了提高吞吐量,数据包可以通过等待策略以获得更多的编码机会^[6],但这又导致了网络传输延迟的增大,而对于实时视频流而言,网络延迟对视频质量有着重要影响。同时,上述方法都没有针对视频应用考虑报文的不同重要级别,对于具有不同重要等级数据包的视频流媒体传输并不能提供很好的支持。文献[7]提出了一种视频内容相关的机会网络编码方法,网络中间节点按一定的策略选择性地对接收缓冲区中数据包进行编码传输,从而在达到最大化网络吞吐量的同时使视频传

输质量最优。而对于当缓冲区中只存在某单一传输流数据的情形,该方法采用的也是机会编码传输。

为提高视频传输质量,并尽量减少带宽需求,针对无线多跳网络环境单播视频流传输,本文提出了一种优先级区分的机会网络编码方法。利用视频流中数据包重要等级不同的特性,在机会网络编码基础上,对不同优先等级的数据包采取不同的编码策略进行传输,从而保证了网络吞吐量,提高了视频流传输质量。

1 系统模型

1.1 无线信道模型

从网络应用层角度来看,无线链路一个明显的特征就是传输过程中丢包的突发性。本文采用二阶马尔可夫链(2-state Markov),即 Gilbert-Elliott (GE)模型^[8]对无线信道进行模拟。当链路处于“好”状态(G)时,可认为传输过程中链路不发生丢包,当链路处于“坏”状态(B)时,数据包在传输过程中将会丢失。 P_{gg} 和 P_{bb} 分别表示链路当前状态为G和B,下一状态仍保持当前状态的概率。

P_G 和 P_B 分别表示链路在G和B状态的平均概率,其计算公式分别为 $P_G = \frac{(1-P_{bb})}{(2-P_{bb}-P_{gg})}$, $P_B = 1 - P_G$ 。信道在G状态下持续的次数为 $L_G = 1/(1-P_{gg})$,在B状态下,平均的突发丢包长度 $L_B = 1/(1-P_{bb})$ 。

1.2 视频失真模型

这里假设视频流数据包分为 $L+1$ 个等级,基本层为 $l=0$,增强层为 $l=1,2,3,\dots,L$,数据包的重要等级随着 l 的增大而降低,同时视频流各层之间有着顺次依赖的关系^[9]。

实际应用中,在源端将一个视频流分成若干段生成流进行传输。在前 $l-1$ 等级的数据包都正确接收到时,第 l 等级的数据包到达对于一段视频流的失真减少带来的影响为 Δd_l , $0 < \Delta d_l < 1$, $\sum_l \Delta d_l = 1$, $P_d(l)$ 为正确收到第 $0 \rightarrow l$ 等级数据包的概率,那么这一段生成流成功接收后带来的总质量失真减少可表示为

$$\sum_{l=0}^L \Delta d_l P_d(l) \quad (1)$$

为提高数据传输可靠性,各段视频生成流经过流内(intra-session)编码^[10]后进行传输,接收端在收到一定数量的编码数据包后可对这一段生成流完成解码。因此,在接收端的重建视频的预期失真可

表示为

$$D_0 - \sum_{l=0}^L \Delta d_l \prod_{l' < l} \left(\sum_{j=K_{l'}(1+\omega)}^{N_{l'}} \binom{N}{j} (1-\epsilon)^j \epsilon^{N-j} \right) \quad (2)$$

式中: D_0 表示在所有数据包都无法解码时的预期最大失真; $K_{l'}$ 和 $N_{l'}$ 分别指第 l' 个编码块的初始数据包个数和编码后数据包个数; ϵ 指数据包由于丢失或延迟而不能在播放时间内到达的概率; ω 为大于 0 的实数。

伽罗华域大小 q 和解码需要的数据包个数 $K(1+\omega)$ 之间的关系^[11]为

$$K(1+\omega) = \min \left\{ K \frac{q}{q-1}, K+1 + \frac{1-q^{-K+1}}{q-1} \right\} \quad (3)$$

通常取编码域 $GF(2^8)$ 是足够的,这时在接收端的解码概率可以达到 99.6%^[12]。

针对视频流数据特性,不同等级的数据包对视频传输失真会产生不同程度的影响。可扩展视频编码(Scalable Video Coding, SVC)流中,一组编码块最终能否完成解码取决于视频的基本层数据是否完整收到,而获得越多增强层数据,意味着更好的视频质量。同时,应考虑到在网络编码中,需要接收到一定数量的编码数据包才能够完成解码。因此,有必要在传输过程中对不同重要等级的数据包进行区分考虑并恰当选择编码数据块大小。

2 编码策略

网络编码过程中,结合视频报文重要等级不同的特性来选择编码策略,从而能够充分地利用有限的网络资源为视频流传输提供更好的服务质量。从以下两个方面对编码策略进行阐述。

2.1 段内分块编码

这里选用视频流中每段由 3 个 GOP(Group of Pictures) 组成^[13]。每个 GOP 中的访问单元(Access Unit, AU)按照质量等级不同分成多个数据块^[14]。一个段内所有 AU 中的数据包按照重要等级的不同进行排序,最重要的基本层数据作为数据块 1,增强层数据包按级别为序作为后续数据块。如图 2 所示,将每一个 AU 分为 3 个质量层: L0、L1、L2。所有 GOP 中数据包按照质量层等级的不同,组成 3 个不同重要程度的数据块。

分块完成后,对属于同一数据块内的数据包进行随机线性编码(Random Linear Coding, RLC)。根据当前链路的丢包情况添加冗余,发送至下一跳节点。

编码后的数据包需要添加相关的报头信息来进行标识,包括源节点 ID,生成流 ID,数据块 ID,重要等级 ID,编码向量等。考虑到报头信息的开销,以及便于编码,本文中数据包大小均选取为 1 024 B。

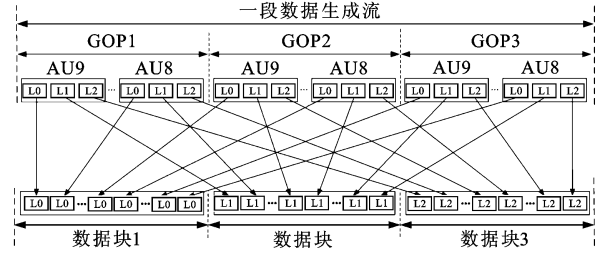


图 2 一段长为 3 个 GOP 的数据流中的数据包分块

2.2 基于优先级的多队列编码策略

首先,网络中间节点开辟不同的接收缓冲区,分别存放来自不同传输流的数据。然后,在各个缓冲区中按照优先等级的不同,将数据包存放到编码队列中,如在队列 q_0 中存放基本层数据包,队列 q_1 至 q_L 存放来自增强层的数据包。多缓冲区多队列方法将来自不同源、不同生成流、以及优先等级不同的数据包分别存放到不同的编码队列。对不同编码队列中的数据包采取不同的处理策略,如图 3 所示。

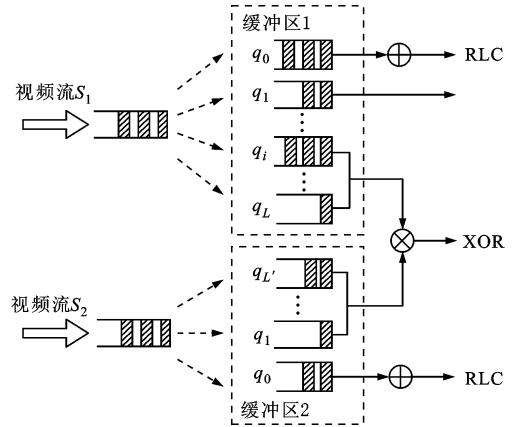


图 3 基于优先级的多缓冲区多队列编码

(1) 流内冗余随机线性编码策略。对各缓冲区中队列 q_0 的数据包,即视频流中基本层的数据包,只进行流内冗余编码,使得尽可能被接收。这里分别对每一个数据块内的数据包以随机线性编码的方式进行。

假设第 j 个数据块中数据包个数为 K_j 个,则根据节点下一跳链路的丢包率 ϵ_j ,在流内编码时的冗余添加量 r_j 为

$$r_j = \left\lceil \frac{K_j}{1-\epsilon_j} - K_j \right\rceil \quad (4)$$

(2) 流间异或编码策略。为提高网络吞吐量,中间节点对来自不同源的视频流进行流间编码操作,如进行简单可行的异或操作。

对于缓冲区中队列 q_L 至 q_1 , 逐次计算队列 q_L 到队列 q_i ($i=L, L-1, \dots, 1$) 的数据包平均到达速率。队列 q_L 至 q_i 的平均速率为

$$R_s^{L \rightarrow i} = \frac{\sum_{l=L}^i R_s^l}{L-i+1} \quad (5)$$

对于两个流速不同的数据流 ($R_{s1} > R_{s2}$), 在 s_1 中可以找到某一增强层 i , 满足

$$\min_i |R_{s1}^{L \rightarrow i} - R_{s2}^{L \rightarrow i}|, 1 \leq i \leq L \quad (6)$$

即对于流速较大的视频流而言,总是可以找到一个增强层平均速率 $R_{s1}^{L \rightarrow i}$ 最接近另一视频流所有增强层平均速率。对这两个缓冲区中累加平均速率最接近的队列进行异或编码操作。在某一出现突发丢包时,另一流的数据包将根据播放时限等待一定的时间进行编码。

(3) 直接转发策略。对于视频流 s_1 中的 q_1 到 q_{i-1} 队列中的数据包,采取一般的存储转发策略。

(4) 丢弃策略。流间编码过程中,若 $R_{s1}^{L \rightarrow i} > R_{s2}^{L \rightarrow i}$ ($1 \leq i \leq L$), 则部分属于流 s_1 的数据包将不能获得编码机会。这里对缓冲区 1 中属于队列 q_L 的部分多余数据包采取直接丢弃策略。若 $R_{s2}^{L \rightarrow i} > R_{s1}^{L \rightarrow i}$ ($1 \leq i \leq L$), 则丢弃缓冲区 2 中队列 q_L 中的部分数据包。

这里主要考虑因素包括:第一,重要数据包采用流内冗余编码能够提高其成功传输概率;第二,流间编码能够提高网络利用率,但代价是可能需要花费一定的额外时间来等待编码机会,同时,监听链路上的丢包会导致流间编码的数据块无法完成解码操作^[15];第三,选择性丢弃部分不重要数据包以减轻网络负载。

因此,根据数据包重要等级不同采取不同的编码策略并选择性地丢弃不重要的数据包,这为提高网络吞吐量和降低网络延迟这对矛盾提供了一个较好的折中,同时也提高了视频流传输质量。

3 实验结果与分析

仿真实验采用 Visual C++ 2008 作为开发平台,模拟两个视频流在无线多跳网络中传输的场景,拓扑结构如图 4 所示。流媒体服务器 S_1 传输视频流经过 Mesh 路由器 R_1 、 R_3 和 R_4 到达客户端 C_1 , S_2 传输另一视频流至 C_2 , 两个流共享传输链路 R_3

$\rightarrow R_4$ 。 R_3 对收到的数据包进行编码, R_4 在收到编码数据包后,以广播的方式发送至 C_1 和 C_2 。无线网络的广播传输方式使得单播数据流在传输时能够被邻居节点监听到。如图 4 所示,终端节点 C_1 可以监听到 R_2 传输至 R_3 的数据。同样, C_2 可以监听到 R_1 传输至 R_3 的数据。利用这一特性,监听到的数据包将会被终端节点保存下来,以用于对收到的编码数据包进行解码操作。图 4 中带箭头的实折线称为直传链路,带箭头的虚折线称为监听链路。链路的丢包率在 1% 到 30% 之间变化。通过 GE 模型来模拟链路的突发丢包特性,突发丢包长度设为 9。

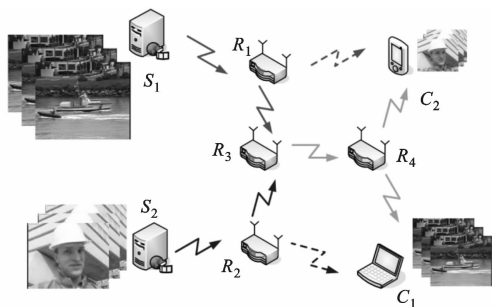


图 4 无线多跳网络上的多源视频流传输

这里使用 QCIF (176 × 144 像素/帧) 和 CIF (352 × 288 像素/帧) 两种视频格式,视频序列为 Foreman 和 Coastguard。帧速率均为 30 帧/s。共享传输链路的带宽设为 512 kb/s。视频传输过程中由于丢包和延迟产生的失真可按 1.2 节中的计算过程得出。采用峰值信噪比 R_{PSN} 作为视频质量评判标准。

对 3 种传输策略进行比较,对比所有接收端获得的视频流平均 R_{PSN} 值,分别为:① Non-NC 为对视频传输流的数据包不进行编码直接传输;② Opp-NC 为采用 COPE 协议中的机会编码 (opportunistic coding) 策略;③ Pri-NC 为本文提出的基于优先等级 (Priority) 的机会编码方法。每组实验都至少进行 10 次以上,取平均值作为结果。

首先对 Foreman 和 Coastguard 两个传输速率均为 512 kb/s 的 QCIF 视频流进行测试,计算两个接收端 C_1 和 C_2 获得的视频质量的平均值。这时引起编码数据包不匹配的原因主要在于传输过程中的突发连续丢包。在平均丢包率增大的情况下,两个接收端在各传输策略下所得到的平均 R_{PSN} 值变化如图 5 所示,可见随着丢包率的增加, R_{PSN} 值都有着不同程度的下降。采用网络编码方法较之不进行编码的方法可以获得更高的 R_{PSN} 值,本文的 Pri-NC 方法也优于机会编码方法。

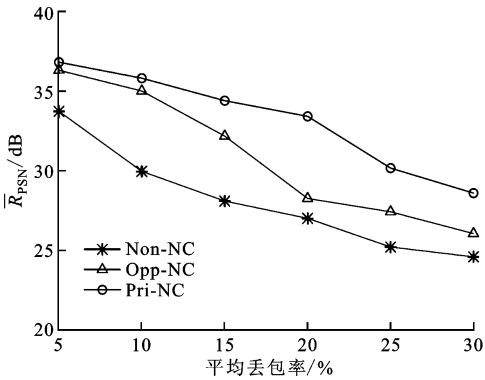
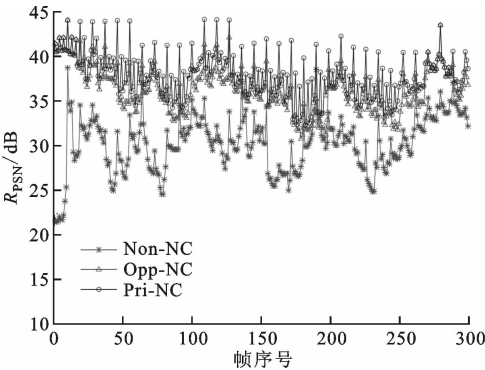
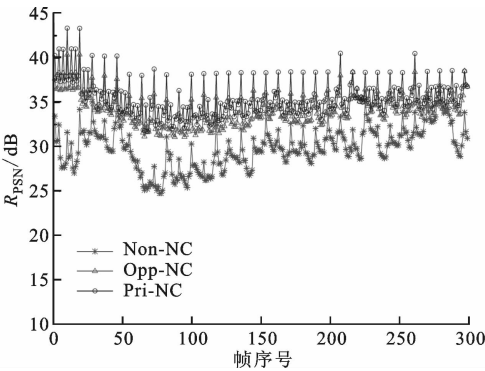


图 5 两个相等速率视频流的平均 R_{PSN} 值

如图 6 所示,图 6a 和图 6b 分别是 C_1 和 C_2 两个接收端在网络平均丢包率为 10% 的情况下,接收到视频序列各帧 R_{PSN} 值的变化情况。对视频流不进行编码的 Non-NC 方法产生的 R_{PSN} 值较低,抖动较多。本文的 Pri-NC 方法在大多数情况下也都能获得比 Opp-NC 更高的 R_{PSN} 值。



(a)Foreman(QCIF)序列各帧的 R_{PSN} 值



(b)Coastguard(QCIF)序列各帧的 R_{PSN} 值

图 6 C_1 和 C_2 收到视频序列的 R_{PSN} 值

接着对两个速率不相同的视频流传输进行测试。Foreman(QCIF 格式)序列传输速率为 256 kb/s, Coastguard(CIF 格式)序列的速率为 512 kb/s。在不同网络丢包率下,两个接收端收到的视频流平均

R_{PSN} 值变化情况如图 7 所示。与流速率相同时类似,本文的 Pri-NC 策略可以获得更好的视频传输质量。

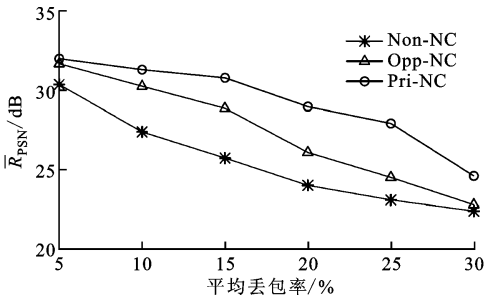
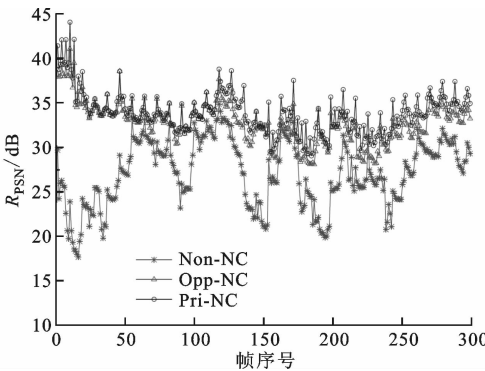
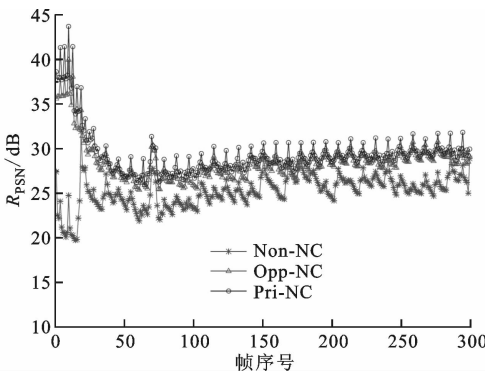


图 7 两个不等速率视频流的平均 R_{PSN} 值

图 8a 和图 8b 分别是两个接收端在网络平均丢包率为 15% 的情况下,视频序列各帧的 R_{PSN} 变化情况。与其他两种方法相比较,采用 Pri-NC 方法可以使绝大多数帧获得更高的值。



(a)Foreman(QCIF)序列各帧的 R_{PSN} 值



(b)Coastguard(CIF)序列各帧的 R_{PSN} 值

图 8 C_1 和 C_2 收到视频序列的 R_{PSN} 值

4 结 论

本文针对多视频流共享传输链路面临的编码机会选择问题,提出了一种基于优先级的机会编码方法。该方法根据视频流数据包优先等级的不同在源

端进行分块流内编码,中间节点对收到的数据包按照优先级别放入对应的编码队列,然后对不同编码队列中的数据包分别执行流内编码、流间编码、直接传输或选择丢弃的操作。实验结果表明,该策略能够充分利用网络带宽,提高视频传输质量。

参考文献:

- [1] QIU Xiaoling, LIU Haiping, GHOSAL D, et al. Enhancing the performance of video streaming in wireless mesh networks [J]. *Wireless Personal Communications*, 2011, 56(3): 535-557.
- [2] HO T, LUN D S. *Network coding: an introduction* [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 2008: 87-110.
- [3] HSU Y P, ABEDINI N, RAMASAMY S, et al. Opportunities for network coding: to wait or not to wait [C]//*Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Theory*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 791-795.
- [4] KATTI S, RAHUL H, HU Wenjun, et al. XORs in the air: practical wireless network coding [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, 16(3): 497-510.
- [5] 卢冀,肖嵩,吴成柯. 无线网络中应用机会式网络编码的广播重传方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(2): 68-72.
LU Ji, XIAO Song, WU Chengke. A broadcast retransmission method using opportunistic network coding in wireless networks [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(2): 68-72.
- [6] HUANG Yong, GHADERI M, TOWSLEY D, et al. TCP performance in coded wireless mesh networks [C]//*Proceedings of the 5th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 179-187.
- [7] 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.
- [8] KIM J, MERSEREAU R, ALTUNBASAK Y. Distributed video streaming using multiple description coding and unequal error protection [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(7): 849-861.
- [9] SCHWARZ H, MARPE D, WIEGAND T. Overview of the scalable video coding extension of the H. 264/AVC standard [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2007, 17(9): 1103-1120.
- [10] GOWAIKAR R, DANA A, HASSIBI B, et al. A practical scheme for wireless network operation [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(3): 463-476.
- [11] LUCANI D, MEDARD M, STOJANOVIC M. Random linear network coding for time-division duplexing: field size considerations [C]//*Proceedings of the IEEE Global Communications Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1-6.
- [12] CHOU P A, WU Yunnan, JAIN Y. Practical network coding [C]//*Proceedings of the 41st Annual Allerton Conference on Communication Control and Computing*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 1-10.
- [13] CUI Huali, QIAN Depei, ZHANG Xingjun, et al. Joint source-network coding optimization for video streaming over wireless multi-hop networks [C]//*Proceedings of the 75th IEEE Vehicular Technology Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 1-5.
- [14] NGUYEN T, LI Baochun, ELIASSEN F. Chameleon: adaptive peer-to-peer streaming with network coding [C]//*Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Computer Communications*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1-9.
- [15] RAYANCHU S, SEN S, WU Jianming, et al. Loss-aware network coding for unicast wireless sessions: design, implementation, and performance evaluation [C]//*Proceedings of the ACM International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*. New York, USA: ACM, 2006: 85-96.

(编辑 武红江)