

效率感知的无线网络编码机制

王斌^① 吴伟仁^① 岩延^{*②} 张宝贤^②

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院泛在与传感网研究中心 北京 100049)

摘要: 网络编码在无线网络中的应用可以显著提高无线网络的吞吐量和容量。然而,当前大多数的无线网络编码机制在进行编码操作时,都没有考虑将不同长度的报文编码在一起时的效率问题。该文研究了在进行网络编码操作时如何获得最优的每字节编码效率,并设计了编码效率感知的无线网络编码机制(coDing Efficiency aware Network coding, DEEN),以提升每字节的编码效率。模拟结果表明,DEEN协议能够有效地提升无线网络的容量。

关键词: 无线网络; 网络编码; 编码效率

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)01-0069-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00366

Efficiency-aware Localized Network Coding Mechanism for Wireless Networks

Wang Bin^① Wu Wei-ren^① Yan Yan^{*②} Zhang Bao-xian^②

^①(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

^②(*Research Center of Ubiquitous Sensor Networks, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Localized network coding is a promising technique to improve the performance of a wireless multihop network when multiple concurrent unicast sessions are present in the network. However, most existing mechanisms in this field do not consider the issue that the potential diversity in packet size has a big impact on the coding efficiency. In this paper, the issue of achieving optimal per-byte coding efficiency via localized network coding is studied. An efficient localized network coding mechanism is designed to provide high per-byte coding efficiency. Simulation results show that the designed mechanism can greatly improve the network throughput as compared with existing mechanisms.

Key words: Wireless networks; Localized network coding; Coding efficiency

1 引言

由于无线链路的不可靠性和无线信道的广播特性,使得无线网络成为非常适合网络编码发挥功效的一个重要领域。当前在网络编码领域已有大量的研究工作提出。Katti等人^[1]提出的机会网络编码机制COPE可以有效地提升多并发无线网络单播流的性能。结果表明COPE协议能够有效支持多路单播流,COPE是本文研究工作的基础。但是,在进行每次编码传输时,COPE仅仅尝试最大化能够编码在一起的原始报文数目,而没有深入考虑如何能够有效地增加每个传输字节的编码效率。同时,当进行编码操作时,COPE的单向先进先出(FIFO)的编

码方式在丢失率较高的无线网络环境中会限制在节点上的编码机会数目,也会导致网络编码效率的降低。文献[2]将网络编码与无线发送速率控制提升结合起来提升无线网络的吞吐量。分布式编码感知路由协议(DCAR)^[3]在路由寻路阶段能够找出源和宿之间的潜在路径,并能找出这些路径上的端到端潜在网络编码机会而不仅仅是两跳拓扑内的编码机会,以提升网络吞吐量。编码感知的机会路由机制(CORE)^[4]与基于累积编码确认机制的机会路由协议(CCACK)^[5]将网络编码与机会路由相结合来进行编码感知的路由。文献[6]将线性随机编码,速率控制与机会路由协议相结合以增大网络中的编码增益。上述无线网络中的网络编码研究成果虽然都能有效提升无线网络的吞吐量,然而这些工作都并未考虑如何提升进行网络编码时的效率问题,从而进一步提升网络容量。

2011-04-17 收到, 2011-09-28 改回

国家自然科学基金(60702074, 60970137)和国家科技重大专项(2010ZX03006-001-02)资助课题

*通信作者: 岩延 yany@gucas.ac.cn

某些本地化网络编码机制着眼于如何处理高丢失率无线网络中的编码问题。Rayanchu 等人^[7]提出了具有丢失感知能力的网络编码机制(CLONE), CLONE 在编码操作时通过加入足够的冗余信息来保证传输的可靠性,以减少总的传输次数。Dong 等人^[8]提出了基于 loop 操作的编码机制,在不需外通信负载的情况下减少报文的丢失率。然而,上述机制均着眼于在传递的编码后报文中通过不同程度上的信息冗余度来提升传输的可靠性,而没有考虑如何有效地提升网络的吞吐量。同时,某些工作关注如何利用网络编码机制来提升网络的能量效率。文献[9]提出了一种能量有效的无线网络编码机制,通过将多个并发的单播流来分解为组播流和单播流的集合来提升能量效率。文献[10]提出了一种能够在能量受限的网络中降低总能耗的编码机制。然而上述机制都没有从报文的角度出发来进一步提升网络的效率。

本文提出了一种全新的编码效率感知网络编码机制(coDing Efficiency awarE Network coding, DEEN),能够提高编码报文的每字节编码效率,从而有效增加无线网络的吞吐量。本文创新点如下:首先,证明了网络编码每字节效率最大化是一个 NP 问题。其次,提出了分布式启发算法 DEEN,在节点每次发送报文时,选择能够提升每字节编码效率的编码组合,增加每传输字节所携带的有效信息量,从而有效地减少全网总的传输次数。最后,模拟仿真结果表明 DEEN 可以显著提升无线网络的容量。据我们所知,DEEN 是首个从每字节信息效率角度来提升网络编码性能的工作。

2 效率感知的无线网络编码机制 DEEN

DEEN 的关键思想就在于使得每字节都能携带更多的有效信息,我们给出几个设计 DEEN 的考虑。

2.1 编码效率

考虑图 1 中的网络场景,节点 A 和节点 D 希望交换报文 p_4 及 p_1 ,同时节点 B 和节点 C 也希望能够交换报文 p_2 及 p_3 ,图中给出了每个节点发送后的报文持有情况。报文 p_1 和 p_4 的长度均为 1400 byte,而报文 p_2 和 p_3 的长度为 200 byte。

2.1.1 基于报文的编码操作 如果节点 R 根据其最大编码机会 p_1, p_2, p_3 进行编码,则传输的总有效信息为 $1400+200+200=1800$ byte,编码后报文长度为 1400 byte。因此,编码后报文每个字节所承载的有效信息为 $1800/1400=1.28$ 。R 还需要单播剩余的 p_4 报文。因此,发送 4 个报文的总传输字节数为 $1400+1400=2800$ byte。总的每字节平均有效信息

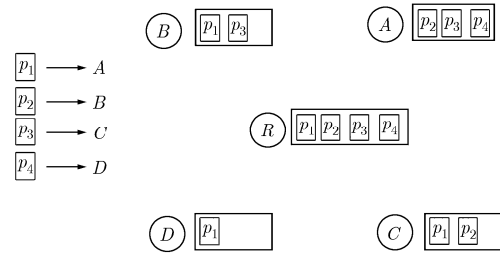


图 1 基于效率编码的基本思想

为 $(1400+200+200+1400)/2800 = 1.14$ 。

2.1.2 基于字节的编码操作 如果节点 R 仅将 p_1 和 p_4 编码在一起,那么总有效信息为 $1400+1400=2800$ byte,每字节承载的有效信息为 $2800/1400=2$ 。接下来,节点 R 将 p_2 和 p_3 编码后发送,编码报文长度仅为 200 byte。因此,最后总传输字节数为 $1400+200=1600$ byte。总的每字节平均有效信息为 $(1400+200+200+1400)/1600 = 2$ 。

定义 1 每字节编码效率 考虑一个编码模式 C,该模式包含 n 个原始报文 p_1, p_2, \dots, p_n ,每个原始报文的长度分别为 l_1, l_2, \dots, l_n 字节。那么 C 的每字节编码效率 η_C 的定义如下:

$$\eta_C = (l_1 + l_2 + \dots + l_n) / \max(l_1, l_2, \dots, l_n) \quad (1)$$

从上述定义中可以看出,编码效率可以通过两种方式提升。首先是通过减少编码在一起的报文长度差异。其次是提升编码在一起的报文的数目。

2.2 非先进先出编码

在 COPE 中,每个节点维护一个先进先出(FIFO)输出队列,对每个邻居节点都维护一个虚拟队列,虚拟队列维护了多个指针指向在 FIFO 输出队列中下一跳为此邻居节点的报文。进行编码时,COPE 仅从虚拟队列的头部选择报文,这种 FIFO 的编码方式在易丢失的无线环境中很大程度上限制了节点上的网络编码机会。在图 2 中,如果仅从每个虚拟队列的头部选择报文的话,最大的编码机会数目仅为 2。然而如果从每个虚拟队列中任意选择报文的话,最大编码机会就为 4。

接下来我们证明上述非 FIFO 网络编码机制在易丢失的无线网络环境中能够创造出更多的编码机会。考虑如下无线多跳网络 $G=(N,E)$,其中 N 代表网络中的节点集合, $E \subset V \times V$ 代表网络中边的集合。网络中的节点被表示为 $n_i(1 \leq i \leq |N|)$ 。 $e_{ij} = (i,j)$ 表示节点 n_i 到 n_j 的链路。

定理 1 在易丢失的无线网络中,非 FIFO 编码机制的网络编码机会数以很高的概率大于或等于 COPE 采用的 FIFO 编码机制的网络编码机会数。

证明 考虑网络中的一个节点 R,通过 R 的共

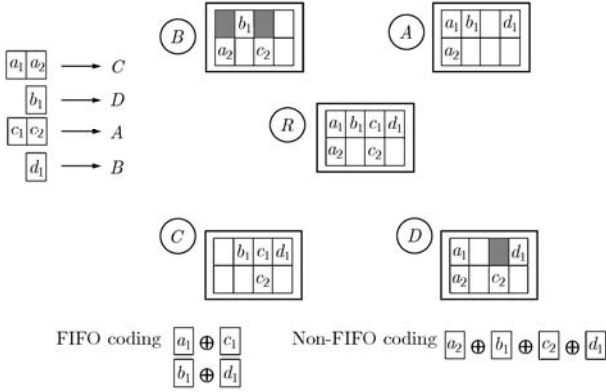


图2 易丢失无线网络环境中的非先进先出编码选择

有 m 个流 $\{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ 。每个流 f_i 的虚拟队列记做 Q_i ，长度均为 k ， Q_i 中的第 j 个报文记做 p_i^j 。某报文 p 的发送者和接收者分别被记为 $s(p)$ 及 $d(p)$ 。我们用 P_{ij} 表示节点 n_i 与 n_j 之间的传输概率，并指定 $P_{ii}=1$ ， $i=1, 2, \dots, m$ 。我们将节点 R 对于某报文 p 能够创造 x ($1 \leq x \leq m$) 个编码机会的概率记为 P_x 。接下来，我们证明在易丢失无线网络中，使用 COPE 以及 DEEN 分别能够创造出 x 个编码机会的概率 $P_x(\text{COPE}) \geq P_x(\text{DEEN})$ 。

不失一般性，对于包含了 x 个编码机会的编码报文，我们将其 x 个下一跳接收者重新按照 1 到 x 进行排列，而其他邻居的序号为 $x+1$ 到 m 。因此，对于在此编码报文内处于虚拟队列 Q_i 中的某报文 p_i^j 来说，在易丢失的无线环境中，其他 $x-1$ 个邻居已经接收到该报文的概率记做 $\text{Prob}_x(p_i^j)$ ：

$$\text{Prob}_x(p_i^j) = \prod_{j=1, j \neq d(p_i^j)}^x P_{s(p_i^j)j} \quad (2)$$

在 COPE 中， $x-1$ 个邻居节点接收到了虚拟队列 Q_i 的第 1 个报文 p_i^1 的概率为 $\text{Prob}_x(p_i^1)$ 。在 COPE 中能够从 m 个虚拟队列中编码 x 个第 1 个报文的概率就为

$$P_x(\text{COPE}) = \prod_{i=1}^x \text{Prob}_x(p_i^1) \quad (3)$$

在 DEEN 中，如果虚拟队列 Q_i 具有 k 个报文。则此 k 个报文中，至少有一个报文 p_i^j 能够被 $x-1$ 个邻居所监听到的概率为

$$1 - \prod_{j=1}^k (1 - \text{Prob}_x(p_i^j)) \quad (4)$$

DEEN 能够从 m 个虚拟队列中编码 x 个原始报文的概率就为

$$P_x(\text{DEEN}) = \prod_{i=1}^x \left(1 - \prod_{j=1}^k (1 - \text{Prob}_x(p_i^j)) \right) \quad (5)$$

证明 $P_x(\text{DEEN}) \geq P_x(\text{COPE})$ ，对于每个节点

来说我们需要证明，式(4)的值都大于等于式(2)的值。

首先，我们给出相反的假设，假设式(2)的值大于式(4)的值。在这种情况下，我们有

$$\begin{aligned} \text{Prob}_x(p_i^1) &> 1 - \prod_{j=1}^k (1 - \text{Prob}_x(p_i^j)) \\ &> 1 - (1 - \text{Prob}_x(p_i^1)) \prod_{j=2}^k (1 - \text{Prob}_x(p_i^j)) \end{aligned} \quad (6)$$

上述不等式可以变为

$$1 - \text{Prob}_x(p_i^1) < (1 - \text{Prob}_x(p_i^1)) \prod_{j=2}^k (1 - \text{Prob}_x(p_i^j)) \quad (7)$$

然而，由于 $\text{Prob}_x(p_i^k)$ 为概率值，对于概率值来说， $0 \leq \text{Prob}_x(p_i^k) \leq 1$ 永远成立。因此不等式(7)不成立，我们得出了矛盾的结论。因此可得 $P_x(\text{DEEN}) \geq P_x(\text{COPE})$ 。

3 DEEN 协议设计

3.1 问题描述

节点需要找出一组编码模式集合，以便能够使用最少的字节数将其所有的报文都传送至各个目的接收节点。我们将该问题称为每字节编码效率优化问题。

可以证明上述问题为 NP-hard 问题。首先，为了解决传统的基于报文的最优效率编码问题，构造编码图 $G'=(V,E)$ ，图 G' 中的每个顶点 i 都对应于一个报文 p_i 。如果在顶点 i 和 j 之间具有一条边 (i, j) ，则说明对应的报文 p_i 和 p_j 可以被编码在一起。因此，基于报文的最优效率编码问题就等同于最大团问题^[11]。为了解决最优编码效率问题，我们构造相同的编码图 $G'=(V,E)$ ，对于编码图中的任意顶点 i ，我们将其对应报文 p_i 的长度 l_i 作为该顶点 i 的权重。那么一个团的权重就等于该团中包含的所有顶点的权重之和。那么，基于字节的最优化编码效率问题就等同于最大权重团问题，同样是 NP-hard 问题。

3.2 DEEN 协议流程

DEEN 采用启发式的解决方案，其基本思想是在选择编码报文时，仅选择能够提升当前编码效率的报文进行编码，从而提升整网的编码效率和吞吐量。

表 1 给出了 DEEN 的详细操作流程。在代码的 1-5 行，节点 R 将其输出队列头部的报文 p 取出。在第 6 行，节点 R 将其所有的虚拟队列按照与报文 p 的报文长度差异以增序排列。进行这种排列的原因在于数据报文的选择顺序对于编码报文的每字节编码效率有着重要的影响，与报文 p 的报文长度差异较小的虚拟队列在与报文 p 编码时应当被尽早考虑。

表1 DEEN 协议的操作流程

/* F 表示穿过节点 R 的流数目 R^* */

Input: 节点 R 及其邻居所持有的报文信息

Output: C //选中的编码模式
 η_C //选中编码模式的编码效率

Procedures

- (1) Select the first packet p from R 's output queue;
- (2) $C \leftarrow p$;
- (3) $\eta_C \leftarrow 1$;
- (4) NextHops $\leftarrow \{d(p)\}$;
- (5) Get the packet size of packet p ;
- (6) Sort the virtual queues according to the size difference with p in the ascending order and denote the sorted virtual queues by Q_1, Q_2, \dots, Q_{F-1} (excluding the virtual queue (flow) to which p belongs to);
- (7) **for each** virtual queue $Q_i, i=1$ to $F-1$, **do**
- (8) **for** $j=1$ to k **do** //Select a packet p_i^j from queue Q_i ,
- do**
- (9) **if** $P_D(y \text{ can decode } C \oplus p_i^j) \geq \text{GAIN}, \forall y \in \text{NextHops} \cup \{d(p_i^j)\}$, **then**
- (10) **if** (9) is satisfied **OR** “ $p_i^j \oplus$ any other packet belonging to the remaining flows traversing R is not a feasible coding pattern”
- (11) **then** NextHops $\leftarrow \text{NextHops} \cup \{d(p_i^j)\}$;
- (12) $C \leftarrow C \oplus p_i^j$;
- (13) $\eta_C \leftarrow \eta(C \oplus p_i^j)$
- (14) **break**//One packet from a virtual queue is enough
- (15) **Return** η_C, C ;

在代码的 7-14 行, 节点 R 尝试从每个虚拟队列中选择出一个报文与当前已经选择出的编码模式进行编码。第 9 行中, DEEN 考虑每个目的节点能够正确解码概率。目的节点的解码概率 P_D 必须大于一个指定的解码阈值 GAIN, 我们设置 GAIN=0.8。

在第 10 行中, DEEN 给出了一个新的原始报文 p_i^j 能够与当前的编码模式进行编码的条件。如果当前的编码模式 C 中已经编码了 $x(x \geq 1)$ 个原始报文。那么 C 的编码效率 η_C 的值为 $\eta_C = (l_1 + l_2 + \dots + l_x) / \max(l_1, l_2, \dots, l_x)$ 。我们将其简写为 $\eta_C = l_C / l_{C_{\max}}$ 。对于 p_i^j 来说, 我们需要从以下几个方面来考虑其每字节编码效率。

首先, 如果报文 p_i^j 的报文长度 l_i^j 小于或等于 $l_{C_{\max}}$, 那么新的编码效率将大于现有编码模式的编码效率, 即 $\eta(C \oplus p_i^j) > \eta_C$ 。因此, 在这种情况下, 新 p_i^j 将与现有的编码模式 C 编码在一起。

然而, 如果报文 p_i^j 的报文长度 l_i^j 大于 $l_{C_{\max}}$ 。如果我们将报文 p_i^j 与现有编码模式 C 编码在一起的

话, 新的编码模式的每字节编码效率将为 $\eta_{\text{new}} = (l_C + l_i^j) / l_i^j$ 。如果编码效率需要得到增加, 即 $\eta_C \leq \eta_{\text{new}}$, 应满足

$$\frac{l_C}{l_{C_{\max}}} \leq \frac{(l_C + l_i^j)}{l_i^j} \quad (8)$$

可以得到

$$l_i^j \leq \frac{l_C l_{C_{\max}}}{l_C - l_{C_{\max}}} \quad (9)$$

如果不等式(9)成立的话, 新的编码效率就会大于等于原有的编码效率。一个特殊情况是 $x=1$ 的时候, 在这种情况下, 不等式(9)右侧的分母就为 0。因此, 在 $x=1$ 时, 在任何情况下都可以将新的报文 p_i^j 与现有编码模式 C 编码在一起。

然而, 如果 l_i^j 大于不等式(9)的右侧, DEEN 需要仔细检查是否能够将 p_i^j 与现有编码模式编码在一起。在第 10 行的第 2 个条件中, 如果 p_i^j 不能与属于当前编码模式 C 之外的任何报文进行编码。这意味着, 如果 p_i^j 不与当前编码模式 C 进行编码的话, p_i^j 就需要在稍后进行单播发送。因此, 我们需要将 p_i^j 加入现有的编码模式 C 。虽然这样会降低新的编码模式的每字节编码效率, 但是会增加网络中整体的编码效率。为了实现上述功能, 每个节点记录被每个流最近使用的成功传输的编码模式。当检查某个报文时, DEEN 查找该报文所属流所对应的编码模式列表, 并根据历史信息推测是否这个新的报文应当与当前的编码模式编码在一起。

代码的 11-13 行对必要的信息进行更新。14 行说明从每个虚拟队列选择一个报文已经足够了。

3.3 复杂度分析

在 COPE 中, 先进先出编码算法限制了节点上能够被创造出来的网络编码机会的增加。而在 DEEN 中, 所有的额外编码增益, 计算负载都能通过调整虚拟队列的长度 k 来控制。假设在网络中, 节点的平均度为 $D(D > 1)$, 则 COPE 的复杂度如下: 用于检查在一个下一跳节点是否能够正确解码某编码报文的时间为 $O(D)$ 。由于节点共有 $O(D)$ 个虚拟队列, 因此 COPE 编码算法的负载为 $O(D^2)$ 。

在 DEEN 中, 假设流经网络中的节点的流平均数为 $F(F > 1)$ 。在无线网络中, 由于带宽等资源受限, 因此流数 F 通常较小。节点上维护的虚拟队列为 $O(F)$, 即流的个数, 每个虚拟队列的长度为 k , 而用于检查在一个下一跳节点是否能够正确解码某编码报文的时间同样为 $O(D)$, 因此总的编码算法时间复杂度为 $O(kFD)$ 。可以看出, DEEN 的编码算法复杂度可以通过调整虚拟队列的长度 k 的值得到有效的控制。

4 仿真结果与分析

本文使用模拟工具 ns-2 来对我们的工作进行模拟。在实验中，模拟了 COPE 协议和 DEEN 协议；提出的协议都使用最短路径路由协议来为数据流寻找路径。在仿真中，我们使用 802.11b 作为 MAC 层，并修改了 802.11 的 MAC 重传机制。对于每个节点，都打开混杂模式以便监听周围邻居节点的传输，同时实现了伪广播机制以实现编码报文的可靠广播。仿真场景由 $800 \times 800 \text{ m}^2$ 正方形区域内的 100 个固定节点构成。节点的传输范围约为 100 m，干扰范围约为 200 m。在网络中随机的产生 UDP 流，每个流的速率随机地从 200 kps 到 1 Mbps 中选择，并具有随机的持续时间。每个流的报文长度也随机变化，范围从 32 到 512 byte。在模拟中将虚拟队列的长度 k 设为 5。我们用网络中的编码效率、所创造的编码机会以及网络吞吐量作为衡量协议性能的尺度。为了去掉路由协议的影响，在吞吐量的计算中，只考虑了数据报文。每个模拟得出的数据都是在 5 个随机网络拓扑上得出数据的平均，每个随机网络拓扑都是由 ns-2 中的 setdest 工具产生。

编码效率：图 3 显示了分别使用 COPE 和 DEEN 协议所取得网络中平均每字节所携带的有用信息。从图中，我们可以观察到 DEEN 的性能显著超过 COPE，这是由于相比 COPE，DEEN 能够选择效率更高的编码模式，并且能够创造出更多的网络机会。例如，当网络中的负载为 10 Mb/s 时，COPE 的每字节编码效率为 1.21，而与此同时，DEEN 的每字节编码效率为 1.52。DEEN 所能达到的最高编码效率为 1.81。

创造的编码机会：图 4 给出了分别使用 COPE 和 DEEN 协议在不同的网络负载时所创造出的网络

编码机会数目。从图中可以看出，DEEN 可以创造出比 COPE 多的编码机会。仿真结果再次说明了 DEEN 所采取的非先进先出编码策略的有效性。

网络吞吐量：图 5 显示不同的网络负载时 DEEN 和 COPE 协议的网络吞吐量。从图中可以看出，DEEN 相比 COPE 能够显著提升网络吞吐量。DEEN 的吞吐量相比 COPE 平均可提升 20%，最高提升可达 35%。当网络的负载较小时，网络中能够创造出的潜在网络编码机会较少，因此此时 DEEN 的性能与 COPE 相近。当网络的流量负载增加时，COPE 的网络性能持续下降，这是由于网络中较高的丢失率，COPE 很难从丢失中继续创造出网络编码机会。然而，DEEN 在广泛的流量负载范围之内都能持续地提供吞吐量的提升。特别是网络流量负载较高的时候，这是由于 DEEN 能够选择效率较高的编码模式，并且能够从丢失中创造出更多的编码机会，都能够有效地给网络吞吐量带来提升。当网络负载持续增加时，虽然两个协议的性能都受到拥塞的影响持续下降，但是 DEEN 的性能下降的比 COPE 要慢得多，仿真结果也再次说明了 DEEN 所采用机制的有效性。

5 结论

本文详细研究了在如何利用效率感知的网络编码为易丢失无线网络提升吞吐量的技术。首先，我们提出了效率感知的网络编码机制 DEEN。在 DEEN 中，针对无线易丢失的环境，提出了能够在报文丢失中寻找编码机会的全新编码算法，能够有效地在易丢失的无线环境中创造出网络编码机会。最后，给出了协议和算法的理论分析与仿真结果。结果显示通过效率感知的网络编码机制 DEEN，能够有效提升网络的吞吐量。

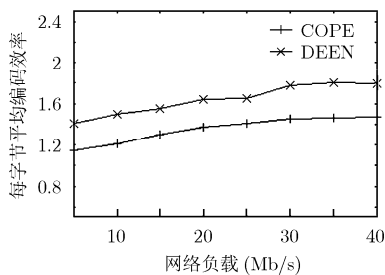


图3 每字节编码效率与网络负载之间的关系

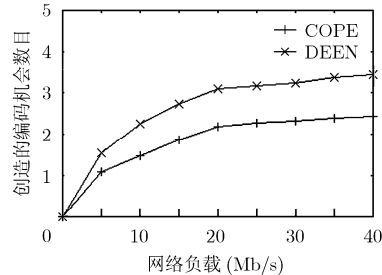


图4 创造的编码机会与网络负载之间的关系

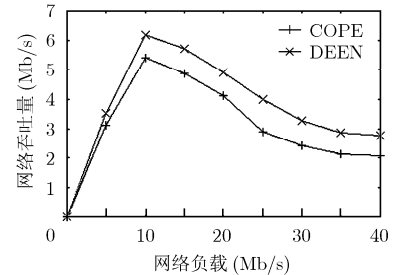


图5 网络吞吐量与网络负载之间的关系

参考文献

[1] Katti S, Rahul H, Hu W, *et al.* XORs in the air: practical wireless network coding. Proc. ACM SIGCOMM'06, Pisa, Italy, 2006: 243-254.

[2] Kim T S, Vural S, Broustis I, *et al.* A framework for joint network coding and transmission rate control in wireless networks. Proc. IEEE INFOCOM'10, San Diego, CA, USA, 2010: 1-9.

- [3] Le Jilin, Lui J C S, and Chiu Dah-ming. DCAR: Distributed Coding-Aware Routing in wireless networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(4): 596–608.
- [4] Yan Yan, Zhang Baoxian, Zheng Jun, *et al.* CORE: a coding-aware opportunistic routing mechanism for wireless mesh networks. *IEEE Wireless Communications Magazine*, 2010, 17(3): 96–103.
- [5] Koutsonikolas D, Wang Chih-Chun, and Hu Y C. CCACK: efficient network coding based opportunistic routing through cumulative coded acknowledgments. Proceedings of IEEE INFOCOM 2010, San Diego, CA, USA, March 15–19, 2010: 1–9.
- [6] Zhang X and Li B. Optimized multipath network coding in lossy wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(3): 622–634.
- [7] Rayanchu S, Sen S, Wu J, *et al.* Loss-aware network coding for unicast wireless sessions: design, implementation, and performance evaluation. Proc. ACM SIGMETRICS'08, Annapolis, Maryland, USA, June. 2008: 85–96.
- [8] Dong Q, Wu J, Hu W, *et al.* Practical network coding in wireless networks. In Proc. ACM MobiCom'07, Montreal, Canada, Sept. 2007: 306–309.
- [9] Cui T, Chen L, and Ho T. Energy efficient opportunistic network coding for wireless networks. Proc. IEEE INFOCOM'08, Phoenix, AZ, USA, Apr. 2008: 361–365.
- [10] Gaddam N, Gathala S A, Lastine D, *et al.* Energy minimization through network coding for lifetime constrained wireless networks. Proc. IEEE ICCCN'08, Virgin Islands, USA, Aug. 2008: 1–6.
- [11] Rozner E, Iyer A, Mehta Y, *et al.* ER: efficient retransmission scheme for wireless LANs. Proc. ACM CoNEXT'07, New York, NY, USA, Dec. 2007: 1–12.
- 王 斌: 男, 1977 年生, 博士, 研究方向为信号与信息处理、无线通信。
- 吴伟仁: 男, 1953 年生, 中国探月工程总设计师, 博士, 博士生导师, 研究方向为航空宇航制造、航天测控技术。
- 岩 延: 男, 1979 年生, 讲师, 博士, 研究方向为无线自组织网络、网络编码等。