

MANET 中基于滑动窗口的网络编码协作算法



宋 莺¹ 钟 欣² 孙宝林¹ 桂 超¹

1 湖北经济学院信息与通信工程学院 武汉 430205

2 武汉理工大学计算机科学与技术学院 武汉 430070

(prisong@163.com)

摘 要 移动 Ad Hoc 网络(Mobile Ad Hoc Network, MANET)受限于移动节点的能量、通信链路的带宽、计算和存储能力等一系列因素。如何提高网络的通信带宽和数据吞吐量,仍然是 MANET 亟待解决的问题。网络编码(Network Coding, NC)是一种发展非常迅速的编码技术,应用于 MANET 中可有效地增加网络带宽和网络通信量。将滑动窗口机制融入网络编码和协作传输中,可以更好地提高 MANET 的数据吞吐量。鉴于此,提出一种 MANET 中基于滑动窗口的网络编码协作算法(Sliding Window-based Network Coding Cooperative algorithm in MANET, SWNC-CM)。源节点首先对需要发送的数据分组进行编码,然后将编码的数据分组在协作传输机制中传送到下一个节点,目的节点接收到编码数据分组后,根据网络编码的解码机制对数据分组进行解码,从而恢复原始数据。在 SWNC-CM 中,主要关注滑动窗口、随机线性网络编码方法以及协作传输数据问题。当使用 SWNC-CM 算法时,并不是所有的数据分组都需要编码,只是对那些在同一个窗口中的数据分组利用随机网络编码方法进行编码,目的节点就可以使用高斯消去法进行解码操作,从而降低编码/解码的计算复杂性。使用网络仿真软件 NS2(Network Simulator version 2),以数据吞吐量、解码延迟和分组丢失率等指标,对 SWNC-CM 算法进行仿真实验研究。仿真实验结果表明,SWNC-CM 算法能较好地提高网络的数据吞吐量,并降低分组丢失率。

关键词: MANET; 滑动窗口; 网络编码; 网络通信量; 分组丢失率

中图法分类号 TP393

Sliding Window-based Network Coding Cooperative Algorithm in MANET

SONG Ying¹, ZHONG Xian², SUN Bao-lin¹ and GUI Chao¹

1 School of Information and Communication Engineering, Hubei University of Economics, Wuhan 430205, China

2 School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

Abstract Mobile Ad Hoc Network (MANET) is limited by the energy of mobile nodes, the bandwidth of communication links, computing and storage capacity. How to improve the communication bandwidth and data throughput of MANETs is still an urgent problem to be solved. Network coding (NC) is a rapidly developing coding technology, which can effectively increase network bandwidth and network traffic in MANET. Sliding-window Network Coding is a variation of NC that is an addition to multipath routing and improves the throughput of MANET. It is proposed a Sliding Window-based Network Coding Cooperative algorithm in MANET (SWNC-CM). The packets at source nodes are transmitted on the cooperative transport mechanism. Then, code nodes encode the received packets and forward the new packets to next node. The destination node decodes the packets received from different paths and recovers the original data. This algorithm mainly focuses on sliding window, random linear network coding and cooperative data transmission. When SWNC-CM algorithm is used, not all data packets need to be coded. Only those data packets in the same window are coded by random network coding method. Gauss elimination method can be used to decode at the receiving node. This method reduces the computational complexity of encoding/decoding. The performance of this SWNC-CM is studied using NS2 and evaluated in terms of the throughput, decoding delay and packet loss probability when a packet is transmitted. The simulations results shows that the multipath diversity achieved with our proposition can significantly improve the network throughput and packet loss probability.

Keywords MANET, Sliding window, Network coding, Network throughput, Packet loss probability

收稿日期:2019-10-29 返修日期:2020-05-31 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金(61572012);湖北省自然科学基金计划项目(2018CFB661,2017CFB677);湖北省教育厅科学研究计划项目(D20192203)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61572012), Natural Science Foundation of Hubei Province, China (2018CFB661,2017CFB677) and Scientific Research Project of Hubei Department of Education (D20192203).

通信作者:孙宝林(blsun@163.com)

1 引言

MANET 是由大量具有移动计算能力和通信功能的移动节点组成的一种无线多跳自组织网络,其不需要固定的基站,各个节点均可自由移动,且能实现动态无线链接、快速自动组网功能^[1-3]。MANET 虽然具有无线传输、高度的动态拓扑结构、无中心组网、多跳路由等特点,但受限于移动节点的能量、无线链路的带宽、移动计算和存储能力等一系列因素。如何提高网络的无线带宽和网络通信量,仍然是 MANET 网络亟待解决的关键问题。

2000 年,香港中文大学的 Ahlswede 等^[4]创造性地提出了“网络编码”的新概念。网络编码的提出解决了传统无线传输流量上的局限性,能够实现理论上的最大传输容量。目前,网络编码技术也被应用于 MANET 网络移动节点来对数据分组进行编码,较好地提高了 MANET 网络的数据吞吐量。Yeung 等^[5]针对网络编码的特性,提出了一种线性网络编码算法,该算法较好地提高了网络编码的编/解码能力和网络通信量。Guo 等^[6]提出的一种多路输入、多路输出的双向转接无线信道的物理层网络编码算法,较好地提升了目的节点解码分组的操作性。Aktas 等^[7]针对多个单播路由问题,提出了一种简单、有效的无线分组编码和解码算法。Yin 等^[8]提出了一种图小角度的多播路由网络编码算法,该算法能较好地利用图小角度建立一棵多播树,降低了网络编码的编/解码复杂性。

基于上述研究,本文提出了一种 MANET 中基于滑动窗口的网络编码协作算法。本文第 2 节主要讨论了网络编码的相关研究工作;第 3 节论述了滑动窗口模型和网络编码方案;第 4 节从数学角度分析了滑动窗口网络编码;第 5 节描述了仿真实验的性能比较;最后总结全文。

2 相关工作

网络编码研究是为了提升 MANET 的性能和网络通信量。文献^[9]提出的随机网络编码路由算法可以较好地提高网络的数据吞吐量。Tang 等^[10]提出了一种采用分层调制方式的物理层网络编码方案,该方案首先构建了源节点、中继节点均采用分层调制的双向中继通信系统模型,然后给出了中继节点的物理层网络编码解调及映射规则,最后推导出了加性高斯白噪声下中继误比特率及端到端中继误比特率的理论计算公式。Louie 等^[11]针对物理层网络编码(Physical-layer Network Coding, PNC)中的双向中继信道问题和误码率(Bit Error Rate, BER)性能等问题,提出了一种基于 PNC 的双向中继信道算法,而这些中继信道不需要严格同步在物理层。Jones 等^[12]针对基于网络编码的优化处理、协作路由传输和调度机制进行了研究,从理论上分析了网络编码对提高网络吞吐量起到的重要促进作用。Sengupta 等^[13]讨论了多跳无线网络中的网络编码感知路由问题,提出了一种基于网络编码的分布式路由传输协议,从而较好地提高了网络数据吞吐量。Chen 等^[14]讨论了使用缓冲区长度来反映节点负荷、总

缓冲区长度的最小路径的路由度量算法,其网络编码率可以通过计算每个节点的缓冲区长度来确定。

Chen 等^[15]提出了一种基于滑动窗口方法构建的循环和准循环结构多进制(q -ary) LDPC 网络编码方案,这种构建是预定义滑动窗口的大小,在确定的滑动窗口大小的基础上对滑动窗口的数据进行网络编码。Wu 等^[16]提出了一种基于运动窗口网络编码技术的协作多播协议(Cooperative Multicast Protocol Based on Moving Window Network Coding Technique, MWNCast),MWNCast 协议的解码复杂性为 $O(W)$, W 为运动窗口的大小。Siavoshani 等^[17]考虑针对多播数据分组从源节点到一组目的节点的路径,在网络中间节点上对数据分组进行随机线性网络编码操作的问题,提出了一种非相干网络编码信道模型。

为了提高无线网络的效率,网络编码可以用于向后兼容增强的 TCP 协议。Karafillis 等^[18]为了缩短总传输时间,提出了一种在整个传输过程中缩短解码时延和提高数据吞吐量的算法(TCP/NC)。在 TCP/NC 中,定义了一个冗余因子 R ,当发现丢失的数据分组(t)需要重新发送时,将重发数据分组的数量设置为 $t * R$,以确保有足够的分组传输到目的节点。Sun 等^[19]对 N 个多播网络和网络的线性可解性的显式公式进行了研究,提出了一种在基本域 $GF(2^8)$ 上,基于代数结构的线性网络编码构造方法。Hong 等^[20]提出了一种短消息噪声网络编码与滑动窗口解码理论相结合的合作转发算法(Short Message Noisy Network Coding with Sliding-Window Decoding, SNNC-SW)^[20],该算法较好地降低了分组解码复杂度并缩短了延迟。Huang 等^[21]提出了一种基于层次化网络编码(Hierarchical Network Coding, HNC)的协作切换机制,HNC 机制在传统实用网络编码的基础上,利用中继节点距离网络接入点的跳数差异,引入了多层中继圈的思想,对网络进行分层。Huang 等^[22]提出了一种基于乘法运算的网络编码中继编码方案,该编码方案要求中继节点对接收到的两个上游节点信号直接做乘运算,然后进行放大转发,从而实现网络编码。

3 滑动窗口模型和网络编码方案

SWNC-CM 算法主要关注滑动窗口、随机线性网络编码方法以及协作传输数据问题。当使用 SWNC-CM 时,并不是所有的数据分组都需要编码,只须在同一个窗口中的数据分组利用随机网络编码方法进行编码,目的节点就可以使用高斯消去法进行解码操作,从而降低了编码/解码的计算复杂性。

3.1 滑动窗口模型

MANET 可以表示成一个无向图 $G=(V, E)$,其中 V 表示网络中移动节点的集合, E 表示两个节点之间的无线链路的集合。每个无线链路 $e=(i, j) \in E$ 表示移动节点 i 与移动节点 j 是直接相连的,且设定无线链路是对称的,即 $(i, j) = (j, i) \in E$ 。

滑动窗口模型可以定义为一个分组流的计算函数。考虑 N 个数据分组 $(x_0, x_1, \dots, x_{N-1})$ 和 N 个编码向量 $(c_0, c_1, \dots,$

c_{N-1})。 f 表示滑动窗口的开始点, e 表示滑动窗口的结束点, 滑动窗口的大小 $W=e-f+1$ 。对于 N 个数据分组, 有 $N-W+1$ 个可能的滑动窗口, 可以用 W_w^f 表示开始点为 f 的滑动窗口。例如, 如图 1 所示, 对于数据分组为 8、编码窗口为 4 的模型, 其可能的 $N-W+1=5$ 个编码窗口可以表示为 (W_1^0, \dots, W_4^1) 。

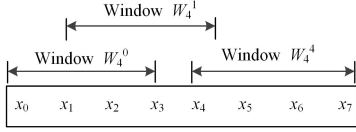


图 1 数据分组 $N=8$, 滑动窗口 $W=4$

Fig. 1 Data packets: $N=8$, sliding window $W=4$

3.2 滑动窗口算法

假设有 $e-f+1$ 个数据分组 (x_f, \dots, x_e) , 对于任意的 $\epsilon > 0$, 其窗口匹配长度为:

$$L_0 = \lfloor \frac{1}{\omega + \epsilon} \rfloor \quad (1)$$

用 m_1 表示有一个匹配的分组数量, m_2 表示没有一个匹配的分组数量, 则有:

$$m_1 \leq j < (e-f+1)/L_0 \quad (2)$$

基于式(1)和式(2), 可以得到:

$$\frac{m_1 \lceil \log n_w \rceil}{e-f+1} < \frac{\lceil \log n_w \rceil}{L_0} < \frac{\lceil \log n_w \rceil}{n_w-1} \quad (3)$$

当 $n_w \rightarrow \infty$ 时, 式(3)可以简化为式(4):

$$\lim_{n_w \rightarrow \infty} \frac{m_1 \lceil \log n_w \rceil}{e-f+1} = 0 \quad (4)$$

基于滑动窗口模型, 滑动窗口算法的计算步骤如算法 1 所示。

算法 1 SWNC-CM 算法

输入: N 个数据分组 $(x_0, x_1, \dots, x_{N-1})$ 和 N 个编码向量 $(c_0, c_1, \dots, c_{N-1})$

输出: 滑动窗口的大小 W , 滑动窗口内生成的 t 个网编编码后的数据分组 (e_0, \dots, e_{t-1})

Step1 计算 L_0 , 确定窗口的大小 W 、窗口分组的开始值 f 和窗口分组的结束值 e ; $n=0$ 。

Step2 将数据分组移入第 W_w^n 个窗口中, 然后进行网络编码操作。

Step3 将编码后的数据分组传输到下一个节点。

Step4 匹配新窗口, 如果 $e-f+1 < W$, 则对 $e-f+1$ 个分组进行网络编码, 并将编码后的分组传到下一个节点, 算法终止; 否则 $n=n+1$, 转到 Step2。

3.3 滑动窗口的概率分布

当滑动窗口的边界设定后, 其滑动窗口中数据分组的数量、滑动窗口之间的数据融合就可以建立起来。用 $P(d_{p,w} | s)$ 表示滑动窗口 w 内的数据分组 d 在位置 p 的相关概率, 则在滑动窗口中对数据分组的处理机制 s 下的概率可表示为:

$$P(d_{p,w} | s) = \frac{\sum_{i=f}^e P(d_i | s)}{e-f+1} \quad (5)$$

3.4 随机线性网络编码方案

本文主要使用随机线性网络编码 (Random Linear Network Coding, RLNC) 进行网络编码的编码/解码操作。RLNC 算法主要在 Galois 有限域 $GF(2^8)$ 中运算。

首先, 在 $GF(2^8)$ 上确定参加编码的分组, 并生成一个线性编码系数。然后, 产生 s 位的比特数据, 且 $e(k) = \sum_{i=1}^g c_i x_i(k)$, $\forall k$, $e(k)$ 表示第 k 次的编码, $x_i(k)$ 表示第 i 次的数据分组, g 是确定的数据分组数量。在 $GF(2^8)$ 中随机产生一组编码向量 (c_1, c_2, \dots, c_g) , 其系数的线性相关性取决于域 $GF(2^8)$ 的大小。目的节点 v 对接收到的第 i 个滑动窗口的编码数据使用矩阵 $G_{v,i}$ 进行解码操作, 使用高斯消去法进行解码操作。解码数据分组的子集也可能对一个满秩子矩阵进行运算。

4 数学分析

编码数据分组的传送, 是一个分组块接着一个分组块地传输。对于每个编码数据分组块, 目的节点需要接收 B 个独立编码数据分组进行解码, 从而恢复出原来的数据分组。设 N_i 表示第 i 个解码编码块中传输的编码分组的数量。目的节点接收到编码分组块 i 的概率可由分组块 i 传输的 n 个分组中接收到 B 个独立编码数据分组的概率进行计算, 因此满足 Bernoulli 二项分布, 即:

$$P\{N_i = n\} = \binom{n-1}{B-1} (1-p)^B p^{n-B}, n \geq B \quad (6)$$

式(6)为第 $B-1$ 个数据分组第 $n-1$ 次传输成功的概率。此时, 我们假设所有编码分组是独立进行传输的, 其概率可以描述为:

$$P\{N_i \leq n\} = \sum_{i=B}^n \binom{i-1}{B-1} (1-p)^B p^{i-B} (1-p)^B \sum_{i=0}^{n-B} \binom{B+i-1}{B-1} p^i \quad (7)$$

滑动窗口 W 包含的编码数据分组 $M=W/B$ 。如果没有数据分组丢失, 我们假设 W 是 B 的一个整数倍的 M 编码块, ℓ 表示目的节点解码的最后一块, 则需要接收的最大分组数量是其相应的 B 个编码数据分组。 N_{FEC} 表示所需的传输分组数量被目的节点解码的概率分布。因为数据分组的丢失是独立的, 所以随机变量的概率分布 N_{FEC} 可表示为:

$$N_{FEC} = \max_{1 \leq i \leq w} N_i \quad (8)$$

4.1 传输概率分析

源节点 S 将需要发送的 g 个原始数据分组进行网络编码, 生成 t 个大小相同的数据分组。假设成功传输 t 个网络编码后的数据分组需要 L 个路径协作, 无线信道的误差率 (e) 与无线信道的质量等性能指标是相同的, 则每一跳传输成功率的概率为 $(1-e)$ 。数据分组需要经过 h 跳到达目的节点 v 的传输成功率 $p(h)$ 为:

$$p(h) = (1-e)^h \quad (9)$$

按照网络编码的解码条件, 如果目的节点 v 可以正确恢复 g 个原始数据分组, 则目的节点 v 至少需要接收 B ($B \leq t$) 个编码数据分组。在所有 L 个协作传输路径中, 至少需要 u 个传输路径正确传输, 才能达到预期的可靠性 r , 则伯努利分布可表达为:

$$r = 1 - \sum_{i=0}^L C_L^i (1-(1-e)^h)^{L-i} (1-e)^{B i} \quad (10)$$

因此, 基于伯努利分布的正态分布 $N(\mu, \sigma)$ 可表示为:

$$\sigma^2 = L(1-e)^h(1-(1-e)^h) \quad (11)$$

$$\mu = E(n) = L(1-e)^h \quad (12)$$

4.2 复杂性分析

本节对滑动窗口网络编码算法 SWNC-CM 的复杂性进行分析。随着 W 的增大, SWNC-CM 算法的平均复杂度为 $O(W^2)$, q -ary 算法的解码复杂度为 $O(W^3)$, 可以看出 SWNC-CM 算法的解码复杂度比 q -ary 算法^[15] 的解码复杂度小得多。在 SWNC-CM 算法中, 目的节点的解码系数矩阵是满秩的, 非零项的数量较少, 因此 SWNC-CM 算法的复杂性也明显降低。

5 仿真实验

5.1 仿真模型

在仿真实验研究中, 采用文献[23]中的算法来构造随机 MANET 网络生成图, 该随机 MANET 网络生成图与真实网络比较接近, 可以确保仿真实验结果的真实性。

为了有效评价 MANET 网络中 SWNC-CM 的性能, 我们采用 IETF 推荐的 NS2^[24] 网络仿真软件进行仿真实验。在 NS2 上模拟一个 $1000\text{m} \times 1000\text{m}$ 的区域, 在此区域内随机分布 100 个移动节点, 移动节点的平均连通度为 4, 传输半径为 250m, 若任意两个移动节点在彼此的传输范围内, 则用一条无向链路连接它们; 传输类型为固定码率 (Constant BitRate, CBR), 报文到达率为 Poisson 数据流, 平均服务时间为指数分布, 报文长度为 5000 bit。将 SWNC-CM 算法与典型的循环和准循环结构多进制 (q -ary) 算法^[15]、基于短消息噪声网络编码与滑动窗口解码理论的合作转发算法 (SNNC-SW)^[20] 进行比较。仿真实验参数的设置如表 1 所列。

表 1 仿真实验参数

Table 1 Parameters of simulation experiment

参数	取值
网络节点数	100
网络仿真范围	$1000\text{m} \times 1000\text{m}$
节点传输距离	250m
仿真时间	600 seconds
网络传输模式	Free space
多路经数	3
数据载入	512 bytes/packet
传输类型	Constant bit rate (CBR)
仿真实验算法	q -ary ^[15] , SNNC-SW ^[20]

5.2 仿真实验结果分析

在接收同样数量的数据分组时, q -ary 算法与 SNNC-SW 算法、SWNC-CM 算法的吞吐量比较如图 2 所示。从仿真实验结果可以看出, 在同样的网络环境下, SWNC-CM 的吞吐量比 q -ary 算法和 SNNC-SW 算法的吞吐量大; 随着网络接收数据分组的增大, SWNC-CM 的吞吐量也在增大。利用滑动窗口网络编码机制, SWNC-CM 算法显示出了较好的性能。

图 3 给出了 SWNC-CM, q -ary 和 SNNC-SW 在同一接收数据分组数量下解码延迟的比较。当接收数据分组的数量增多时, 3 种算法的解码时延也在增大。在此仿真实验中, 滑动窗口的大小设为 16。从图 3 可以看出, SWNC-CM 算法比 q -ary 和 SNNC-SW 两种算法的解码延迟短。这是因为滑动

窗口算法较好地缩短了解码数据分组的时延。

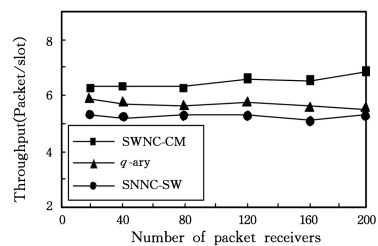


图 2 网络吞吐量与接收数据分组数量的比较

Fig. 2 Comparison of network throughput and number of data packets received

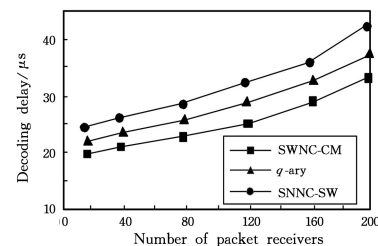


图 3 解码时延与接收数据分组数量的比较

Fig. 3 Comparison of decoding delay and number of data packets received

图 4 给出了不同滑动窗口大小下各算法的数据分组丢失率。当滑动窗口变大时, 窗口中的数据分组增多, 其分组的丢失率相应变高。从图 4 中可以看出, SWNC-CM 算法的分组丢失率低于 q -ary 算法和 SNNC-SW 算法的丢失率, 说明 SWNC-CM 算法在分组丢失率方面表现出了较好的性能。

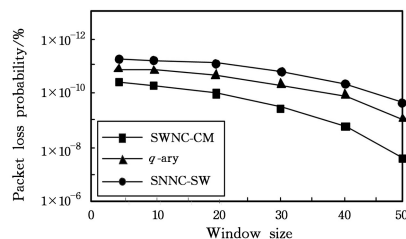


图 4 分组丢失率与滑动窗口大小的比较

Fig. 4 Comparison of packet loss probability and window size

图 5 给出了滑动窗口变化时, SWNC-CM, q -ary 和 SNNC-SW 的解码延迟的比较。当滑动窗口变大时, 其窗口的编码数据分组也会变多, 目的节点接收到的数据分组也随之增多, 导致对数据分组进行解码的时间也增加。

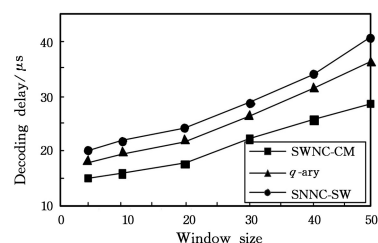


图 5 解码时延与滑动窗口大小的比较

Fig. 5 Comparison of decoding delay and window size

从图 5 中可以看出, SWNC-CM 算法的解码延迟比 q -ary 算法和 SNNC-SW 算法的解码延迟短, 说明 SWNC-CM 算法

表现出了较好的解码延迟性能,也降低了解码的复杂性。

结束语 网络编码技术在 MANET 网络中能有效地提高网络吞吐量和性能。本文提出了一种 MANET 中基于滑动窗口网络编码的协作多路径算法,即 SWNC-CM。SWNC-CM 算法由于使用了滑动窗口机制,能缩短数据分组的解码延迟;通过应用网络编码和多路径传输数据分组,较好地提高了网络吞吐量。仿真结果验证了该算法的有效性。未来我们将深入研究网络编码的编码效率和编码窗口大小的关系,以进一步提升网络编码的效率。

参 考 文 献

- [1] SUN B L, GUI C, SONG Y, et al. A novel network coding and multi-path routing approach for wireless sensor network[J]. *Wireless Personal Communications*, 2014, 77(1): 87-99.
- [2] MOHAMMED A H, DAI B, HUANG B X, et al. A survey and tutorial of wireless relay network protocols based on network coding[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2013, 36(2): 593-610.
- [3] GUI C, XIAO K, SUN B L, et al. Sliding window network coding for free viewpoint multimedia streaming in MANETs[C]// *The Second International Conference of Young Computer Scientists, Engineers and Educators (ICYCSEE 2016)*. Harbin, China, 2016: 188-197.
- [4] AHLSEWEDE R, CAI N, LI S Y R, et al. Network information flow[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [5] YEUNG R W. Network coding: A historical perspective[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(3): 366-371.
- [6] GUO J J, YANG T, YUAN J H, et al. Linear vector physical-layer network coding for MIMO two-way relay channels: design and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(7): 2591-2604.
- [7] AKTAS T, OZGÜR Y A, AKTAS E. Practical methods for wireless network coding with multiple unicast transmissions[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(3): 1123-1133.
- [8] YIN X R, WANG Y. A graph minor perspective to multicast network coding[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2014, 60(9): 5375-5383.
- [9] LIN Y, LIANG B, LI B. SlideOR: online opportunistic network coding in wireless mesh networks[C]// *IEEE INFOCOM (2010)*. San Diego, CA, USA, 2010: 171-175.
- [10] TANG M, CHEN J H, ZHANG Y, et al. Physical-layer network coding based on hierarchical modulation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(10): 2568-2574.
- [11] LOUIE R, LI Y, VUCETIC B. Practical physical layer network coding for two-way relay channels: performance analysis and comparison[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(2): 764-777.
- [12] JONES N M, SHRADER B, MODIANO E. Optimal routing and scheduling for a simple network coding scheme[C]// *IEEE INFOCOM (2012)*. Orlando, FL, USA, 2012: 352-360.
- [13] SENGUPTA S, RAYANCHU S, BANERJEE S. Network coding-aware routing in wireless networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2010, 18(4): 1158-1170.
- [14] CHEN J, HE K, YUAN Q, et al. Distributed greedy coding-aware deterministic routing for multi-flow in wireless networks[J]. *Computer Networks*, 2016, 105: 194-206.
- [15] CHEN H Q, LIU Y Y, QIN T F, et al. Construction of structured q-ary LDPC codes over small fields using sliding-window method[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2014, 16(5): 479-484.
- [16] WU F, HUA C Q, SHAN H G, et al. Cooperative multicast with moving window network coding in wireless networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2015, 25: 213-227.
- [17] SIAVOSHANI M J, MOHAJER S, FRAGOULI C, et al. On the Capacity of Noncoherent Network Coding[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2011, 57(2): 1046-1066.
- [18] KARAFILLIS P, FOULI K, PARANDEHGHEIBI A, et al. An algorithm for improving sliding window network coding in TCP[C]// *47th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS 2013)*. Baltimore, MD, USA, 2013: 1-5.
- [19] SUN Q F T, LI S Y R, LI Z P. On Base Field of Linear Network Coding[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2016, 62(12): 7272-7282.
- [20] HONG S N, MARIC I, HUI D. Short message noisy network coding with sliding-window decoding for half-duplex multichip relay networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(10): 6676-6689.
- [21] HUANG C, ZHANG W, LI K W, et al. Hierarchical network coding based cooperative handover mechanism in wireless internet of things[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(1): 147-150.
- [22] HUANG X J, ZHU H B. A multiplication-based analog network coding relaying scheme[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(7): 1775-1778.
- [23] WAXMAN B. Routing of multipoint connections[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1988, 6(9): 1617-1622.
- [24] The Network Simulator-NS-2[EB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.



SONG Ying, born in 1975, Ph.D, associate professor, is a member of China Computer Federation. Her main research interests include wireless communication, mesh networks and network protocol.



SUN Bao-lin, born in 1963, Ph.D, professor, is a member of China Computer Federation. His main research interests include wireless network technology, routing technology and network coding technology.