

机会式网络编码的系统中断性能

李世唐^{①②} 郑宝玉^① 黄川^{①②} 崔景伍^①

^①(南京邮电大学信号处理与传输研究院 南京 210003)

^②(福建师范大学数学与计算机科学学院 福州 350007)

摘要: 该文在两用户通过一个中继节点的协作向基站传送数据的无线通信环境下,研究了基于网络编码的中继策略。与通常的“用户到中继的信道是可靠的”这一假设不同,该文假设所有的信道都存在衰落现象,比较了复制重传中继策略、确定性网络编码策略和机会式网络编码策略对系统中断概率的影响。仿真结果说明了机会式网络编码中继策略具有较好的性能。

关键词: 网络编码; 中继; 系统中断概率

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)09-2242-05

Performance of System Outage Based on Opportunistic Network Coding

Li Shi-tang^{①②} Zheng Bao-yu^① Huang Chuan^{①②} Cui Jing-wu^①

^①(Institute of Signal Processing and Transmission, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China)

^②(School of Mathematics and Computer Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: This paper investigates the strategies of relaying based on network coding over wireless communication context with two users and one relay sending data to the base station. Differing from the assumption that the channels from users to relay are reliable, this paper supposes that all channels exist fading phenomenon. The effects on probability of system outage are compared among store-and-forwarding, deterministic network coding and opportunistic network coding. Results of numerical analysis indicate that opportunistic network coding is better than deterministic network coding.

Key words: Network coding; Relaying; Probability of system outage

1 引言

无线信道的多径衰落特性一直以来都是阻碍信道容量增加和服务质量改善的主要原因之一。基于空间分集思想的 MIMO 技术在抗信道多径衰落方面具有明显的优势,并可以在不增加功率和频谱的前提下大幅度提高信道容量,已逐渐被新一代无线通信的主流协议所采纳。然而 MIMO 技术仍然存在很多问题,尤其是小型无线移动终端较难安置多天线的难题使理想的 MIMO 技术在走向实用的过程中步履维艰。为此,Sendonaris^[1,2]等人首先提出了协作分集的概念,并分析了协作分集、网络容量和中断概率之间的关系;Laneman^[3]等人深入讨论了协作分集的实现策略,并给出了分布式空时编码的若干实现方案;以 Hunter^[4]为首的研究团队提出了基于编码协作的分集方案。

上述提出的协作分集方案中,中继节点的中继策略大都为复制重传、放大重传或空时编码重传等,都没有利用到业已证明能极大提高无线通信网络性能的新的编码模式——网络编码。网络编码是 Yeung^[5]等人在研究有线组播网络容量时提出来的概念;他们证明了在中间节点运用网络编码比传统的运用存储转发机制更具优势。随后, Li^[6]等人给出了单信源无噪声有线组播通信网络环境下,达到组播容量(multicast capacity)的线性网络编码的简单代数构造,为网络编码的实际应用铺平了道路。对于单信源及多信源无噪声有线组播网络, Koetter^[7]等人运用近世代数方法给出了多项式时间复杂度线性网络编码存在性的证明,同时他们也证明了网络编码可用来解决非遍历的链路故障问题。

网络编码的核心思想是允许中继节点对来自不同信道的数据进行混合(编码)后再转发出去,以获取更高的网络吞吐量、改善链路负载均衡、减少网络节点的能量消耗、提高网络链接的鲁棒性和纠错效率等。由于网络编码的初衷是权衡中继节点的编码能力来提高系统性能,它本身就包含了协作的思

2008-05-30 收到, 2009-04-27 改回

国家自然科学基金(60372107), 江苏省自然科学基金重大项目(BK2007729)和江苏省高校自然科学基金重大项目(06KJ510001)资助课题

想, 因而将它与协作分集结合起来以对抗无线信道固有的衰落特性是非常合情理的。也正因为这样, 人们已开始把网络编码用于协作分集的研究上: Xiao^[8]等人利用纠错码的代数叠加方法将网络编码运用到协作分集中, 获得了相当大的编码增益; Bao^[9]等人在多用户协作中, 利用编码图动态地匹配网络图, 提出了自适应网络编码协作技术; 在分布式天线系统(DAS)和多用户协作系统环境下, Chen^[10]等人研究了网络编码方案实现的分集性能; 在多单播多中继的无线通信模型下, Peng^[11]等人研究了中继节点采用线性网络编码时系统的中断性能和协作分集增益; Chen^[12]等人将网络编码运用到数据交换的通信环境中, 研究其对系统性能的影响; Lü^[13]等人考虑了有多个中继节点的两用户数据交换通信系统, 提出了机会式网络编码方案; Wang^[14]等人考虑了将网络编码运用到协作中继网络中, 证明了中继节点采用网络编码方案比采用转发方案能获得的更好的系统性能。

除文献[13,14]外, 上述的其它网络编码方案都假定中继节点(或协作用户节点)能可靠地接收到每个(或其它)用户节点发来的数据, 这在实际无线网络环境下(特别是大规模的通信网络环境)是一个苛刻的条件。在两用户利用一个中继节点的协作向基站发送数据、用户到中继节点的信道也存在固有的衰弱现象的通信环境下, 本文研究网络编码中继策略对系统中断性能的影响。与本文密切相关的是文献[14], Wang 等人也考虑两用户利用一个中继节点的协作向基站发送数据的系统模型, 且用户节点到中继节点的上行链路的 BER 与用户节点到基站的上行链路的 BER 成线性关系。本文考虑更一般的情形, 也即节点到节点之间的上行链路的 BER 可以是任意相关的。

本文剩下的部分安排如下: 第 2 节给出系统模型; 第 3 节推导出系统中断概率的表达式; 第 4 节通过实验仿真比较所提中继方案的优劣; 第 5 节对本文进行总结。

2 系统模型

考虑两个用户 A 和用户 B 把数据发送到基站 D 这样一个无线通信模型。为提高分集增益, 每个用户或者各自配备了一个中继节点: R_1 与 R_2 (如图 1), 或者共同配备一个中继节点 R(如图 2)。图 1 中的每个中继节点把正确接收到的数据转发给基站; 图 2 中的中继节点对收到的数据采用 3 种处理方案, 分别称为复制重传方案, 确定性网络编码方案和机会式网络编码方案。对于复制重传方案, 中继节点每

次只转发一个用户的数据(如果有的话), 该方案等效于图 1; 确定性网络编码策略要求中继节点只有在正确收到用户 A 和用户 B 的数据时, 才对两个数据进行混合处理(异或(XOR))并将所得结果转发给基站, 否则不转发任何数据, 等待有编码机会时再转发(可能导致时延); 对于机会式网络编码策略, 如果中继节点只正确接收到单个用户的数据, 就把该数据转发给基站; 如果正确收到用户 A 和用户 B 的数据, 则对两个数据进行混合(异或)处理后转发给基站, 此时中继节点对每个用户需要一个适当大小的缓存空间。

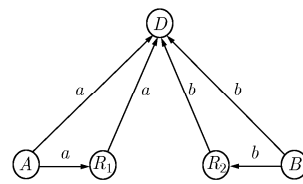


图 1 每个用户配备一个中继

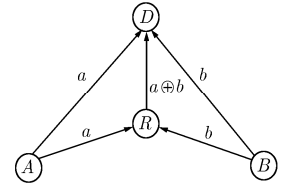


图 2 两个用户配备一个中继

假设初始信号和中继信号通过正交信道(时分、频分、空分等)发射, 且用户到基站、用户到中继及中继到基站的信道是相互独立的。

3 系统中断概率

记 P_{xy} 为节点 X 到节点 Y 的上行链路的 BER。下面考虑图 2 在 3 种中继方案下的系统中断概率, 也就是基站 D 无法正确接收到用户 A 及用户 B 发送的数据的概率。

定理 1 图 2 中, 中继节点采用复制重传中继策略时系统中断概率为

$$P_{out}^1 = P_{ad}(P_{ar} + P_{rd} - P_{ar}P_{rd}) + P_{bd}(P_{br} + P_{rd} - P_{br}P_{rd}) - P_{ad}P_{bd}(P_{ar} + P_{rd} - P_{ar}P_{rd})(P_{br} + P_{rd} - P_{br}P_{rd}) \quad (1)$$

证明 设用户 A 的中断概率为 P^a , 用户 B 的中断概率为 P^b , 则

$$P^a = P_{ad} - (1 - P_{ar})(1 - P_{rd}) + (1 - P_{ad})(1 - P_{ar})(1 - P_{rd}) = P_{ad}(P_{ar} + P_{rd} - P_{ar}P_{rd}) \quad (2)$$

$$P^b = P_{bd} - (1 - P_{br})(1 - P_{rd}) + (1 - P_{bd})(1 - P_{br})(1 - P_{rd}) = P_{bd}(P_{br} + P_{rd} - P_{br}P_{rd}) \quad (3)$$

从而可得系统中断概率为

$$P_{out}^1 = P^a + P^b - P^aP^b = P_{ad}(P_{ar} + P_{rd} - P_{ar}P_{rd}) + P_{bd}(P_{br} + P_{rd} - P_{br}P_{rd}) - P_{ad}P_{bd}(P_{ar} + P_{rd} - P_{ar}P_{rd})(P_{br} + P_{rd} - P_{br}P_{rd})$$

定理 2 图 2 中, 中继节点采用确定性网络编码策略时系统中断概率为

$$P_{\text{out}}^2 = P_{ad} [1 - (1 - P_{ar})(1 - P_{br})(1 - P_{bd})(1 - P_{rd})] + P_{bd} [1 - (1 - P_{ar})(1 - P_{br})(1 - P_{ad}) \cdot (1 - P_{rd})] - P_{ad} P_{bd} \quad (4)$$

证明 设用户 A 的中断概率为 P^a , 用户 B 的中断概率为 P^b , 用户 A , 用户 B 同时中断的概率为 P^{ab} , 则有

$$P^a = 1 - [(1 - P_{ad}) + (1 - P_{ar})(1 - P_{br})(1 - P_{bd})(1 - P_{rd}) - (1 - P_{ad})(1 - P_{ar})(1 - P_{br})(1 - P_{bd})(1 - P_{rd})] = P_{ad} [1 - (1 - P_{ar})(1 - P_{br})(1 - P_{bd})(1 - P_{rd})] \quad (5)$$

$$P^b = 1 - [(1 - P_{bd}) + (1 - P_{br})(1 - P_{ar})(1 - P_{bd})(1 - P_{rd}) - (1 - P_{bd})(1 - P_{br})(1 - P_{ar})(1 - P_{ad})(1 - P_{rd})] = P_{bd} [1 - (1 - P_{ar})(1 - P_{br})(1 - P_{ad})(1 - P_{rd})] \quad (6)$$

$$P^{ab} = P_{ad} \times P_{bd} \quad (7)$$

系统中断概率为 $P_{\text{out}}^2 = P^a + P^b - P^{ab}$, 将式(5), 式(6)与式(7)代入即得。

定理 3 图 2 中, 中继节点采用机会式网络编码策略时系统中断概率为

$$P_{\text{out}}^3 = P_{ad} [P_{ar} + (1 - P_{ar})[P_{rd} + (1 - P_{rd})(1 - P_{br})P_{bd}]] + P_{bd} [P_{br} + (1 - P_{br})[P_{rd} + (1 - P_{rd})(1 - P_{ar})P_{bd}]] - P_{ad} P_{bd} [1 - [(1 - P_{ar})(1 - P_{rd})P_{br} + (1 - P_{br})(1 - P_{rd})P_{ar}]] \quad (8)$$

证明 设用户 A 的中断概率为 P^a , 用户 B 的中断概率为 P^b , 用户 A , 用户 B 同时中断的概率为 P^{ab} , 则有

$$P^a = P_{ad} [P_{ar} + (1 - P_{ar})[P_{rd} + (1 - P_{rd})(1 - P_{br})P_{bd}]] \quad (9)$$

$$P^b = P_{bd} [P_{br} + (1 - P_{br})[P_{rd} + (1 - P_{rd})(1 - P_{ar})P_{bd}]] \quad (10)$$

$$P^{ab} = P_{ad} P_{bd} [1 - [(1 - P_{ar})(1 - P_{rd})P_{br} + (1 - P_{br})(1 - P_{rd})P_{ar}]] \quad (11)$$

系统中断概率为 $P_{\text{out}}^3 = P^a + P^b - P^{ab}$, 将式(9), 式(10)与式(11)代入即得。

若假设用户 A 或用户 B 到基站 D , 以及中继节点 R 到基站的 BER 均为 p , 而用户到中继节点的 BER 均为 q , 则上述系统中断概率分别为

$$P_{\text{out}}^1 = 2p^2 + 2pq - 2p^2q - p^4 - p^2q^2 - 2p^3q + 2p^4q + 2p^3q^2 - p^4q^2 \quad (12)$$

$$P_{\text{out}}^2 = 3p^2 + 4pq - 2p^3 - 2pq^2 - 8p^2q + 4p^3q + 4p^2q^2 - 2p^3q^2 \quad (13)$$

$$P_{\text{out}}^3 = 3p^2 + 2pq - 2p^4 - 6p^2q + 2p^3q + 2p^2q^2 + 2p^4q - 2p^3q^2 \quad (14)$$

此时, 当 $p = q \ll 1$ 时, 3 种中继方案都获得了完全分集阶数 2, 但复制重传方案要求更高的带宽, 消耗更多的能量, 导致更大的时延等。因此, 使用网络编码的中继策略要优于复制重传的中继策略。下面通过数值分析来比较各种中继策略的优劣。

4 数值分析

先考虑每个用户和中继节点的发射功率都为 E 的情形。假设用户到基站以及中继到基站的信道增益服从均值为 0 方差为 1 的复高斯分布: $h \sim CN(0,1)$, 而用户到中继的 BER 都为 q , 并且假设采用 BPSK 调制, 则相应的上行链路的 BER 为

$$p = E \left[Q \left(\sqrt{2|h|^2 \text{SNR}} \right) \right] = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\text{SNR}}{1 + \text{SNR}}} \right) \quad (15)$$

当 $\text{SNR} \gg 1$ 时, 利用泰勒展开可得

$$p \approx \frac{1}{4 \cdot \text{SNR}} = \frac{N_0}{4E} \quad (16)$$

其中 N_0 为单边高斯噪声功率。

下面分别给出 $q = 0$, $q = 0.05$, $q = 0.1$ 及 $q = 0.2$ 时系统中断概率与 SNR 的关系图。

从仿真图(图 3, 图 4)可以看出, 随着 q 的逐渐增大, 3 种中继策略的系统中断概率都逐渐接近没有中继时的系统中断概率, 这是因为, q 越大, 中继节点就越无法收到初始数据, 因而中继节点也就逐渐失去了中继的作用。再来看看确定性网络编码策略与机会式网络编码策略对系统中断概率的影响: 对于较小的 SNR, 当 $q = 0$, 也即中继节点能可靠地收到用户发来的数据时, 确定性网络编码与机会式网络编码策略的系统中断概率几乎差不多, 都高于复制重传中继方案; 随着 q 的逐步增大, 机会式网络编码策略的系统中断概率逐渐接近复制重传中继方案; $q = 0.2$ 时, 机会式网络编码策略与复制重传中继方案的系统中断概率曲线几乎重合在一起, 且都低于确定性网络编码策略。也就是说, 不管用户到中继的信道状况如何, 机会式网络编码方案都几乎优于确定性网络编码方案。但这种优势的代价是机会式网络编码可能需要消耗更多的能量, 因而接下来考虑系统中断概率与能量效率的权衡关系。

现假设系统消耗的总的能量为 E_t , 并且用户所用的能量比率为 α , 中继所用的能量比率为 $1 - \alpha$ 。为表示公平性, 每个用户所用的能量相等; 在复制重传方案中, 中继两次重传所用的能量也相等; 在确定性网络编码和机会式网络编码方案中, 中继节点的发射功率都为 E_t 。记 $\beta = N_0/(2E_t) = 2/\text{SNR}$,

当 $SNR \gg 1$ 时, 3 种中继方案的系统中断概率分别为

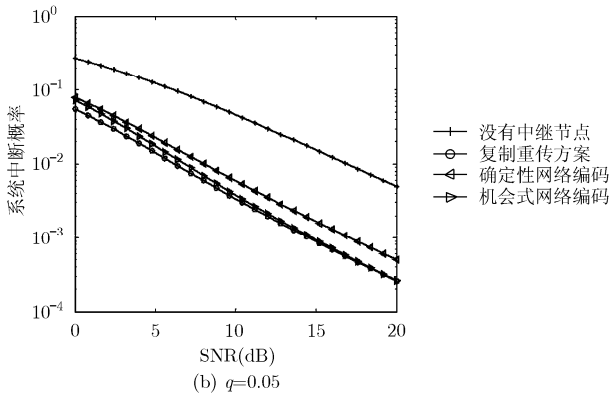
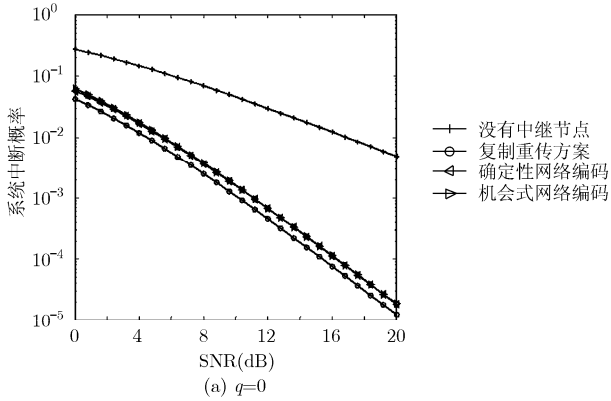


图 3 系统中断概率比较

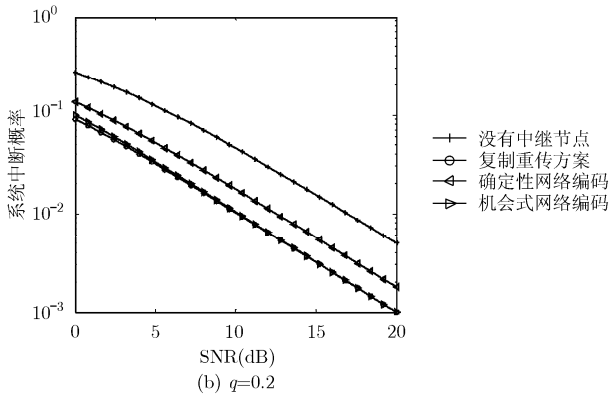
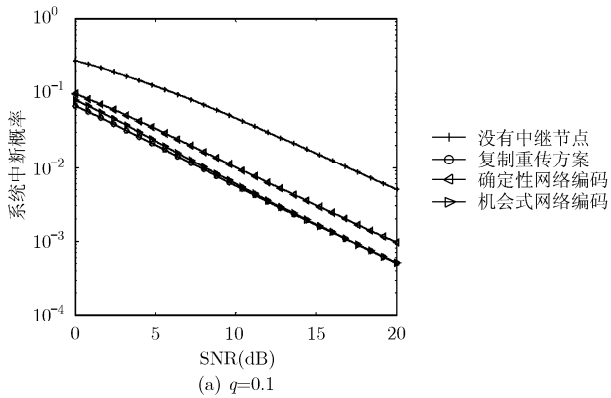


图 4 系统中断概率比较

$$P_{out}^1 = 2 \cdot \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{\beta}{\alpha} + \frac{\beta}{1-\alpha} - \frac{\beta^2}{\alpha(1-\alpha)} \right) - \frac{\beta^2}{\alpha^2} \left(\frac{\beta}{\alpha} + \frac{\beta}{1-\alpha} - \frac{\beta^2}{\alpha(1-\alpha)} \right)^2 \quad (17)$$

$$P_{out}^2 = 2 \cdot \frac{\beta}{\alpha} \left[1 - \left(1 - \frac{\beta}{\alpha} \right)^3 \left(1 - \frac{\beta}{2(1-\alpha)} \right) \right] - \frac{\beta^2}{\alpha^2} \quad (18)$$

$$P_{out}^3 = 2 \cdot \frac{\beta}{\alpha} \left[\frac{\beta}{\alpha} + \left(1 - \frac{\beta}{\alpha} \right) \left[\frac{\beta}{2(1-\alpha)} + \left(1 - \frac{\beta}{2(1-\alpha)} \right) \cdot \left(1 - \frac{\beta}{\alpha} \right) \frac{\beta}{\alpha} \right] - \frac{\beta^2}{\alpha^2} \left[1 - 2 \left(1 - \frac{\beta}{\alpha} \right) \left(1 - \frac{\beta}{2(1-\alpha)} \right) \frac{\beta}{\alpha} \right] \right] \quad (19)$$

下面分别给出 $\alpha = 0.2$, $\alpha = 0.5$ 及 $\alpha = 0.8$ 时系统中断概率与 SNR 的关系图。

从仿真图(图 5, 图 6)可以看出: (1)随着用户的发射功率所占比例逐步增大, 网络编码策略的系统中断概率的性能逐渐变好, 甚至超过了复制重传方案; (2)机会式网络编码策略的系统中断性能始终优于确定性网络编码策略的系统中断性能。

5 结论

在两用户通过一个中继节点向基站传送数据的无线网络环境下, 该文研究了基于网络编码的中继策略。与通常的“用户到中继的信道是可靠的”这

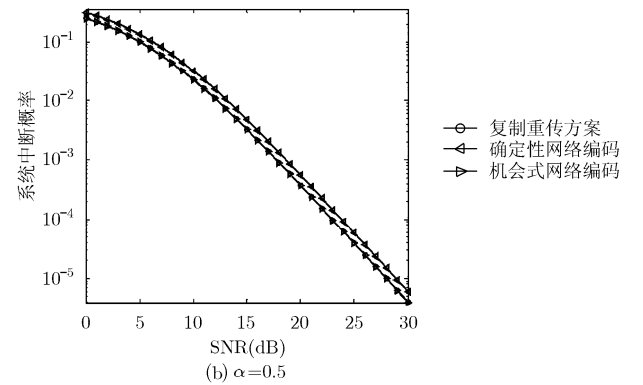
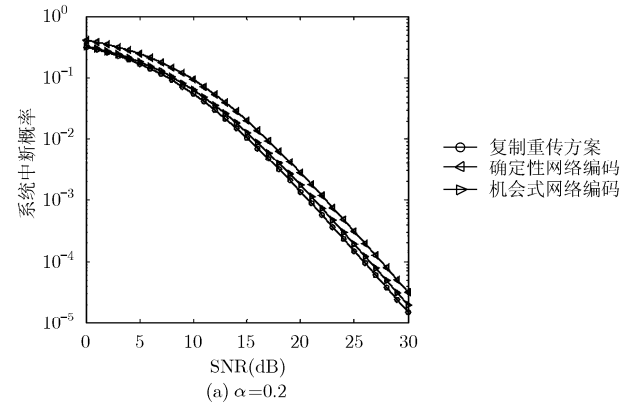


图 5 系统中断概率比较

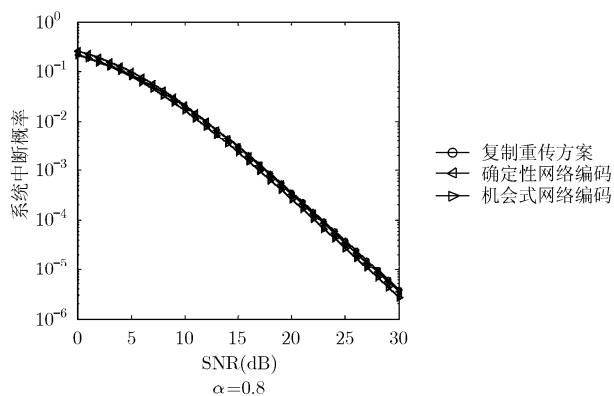


图 6 系统中断概率比较

一假设不同, 该文假设所有的信道都存在衰落现象, 推导出复制重传中继策略、确定性网络编码策略和机会式网络编码策略的系统中断概率。仿真结果表明: (1)网络编码中继策略优于复制重传中继策略; (2)在中继节点与信源节点的发射功率相同的情形下, 机会式网络编码中继策略要优于确定性网络编码中继策略; (3)在总的发射功率一定的情形下, 机会式网络编码中继策略仍然要优于确定性网络编码中继策略。

参 考 文 献

- [1] Sendonaris A, Erkip E, and Zhang B. User cooperation diversity-part I: System description[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(11): 1927-1938.
 - [2] Sendonaris A, Erkip E, and Zhang B. User cooperation diversity-part II: Implement aspects and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(11): 1939-1948.
 - [3] Laneman N, Tse D N C, and Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(12): 3062-3080.
 - [4] Nosratinia A, Hunter T E, and Hedayat A. Cooperative communication in wireless network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42(10): 74-80.
 - [5] Ahlswede R, Cai N, and Li S Y R, et al. Network information flow[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(4): 1204-1216.
 - [6] Li S Y R, Yeung R W, and Cai N. Linear network coding[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(2): 371-381.
 - [7] Koetter R and Médard M. An algebraic approach to network coding[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2003, 11(5): 782-795.
 - [8] Xiao L, Fuja T E, and Klierer J, et al. A network coding approach to cooperative diversity[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(10): 3714-3722.
 - [9] Bao X and Li J. Wireless relay networks: Matching code-on-graph with network-on-graph[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 7(2): 574-583.
 - [10] Chen Y, Kishore S, and Li J. Wireless diversity through network coding[C]. in Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Las Vegas, USA. 2006, 3: 1681-1686.
 - [11] Peng C, Zhang Q, and Zhao M, et al. On the performance analysis of network-coded cooperation in wireless networks[C]. Proc. IEEE 26th International Conference on Computer Communications (INFOCOM), Ancharage, AK. 2007: 1460-1468.
 - [12] Chen W, Letaief K B, and Cao Z. Opportunistic network coding for wireless networks[C]. Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC), Glasgow, Scotland. 2007: 4634-4639.
 - [13] Lü L, Yu H, and Yang J. Opportunistic cooperative network-coding based on space-time coding for bi-directional traffic flows[C]. Proc. IEEE Workshop on Network Coding, Theory, and Applications (NetCod), Hong Kong, China. 2008: 1-6.
 - [14] Wang Y, Hu C, and Liu H, et al. Network coding in cooperative relay networks[C]. Proc. IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), French Riviera, France. 2008: 1-5.
- 李世唐: 男, 1973年生, 讲师, 博士生, 研究方向为网络编码、信息论等。
- 郑宝玉: 男, 1945年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代通信中的智能信号处理、Ad-hoc网络等。
- 黄川: 男, 1979年生, 讲师, 博士生, 研究方向为无线异构网络融合、现代智能信息处理等。
- 崔景伍: 女, 1955年生, 高级工程师, 研究方向为移动通信等。