

空间相关莱斯衰落信道下基于部分信道信息的多用户预编码与调度算法

刘建国 许道峰 林敏 杨绿溪
(东南大学信息科学与工程学院 南京 210096)

摘要: 在空间相关的莱斯衰落信道模型下, 针对多用户 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)系统潜在的多用户分集增益和空间分集增益, 该文提出了一种基于部分信道信息的多用户预编码与调度算法。结合部分瞬时信道信息和统计信息, 利用约束最大似然估计对各用户信道矢量进行估计, 然后利用估计的各用户信道调度多个用户进行预编码。仿真结果表明, 该方案以较少的反馈开销, 获得了较大的性能增益。

关键词: 多用户预编码; 调度算法; 莱斯信道; 信道状态信息

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0053-04

Multi-user Precoding and Scheduling Algorithm for Spatial Correlation-Aided Ricean Fading Channel with Partial CSI

Liu Jian-guo Xu Dao-feng Lin Min Yang Lu-xi

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

Abstract: In order to exploit multi-user diversity gain and spatial multiplexing gain for multi-user MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) system with spatial correlation-aided Ricean fading channel, a joint multi-user precoding and scheduling algorithm is proposed based on partial Channel State Information (CSI). Utilizing partial instantaneous CSI and statistical CSI for all users, the Base Station (BS) estimates the channel for each user using Constrained Maximum Likelihood (CML) approach, and then schedules a group of users with optimal precoding using the estimated channels. Simulation results demonstrate that the proposed scheme greatly improves system throughput with a bit of feedback overhead.

Key words: Multi-user precoding; Scheduling algorithm; Ricean channel; Channel State Information(CSI)

1 引言

针对多用户MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)系统, 空分多址(SDMA)由于在相同的时隙与频带获得空分复用增益, 而备受关注。已有研究表明非线性多用户预编码, 如脏纸编码(DPC)^[1], 从理论上能接近广播信道容量, 但其复杂度太高而难以实现。现有处理简单的线性多用户预编码方案主要基于迫零(ZF)准则^[2]或基于最小均方误差(MMSE)准则^[3], 以此把多用户MIMO信道分解成并行的完全或部分消除用户间干扰的单用户信道。然而, 上述方案要求基站精确已知用户的信道状态信息(CSI), 当用户数目较多时, 这在有限反馈系统中并不可行。

尽管基站不能精确获知所有请求用户的CSI, 但是每个用户的信道质量指标(CQI)或量化的信道信息可以通过有限反馈信道上报给基站, 基站可以利用反馈的部分信道信息, 通过预编码或调度方法来提升系统容量。文献[4]提出了一种基于部分信道信息的调度方案, 其将随机产生的多个波束同

时分分配给对应SINR最大的多个用户, 随着用户数的增加, 它能渐进地达到多天系统广播信道容量的增长速度, 且每用户仅需反馈最大的SINR和其对应的波束矢量在码本中的编号给基站, 然而, 当用户数目较少时, 该方案的性能急剧下降。另一种方法就是结合部分瞬时信道信息与信道统计信息对多用户进行调度和预编码。在瑞利衰落信道模型下, Gesbert等提出了利用各用户反馈的信道矩阵的Frobenius范数和相关矩阵估计用户信道, 然后利用估计的信道矩阵对多用户进行调度和预编码^[5]。当用户数较少时, 上述方案优于随机调度方案, 然而, 当发射端天线相关性较小或发射端天线数增加时, 系统性能较差。为了能进一步提升系统容量, 基站有必要获得更多的瞬时信道信息。

当用户与基站间距离比较近时, 存在视距分量(LOS), 采用瑞利信道模型不再准确, 此时应采用更为普遍和适用的莱斯信道模型。在这种场景下, 利用莱斯信道视距分量来重构信道矩阵, 将有利于提高信道估计性能。因此, 针对存在空间相关的莱斯衰落信道, 本文提出了一种基于部分瞬时信道信息和信道统计信息的多用户预编码和调度算法。其核心思想是在基站和用户端随机产生标准正交的多个波束矢量, 并将其组成一个码本(codebook), 各用户计算其信道矢量与

2007-07-16 收到, 2007-11-14 改回

国家重点基础研究发展计划(2007CB310603), 国家自然科学基金(60672093, 60496310), 国家863计划项目(2007AA01Z262), 江苏省自然科学基金(BK2005061)和华为高校基金资助课题

各码字的相关值,并反馈与信道矢量最相关码字编号和其对应的相关值给基站,基站利用约束最大似然估计对各用户信道矢量进行估计,最后利用各用户估计的信道矩阵调度多个用户进行预编码。通过分析发现,当莱斯信道退化为瑞利衰落信道时,本文方案仅需反馈与信道矢量最相关的码字编号和最大相关值的模值。

2 系统模型

如图1所示的下行链路多用户MIMO系统,小区内需要服务的用户总数为 K ,基站配置了 N_t 根发射天线,各用户均配置了 N_r ($N_r=1$)根天线。其中 v_k 为基站向用户 k 发送的数据,且用户数据 $v(k)$ 在发出之前乘以预编码矢量 w_k 进行线性预编码,最终经基站复用的 M (通常 $M \leq N_t$)路数据流可表示为

$$\mathbf{x} = \sum_{k=1}^M w_k v_k \quad (1)$$

对用户数据 v_k 和波束形成矢量 w_k 作如下归一化:

$$E|v_k|^2 = 1, \|w_k\|^2 = 1, k = 1, \dots, M \quad (2)$$

经复用的 M 路数据流下发给 M 个用户,其中第 k 个用户相应的基带接收信号可表示为

$$y_k = \sqrt{\frac{E_s}{M}} h_k \sum_{i=1}^M w_i v_i + n_k \quad (3)$$

其中 E_s 为总的发射功率; n_k 为加性高斯白噪声,其分布服从 $\mathcal{CN}(0, \sigma_n^2)$; h_k 为第 k 个用户的 $1 \times N_t$ 维信道矩阵。假设 h_k 为空间相关的准静态平坦莱斯衰落信道,即在一帧内保持不变,在帧间独立变化,且可建模为如下形式:

$$h_k = \sqrt{\frac{\rho}{1+\rho}} h_{ku} + \sqrt{\frac{1}{1+\rho}} h_{kr} \quad (4)$$

式中 ρ 为莱斯因子,且满足 $0 \leq \rho < \infty$,当莱斯因子 $\rho=0$ 时, h_k 退化为瑞利衰落信道; $\sqrt{\frac{\rho}{1+\rho}} h_{ku}$ 为信道矩阵 h_k 的视距分量, h_{ku} 各元素的实部与虚部均为复高斯分布;

$\sqrt{\frac{1}{1+\rho}} h_{kr}$ 为信道矩阵 h_k 的衰落分量, h_{kr} 服从瑞利分布,

且可利用Kronecker积的形式加以表示,即

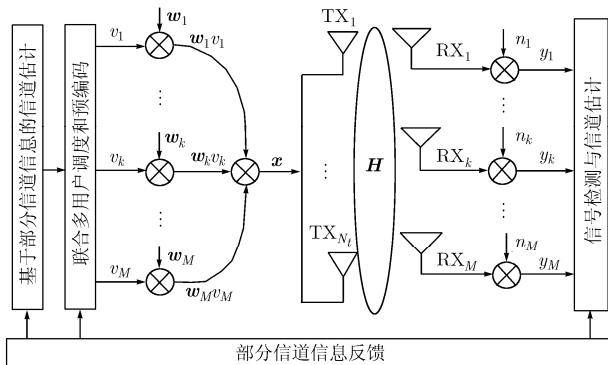


图1 多用户MIMO系统等效基带系统框图

$$h_{kr} = h_{kw} R_{kt}^{1/2} \quad (5)$$

其中 h_{kw} 是第 k 个用户的去相关的 $1 \times N_t$ 维矩阵,其分布服从 $\mathcal{CN}(0,1)$; $R_{kt} = E\{h_{kw}^H h_{kw}\}$ 是第 k 个用户发射端 $N_t \times N_t$ 维的空间相关矩阵,其取决于系统的载频、基站周围的散射体、天线排列、天线间的距离,波达方向和入射波的角度扩展等因素,可以通过计算或标定等方法得到。本文假设莱斯信道矩阵的均值和相关矩阵在发射端可以得到,且可表示为

$$\begin{aligned} \mu_k &= E\{h_k\} = \sqrt{\frac{\rho}{1+\rho}} h_{ku}, \\ B_k &= E\{(h_k - E(h_k))^H (h_k - E(h_k))\} = \frac{1}{1+\rho} R_{kt}, \\ &k = 1, \dots, K \end{aligned} \quad (6)$$

3 联合多用户调度与预编码算法

为了充分利用多用户多天线系统的空间自由度,不失一般性,假设基站每个时隙从 k 个用户中调度 M 个用户复用相同的信道资源,则式(3)可重写为

$$y_k = \sqrt{\frac{E_s}{M}} h_k w_k v_k + \sqrt{\frac{E_s}{M}} h_k \sum_{i=1, i \neq k}^M w_i v_i + n_k \quad (7)$$

式中右边第2项为其它用户对当前用户的干扰,在一定条件下,基站可以通过设计预编码矩阵来消除干扰,为了减少运算复杂度,本文考虑基于迫零准则的预编码方案^[2]。为了表示方便,定义被选择的 M_s 个用户联合的信道矩阵为

$$H_s = [h_1^H, \dots, h_{k-1}^H, h_k^H, \dots, h_M^H]^H \quad (8)$$

式中 s 为被调度的用户子集。则第 k 个用户的预编码矢量可表示为

$$w_{ZF,k}(H_s) = \frac{(H_s)_k^+}{\sqrt{\|(H_s)_k^+\|_F^2}} \quad (9)$$

式中 $(H_s)_k^+$ 为矩阵 H_s^+ 的第 k 列; $(A)^+$ 表示对 A 的伪逆操作; $\|A\|_F$ 表示 A 的Frobenius范数。

依据式(7),第 k 个用户的接收端信干噪比可以表示为^[2]

$$\text{SINR}_k(H_s) = \frac{E_s h_k w_k w_k^H h_k^H}{E_s h_k \left(\sum_{i=1, i \neq k}^M w_i w_i^H \right) h_k^H + M \sigma_n^2} \quad (10)$$

从而可获得的系统吞吐量为

$$C_s(H_s) = \sum_{k=1}^M \log_2(1 + \text{SINR}_k(H_s)) \quad (11)$$

在多用户环境下,由于各个用户间的衰落特性相互独立,可以通过调度算法选择最优的一组用户来使系统容量达到最大。假设基站每个时隙可以从 K 个用户中调度 M 个用户复用相同的信道资源,则所选择的一组用户 s 应满足

$$s = \max_{s \in \Phi} \{C_s(H_s)\} = \max_{s \in \Phi} \sum_{k=1}^M \log_2(1 + \text{SINR}_k(H_s)) \quad (12)$$

式中 Φ 表示 K 个用户组成所有用户子集, s 是从 Φ 选择的一种组合。显然,当用户总数 K 较大时,该算法的计算复杂度较大,如参考文献[6]所示,可以采用复杂度较低的次优的

调度算法。

4 基于部分信道信息的信道估计

上述算法要求基站精确已知各用户的 CSI，这在实际系统中并不可行。为了减少反馈信息量，本节提出了一种利用用户部分瞬时信道信息和长时信道统计信息对信道估计的方法，基站根据各用户估计的信道矩阵对多用户进行调度和预编码。

4.1 约束最大似然估计

假设在基站和用户端同时随机产生标准正交的多个波束矢量，并将其组成一个码本，用户计算其信道矢量与码本元素的相关值，并反馈与信道矢量最相关的码字编号和其对应的相关系数给基站。且各用户的反馈信息可由下式确定

$$N_k = \arg \max_{i=1, \dots, N} |\mathbf{h}_k \mathbf{F}_i| \quad (13)$$

$$e^{j\theta_k} \gamma_k = \mathbf{h}_k \mathbf{F}_{N_k} \quad (14)$$

式中 $k = 1, \dots, K$ ；反馈信息 N_k 为用户 k 所选择的码字编号； θ_k 为最大相关值的相位； γ_k 为最大相关值的模值。 $\mathbf{F} = \{\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_N\}$ 是由长度为 N 的正交随机多波束组成的码本，当 $N = N_t$ 时，此时正交随机码本可以是任何 N_t 维的酉空间中的完备正交基。

按照多元变量统计学理论，莱斯衰落信道 \mathbf{h}_k 服从复高斯分布 $\mathcal{CN}(\boldsymbol{\mu}_k, \mathbf{B}_k)$ ，其概率密度函数可以表示为

$$p(\mathbf{h}_k) = \frac{1}{\pi^{N_t} \det(\mathbf{B}_k)} \exp\left\{-\left(\mathbf{h}_k - \boldsymbol{\mu}_k\right) \mathbf{B}_k^{-1} \left(\mathbf{h}_k - \boldsymbol{\mu}_k\right)^H\right\} \quad (15)$$

于是在约束式(14)下，对莱斯衰落信道 \mathbf{h}_k 的估计可以用约束最优化问题来描述：

$$\begin{aligned} & \min (\mathbf{h}_k - \boldsymbol{\mu}_k) \mathbf{B}_k^{-1} (\mathbf{h}_k - \boldsymbol{\mu}_k)^H \\ & \text{s.t. } e^{-j\theta_k} \gamma_k = \mathbf{F}_{N_k}^H \mathbf{h}_k^H \end{aligned} \quad (16)$$

利用 Lagrange 乘子法，构造代价函数

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\mathbf{h}_k, \lambda) &= (\mathbf{h}_k - \boldsymbol{\mu}_k) \mathbf{B}_k^{-1} (\mathbf{h}_k - \boldsymbol{\mu}_k)^H \\ &+ \lambda \left(e^{-j\theta_k} \gamma_k - \mathbf{F}_{N_k}^H \mathbf{h}_k^H \right) \end{aligned} \quad (17)$$

令代价函数的共轭转置梯度为零向量，有

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{h}_k, \lambda)}{\partial \mathbf{h}_k^H} = \mathbf{B}_k^{-T} (\mathbf{h}_k - \boldsymbol{\mu}_k)^T - \lambda \mathbf{F}_{N_k}^* = \mathbf{0} \quad (18)$$

得 $\mathbf{h}_k - \boldsymbol{\mu}_k = \lambda \mathbf{F}_{N_k}^H \mathbf{B}_k$ ，将这一结果代入约束条件，得 $\mathbf{h}_k \mathbf{F}_{N_k}^H = \boldsymbol{\mu}_k \mathbf{F}_{N_k}^H + \lambda \mathbf{F}_{N_k}^H \mathbf{B}_k \mathbf{F}_{N_k}^H = e^{j\theta_k} \gamma_k$ ，即有

$$\lambda = \frac{e^{j\theta_k} \gamma_k - \boldsymbol{\mu}_k \mathbf{F}_{N_k}^H}{\mathbf{F}_{N_k}^H \mathbf{B}_k \mathbf{F}_{N_k}^H} \quad (19)$$

于是，有

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{h}}_k &= \boldsymbol{\mu}_k + \lambda \mathbf{F}_{N_k}^H \mathbf{B}_k = \boldsymbol{\mu}_k + \frac{\left(e^{j\theta_k} \gamma_k - \boldsymbol{\mu}_k \mathbf{F}_{N_k}^H \right) \mathbf{F}_{N_k}^H \mathbf{B}_k}{\mathbf{F}_{N_k}^H \mathbf{B}_k \mathbf{F}_{N_k}^H}, \\ & k = 1, \dots, K \end{aligned} \quad (20)$$

其中 $\hat{\mathbf{h}}_k$ 即为估计的信道矢量。

4.2 反馈信息量分析

通过上一小节分析可知，小区内各用户反馈给基站的信

息包括与信道矢量最匹配的码字编号 N_k 和其对应的相关值的相位 θ_k 及模值 γ_k 。显然，本文方案具有较低的反馈开销，然而，实际上当 $\rho = 0$ 时，莱斯衰落信道将退化为瑞利衰落信道，本文方案的反馈开销可进一步减少，而不影响系统的传输速率。此时，莱斯衰落信道矩阵的均值 $\boldsymbol{\mu}_k = E\{\mathbf{h}_k\} = \mathbf{0}_{1 \times N_t}$ ，由式(20)确定的信道 $\hat{\mathbf{h}}_k$ 可简化为

$$\hat{\mathbf{h}}_k = \frac{e^{j\theta_k} \gamma_k \mathbf{F}_{N_k}^H \mathbf{B}_k}{\mathbf{F}_{N_k}^H \mathbf{B}_k \mathbf{F}_{N_k}^H} = e^{j\theta_k} \tilde{\mathbf{h}}_k \quad (21)$$

于是，由式(8)确定的被选择的 M_s 个用户的联合信道矩阵可重写为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{H}}_s &= \left[\hat{\mathbf{h}}_1^H, \dots, \hat{\mathbf{h}}_{k-1}^H, \hat{\mathbf{h}}_k^H, \dots, \hat{\mathbf{h}}_M^H \right]^H \\ &= \text{diag}\left(e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_{k-1}}, e^{j\theta_k}, \dots, e^{j\theta_M}\right) \left[\tilde{\mathbf{h}}_1^H, \dots, \tilde{\mathbf{h}}_{k-1}^H, \right. \\ & \quad \left. \tilde{\mathbf{h}}_k^H, \dots, \tilde{\mathbf{h}}_M^H \right]^H = \text{diag}\left(e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_{k-1}}, e^{j\theta_k}, \dots, e^{j\theta_M}\right) \tilde{\mathbf{H}}_s \end{aligned} \quad (22)$$

式中 $\tilde{\mathbf{H}}_s = \left[\tilde{\mathbf{h}}_1^H, \dots, \tilde{\mathbf{h}}_{k-1}^H, \tilde{\mathbf{h}}_k^H, \dots, \tilde{\mathbf{h}}_M^H \right]^H$ 。将上式代入式(9)中，有

$$\mathbf{w}_k(\hat{\mathbf{H}}_s) = e^{-j\theta_k} \mathbf{w}_k(\tilde{\mathbf{H}}_s), \quad k = 1, \dots, K \quad (23)$$

将式(23)和式(10)代入式(11)中，即有

$$C_s(\hat{\mathbf{H}}_s) = \sum_{k=1}^M \log_2 \left(1 + \text{SINR}_k(\tilde{\mathbf{H}}_s) \right) = C_s(\tilde{\mathbf{H}}_s) \quad (24)$$

由此可知，用户端反馈的相位 θ_k 对系统吞吐量没有影响。因此，当 $\rho = 0$ 时，小区内各用户仅需反馈与信道矢量最相关的码字编号、相关值的模值给基站。此时，反馈开销与随机调度方案^[4]相同，比文献[5]相差 $\log_2(N_t)$ 位反馈信息。

5 仿真结果

不失一般性，假设基站配置 4 根发射天线，用户各配置 1 根接收天线，发射天线为均匀线阵排列(ULA)，相邻天线间距离为半波长，在每个时隙内，基站同时调度 4 个用户传输数据。在所有仿真中，有限反馈码本采用 $N_t \times N_t$ 维的随机正交阵，各用户具有相同的噪声方差，且仿真信噪比为 $\text{SNR} = E_s / \sigma_n^2 = 10 \text{ dB}$ 。

在各用户的莱斯因子 $\rho = 0.2$ ，角度扩展 $\text{AS} = 9^\circ$ ，离开角 DOA 在 -45° 和 $+45^\circ$ 之间均匀分布的条件下，图 2 给出了系统可获得的和速率随小区内请求用户总数变化的性能曲线。从仿真结果可以看出，各方案的传输速率随着用户总数的增加而增加，这是可解释为多用户分集带来的性能增益。此外，本文方案性能优于随机调度方案^[4]，例如当用户总数 $K = 20$ 时，与随机调度方案相比，能够带来 5.23bps/Hz 的速率提升，这主要因为本文方案在统计意义上保证了系统的速率。然而，由于本文方案对信道估计存在误差，其性能略差于基站精确已知各用户 CSI 的最优方案。

在各用户莱斯因子 $\rho = 0.2$ ，离开角 DOA 在 -45° 和 $+45^\circ$ 之间均匀分布以及用户总数 $K = 20$ 的条件下，图 3 给出了系统可获得的和速率随角度扩展变化的性能曲线。从仿

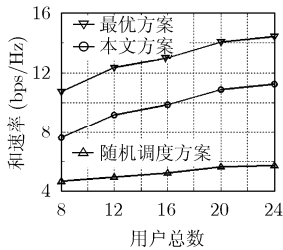


图2 各方案的平均吞吐量 ($\rho=0.2, AS=9^\circ, SNR=10dB$)

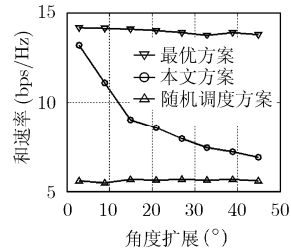


图3 各方案的平均吞吐量 ($\rho=0.2, K=20, SNR=10dB$)

真结果可以看出,随着角度扩展的增加本文方案的速率呈下降趋势,这主要由于随着角度扩展的增加各用户的信道空间相关性减弱,使得对信道矩阵的估计性能下降所造成的。虽然随机调度方案^[4]的性能受角度扩展的影响不大,然而从图2可以看出,当角度扩展小于 45° 时,其系统速率仍比本文方案要差。

在各用户莱斯因子 $\rho=0$,角度扩展 $AS=9^\circ$,离开角DOA在 -45° 和 $+45^\circ$ 之间均匀分布的条件下,图4给出了系统可获得的和速率随用户总数变化的性能曲线。对比图2和图4的仿真结果发现,图4中的本文方案性能差于图2中的本文方案性能,这主要由于当莱斯因子 ρ 不为零时,本文方案有效利用了信道矩阵直流分量来提升信道估计性能。通过观察发现,在莱斯因子 $\rho=0$ 情况下,本文方案性能好于Gesbert方案^[5],这主要因为本文方案在Gesbert方案的基础上,增加了对所要估计信道的约束,从而使系统速率得到提升。

6 结束语

针对空间相关的莱斯衰落物理信道模型,本文提出了一

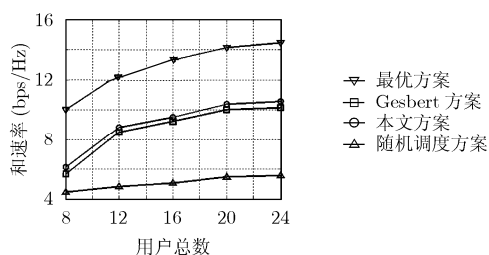


图4 各方案的平均吞吐量 ($\rho=0, AS=9^\circ, SNR=10dB$)

种有效利用统计信息和部分瞬时信道信息进行多用户调度与预编码的算法。通过约束最大似然估计,最优化估计各用户信道矢量,同时在统计意义上,保证进行多用户调度和预编码后的系统和速率。然而,本文只考虑理想信道模型,其实,接收端不可能精确已知下行信道CSI以及反馈控制信道存在噪声,因此下一步研究将考虑更为实际的信道模型(包括反馈时延、信道估计误差等),并分析这些因素对本文方案的影响,提出一种更具鲁棒性的算法。

参考文献

- [1] Costa M. Writing on dirty paper. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1983, 29(5): 439-451.
- [2] Spencer Q H, Peel C P, Swindlehurst A L, and Haardt M. An introduction to the multiuser MIMO downlink. *IEEE Communication Magazine*, 2004, 42(10): 60-67.
- [3] Wu Y L, Zhang J F, Xu M G, Zhou S D, and Xu X B. Multiuser MIMO downlink precoder design based on the maximal SJNR criterion. *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, St. Louis, Missouri. 2005(5): 2694-2698.
- [4] Sharif M and Hassibi B. On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2005, 51(2): 506-522.
- [5] Gesbert D, Pittman L, and Kountouris M. Transmit correlation-aided scheduling in multiuser MIMO networks. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Toulouse, France, 2006(4): 249-252.
- [6] Shen Z, Chen, R Andrews J R, Heath R W, and Evans B L. Low complexity user selection algorithms for multiuser MIMO systems with block digitalization. *IEEE Trans. on Signal Process.*, 2006, 54(9): 3658-3663.

刘建国: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为MIMO通信信号处理、多用户信号处理。

杨绿溪: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为通信信号处理、MIMO通信系统盲信号处理和自适应信号处理。