

协作通信系统中基于频谱效率优化的跨层设计

刘少智^{1,3} 柯峰² 黄生叶¹

(1. 湖南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510640;
3. 南昌铁路局电务处, 江西南昌 330002)

摘要: 为改善协作分集系统的频谱效率, 提出一种改进的跨层设计方案, 对协作通信系统物理层的自适应调制编码 (AMC) 技术和链路层的混合自动重传 (HARQ) 协议进行联合优化设计。该方案利用少量比特的反馈, 使得仅当目的节点通过直接信道不能正确译码分组时或者当直接信道处于深度衰落时触发中继节点转发协作伙伴数据。给出了所提方案基于瑞利衰落信道、解码转发 (DF) 条件下频谱效率的表达式, 然后搜索在任意信噪比条件下使频谱效率最大化的调制与编码方案。通过计算机仿真对理论分析进行了验证。理论分析和仿真表明该跨层设计在中低信噪比 (SNR) 可进一步提升协作通信系统的频谱效率。

关键词: 频谱效率; 协作分集; 自动重传请求; 自适应调制与编码

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)03-0475-05

Cross-layer design based on optimal spectral efficiency in cooperative communication system

LIU Shao-zhi^{1,3} KE Feng² HUANG Sheng-ye¹

(1. College of information science and engineering, Hunan University, Changsha Hunan, 410082;
2. College of electronics and telecommunication, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640;
3. Electric department of nanchang railway administration bureau 330002)

Abstract: This paper presents an improved cross-layer design which combines adaptive modulation and coding (AMC), cooperative diversity (CD) at physical layer (PHY) and the hybrid automatic repeat request (HARQ) protocol at data link layer (LL) to enhance the spectral efficiency in cooperative communication system. Only when the destination node (D) is unable to decode a packet directly from the source node (S) correctly, or the source-destination channel is suffering deep fading, the relay node (R) forwards the data from the source to the destination on receiving a feedback signal of a little bits. We first derive a closed form expression for the spectral efficiency of the joint cooperative HARQ-AMC under Rayleigh fading channel and decode-and-forward (DF) scenarios, then, aiming at maximizing the spectral efficiency, we search for the optimum AMC scheme by a computer algorithm. Simulations are done to verify the method. Numerical and simulation results show that the proposed scheme can further improve the spectral efficiency at medium to low signal-to-noise-ratio (SNR) scenarios.

Key words: spectral efficiency; cooperative diversity; HARQ; AMC

1 引言

在实际的蜂窝通信系统和无线自组织网络中, 移动终端由于受到体积、功耗和工艺等多方面的限制, 安装多个天线有很大困难, 因此限制了多输入多输出 (MIMO) 技术的应用。协作分集技术^[1]使具有单天线的移动设备按照一定方案共享彼此天线, 产生一个虚

拟 MIMO 系统从而获得分集增益, 大大加快了 MIMO 系统走向实用化的进程。

如图 1 所示, 在协作分集网络中, 目的节点 D 为了区分来自信源节点 S 和中继节点 R 的信息, S-D 和 R-D 信道需映射到相互正交的子信道, 这里信道正交的方法可以采用时分多址 (TDMA)、频分多址 (FDMA) 或者码分多址 (CDMA) 等技术。各用户分别在自己的正交

子信道上转发协作伙伴的数据,而在直接传输系统中,这部分资源可用来发送自己的数据,因此协作分集增益实际是以牺牲系统的频谱效率为代价的^[2]。如何在获得协作分集增益的同时提高系统的频谱效率,是协作分集系统设计的研究重点。

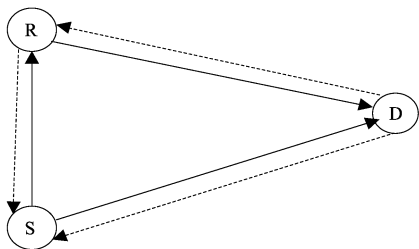


图1 两用户协作通信系统示意图
实线表示数据传递信道,虚线为反馈信道

近来,把物理层的 AMC 与链路层的 ARQ 联合进行优化的跨层设计应用于协作通信系统(C-ARQ)已有一些研究,其基本思想是:利用目的节点分组检错机制,中继节点仅在直接信道传输出错时协作转发伙伴的数据。文献[3]表明,C-ARQ 可以有效提高时间相关衰落信道的吞吐量,并降低分组的平均延迟。文献[4]提出了在解码转发(DF)协作环境下将 AMC 和 HARQ 相结合的数据传输协议(C-HARQ),但其中物理层进行自适应调制编码模式选择的信噪比转换阈值 γ_n 固定设置。文献[5]研究了在 TDMA 模式下,S 和 R 利用 S-D、R-D 信道瞬时 CSI,分别选择最佳 AMC 模式发送(转发)数据,但 R 协作转发的信息来自 S,其转发速率 R_m 不能大于 S 的发送速率 R_n ;当 $R_m < R_n$ 时,也会增加上层协议的复杂度。

基于此,本文以最大协作分集系统频谱效率为目标,提出一种改进的 C-HARQ 协议。一是 R 的协作转发模式与 S 的发送模式相同,使得 C-HARQ 协议更为实用,也减小了 R 的物理层复杂度和分组转发延迟。

二是根据信道统计特性(平均信噪比)优化设置 γ_n 。三是当直接信道处于深度衰落时,与传统的 AMC 不同,信源节点可以经 S-R 和 R-D 路径进行 AMC 发送信息。对于一个用户相互协作的环境,S 和 R 通过若干比特来交换 S-D 和 R-D 信道当前 CSI 的假设是合理的。

全文结构如下:第2节提出改进的 C-HARQ 系统模型和工作原理,第3节对该系统的频谱效率进行理论分析,第4节给出数值计算和计算机仿真结果,最后给出简单的结论。

2 系统模型

2.1 改进的 C-HARQ 协议模型

本文采用一种两用户的半双工 DF 协作模型,所有用户通过时分多址的正交信道发送信息。如图2所示,无线网络中包含一个信源节点 S、中继节点 R 和目的节点 D。每个节点安装一副天线。S 首先将链路层传来的分组暂存在缓存器中,再根据 D 和 R 反馈的 CSI 将若干个分组映射为物理层的一个数据帧。我们采用文献[6]中的帧结构,各分组包含的循环冗余校验(CRC)比特具有理想的检错性能。第一阶段,S 发送一个数据帧,R 和 D 接收该帧。D 根据其对 CRC 的检测结果广播一个肯定确认(ACK)或者否定确认(NACK)。这里假定 S 和 R 可以正确的接收到 ACK 或者 NACK。第二阶段,若 S 接收到 ACK,则启动发送新的数据帧;如果 R 收到 NACK 且自己能正确译码时,它就与 S 相同的模式转发该数据帧,直至 D 正确接收或达到最大重传次数 N_r 为止。此时 D 对 S 和 R 发送的信号经最大比合并(MRC)后译码。仅通过 R 的有限次重传不能保证无差错传送,当 R 重传 N_r 次后 D 仍不能正确接收时将该分组丢弃。本文定义系统平均分组丢弃率(\overline{PLR})不大于 P_{loss} 。

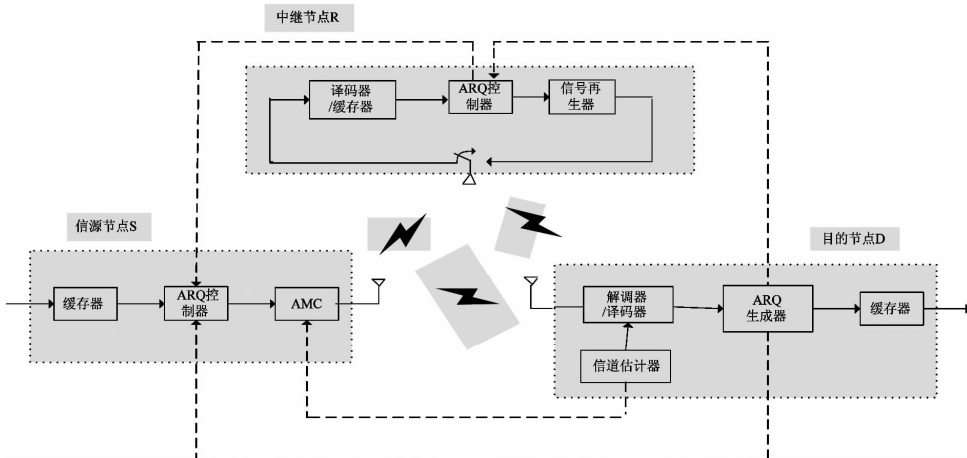


图2 改进的 C-HARQ 系统模型

2.2 信道模型

为方便分析,我们做如下假设。

(1) 设 S-D 和 R-D 信道相互独立,且为频率平坦的瑞利块衰落信道,衰落因子 h_{sd}, h_{rd} 在一个帧发送期间保持不变,在各帧之间独立变化。S-D 和 R-D 信道的加性高斯白噪声(AWGN)均值为零,单边功率谱密度为 N_0 。

(2) 通过合适的中继节点选择算法, R 能可靠接收 S 发送的数据。

(3) S 和 R 的发送功率恒为 P , 占用带宽为 W 。对应于 S-D 和 R-D 信道, D 的瞬时接收信噪比分别为 $\gamma_{sd} = h_{sd}^2 P / N_0 W$, $\gamma_{rd} = h_{rd}^2 P / N_0 W$ 。

2.3 结合 AMC 的 C-HARQ 协议

在物理层,通过把整个接收信噪比划分为 $N+1$ 个连续且不相交叠的区间 $[\gamma_n, \gamma_{n+1})$, $n=0, 1, \dots, N$, 将 S-D 和 R-D 信道离散化为 $N+1$ 个状态。每个状态对应不同的调制编码模式。当 S-D 信道瞬时信噪比 $\gamma_{sd} \in [\gamma_n, \gamma_{n+1})$, $n=1, \dots, N$ 时, S 选择模式 n 发送信息, 信息传送速率为 R_n 。当 $\gamma_{sd} \in [\gamma_0, \gamma_1)$ 时, S 将通过 S-R、R-D 信道 AMC 发送数据。假设通过信道估计, D 可以得到理想的 S-D、R-D 信道的 CSI, 并且无差错、无延迟地反馈到 S。

由于 S-D、R-D 信道增益在一个帧发送期间保持恒定,因此在计算 D 接收某一个数据帧的差错性能时可以把它们看做 AWGN 信道。本文涉及跨层性能分析,我们采用分组错误率(PER)进行性能分析。为了简化分析,PER 采用下式近似表示:

$$PER_n(\gamma) \approx \begin{cases} 1, & 0 < \gamma < \gamma_{pm} \\ a_n \exp(-g_n \gamma) & \gamma > \gamma_{pm} \end{cases} \quad (1)$$

其中参数 a_n, g_n 和 γ_{pm} 通过计算机仿真和数据拟合方法得到^[7]。

R 协作重传 N_r 次后, D 对 S 和 R 发送的信号经 MRC 合并,等效信噪比等于 $\gamma_{sd} + \gamma_{rd1} + \dots + \gamma_{rdNr}$ 。为了满足 $PLR \leq P_{loss}$, 需满足

$$PER(\gamma_{sd}) PER(\gamma_{sd} + \gamma_{rd1}) \dots PER(\gamma_{sd} + \gamma_{rd1} + \dots + \gamma_{rdNr}) \leq P_{loss} \quad (2)$$

为便于分析,本文设 R 最大协作转发次数 $N_r = 1$ 。

3 频谱效率分析

3.1 接收信噪比概率密度函数

对于瑞利衰落的 S-D、R-D 信道,接收信噪比 γ_{sd}, γ_{rd} 均为指数分布的随机变量,其概率密度函数(pdf)可以表示为

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \quad (3)$$

其中 $\bar{\gamma} = E\{\gamma\}$ 表示 γ_{sd} 或 γ_{rd} 的统计平均值。

D 对 S 发送的原始帧和 R 协作转发的重复帧 MRC

合并后等效的接收信噪比 γ_{tot} 可以表示为

$$\gamma_{tot} = \gamma_{sd} + \gamma_{rd} \quad (4)$$

由于 γ_{sd}, γ_{rd} 相互独立, γ_{tot} 矩量母函数(MGF)可以表示为

$$M_{\gamma_{tot}} = M_{\gamma_{sd}} M_{\gamma_{rd}} = \left(1 + \overline{\gamma_{sd}s}\right)^{-1} \left(1 + \overline{\gamma_{rd}s}\right)^{-1} \quad (5)$$

(1) 当 γ_{sd}, γ_{rd} 独立同分布(i. i. d), 即 $E\{|h_{sd}|^2\} = E\{|h_{rd}|^2\}$ 时, 令 $\overline{\gamma_{sd}} = \overline{\gamma_{rd}} = \bar{\gamma}$, 取 $M_{\gamma_{tot}}$ 的 Laplace 逆变换, γ_{tot} 的 pdf 可表示为

$$p_{\gamma_{tot}} = \frac{1}{\bar{\gamma}^2} \gamma \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \quad (6)$$

(2) 当 γ_{sd}, γ_{rd} 独立不同分布(non-i. i. d) 时, $E\{|h_{sd}|^2\} \neq E\{|h_{rd}|^2\}$, $\overline{\gamma_{sd}} \neq \overline{\gamma_{rd}}$, 对(5)式多项式分解后取 Laplace 逆变换, 可得到 γ_{tot} 的 pdf

$$p_{\gamma_{tot}} = \frac{1}{\gamma_{sd} - \gamma_{rd}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_{sd}}\right) + \frac{1}{\gamma_{rd} - \gamma_{sd}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_{rd}}\right) \quad (7)$$

3.2 频谱效率计算

我们把结合了 AMC、ARQ 的协作分集系统的频谱效率定义为每个符号成功传递的平均信息比特数。参考文献[5](7)式, 令 $R_m = R_n$, 可以得到本文研究的 C-HARQ 协议的频谱效率为

$$\eta = \sum_{n=1}^N R_n (1 - \overline{PER(n)}_{sd}) \Pr(n)_{sd} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N R_n \overline{PER(n)}_{sd} \Pr(n)_{sd} \sum_{k=n}^N \Pr(k)_{tot} + \frac{1}{2} \Pr(0)_{sd} \sum_{k=1}^N R_k \Pr(k)_{tot} \quad (8)$$

其中: $\Pr(n)_{sd} = \int_{\gamma_{sd}^n}^{\gamma_{sd}^{n+1}} p_{\gamma_{sd}}(\gamma) d\gamma$, 表示 γ_{sd} 处于状态 n 的概率;

$\Pr(k)_{tot} = \int_{\gamma_{tot}^k}^{\gamma_{tot}^{k+1}} p_{\gamma_{tot}}(\gamma) d\gamma$, 表示 R 协作重传后, γ_{tot} 处于状态

k 的概率; $\overline{PER(n)}_{sd} = \frac{1}{\Pr(n)_{sd}} \int_{\gamma_{sd}^n}^{\gamma_{sd}^{n+1}} PER_n(\gamma) p_{\gamma_{sd}}(\gamma) d\gamma$,

表示 S-D 信道以模式 n 发送原始信息帧的平均 PER。(8)式第三部分表示当 $\gamma_{sd} \in [\gamma_0, \gamma_1)$ 时, S 依据 γ_{tot} AMC 发送数据的频谱效率。

由于 R 工作在 DF 方式, 且设定 S-R 信道可靠接收, 系统 PLR 可以表示为

$$PLR = \sum_{n=1}^N \Pr(n)_{sd} \overline{PER(n)}_{sd} \overline{PER(n)}_{tot} + \Pr(0)_{sd} \overline{PER(0)}_{sd} \sum_{k=1}^N \overline{PER(k)}_{tot} \quad (9)$$

其中 $\overline{PER(n)}_{tot} = \frac{1}{\Pr(n)_{tot}} \int_{\gamma_{tot}^n}^{\gamma_{tot}^{n+1}} PER_n(\gamma) p_{\gamma_{tot}}(\gamma) d\gamma$, 表示目的节点收到 R 重传帧的平均 PER。当 $\gamma_{sd} \in [\gamma_0, \gamma_1)$ 时, S-D 信道深度衰落, $\overline{PER(0)}_{sd} = 1$ 。

3.3 优化频谱效率

本文的目标是在保证给定服务质量条件下最大化系统的平均频谱效率,即

$$\begin{cases} \max & \eta \\ \text{s.t.} & \overline{\text{PLR}} \leq P_{\text{loss}} \end{cases} \quad (10)$$

其中 P_{loss} 表示链路层需要满足的服务质量性能指标。

这是一个两变量的数值优化问题。当 $\overline{\text{PLR}} = P_{\text{loss}}$ 时, η 取得最大值。实际上,只要系统在每一个状态 n 均满足

$$\text{PLR}(n) = \begin{cases} \overline{\text{PER}(n)}_{\text{sd}} \overline{\text{PER}(n)}_{\text{tot}} = P_{\text{loss}} & n = 1, 2, \dots, N \\ \overline{\text{PER}(k)}_{\text{tot}} = P_{\text{loss}} & n = 0, k = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (11)$$

就能保证系统 $\overline{\text{PLR}} = P_{\text{loss}}$ 的服务质量要求。下面给出的搜索算法可以在 P_{loss} 和 $\overline{\gamma}_{\text{sd}}, \overline{\gamma}_{\text{rd}}$ 给定的条件下求解(10)式。

(1) 取定 $\overline{\text{PER}(n)}_{\text{sd}} \in \theta$,

$\theta = \{\overline{\text{PER}(n)}_{\text{sd}} : P_{\text{loss}} < \overline{\text{PER}(n)}_{\text{sd}} \leq 1\}$ 。由(11)式得到 $\overline{\text{PER}(n)}_{\text{tot}}$ (或 $\overline{\text{PER}(k)}_{\text{tot}}$)。

(2) 按照文献[7]的方法,由 $\overline{\text{PER}(n)}_{\text{sd}}, \overline{\text{PER}(n)}_{\text{tot}}$ (或 $\overline{\text{PER}(k)}_{\text{tot}}$) 确定 S-D、R-D 链路 AMC 信噪比边界 $\{\gamma_n^{\text{sd}}\}_{n=0}^{N+1}$ 和 $\{\gamma_n^{\text{rd}}\}_{n=0}^{N+1}$ 。

(3) 按(8)式计算系统的平均频谱效率

$$\eta(\overline{\text{PER}(n)}_{\text{sd}})。$$

(4) 遍历 $\overline{\text{PER}(n)}_{\text{sd}} \in \theta$, 重复 1-3 步。

$$(5) \eta = \max\{\eta(\overline{\text{PER}(n)}_{\text{sd}})\}。$$

4 数值计算与仿真

参数设定:信息分组长度 $N_b = 1080\text{bit}$,采用的信道编码与调制模式及对应的拟合参数 a_n, g_n 和 γ_{pn} 如表1所示。将 S-D 的距离归一化, R-D 距离设为 d , 路径损耗系数 $\alpha = 4, P_{\text{loss}} = 0.001$ 。

表1 信道编码与调制模式

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
Modulation	BPSK	QPSK	QPSK	16-QAM	64-QAM
Coding rate	1/2	1/2	3/4	3/4	3/4
R_n (bits/sym)	0.5	1.0	1.5	3.0	4.5
a_n	274.7229	90.2514	67.6181	53.3987	35.3508
g_n	7.9932	3.4998	1.6883	0.3756	0.0900
γ_{pn}	-1.5331	1.0942	3.9722	10.2488	15.9784

图3,4 分别给出 $d=0.8, d=1$ 两种情况下系统频谱效率 η 与 $\overline{\gamma}_{\text{sd}}$ 的关系。为便于比较,图中还给出了参考文献[4]、[5]在与本文相同仿真条件下的性能曲线。可以看出,所提方案的频谱效率在中、低信噪比时较[4]、[5]有进一步的改善,而文献[4]、[5]的性能曲线较为接近。这是因为本文改进的 C-HRQ 协议以最优化频谱效率为目标,对物理层的 AMC 和链路层的 HARQ 协议进行联合优化设计,提高了系统的性能。具体来讲,本方案 AMC 根据 S-D 和 R-D 衰落信道统计特性动态调整 γ_n , 在满足给定的 $\overline{\text{PLR}}$ 条件下相对文献[4]能够提高系统频谱效率;相对文献[5],本文采用的 HARQ 协议较 ARQ 协议性能有所提高,而且信噪比越低,直接信道发生深衰落和 R 参与协作重传的概率越大。

图3,4 分别对应了 $\gamma_{\text{sd}}, \gamma_{\text{rd}}$ 独立不同分布和独立同分布。比较图3,4 可看出,选择路径损耗更小的中继节点 R(图3)对系统的频谱效率略有改善,但差异不明显。

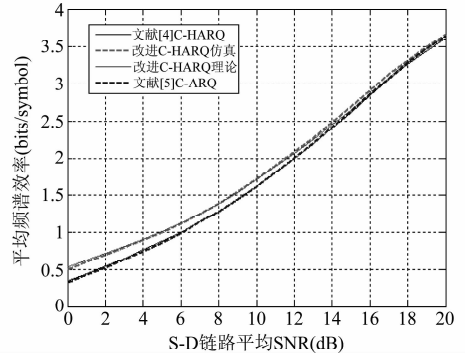


图3 协作分集系统平均频谱效率与 S-D 链路平均信噪比关系 ($d=0.8$)

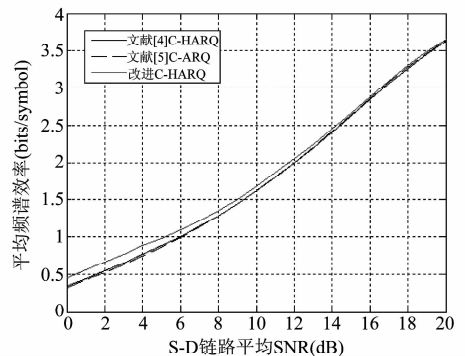


图4 协作分集系统平均频谱效率与 S-D 链路平均信噪比关系 ($d=1.0$)

5 结论

针对协作分集(CD)系统会降低频谱效率的问题,提出一种复杂度较低的对物理层的 AMC 和链路层的

HARQ 协议进行联合优化的跨层设计方案。本文从理论上推导了基于该方案系统可达到的频谱效率,并通过计算机仿真进行验证。理论分析和仿真表明该跨层设计方法在中、低信噪比可进一步提高协作通信系统频谱效率。

参考文献

- [1] J. Nicholas Laneman, David N. C. Tse, and Gregory W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Dec. 2004, vol. 50, pp. 3062-3080.
- [2] Tyler Nechiporenko and Khoa T. Phan, "On the Capacity of Rayleigh Fading Cooperative Systems Under Adaptive Transmission," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Apr. 2009, vol. 8, pp. 1626-1631.
- [3] Dianati M, Ling Xinhua, Naik K, Shen Xuemin, "A node-cooperative ARQ scheme for wireless Ad hoc networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 2006; 55(3): 1032-1044.
- [4] Shi Feijin, Yuan Dongfeng, "Cross-Layer Combination of Cooperative HARQ with AMC in Wireless Ad-hoc Networks," *IEEE Singapore International Conference on* 19-21 Nov. 2008; 896-900.
- [5] Morteza Mardani, Jalil S. Harsini, Farshad Lahouti, Behrouz Eliasi, "Joint Adaptive Modulation-Coding and Cooperative ARQ Over Relay Channels-Applications to Land Mobile Satellite Communications", Submitted to *Wiley J. on Wireless Commun. and Mobile Computing*, July 2008.
- [6] Liu Qingwen, Zhou Shengli, and Georgios B. Giannakis, "Cross-Layer Combining of Adaptive Modulation and Coding With Truncated ARQ Over Wireless Links," *IEEE*

Trans. Wireless Commun., Sept. 2004, vol. 3, pp. 1746-1755.

- [7] Liu Qingwen, Zhou Shengli, and Georgios B. Giannakis, "Queuing With Adaptive Modulation and Coding Over Wireless Links: Cross-Layer Analysis and Design," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, May 2005, vol. 4, pp. 1142-1153.
- [8] Mohamed-Slim Alouini and Andrew J. Goldsmith, "Adaptive Modulation over Nakagami Fading Channels," *Kluwer J. Wireless Commun.*, May 2000, vol. 13, no. 1-2, pp. 119-143.

作者简介



刘少智(1976-),男,江西萍乡人,湖南大学信息科学与工程学院硕士研究生,南昌铁路局电务处助理工程师,主要研究方向为无线通信技术。

E-mail:lsz1119@163.com



柯峰(1975-),男,江苏无锡人,博士,华南理工大学电子与信息学院,副教授。主要研究方向为:中继协作通信与空时处理,移动通信网络中资源分配,OFDM通信系统的同步与自适应调制。



黄生叶(1966-),男,湖南武冈人,博士,湖南大学信息科学与工程学院教授,主要研究领域为通信网络性能评价及优化、无线通信技术等。