

一种基于空时码的协作网络编码技术及其性能分析

吕凌 于宏毅

(解放军信息工程大学信息工程学院 郑州 450002)

摘要: 该文提出了一种基于空时码的协作网络编码技术(Cooperative Network Coding based on Space-Time code, ST-CNC), 该技术将协作分集技术和网络编码技术有机结合, 能够克服无线信道衰落, 提高系统资源利用率和网络吞吐。推导了采用ST-CNC的两跳链状网络中端到端信息交换的误比特率, 分析了该技术带来的分集增益和网络编码增益。结果表明: 相对于传统的多跳链路的数据交互策略, 该技术能够带来明显的性能增益。最后通过仿真验证了分析结果的正确性。

关键词: 无线网络; 网络编码; 协作分集; 分布式空时码

中图分类号: TN919.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)07-1598-04

Performance Analysis of a Cooperative Network Coding Technique Based on Space-Time Code

Lü Ling Yu Hong-yi

(Institute of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: A Cooperative Network Coding technique based on Space-Time code (ST-CNC) is proposed, which combats channel fading and improves resource efficiency and network throughput. A close form expression for theoretical Bit Error Rate (BER) performance of the information exchange in two-hop chain network is derived and its diversity gain and network coding gain is analyzed. The numerical results show that the BER performance of ST-CNC outperforms the traditional strategies with distinctive gains. Furthermore, the simulation results coincide with the theoretical results well.

Key words: Wireless network; Network coding; Cooperative diversity; Distributed space-time codes

1 引言

协作分集技术^[1-4]通过节点间的协作, 以虚拟天线阵的形式来克服无线信道衰落、获得分集增益, 能够有效提高无线通信系统的性能。网络编码^[5-7]的概念最初产生于有线网络, 采用网络编码技术可以达到提高系统资源利用率、提升网络吞吐的目的。对于无线网络来说, 一方面, 无线信道的广播特性为网络编码的应用提供了有利条件; 另一方面, 无线信道衰落、干扰及噪声等因素又给网络编码的应用带来了新的挑战。

基于克服无线信道衰落、提高网络吞吐的考虑, 本文研究了协作网络编码技术, 该技术融合了协作分集技术和网络编码技术的优点, 采用该技术的无线通信系统在获得分集增益的同时也能获得网络编码增益(系统资源利用率和网络吞吐的提高)。

协作分集技术中, 为获得分集增益, 目的节点需要收到来自不同节点、包含同样信息的多个信号样本; 网络编码技术则需要中间节点将来自多个节点的多个信息有选择地合并到一起, 目的节点收到多个合并样本后进行解码、还原原

始信息。和传统的点到点通信相区别, 协作分集技术和网络编码技术具有共同的通信特征: 多个节点参与、通过多次收发完成通信, 因此, 协作网络编码技术是协作分集技术和网络编码技术的自然结合。

当前有关协作网络编码技术的研究还停留在基本通信方式的研究上, 大致可以归结为两类: 一类是文献[8-12]中对基于 SRD 的协作网络编码技术所做的研究, 另一类研究主要是文献[13]基于多跳无线网络研究的累进网络编码技术, 体现了多跳协作网络编码的基本思想。

本文提出一种基于空时码的协作网络编码技术, 针对协作节点有一定判决误码的情况, 分析了分布式 Alamouti 空时码的误比特率, 在此基础上对基于空时码的协作网络编码的性能进行了讨论。文章结构安排如下: 第2节, 给出基于空时码的协作网络编码的数据交换策略; 第3节, 分析对比采用不同数据发送策略的链状网络中端到端信息交换的性能; 第4节总结全文。

2 基于空时码的协作网络编码

考虑无线链状网络中相隔两跳的节点间的信息交换, 如图1(a)所示, 它由3个独立节点组成, 节点A, B均不在对方的可靠通信范围内, 信息交换需要通过中继节点R才能进行。文献[14]给出了非协作模式下的两种数据交换策略: 通

常的数据交换策略(TS)和网络编码的数据交换策略(NC), A, B 进行一次信息交换, 通常的数据交换策略需要 4 个时隙, 网络编码的策略需要 3 个时隙, 因此 NC 的策略可获得 $G_{NC} = 4/3$ 的网络编码增益^[15], 但没有获得分集增益。考虑节点间的协作, 假设每个节点周围都有一定数量($K_n - 1$)的协作伙伴, 它们共同组成协作节点群, 如图 1(b)所示。采用空时协作分集技术^[2](STC), 单跳链路上可获得 K_n 阶分集增益, 但 STC 所用的系统资源和 TS 的策略一样, 即 $G_{NC} = 1$, 不能获得网络编码增益。

结合作业分集和网络编码两种技术的优势, 本文提出了一种基于空时分组码的协作网络编码技术。假设群内协作节点间有理想的载波同步和符号同步, 通过信令交互、相互配合共同完成信息发送。群内节点 i 和 j 间信道系数 $h_{i,j}$ 服从均值为 0, 方差为 1 的复高斯分布, 接收节点可以获得理想的信道状态信息, 受均值为 0, 方差为 $N_0/2$ 的加性高斯噪声的影响, 接收信噪比 $\gamma = |h_{i,j}|^2 E_b / N_0$, E_b 为单位比特发射能量。

为简化分析, 但不失一般性, 假设群内节点采用 BPSK 调制的 Alamouti 发送方案^[16]。完成一次信息交换, ST-CNC 需要 3 个时隙, 分别如图 2(a), 2(b), 2(c)所示。第 1 时隙, 按照 Alamouti 码的编码方案, 节点 A_1, A_2 向 R_1, R_2 发送 a_1, a_2 ; 第 2 时隙, 节点 B_1, B_2 以同样的方式向 R_1, R_2 发送 b_1, b_2 ; 第 3 时隙, 中继节点 R_i 将前两个时隙接收的 $\hat{a}_{i,1}, \hat{a}_{i,2}$ 和 $\hat{b}_{i,1}, \hat{b}_{i,2}$ 进行网络编码, 即 $c_{i,1} = \hat{a}_{i,1} \oplus \hat{b}_{i,1}$, $c_{i,2} = \hat{a}_{i,2} \oplus \hat{b}_{i,2}$, 调制后得到 $x_{i,1}, x_{i,2}$, 按照式(1)所示的方案进行空时编码后, 将编码信息发送出去。每个接收节点先进行空时译码得到 c_1, c_2 , 然后再根据已知信息 a_1, a_2 或 b_1, b_2 译出所需信息。

$$\begin{matrix} \text{时间} \\ \text{节点} \end{matrix} \begin{bmatrix} x_{1,1} & -x_{1,2}^* \\ x_{2,1} & x_{2,1}^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

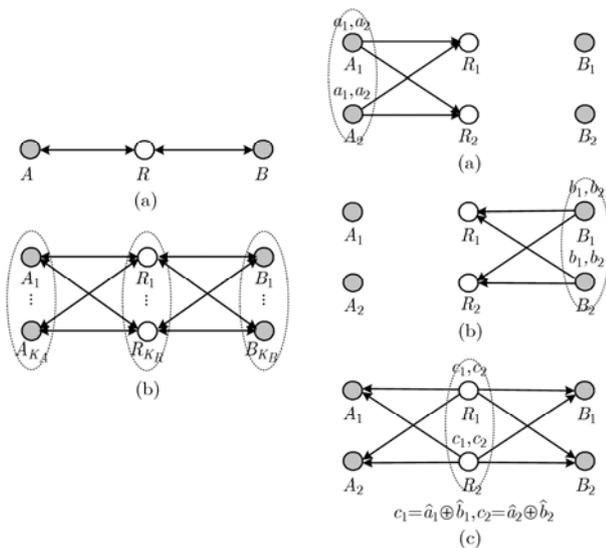


图 1 相隔两跳的节点间的信息交换 图 2 基空时码的协作网络编码

3 性能分析与仿真

无线衰落网络环境中, 图 1 所示的间隔两跳的节点间信息交换可采用如下几种策略: 通常的策略、网络编码的策略、空时协作策略以及本文给出的基于空时码的协作网络编码策略, 本节将从端到端信息交换的误比特性能入手, 分析对比上述几种策略的性能。

3.1 误比特性能分析

3.1.1 TS 策略和 NC 策略的误比特率 瑞利衰落信道中, BPSK 调制的单跳链路平均误比特率由文献^[17]给出

$$P_D = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}}{1 + \bar{\gamma}}} \right) = \frac{1}{4} \bar{\gamma}^{-1} + o(\bar{\gamma}^{-1}) \quad (2)$$

其中 $\bar{\gamma} = E_b / N_0$ 为平均信噪比, $o(x)$ 表示比 x 高阶的无穷小。

采用通常的数据交换策略, 假设每跳链路的平均信噪比相同, 端到端误比特率

$$P_{TS} = 2P_D(1 - P_D) = \frac{1}{2} \bar{\gamma}^{-1} + o(\bar{\gamma}^{-1}) \quad (3)$$

网络编码的数据交换策略中, 端到端传输正确的情况有以下 2 种: (1) $\hat{a} = (a \oplus b) \oplus b = a$, 即 $A \rightarrow R$ 正确, $B \rightarrow R$ 正确, 且 $R \rightarrow B$ 正确, 发生概率 $(1 - P_D)^3$; (2) $\hat{a} = (\bar{a} \oplus \bar{b}) \oplus b = a$, 即 $A \rightarrow R$ 错误, $B \rightarrow R$ 错误, 且 $R \rightarrow B$ 正确, 发生概率 $P_D^2(1 - P_D)$; 因此, 端到端误比特率

$$P_{NC} = 1 - [(1 - P_D)^3 + P_D^2(1 - P_D)] = \frac{3}{4} \bar{\gamma}^{-1} + o(\bar{\gamma}^{-1}) \quad (4)$$

由式(3), 式(4)可以看出, 在衰落环境中, TS 和 NC 两种策略不能获得分集增益。和传统的数据交换策略相比, 因为中继节点将两路数据合并在一起, 目的节点解码时会受另一路数据的影响, 因此网络编码策略的端到端性能要稍差。

3.1.2 分布式 Alamouti 空时码误比特率 在讨论采用 STC, ST-CNC 策略的两跳信息交换误比特性能前, 先给出中继节点 R_1, R_2 接收数据错误概率为 P_R 的情况下, 采用 Alamouti 方案转发数据时目的节点接收数据的误比特率。

源节点发送的调制符号记为 x_1, x_2 , 经过中继节点 R_i 译码调制后表示为 $x_{i,1}, x_{i,2}$, 两个中继节点采用式(1)所示的发送方案, 目的节点译码后得到 \hat{x}_1, \hat{x}_2 :

$$\begin{cases} \hat{x}_1 = \text{sign}\{\text{Re}[h_1^2 x_{11} + h_2^2 x_{21} + h_1^* h_2 (x_{22} - x_{12}) + h_1^* n_1 + h_2 n_2^*]\} \\ \hat{x}_2 = \text{sign}\{\text{Re}[h_1^2 x_{12} + h_2^2 x_{22} + h_1 h_2^* (x_{11} - x_{21}) + h_2^* n_1 - h_1 n_2^*]\} \end{cases} \quad (5)$$

将中继节点译码符号 $\{x_{11}, x_{21}; x_{12}, x_{22}\}$ 的各种出错状态 (和正确的结果 $\{x_1, x_1; x_2, x_2\}$ 相对应) 记为 S_j , 其中 $j = 0 \sim 15$, 例如 S_9 表示 $\{x_{11} = -x_1, x_{21} = x_1; x_{12} = x_2, x_{22} = -x_2\}$, 即 R_1 对 x_1 以及 R_2 对 x_2 的接收出错。计算每种状态的出现概率 $P(S_0) = (1 - P_R)^4$, $P(S_{12}) = P(S_3) = P(S_5) = P(S_{10}) = P(S_9) = P(S_6) = (1 - P_R)^2 P_R^2$, $P(S_{15}) = P_R^4$, $P(S_7) = P(S_{11}) = P(S_{13}) = P(S_{14}) = (1 - P_R) P_R^3$, $P(S_4) = P(S_8) = P(S_1) = P(S_2) = (1 - P_R)^3 P_R$ 。

假设源节点发送的二进制符号等概, 记 $\zeta_{+,+1} = \{x_1 = +1, x_2 = +1\}$, $\zeta_{+, -1} = \{x_1 = +1, x_2 = -1\}$, $\zeta_{-, +1} = \{x_1 = -1, x_2 = +1\}$, $\zeta_{-, -1} = \{x_1 = -1, x_2 = -1\}$ 。

目的节点接收 x_1 的错误概率

$$\begin{aligned} P_{\text{Al-e}} &= \sum_{j=0}^{15} P(S_j) \times P_e\{\hat{x}_1 | S_j\} = \frac{1}{4} \sum_{j=0}^{15} P(S_j) \times [P\{\hat{x}_1 \\ &= -1/\zeta_{+,+1}, S_j\} + P\{\hat{x}_1 = -1/\zeta_{+, -1}, S_j\} + P\{\hat{x}_1 \\ &= +1/\zeta_{-, +1}, S_j\} + P\{\hat{x}_1 = +1/\zeta_{-, -1}, S_j\}] \\ &= (1 - P_R)^4 P_m + P_R^4 (1 - P_m) + (1 - P_R)^2 P_R^2 [1 + 4P_a] \\ &\quad + 2(1 - P_R) P_R^3 [1 + P_w - P_t] + 2(1 - P_R)^3 P_R [P_w + P_t] \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $P_w = P\{\text{Re}[\pm(h_1^2 - h_2^2)\sqrt{E_b/2} \pm (h_1^* n_1 + h_2^* n_2)] < 0\}$, $P_a = P\{\text{Re}[\pm(h_1^2 - h_2^2)\sqrt{E_b/2} \pm 2h_1^* h_2^* \sqrt{E_b/2} \pm (h_1^* n_1 + h_2^* n_2)] < 0\}$, $P_m = P\{\text{Re}[(h_1^2 + h_2^2)\sqrt{E_b/2} \pm (h_1^* n_1 + h_2^* n_2)] < 0\}$, $P_t = P\{\text{Re}[(h_1^2 + h_2^2)\sqrt{E_b/2} \pm 2h_1^* h_2^* \sqrt{E_b/2} \pm (h_1^* n_1 + h_2^* n_2)] < 0\}$ 。

由概率论知识, 可得如下3个命题:

(1) 随机变量 X, Y 独立同分布, 则随机变量 $W = X - Y$ 的概率密度函数为偶函数。

(2) 随机变量 M, N 相互独立、概率密度函数都为偶函数, 则随机变量函数 $I = M + N$ 的概率密度函数都是偶函数。

(3) 随机变量 Z 的概率密度为偶函数, 则 $P\{z < 0\} = P\{z > 0\} = 0.5$ 。

对 P_w 进行整理

$$\begin{aligned} \text{Re}[(h_1^2 - h_2^2)\sqrt{E_b/2} + h_1^* n_1 + h_2^* n_2] &= [(h_{1a}^2 + h_{2a}^2) \\ &- (h_{2a}^2 + h_{2b}^2)]\sqrt{E_b/2} + h_{1a} n_{1a} + h_{1b} n_{1b} + h_{2a} n_{2a} + h_{2b} n_{2b} \\ &= [h_{1a}(h_{1a}\sqrt{E_b/2} + n_{1a}) - h_{2a}(h_{2a}\sqrt{E_b/2} - n_{2a})] \\ &\quad + [h_{1b}(h_{1b}\sqrt{E_b/2} + n_{1b}) - h_{2b}(h_{2b}\sqrt{E_b/2} - n_{2b})] \\ &= (H_1 - H_2) + (H_3 - H_4) \end{aligned} \quad (7)$$

显然, H_1, H_2 独立同分布, 所以 $(H_1 - H_2)$ 概率密度函数为偶函数; 同理, $(H_3 - H_4)$ 概率密度函数也为偶函数, 随机变量 $(H_1 - H_2)$ 和 $(H_3 - H_4)$ 相互独立, 所以 $(H_1 - H_2) + (H_3 - H_4)$ 的概率密度函数为偶函数。

同理, 随机变量 $\text{Re}[\pm(h_1^2 - h_2^2)\sqrt{E_b/2} \pm (h_1^* n_1 + h_2^* n_2)]$ 和 $\text{Re}[\pm(h_1^2 - h_2^2)\sqrt{E_b/2} \pm 2h_1^* h_2^* \sqrt{E_b/2} \pm (h_1^* n_1 + h_2^* n_2)]$ 的概率密度函数为偶函数。所以 $P_w = P_a = 0.5$ 。

$$\begin{aligned} P_m &= P\{\text{Re}[(h_1^2 + h_2^2)\sqrt{E_b/2} \pm (h_1^* n_1 + h_2^* n_2)] < 0\} \\ &= \int_0^\infty Q(\sqrt{2\gamma}) f(\gamma) d\gamma \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $\gamma = (1/2)(\gamma_1 + \gamma_2)$ 为目的节点接收信号的信噪比, $\gamma_i = |h_i|^2$ 服从指数分布, 在总发射功率不变的情况下, 其均值为 $\bar{\gamma}/2$, 因此, γ 的概率密度函数 $f(\gamma) = (4\gamma/\bar{\gamma}^2)e^{-2\gamma/\bar{\gamma}}$, 所以

$$P_m = \frac{1}{4} \left(2 - 3\sqrt{\frac{\bar{\gamma}}{2 + \bar{\gamma}}} + \sqrt{\left(\frac{\bar{\gamma}}{2 + \bar{\gamma}}\right)^3} \right) = \frac{3}{4}\bar{\gamma}^{-2} + o(\bar{\gamma}^{-2}) \quad (9)$$

P_t 整理后可表示为“几个高斯随机变量函数小于0的概率”的形式, 此概率和平均信噪比的关系可近似表示为

$$P_t \approx \frac{1}{6}\bar{\gamma}^{-0.5} + o(\bar{\gamma}^{-0.5}) \quad (10)$$

由3.2节的仿真结果可以看出, 此理论近似较好地符合了仿真结果。

将 $P_w = P_a = 0.5$ 代入式(6)并整理。于是, 协作节点数据错误概率为 P_R 的情况下, 分布式 Alamouti 码的误比特率

$$\begin{aligned} P_{\text{Al-e}} &= P_m + (1 - 4P_m + 2P_t)P_R - 6(P_t - P_m)P_R^2 \\ &\quad + 4(P_t - P_m)P_R^3 \end{aligned} \quad (11)$$

3.1.3 STC 策略和 ST-CNC 策略的误比特率 完成间隔两跳的节点间信息交换, 空时协作的策略和协作网络编码的策略分别需要4个和3个时隙。空时协作的策略下, 中继节点转发数据的误码率 $P_R = P_m$, 由式(11)可得端到端误比特率

$$\begin{aligned} P_{\text{STC}} &= 2P_m - 4P_m^2 + 6P_m^3 - 4P_m^4 + 2P_m P_t - 6P_m^2 P_t \\ &\quad + 4P_m^3 P_t = \frac{3}{2}\bar{\gamma}^{-2} + o(\bar{\gamma}^{-2}) \end{aligned} \quad (12)$$

基于空时码的协作网络编码策略中, $P_R = 2P_m(1 - P_m)$, 因此端到端误比特率

$$\begin{aligned} P_{\text{ST-CNC}} &= 3P_m + 4P_m P_t - 10P_m^2 - 28P_m^2 P_t + 32P_m^3 \\ &\quad + 80(P_t - P_m)P_m^3 + 120(P_m - P_t)P_m^4 \\ &\quad + 96(P_t - P_m)P_m^5 + 32(P_m - P_t)P_m^6 \\ &= \frac{9}{4}\bar{\gamma}^{-2} + o(\bar{\gamma}^{-2}) \end{aligned} \quad (13)$$

由式(12), 式(13)可见, 基于空时码的协作网络编码可以获得和空时协作分集的策略同样的分集增益。接收节点译码时受另一路数据的影响, ST-CNC 的性能会有些许损失。

3.2 性能评估与仿真结果

图3给出了采用不同策略情况下, 间隔两跳的节点间信息交换的误比特性能, 实线为理论分析的数值结果, 虚线为仿真结果。可以看出, ST-CNC 的策略获得了和空时协作分集技术同样的分集增益, 因为进行了网络编码, 受另一路数据的影响, 端到端误比特性能下降 0.9dB, 理论推导结果和性能仿真结果一致。图4给出了第1跳信噪比固定为 18dB 的端到端误比特性能, 受第1跳性能瓶颈作用的影响, 到端的误比特率出现了地板效应。

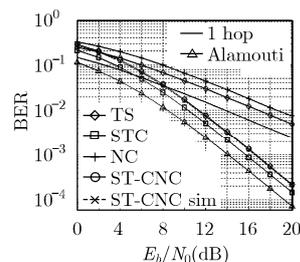


图3 不同策略的误比特性能对比

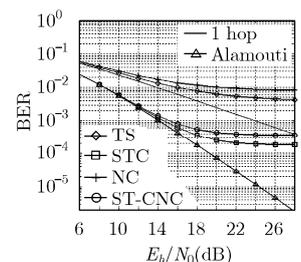


图4 第1跳信噪比固定时的误比特性能对比

网络编码增益方面, 和通常的数据交换策略相比, 网络编码的策略和 ST-CNC 的策略只需 3 个时隙便可完成信息交换, 节省了 1 个时隙, 提高了系统资源利用率和网络吞吐。

综上所述, 两跳链状网络中, 基于空时码的协作网络编码在获得 $G_{NC} = 4/3$ 网络增益的同时也获得了阶数为 2 的分集增益。在多跳链状网络中采用高阶空时码将会获得更大的分集增益和网络编码增益。

4 结束语

本文将协作分集技术和网络编码技术相结合, 提出了一种基于空时码的协作网络编码技术, 在无线衰落网络环境下, 该技术可有效地降低信道衰落的影响, 提高系统资源利用率和网络吞吐。推导了采用 ST-CNC 的两跳链状网络中端到端信息交换的误比特率, 仿真结果较好地符合了理论结果。另外, 本文给出了考虑中继节点判决误码的情况下分布式 Alamouti 方案的误比特率的理论表达式, 分析了中继节点判决误码对协作性能的影响。

当前有关协作网络编码的研究, 还是停留在基本通信方式的研究上, 并且都是围绕特殊的、简单的例子展开的, 结合方式也较为简单。更多的协作网络编码通信方式以及其中所蕴涵的一般性规律还有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Laneman J N, Tse D N C, and Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2004, 50(12): 3062-3080.
 - [2] Laneman J N and Wornell G W. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 2003, 49(10): 2415-2425.
 - [3] Janani M, Hedayat A, Hunter T E, and Nosratinia A. Coded cooperation in wireless communications: space-time transmission and iterative decoding. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2004, 52(2): 362-371.
 - [4] Boyer J, Falconer D D, and Yanikomeroglu H. Multihop diversity in wireless relaying channels. *IEEE Trans. on Communications*, 2004, 52(10): 1820-1830.
 - [5] Ahlswede R, Cai N, Li S Y, and Yeung R W. Network information flow. *IEEE Trans. on Inform Theory*, 2000, 46(4): 1204-1216.
 - [6] Koetter R and Medard M. An algebraic approach to network coding. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2003, 11(5): 782-795.
 - [7] Li S Y, Yeung R W, and Cai N. Linear network coding. *IEEE Trans. on Inform Theory*, 2003, 49(2): 371-381.
 - [8] Chen Y, Kishore S, and Li J. Wireless diversity through network coding. Proceeding of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Las Vegas, NV, March, 2006: 1681-1686.
 - [9] Bao X and Li J. Matching code-on-graph with network-on-graph: Adaptive network coding for wireless relay networks. Proceeding of 43rd Allerton Conf. on Communication, Control, and Computing, Champaign, IL, Sept. 2005.
 - [10] Bao X and Li J. On the outage properties of adaptive network coded cooperation (ANCC) in large wireless networks. in Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) 2006, Champaign, IL USA, 2006, Vol. 4: IV-57- IV-60.
 - [11] Hausl C and Hagenauer J. Iterative network and channel decoding for the two-way relay channel. Proc. IEEE ICC'06, Istanbul, Turkey, June 2006: 1568-1573.
 - [12] Hausl C and Dupraz P. Joint network-channel coding for the multiple-access relay channels. Proc. Intern. Workshop on Wireless Ad-hoc and Sensor Networks (IWVAN), New York, USA, June 2006: 817-822.
 - [13] Bao X and Li J. Progressive network coding for message-forwarding in Ad-hoc wireless networks. Proceeding of 3rd Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), Reston, VA, Sept. 2006: 207-215.
 - [14] Fragouli C, Boudec J L, and Widmer J. Network coding: An instant primer. Technical Report, TR2005010, EPFL, 2005.
 - [15] Nguyen D, Nguyen T, and Bose B. Wireless broadcasting using network coding. NetCod Workshop, 2007.
 - [16] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1998, 16(8): 1451-1458.
 - [17] Proakis J G. Digital Communications. Fourth Edition, McGraw-Hill College, 2000, Chapter 14.
- 吕 凌: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为协作通信技术和网络编码技术。
- 于宏毅: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信号处理、自组织网络及无线传感器网络技术等。