

## 基于有限反馈的数据流数自适应 SDMA

黄永明 许道峰 罗元钊 杨绿溪  
(东南大学信息科学与工程学院 南京 210096)

**摘要:** 针对目前绝大部分有限反馈自适应 SDMA 由于使用固定满波束发送策略而导致在稀疏网络中严重的用户间干扰的问题, 该文提出了一种基于有限反馈的数据流数自适应 SDMA, 该方案能通过自适应地选择并行发送波束的数目来达到有效控制用户间干扰的目的。具体实现如下: 通过用户的有限反馈信息, 以及信道的二阶统计信息, 基站端使用约束最大似然估计的方法估计出使用不同数目发送波束的发送模式所支持的最大和吞吐量, 从而自适应地选择最优的发送模式。仿真结果表明: 该文提出的方案能在增加很少反馈量的前提下显著改善现有 SDMA 方案的性能。

**关键词:** 空分分址接入; 有限反馈; 多用户分集; 数据流数自适应

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)03-0649-04

## Limited Feedback SDMA with Adaptive Multiplexing Order

Huang Yong-ming Xu Dao-feng Luo Yuan-qian Yang Lu-xi

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In order to tackle the inter-user interference issue of the limited feedback SDMA which uses a fixed number of active beams to simultaneously transmit signal, this paper proposes a novel limited feedback SDMA capable of adaptively selecting the optimal number of simultaneous beams, i.e., the optimal multiplexing order. In particular, the base station uses the feedback information from users and the spatial correlation matrix at the transmitter to ML estimate the maximum supported sum throughput for different number of active beams, thus the multiplexing order with the optimal performance can be chosen in each implementation of SDMA. Simulation results demonstrate that the proposed SDMA considerably outperforms the conventional SDMA in terms of throughput, with a small additional feedback overhead.

**Key words:** Space Division Multiple Access(SDMA); Limited feedback; Multiuser diversity; Adaptive multiplexing order

### 1 引言

在多天线的广播信道中, 利用空间资源可以同时同频向多个用户发送信息, 该技术称为空分多址接入(SDMA), 相比传统的时分多址接入(TDMA), 它能成倍地提高系统吞吐量。研究表明, 通过脏纸编码(DPC)<sup>[1]</sup>实现的 SDMA 能获得最优性能, 但这种方案由于太高的复杂度以及非因果性而不实用。目前较实用的 SDMA 通常使用复杂度较低的多用户预编码技术, 比如迫零(ZF)多用户预编码技术<sup>[2]</sup>、MMSE 多用户预编码技术<sup>[3]</sup>、基于广义特征值的多用户预编码技术<sup>[4]</sup>以及迭代的预编码技术<sup>[5]</sup>等。这些技术能获得较优的性能, 当它们与用户调度技术联合使用时, 还能获得广播信道的多用户分集<sup>[6]</sup>。但必须指出的是, 上述技术的实现都需要基站精确已知所有用户的信道状态信息(CSI)。在 FDD 系统中, 反馈所有用户的 CSI 开销太大, 难以实现。

基于信道信息有限反馈的 SDMA 技术是目前广受关注

的一个研究领域, 从反馈信息的内容来看, 它可以大致分为两类: 第 1 类有限反馈 SDMA 通过对用户的信道状态信息 CSI 进行量化<sup>[7-9]</sup>, 生成基站和用户端皆先验已知的信道量化码本, 以减轻信道信息反馈开销; 第 2 类有限反馈 SDMA 是基于多用户预编码码本和随机调度技术<sup>[10,11]</sup>。比较特别的是, 文献[10]使用一个随机酉矩阵作为预编码矩阵, 并选择信道条件好的多个用户实现 SDMA。上述的有限反馈 SDMA 方案在优化设计时都固定地选择最大支持数目的用户并行发送数据。为了达到最优的性能, 理论上需要对各个并行的数据流进行类似注水的功率分配。但由于有限反馈系统基站端缺乏足够的广播信道信息, 现有的 SDMA 方案绝大部分都使用并行用户等功率信号发送的策略, 它会引起一定的性能损失。为了有效补偿有限反馈 SDMA 系统的这种性能损失, 本文提出了一种数据流数自适应的方案, 基站根据已知的部分广播信道信息, 在联合设计预编码与用户调度的同时对并行发送用户的数目也进行自适应地选择。该方案是基于预先定义好的预编码码本或类似文献[10]的随机酉矩阵, 但反馈信息除了首选码字的编号以及供用户调度使用的信道模值信息外, 还需要信道矢量的相位信息。基于这些反馈信

2007-11-15 收到, 2008-05-05 改回

国家 973 计划项目(2007CB310603), 国家自然科学基金(60672093), 国家 863 计划项目(2007AA01Z262)和华为高校基金资助课题

息,同时利用信道的统计信息,基站端能估计出不同数据流数的SDMA所能支持的吞吐量,从而自适应地选择最优的并行发送波束。

本文结构组织如下:第2节介绍了自适应SDMA的系统模型,第3节给出了设计准则、详细的自适应算法,第4节示意了计算机仿真结果,第5节对本文作了小结。

## 2 系统模型

本文考虑一个多用户多天线通信系统的下行链路,基站同时服务于 $U$ 个用户。假设基站配置 $M_t$ 根发射天线,每个用户端配置单根天线。如图1所示,基站根据有限反馈信道信息同时选择 $K$  ( $\leq M_t$ )个用户并行发送数据,用户数 $K$ 是可变的但不能大于基站多天线所能支持的最大并行数据流数。假设被选中的 $K$ 个用户的发送信号矢量为 $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_K]^T$ ,满足 $E[s_k^2] = 1, k = 1, \dots, K$ 。各用户以波束矢量 $\{\mathbf{w}_k\}$ 并行发送数据,即使用SDMA方式,每个用户的发送功率都为 $E_s$ ,则第 $k$ 个用户的等效基带接收信号可以表示为

$$y_k = \sqrt{E_s} \sum_{i=1}^K \mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_i s_i + v_k \quad (1)$$

其中 $\mathbf{h}_k$ 表示平均功率归一化的第 $k$ 个用户的瞬时信道矢量, $\mathbf{h}_k \in C^{M_t \times 1}$ ,且假设服从平坦衰落; $v_k$ 表示高斯白噪声,其单边功率谱密度为 $N_0$ 。用户 $k$ 在进行信号检测时视其他波束上的信号为干扰。

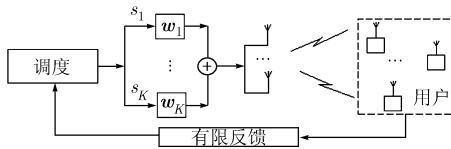


图1 系统模型图

设计高效的信道信息反馈机制和相应调度算法是有效实现上述系统的关键。为了简化设计,传统的有限反馈SDMA一般都采用固定满波束并行发送策略,当用户数量有限时这种方式往往导致用户间存在较强的干扰。为此,本文将提出一种能自适应地选择并行发送波束数量的有限反馈SDMA方案,具体描述见第3节。

## 3 数据流数自适应SDMA算法

### 3.1 反馈信息

本文提出的自适应SDMA算法基于一个码字为酉阵的预编码码本<sup>[10,11]</sup>,与传统的自适应SDMA方案不同的是,这里用户除了反馈最优波束矢量对应的编号外,还需要反馈信道矢量的模值以及信道矢量相对最优波束的相位差。

假设预编码码本表示为 $\mathcal{F} = \{\mathbf{F}_1, \dots, \mathbf{F}_N\}$ ,其码字 $\mathbf{F}_i$ 是阶数为 $M_t$ 的酉阵。令 $\mathbf{F}_i = [\mathbf{f}_1^{(i)}, \dots, \mathbf{f}_{M_t}^{(i)}]$ ,酉阵中的各列 $\{\mathbf{f}_j^{(i)}\}$ 视为用户的发送波束矢量。用户 $k$ 根据估计的信道状态信息 $\mathbf{h}_k$ ,首先按如下方式从码本中选择最优的发送波束矢量 $\mathbf{q}_k$ :

$$\mathbf{q}_k = \underset{j^{(i)}}{\arg \max} |\mathbf{h}_k^T \mathbf{f}_j^{(i)}| \quad (2)$$

并把 $\mathbf{q}_k$ 在码本中的编号 $p_k$ 通过低速反馈信道反馈给基站,由于码本中发送波束矢量的总数为 $NM_t$ ,因此反馈 $p_k$ 需要 $\log_2(NM_t)$ 个信息比特。

为了实现多用户随机调度,用户 $k$ 还需要反馈信道的模值 $\rho_k = \|\mathbf{h}_k\|$ ,以及信道矢量相对于最优波束的相位差 $\cos(\theta_k)$ ,其定义如下:

$$\cos(\theta_k) = |\mathbf{h}_k^T \mathbf{q}_k| / \|\mathbf{h}_k\| = |\tilde{\mathbf{h}}_k^T \mathbf{q}_k| \quad (3)$$

其中 $\tilde{\mathbf{h}}_k = \mathbf{h}_k / \|\mathbf{h}_k\|$ 表示幅度归一化的瞬时信道矢量。

### 3.2 数据流数自适应调度算法

约束多个并行发送波束 $\{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_K\}$ 相互正交,其个数 $K$ 满足 $1 \leq K \leq M_t$ 。给定码本的尺度 $N$ 以及发射天线数 $M_t$ ,最多可以有 $M_p = N \sum_{k=1}^{M_t} \binom{M_t}{k}$ 种不同的发送波束模式,分别记为 $\mathbf{W}^{(i)} = [\mathbf{w}_1^{(i)} \dots \mathbf{w}_{K_i}^{(i)}], i = 1, \dots, M_p$ , $\mathbf{W}^{(i)}$ 必为码本中某一个码字或为包含其某 $K$ 个列的子矩阵。对于任意 $\mathbf{W}^{(i)}$ ,只要其包含的波束都被至少一个用户选为首选波束,根据用户的CSI,可以计算该模式支持的最大和吞吐量:

$$T_i = \sum_{j=1}^{K_i} \log_2(1 + \text{msinr}_j^{(i)}) \quad (4)$$

其中 $\text{msinr}_j^{(i)}$ 表示该模式下第 $j$ 个发送波束支持的最大信干噪比,计算如下:

$$\begin{aligned} \text{msinr}_j^{(i)} &= \underset{1 \leq k \leq U, \mathbf{q}_k = \mathbf{w}_j^{(i)}}{\max} \left( \frac{E_s |\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_j^{(i)}|^2}{E_s \sum_{l=1, l \neq j}^{K_i} |\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_l^{(i)}|^2 + N_0} \right) \\ &= \underset{1 \leq k \leq U, \mathbf{q}_k = \mathbf{w}_j^{(i)}}{\max} \left( \frac{\rho_k^2 \cos^2(\theta_k)}{\sum_{l=1, l \neq j}^{K_i} |\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_l^{(i)}|^2 + 1/\text{snr}_k} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\text{snr}_k = E_s/N_0$ 。式(5)中括号内的表示式表示信道矩阵为 $\mathbf{h}_k$ 的用户接收发送波束 $\mathbf{w}_j^{(i)}$ 上承载的信号时所能获得的信干噪比。由于基站只能获得部分用户的CSI,因此并不能精确计算式(5)中的 $\text{msinr}_j^{(i)}$ 值,只能利用有限的反馈信息对其进行最大似然估计。观察式(5)可以发现,对于码本中用户 $k$ 指向的码字(即 $p_k$ 对应的该用户最优波束 $\mathbf{q}_k$ 从属于 $\mathbf{F}_n$ 的某一列),若能估计出等效信道矢量 $\mathbf{h}_{k,e} = \mathbf{F}_n^T \mathbf{h}_k$ ,则能得到 $\text{msinr}_j^{(i)}$ 的估计值,因为 $\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_l^{(i)}$ 必为 $\mathbf{h}_{k,e}$ 中的某个元素。不失一般性,假设 $\mathbf{q}_k$ 位于矩阵 $\mathbf{F}_n$ 的第1列,它可以通过简单的置换实现。

信道 $\mathbf{h}_k$ 服从零均值复高斯分布,因此 $\mathbf{h}_{k,e}$ 也服从零均值复高斯分布,其二阶统计相关性为

$$\mathbf{R}_{k,e} = E[\mathbf{h}_{k,e} \mathbf{h}_{k,e}^H] = \mathbf{F}_n^T \mathbf{R}_k \mathbf{F}_n \quad (6)$$

其中 $\mathbf{R}_k = E[\mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H]$ 表示信道的统计相关矩阵。 $\mathbf{h}_{k,e}$ 的概率密度分布函数则可以表示为<sup>[12]</sup>

$$f(\mathbf{h}_{k,e}) = \frac{1}{\pi^{N_t} \det(\mathbf{R}_{k,e})} \exp(-\mathbf{h}_{k,e}^H \mathbf{R}_{k,e}^{-1} \mathbf{h}_{k,e}) \quad (7)$$

其中  $\mathbf{R}_{k,e}^{-1}$  表示空间相关矩阵  $\mathbf{R}_{k,e}$  的逆矩阵。由反馈信息可知,  $\mathbf{h}_{k,e}$  还满足如下约束条件:  $\mathbf{h}_{k,e}^H \mathbf{h}_{k,e} = \mathbf{h}_k^H \mathbf{h}_k = \rho_k^2$ ;  $h_{e,1} = \mathbf{q}_k^T \mathbf{h}_k = \rho_k \cos(\theta_k)$ , 这里  $h_{e,1}$  表示  $\mathbf{h}_{k,e}$  的第1个元素。因此,  $\mathbf{h}_{k,e}$  的最大似然估计可以表示为如下的约束优化问题:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mathbf{h}}_{k,e} &= \underset{\mathbf{h}_{k,e}}{\arg \max} (f(\mathbf{h}_{k,e})) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} h_{e,1} = \rho_k \cos(\theta_k) \\ \mathbf{h}_{k,e}^H \mathbf{h}_{k,e} = \rho_k^2 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

上述问题可等效成:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mathbf{h}}_{k,e} &= \underset{\mathbf{h}_{k,e}}{\arg \min} (\mathbf{h}_{k,e}^H \mathbf{R}_{k,e}^{-1} \mathbf{h}_{k,e}) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} h_{e,1} = \rho_k \cos(\theta_k) \\ \mathbf{h}_{k,e}^H \mathbf{h}_{k,e} = \rho_k^2 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由拉格朗日极值法可得:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mathbf{h}}_{k,e} &= [\rho_k \cos(\theta_k) \quad \mathbf{b}^T]^T \\ \mathbf{b} &= -\rho_k \cos(\theta_k) (\Phi^T \mathbf{R}_k^{-1} \Phi^* - \xi \mathbf{I})^{-1} \Phi^T \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{q}_k^* \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中  $\Phi$  表示  $\mathbf{F}_n$  的第2到第  $M_t$  列组成的子矩阵, 拉格朗日乘子  $\xi$  为下列方程的最小根:

$$\sum_{i=1}^{M_t-1} \frac{|a_i|^2}{(\lambda_i - \xi)^2} = \rho_k^2 \frac{1 - \cos^2(\theta_k)}{\cos^2(\theta_k)} \quad (11)$$

其中  $[a_1 \cdots a_{M_t-1}]^T = \Phi^T \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{q}_k^*$ ,  $\{\lambda_i\}$  表示矩阵  $\Phi^T \mathbf{R}_k^{-1} \Phi^*$  的特征根。观察方程(11)可以发现, 该方程左端是一个分区间凸函数, 假设  $\lambda_1$  表示矩阵  $\Phi^T \mathbf{R}_k^{-1} \Phi^*$  的最小特征根, 则式(11)的最小根必属于区间  $[-\infty, \lambda_1)$ , 用数值求解法很容易得到拉格朗日乘子  $\xi$ 。

利用等效信道的估计值  $\hat{\mathbf{h}}_{k,e}$ , 由式(4), 式(5)可以计算基于特定码本所有的可能发送模式支持的最大和吞吐量, 基站则可选择具有最大和吞吐量的发送模式实现 SDMA 传送, 即

$$\mathbf{W}^{(p)} = \underset{\mathbf{W}^{(i)}}{\arg \max} (\hat{T}_i(\mathbf{W}^{(i)})) \quad (12)$$

其中  $\hat{T}_i(\mathbf{W}^{(i)})$  表示发送模式  $\mathbf{W}^{(i)}$  所能支持的最大和吞吐量估计值。  $\mathbf{W}^{(p)}$  所包含的列数  $K_p$  即为最优的数据流数, 被调度的  $K_p$  用户的标号可分别表示为

$$k_l = \underset{1 \leq k \leq U, \mathbf{q}_k = \mathbf{f}_k^{(p)}}{\arg \max} \left( \frac{\rho_k^2 \cos^2(\theta_k)}{\sum_{l=1, l \neq j}^{K_p} |\text{est}(\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_l^{(p)})|^2 + 1/\text{snr}_k} \right), \quad l = 1, \dots, K_p \quad (13)$$

其中  $\text{est}(\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_l^{(p)})$  表示通过等效信道估计获得的  $\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}_l^{(p)}$  的估计值, 它为  $\hat{\mathbf{h}}_{k,e}$  的某个元素, 被调度用户的发送波束对应  $\mathbf{W}^{(p)}$  中的各列。

#### 4 仿真结果

基站配置4根天线, 用户端配置单根天线。信道假设为平坦衰落信道, 基站端天线阵列的空间相关性矩阵  $\mathbf{R}_k$  简单

表示为如下形式:

$$\mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} 1 & \rho & \cdots & \rho^{M_t} \\ \rho^* & 1 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ (\rho^*)^{M_t} & & & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

由于室外 MIMO 信道环境中一般都可以假设发送端和接收端天线阵列的空间相关性是可分离的<sup>[13]</sup>, 因此可以假设所有用户信道在基站端的空间相关性是相同的。仿真中码本采用了 IEEE802.20 协议中的 MISO-SDMA 码本<sup>[11]</sup>。

首先考察  $\mathbf{R}_k$  对信道估计性能的影响, 图2示意了第3.2节所述的等效信道估计的归一化均方误差随相邻发射天线之间的相关系数  $\rho$  的变化趋势。归一化均方误差(Normalized Mean Square Error, NMSE)定义为

$$\text{NMSE} = E \left[ \frac{(|\hat{\mathbf{h}}_{k,e}| - |\mathbf{h}_{k,e}|)^2}{|\mathbf{h}_{k,e}|^2} \right] \quad (15)$$

由图2所示, 归一化均方误差随着  $\rho$  的增加准线性地下降, 说明信道估计性能与发射天线之间的空间相关性密切相关, 相关性越强, 估计性能越优。

图3, 图4给出了不同信道环境下自适应 SDMA 的系统吞吐量性能。作为比较, 图中同时给出了使用固定4波束发送策略的自适应 SDMA(即 IEEE802.20 中的 MISO-SDMA 方案)的性能, 以及假设不存在等效信道估计误差的理想自适应 SDMA 的性能。由图所示, 在稀疏网络中, 本文提出的自适应 SDMA 方案在和吞吐量性能上明显优于 IEEE802.20 MISO-SDMA 方案, 发射天线间相关性越强, 性能优势则越明显, 也越接近理想自适应 SDMA 的性能。随着用户数的增加, 本文提出的自适应 SDMA 相比 IEEE802.20 MISO-SDMA 的性能优势逐渐减弱。图5还示意了系统吞吐量随信噪比增长的变化曲线, 可以看到, 流数自适应 SDMA 由于能有效控制并行用户之间的相互干扰, 因此能避免性能平台的出现。

#### 5 结束语

本文提出了一种基于有限反馈的数据流数自适应 SDMA 方案。该方案使用预编码码本以减少反馈信息量, 用户除了反馈最优波束在码本的编号以及信道模值信息外, 还

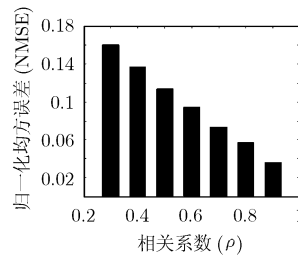


图2 信道估计归一化均方误差随相关系数的变化趋势

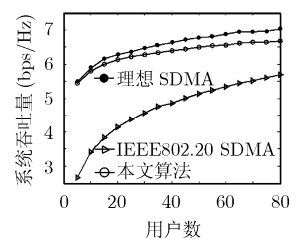


图3 系统吞吐量与用户数的关系, SNR=10dB, rho=0.8

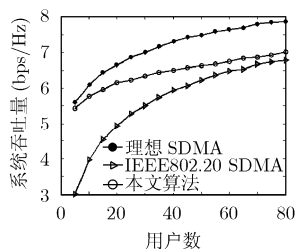


图 4 系统吞吐量与用户数的关系, SNR=10dB,  $\rho=0.6$

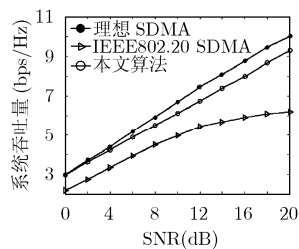


图 5 系统吞吐量与 SNR 的关系, 用户数为 20,  $\rho=0.6$

需同时反馈相位偏差信息, 以使基站能通过约束最大似然估计的方法获得不同发送波束模式支持的最大和吞吐量, 从而自适应地选择最佳的并行波束。仿真结果表明: 在稀疏网络中本文的方案相比传统的 SDMA 方案具有明显的和吞吐量性能优势。

### 参考文献

- [1] Costa M. Writing on dirty paper [J]. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1983, 29(3): 439-441.
- [2] Spencer Q H, Swindlehurst A L, and Haardt M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels [J]. *IEEE Trans. on Sig. Processing*, 2004, 52(2): 461-471.
- [3] Serbetli S and Yener A. Transceiver optimization for multiuser MIMO systems [J]. *IEEE Trans. on Sig. Processing*, 2004, 52(1): 214-226.
- [4] Tarighat A, Sadek M, and Sayed A H. A multi user beamforming scheme for downlink mimo channels based on maximizing signal-to-leakage ratios [C]. Proc. Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing, Philadelphia, USA, 2005: 1129-1132.
- [5] Schuber M and Boche H. Solution of the multiuser downlink beamformig problem with individual SINR constraints [J]. *IEEE Trans. on Veh. Tech.*, 2004, 53(1): 18-28.
- [6] Viswanath P, Tse D N C, and Laroia R. Opportunistic

beamforming using dumb antennas [J]. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2002, 48(6): 1277-1294.

- [7] Jindal N. MIMO broadcast channels with finite-rate feedback [J]. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2006, 52(11): 5045-5060.
- [8] Ding P, Love D J, and Zoltowski M D. Multiple antenna broadcast channels with limited feedback [C]. Proc. Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing, Toulouse, France, 2006: 14-19.
- [9] Huang K, Andrews J G, and Jeath R W Jr. Orthogonal beamforming for SDMA with limited feedback [C]. Proc. Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing, Hawai'i, USA, 2007: 97-100.
- [10] Sharif M and Hassibi B. On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information [J]. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2005, 51(2): 506-522.
- [11] IEEE 802.20 C802.20-06-04. Part 12: Precoding and SDMA codebooks. 2006: 623-625.
- [12] Gesbert D, Pittman D L, and Kountouris M. Transmit correlation-aided scheduling in multiuser MIMO networks [C]. Proc. Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing, Toulouse, France, 2006: 249-252.
- [13] Kermaol J P, Schumacher L, Pedersen K I, Mogensen P E, and Frederiksen F. A stochastic MIMO radio channel model with experimental validation [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(6): 1211-1226.

黄永明: 男, 1977 年生, 博士, 研究方向为 MIMO 通信、多用户通信和协作通信。

许道峰: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为 MIMO 通信系统中的信号处理、多用户系统信号处理。

罗元钊: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为多用户通信中的信号处理。

杨绿溪: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为移动通信空时信号处理、盲信号处理和神经网络。