

基于网络编码的协作 HARQ 协议

孙岳 李颖 王新梅

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文基于网络编码技术提出了一种新的协作 HARQ 协议。在中继节点的协助下两个用户与基站进行通信。中继节点响应基站的重传请求,对两用户的增加冗余帧采用物理层网络编码即信号重叠调制技术进行处理,然后发送至基站。基站对接收信号采用多用户联合检测以及联合软判决译码。在平坦瑞利衰落信道下,该网络编码协作 HARQ 协议较传统的非协作 HARQ 协议可获得较大的性能改善,其性能接近没有采用网络编码的协作 HARQ 协议,且需要较少的硬件和带宽资源。

关键词: 协作通信;混合 ARQ;网络编码;重叠调制

中图分类号:TN911

文献标识码:A

文章编号:1009-5896(2009)10-2326-06

Cooperative Hybrid-ARQ Protocol Based on Network Coding

Sun Yue Li Ying Wang Xin-mei

(State Key Lab of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: A novel cooperative Hybrid-ARQ protocol is presented on the basis of network coding. Two users communicate with the base station with the assistance of a relay node. Relay node responds the repeat request and processes two users' incremental redundancy frames with physical-layer network coding, i.e. signal superposition modulation, before transmitting to the base station. Multi-user joint detection and joint soft decision decoding are adopted at the base station. Compared with traditional Hybrid-ARQ protocol, the proposed cooperative Hybrid-ARQ protocol can achieve better performance on flat Rayleigh fading channel, and approximates the performance of cooperative Hybrid-ARQ protocol without network coding with fewer hardware and bandwidth resources.

Key words: Cooperative communication; Hybrid-ARQ; Network coding; Superposition modulation

1 引言

空间分集技术被广泛地认为是一种抵抗无线信道中衰落影响的非常有效的方法。这促使了人们对多天线技术的研究。然而实际中由于大小、成本或硬件等因素的限制,一个较小的移动平台很难设置多根天线,例如手机或无线传感器节点。多用户环境中获得空间分集的一种替代方式是通过节点间协作来实现空间分集。在协作通信中,单天线用户通过共享自己的天线创造一个虚拟的多天线系统来获得空间分集增益。

现在已经提出了许多协作通信方式。依据中继节点的操作模式,协作通信大体上可分为放大-中继方式^[1](中继节点放大并重传从源节点接收到的信号)和译码-转发方式^[2,3](中继节点对来自源节点的分组进行译码,如果结果正确,重新编码并转发。这里

重新编码时可以采用不同的信道码字,即编码协作方式^[3])。在大部分现有的协作通信方式中,中继重传部分总是固定的而不管需要与否。这将降低系统的通过率以及影响系统的频谱效率。

在现有的无线系统中,链路层自动重传请求(ARQ)协议是一种非常有效的抵抗信道衰落的方式。不同于传统环境中总是由源节点来响应 ARQ 请求,在协作 ARQ 系统中,中继节点也能够响应目的节点的 ARQ 请求并重传相应的分组。由于第 2 部分的重传只在需要时才会被激起,所以协作 ARQ 系统的通过率(频谱效率)要高于传统的协作通信方式。Stanojev 等^[4]已经分析了采用 Chase 合并的 I 型协作混合 ARQ(HARQ)协议的系统性能。文献[5]分析了基于增加冗余协议(或码合并)的 HARQ 方式的性能。文献[6]针对采用节点同步和重复码的单天线系统,提出了一种将 HARQ 和协作相整合的协议。

现有的协作 HARQ 协议主要探讨一个信源节点与一个或多个中继节点相协作的情况^[4-10],很少

2009-01-20 收到, 2009-07-13 改回

国家 863 计划项目(2007AA01Z215), 国家自然科学基金(60502046)和高等学校学科创新引智计划(B08038)资助课题

涉及多个源节点的协作情况。同时也没有探讨无线网络中由于多个移动用户的存在所促发的网络编码潜能。网络编码的概念最早是由 Yeung 等^[1]为了提高无噪有线网络的容量而提出的。当网络编码应用到无线网络时,将能带来系统网络资源消耗减少、系统通过率提高等好处^[2]。本文我们将探讨基于目的和中继节点有限反馈的多用户协通信方式,提出了一种基于网络编码的协作 HARQ 协议。为了利用网络编码的优点,中继节点采用物理层网络编码,即信号重叠调制^[3],对两用户的重传帧进行编码处理然后转发给基站。本文将对系统的链路层分组错误率概率即吞吐率性能进行分析。

本文的第2节将给出协作系统模型,第3节将描述协作 HARQ 协议以及相应的网络编码处理,第4节将给出相应的仿真结果和性能分析,最后是全文的总结。

2 系统模型

在传统的协作系统中,一个源节点至少需要一个中继节点来协助其改善其与基站间的链路可靠性,如图1(a)所示。在任何时刻,一个中继节点只能协助一个用户。这样,多个用户不得不通过排队竞争来获得中继节点所提供的分集增益或者需要多个中继节点。此外,如果源信号和中继信号需要通过正交信道来发送,那么该系统将需要非协作系统两倍的带宽资源。

本文考虑一个基于网络编码的无线协作系统。该系统包含两个源节点(用户A和用户B),一个中继节点(R)和一个目的节点(基站D),如图1(b)所示。每一个节点只含有一个发送天线和接收天线,处于半双工模式,即不能同时接收和发送信号。用户和中继节点采用时分复用(TDM)的工作方式。中继节点可以利用网络编码技术同时来协助两个用户。如果两个用户的分组都需要转发,中继节点在转发前采用网络编码对其进行处理。与传统的中继协作系统相比,采用网络编码的协作系统具有较低的复杂度和频谱消耗。

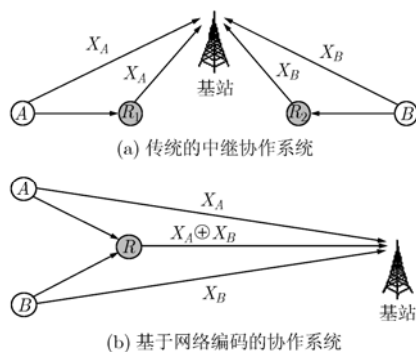


图1 无线网络

3 协作 HARQ 协议

3.1 协议描述

基于网络编码的协作 HARQ 协议的操作流程如下。在第1个数据时隙,用户A将自己附加有循环冗余校验(CRC)码的数据分组 x_A 编码生成 N 长的码字 c_A 。该码字被分割为两帧, N_1 比特长的数据帧 D_A 和 N_2 比特长的增加冗余帧 I_A 。用户A仅发送自己的数据帧 D_A , 中继节点R和目的节点D同时进行接收。在下一个数据时隙,用户B像用户A一样对自己的数据进行处理,然后仅发送自己的数据帧 D_B , 此时D和R进行接收。接着目的节点D和中继节点R对接收到的数据帧进行译码,并利用CRC比特判断译码是否正确。如果D或R能够成功译出某一用户的信息,就反馈一个ACK信号给相应的用户,否则就反馈一个NACK信号,要求重传。目的节点D和中继节点R的反馈都包含两个比特,分别给用户A和用户B。因为反馈信号可以以很低的码率发送,所以这里假设反馈信道是无错的。此外,来自D和R的反馈信息通过TDMA方式进行区分,即他们在事先分配的不同时隙上进行发送。假设反馈信道是理想时间同步的,所以D和R发送的ACK/NACK信号不会发生冲突。因此中继节点R也可以接收到目的节点D的译码反馈信息,用来判断是否需要协助转发数据。如果两个用户的数据分组在目的节点D都可以成功译出,两个用户将结束本轮传输开始发送新的数据分组。否则,中继节点R将依据目的节点D的反馈以及自己对源节点发送数据帧的译码结果来响应目的节点D的ARQ请求并重传相应的增加冗余帧。如果目的节点D不能同时正确译出两个用户的数据分组,并且中继节点R没有目的节点D所需要的任何信息,那么相应的信源用户将会在下一轮重传原来的数据帧。

依据目的节点D和中继节点R的译码结果,中继节点R的重传存在3种情况。

情况1 D仅能够正确译出用户B的数据分组,而R可以正确译出A的数据分组,或者D对A和B的数据分组都不能正确译出,但是R仅能够正确译出A的数据分组。此时,中继节点R重新生成用户A的增加冗余帧 I_A 并发送给目的节点D。

情况2 D仅能够正确译出用户A的数据分组,而R可以正确译出B的数据分组,或者D对A和B的数据分组都不能正确译出,但是R仅能够正确译出B的数据分组。此时,中继节点R重新生成用户B的增加冗余帧 I_B 并发送给目的节点D。

情况3 D对用户A和用户B的数据分组都不能正确译出,但是R可以同时正确译出用户A和用

户 B 的数据分组。中继节点 R 重新生成用户 A 和用户 B 的增加冗余帧，然后对其采用物理层网络编码进行处理，即中继节点 R 将 I_A 和 I_B 相叠加，然后将编码信号发送给目的节点 D 。

在目的节点，接收到的增加冗余帧和前面存储的数据帧相合并，然后再进行软判决译码。如果成功译码，ACK 信号将发送给相应的用户，该用户将在下一轮开始发送新的数据分组。如果不成功，将反馈 NACK 信号，该用户将对原先的数据帧进行新一轮的重传。在本文，最大重传次数仅设为 1。也就是说，中继节点转发一次后目的节点如果还是不能正确译码，该数据分组将被丢弃。这一策略非常适合于实时的数据流，因为实时数据流对分组时延要求非常苛刻，但却可以允许一定的分组丢失。基于网络编码的协作 HARQ 协议的流程图如图 2 所示。

3.2 网络编码处理

在中继转发时隙，如果两个用户的增加冗余帧都需要中继节点 R 来同时重传，中继节点 R 将在重

传之前采用物理层网络编码即信号重叠调制技术进行处理。中继节点 R 将用户 A 的帧 I_A 和用户 B 的帧 I_B 相叠加，其总功率的 $1-\gamma^2$ 用于 I_A ， γ^2 用于 I_B ，这里 $0 \leq \gamma^2 \leq 1$ 。如果中继节点 R 总的发送功率为 1，并且采用 BPSK 调制，那么中继节点 R 发送的信号为^[13]

$$y_R(t) = \sqrt{1-\gamma^2}(-1)^{I_A} + \gamma(-1)^{I_B} \quad (1)$$

在式(1)中， $\sqrt{1-\gamma^2}$ 和 γ 可以看作是线性网络编码的编码系数。因为式(1)中两用户的符号分配有不同的信号功率，所以两个 BPSK 信号的加权和构成一个非对称的 4-PAM 星座，如图 3 所示。

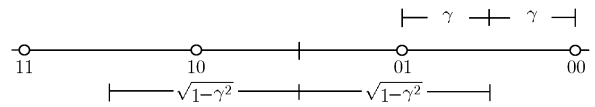


图 3 中继 R 的重叠调制

实际上，上述中继节点 R 重传的前两种情况也可以看作是网络编码的特例，其中一个用户信号的编码系数为零。

在目的节点， D 采用软 MAP 联合解调器从接收到的非对称 4-PAM 信号中计算出 I_A 和 I_B 的对数似然比(LLR)。LLR 可以表示为

$$\text{LLR}(c_k | y_D) = \ln \left[\frac{P(c_k = 1 | y_D)}{P(c_k = 0 | y_D)} \right] \quad (2)$$

$$P(c_k = 1 | y_D) = \sum_{s_1=1} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} (y_D - \sqrt{1-\gamma^2} h s_1 - \gamma h s_2)^2 \right] \cdot P(s_1) P(s_2) \quad (3)$$

$$P(c_k = 0 | y_D) = \sum_{s_1=0} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} (y_D - \sqrt{1-\gamma^2} h s_1 - \gamma h s_2)^2 \right] \cdot P(s_1) P(s_2) \quad (4)$$

这里 y_D 是接收符号， $\{s_1, s_2\}$ 是联合解调的两个符号。 h 是相应链路的信道增益， σ^2 是每维的噪声方差。此外， $P(s_1)$ 和 $P(s_2)$ 是 s_1 和 s_2 的先验概率。这里假设解调时无任何先验信息，即 $P(s_1) = P(s_2) = 1/2$ 。目的节点 D 最后将帧 I_i ($i = A$ 或 B) 的 LLR 和帧 D_i 的 LLR 相合并，然后采用软输入译码器进行译码。

4 仿真结果

在这一节中，不同信道状态下的分组错误概率(PER)性能进行了仿真和分析。所有的信道假设相互独立并服从平坦(频率非选择)瑞利衰落。这里考虑准静态衰落情况，即信道的响应在开始阶段和重传阶段保持不变。这一假设是合理的，因为在许多 ARQ 协议中，当接收到 NACK 消息后就立即启动

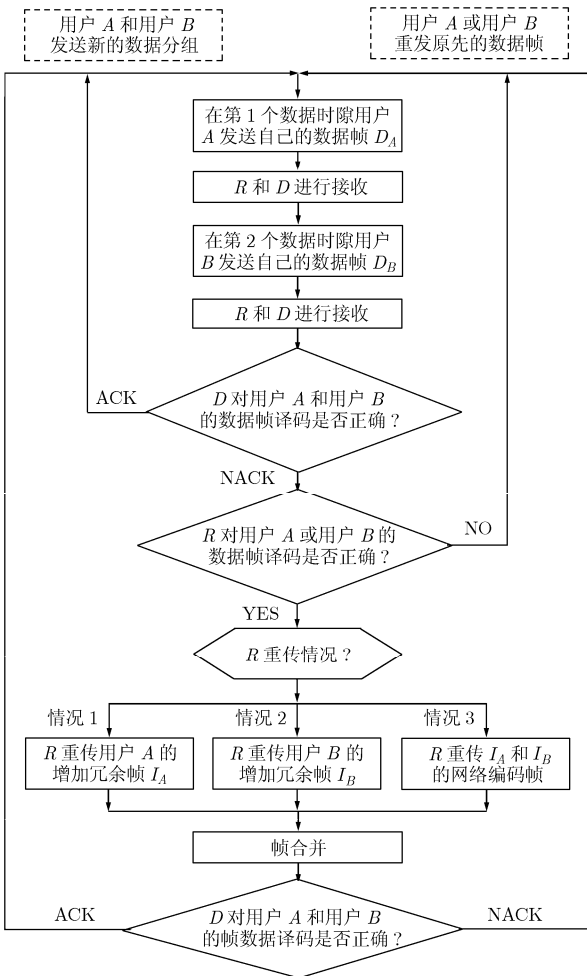


图 2 基于网络编码的协作 HARQ 协议流程图

重传。每一分组包含 500 个数据比特, 然后附加额外的 12 bit CRC 校验, 再进行卷积编码。CRC 校验比特用于目的节点和中继节点检测是否正确译码。编码采用编码存储 $M = 4$, 删余周期 $P = 8$, 母码码率为 $1/4$, 生成多项式为 $G(23,35,27,33)_8$ 的循环冗余校验(RCPC)码。对于数据帧和增加冗余帧, 相应的码率为 $1/2$, 生成多项式分别为 $G(23,35)_8$ 和 $G(27,33)_8$ 。系统采用 BPSK 调制, 接收节点采用相关检测和软判决译码。本文将传统的非协作 HARQ 协议(传统 HARQ)、非网络编码协作 HARQ 协议(C-HARQ)与本文提出的网络编码协作 HARQ 协议(C-HARQ-NC)进行比较。在传统的非协作 HARQ 协议中, 信源节点重传增加冗余帧。在非网络编码协作 HARQ 协议中, 如果中继节点成功接收到数据帧, 那么中继节点来重传增加冗余帧。如果中继节点不能正确接收数据帧, 那么将由信源节点来重传相应的增加冗余帧, 这等价于传统的非协作 HARQ 情况。对于网络编码协作 HARQ 协议, 在所有情况下叠加比例参数 γ^2 都设置为 0.25。

4.1 对称上行链路情况

图 4 和图 5 刻画了不同 HARQ 协议随源节点上行链路信道质量变化下的分组错误概率性能。这里源节点上行链路信道与中继节点上行链路信道具有相同的平均信噪比(SNR)。因为源节点与中继节点间信道质量通常比较好, 这里考虑源节点与中继节点间信道的平均信噪比分别为 16 dB 和理想状态, 其中图 4 为源节点与中继节点间为理想状态下的性能, 图 5 为源节点和中继节点间信道平均信噪比为 16 dB 下的性能。仿真曲线表明本文提出的网络编码协作 HARQ 协议在几乎所有的信噪比区域里可以比传统的非协作 HARQ 协议获得较好的分组错误概率性能。只有用户 B 在低信噪比区域性能有一些损失。两个用户都可以获得分集度为 2 的分集增益。当源节点与中继节点间信道处于理想状态, 分组错误概率在 10^{-2} 时, 用户 A 和用户 B 的增益分别

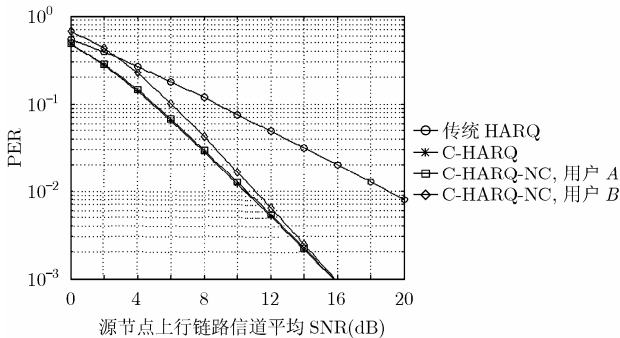


图 4 不同 HARQ 协议的分组错误概率

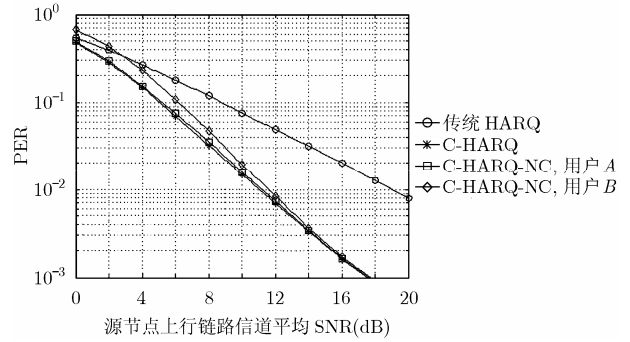


图 5 不同 HARQ 协议的分组错误概率

为 8.4 dB 和 7.9 dB。当源节点与中继节点间信道的平均信噪比为 16 dB 时, 两用户的增益分别为 7.8 dB 和 7.4 dB。在网络编码协作 HARQ 协议里, 两用户间性能的差异是由于中继节点分配给两用户信号的功率不同造成的。在非对称上行链路状况下该方式会显著改善上行链路信道质量差用户的性能。叠加因子 γ^2 的选择对系统的性能有着很大的影响, 这里 $\gamma^2 = 0.25$ 是一种较优的选择。与非网络编码协作 HARQ 协议相比, 用户 A 可获得与其几乎相当的性能, 而用户 B 的性能有一些损失。分组错误概率在 10^{-2} 时, 两种源节点与中继节点间信道状态下, 用户 B 的性能损失分别为 0.5 dB 和 0.4 dB, 都在可接受的范围内。随着上行链路平均信噪比的增加, 这一差异将逐渐缩小。分组错误概率在 10^{-3} 时, 网络编码下用户 B 的性能几乎接近非网络编码协作 HARQ 协议下的性能。两种协作 HARQ 协议都可以获得分集度为 2 的分集增益。然而非网络编码协作 HARQ 协议下这一分集增益的获得需要更高的硬件消耗(两个协助中继节点而网络编码方式下只需一个中继节点)和更多的带宽消耗(4 个正交信道而不是网络编码方式下的 3 个正交信道)。所以本文提出的网络编码协作 HARQ 协议在硬件消耗和频谱效率方面更加有效。

4.2 非对称上行链路情况

图 6 绘制了不同 HARQ 协议在源节点上行链路信道与中继节点上行链路信道统计不对称下的分组错误概率性能。源节点与中继节点间信道平均信噪比为 16 dB, 用户 A 上行链路信道平均信噪比为 10 dB, 用户 B 上行链路信道平均信噪比为 16 dB, 变动中继节点上行链路信道的平均信噪比。从仿真结果可以看出, 即使中继节点上行链路信道质量较差, 网络编码协作 HARQ 模式也能够改善系统的分组错误概率性能。例如, 在中继节点上行链路信道平均信噪比为 6 dB 时(小于源节点的上行链路信道平均信噪比), 网络编码协作 HARQ 协议中两个用户

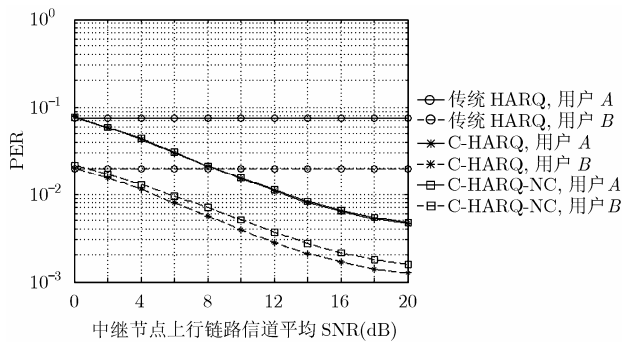


图 6 不同 HARQ 协议的分组错误概率性能

的分组错误概率分别为 3.1×10^{-2} 和 9.5×10^{-3} , 小于传统非协作 HARQ 协议中两个用户的分组错误概率 7.5×10^{-2} 和 2.0×10^{-2} 。随着中继节点上行链路信道平均信噪比的增加, 该性能改善将更加显著。与非网络编码协作 HARQ 协议相比, 用户 A 可以获得几乎相同的性能, 而用户 B 有一些性能损失。例如信噪比在 16 dB 时, 用户 B 在非网络编码协作 HARQ 协议和网络编码协作 HARQ 协议下的性能分别为 1.7×10^{-3} 和 2.1×10^{-3} 。通过网络编码, 两个用户的信号在中继节点分配有不同的功率(用户 A 的上行链路信道较差, 所以中继节点分配给其信号的功率较多, 用户 B 的上行链路信道较好, 所以中继节点分配给其信号的功率较少), 因而用户 A 可以获得较好的分组错误概率性能, 用户 B 的性能虽然较非网络编码协作时有一些损失, 但其性能仍然优于用户 A 的性能。中继节点的编码处理可以平衡两个用户上行链路信道质量的不等差异, 从而构建一个总体性能较优的系统, 因为上行链路信道质量差的用户的性能得到了显著改善。图 7 给出了源节点与中继节点间信道平均信噪比固定为 16 dB, 用户 A 的上行链路信道平均信噪比较中继节点的上行链路信道低 4 dB 而用户 B 的上行链路信道平均信噪比较中继节点的上行链路信道高 4 dB 情况下不同协议的分组错误概率性能。

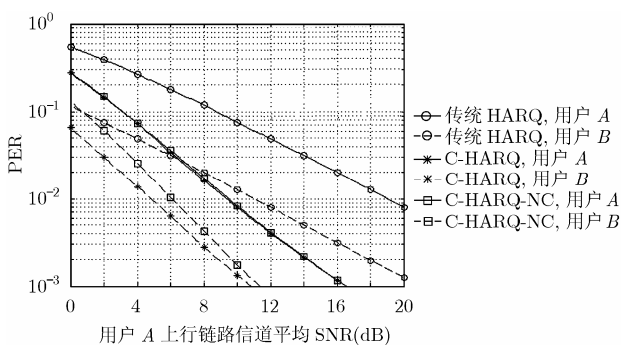


图 7 不同 HARQ 协议的分组错误概率性能

5 结论

本文提出了一种基于物理层网络编码的多用户协作 HARQ 协议。一个中继节点协助信源节点重传, 并采用重叠调制方式处理两用户的增加冗余帧。对不同信道状态下的数据链路层分组错误概率性能进行了仿真和分析。仿真结果表明本文提出的网络编码协作 HARQ 协议可以在较低的硬件消耗和较高的频谱效率下获得分集度为 2 的较好性能。该协作 HARQ 协议可以应用到具有分布式天线系统的无线网络中。下一步我们将就网络编码协作 HARQ 协议的理论性能以及该系统下信号重叠调制中参数的优化问题做进一步的研究。

参考文献

- [1] Laneman J N, Wornell G W, and Tse D N C. An efficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless networks [C]. IEEE International Symposium on Information Theory, Wahinton, D. C., Jun. 24-29, 2001: 294.
- [2] Laneman J N, Tes D N C, and Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocol and outage behavior [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [3] Nosratinia A, Hunter T E, and Hedayata A. Cooperative communication in wireless networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42(10): 74-80.
- [4] Stanojev I, Simeone O, and Bar-Ness Y, et al. Performance of multi-relay collaborative Hybrid-ARQ protocols over fading channels [J]. *IEEE Communications Letters*, 2006, 10(7): 522-524.
- [5] Stanojev I, Simeone O, and Bar-Ness Y. Performance analysis of collaborative Hybrid-ARQ incremental redundancy protocols over fading channels [C]. Signal Processing Advances in Wireless Communications, Cannes, Jul. 2-5, 2006: 1-5.
- [6] Levorato M, Tomasin S, and Zorzi M. Cooperative spatial multiplexing for ad hoc networks with hybrid ARQ: system design and performance analysis [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2008, 56(9): 1545-1555.
- [7] Yu G D, Zhang Z Y, and Qiu P L. Cooperative ARQ in wireless networks: protocols description and performance analysis [C]. IEEE International Conference on Communication, Istanbul, Turkey, Jun. 11-15, 2006: 3608-3614.
- [8] Pang K, Li Y H, and Vucetic B. An improved hybrid ARQ scheme in cooperative wireless networks [C]. IEEE Vehicular Technology Conference, Calgary, Canada, Sep. 2008: 1-5.
- [9] Mardani M, Harsini J S, and Lahouti F, et al. Joint adaptive modulation-coding and cooperative ARQ for wireless relay networks [C]. IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems, Reykjavik, Iceland, Oct. 21-24,

- 2008: 319-323.
- [10] Wang D, Chong C C, and Watanabe F, *et al.*. Opportunistic cooperative ARQ transmission scheme in cellular networks [C]. IEEE International Conference on Communication, Beijing, China, May. 19-23, 2008: 4802-4808.
- [11] Alshwede R, Cai N, and Li S-Y, *et al.*. Network information flow [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [12] Chen Y D, Kishore S, and Li J. Wireless diversity through network coding [C]. Wireless Communications and Networking Conference, Apr. 3-6, 2006, 3: 1681-1686.
- [13] Larsson E G and Vojcic B R. Cooperative transmit diversity based on superposition modulation [J]. *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(8): 778-780.
- 孙 岳: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为协作通信理论和网络编码理论.
- 李 颖: 女, 1973 年生, 教授, 硕士生导师, 研究方向为网络编码、信息论与差错控制编码、MIMO 与空时编码技术.
- 王新梅: 男, 1937 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信道编码理论和密码学.