

文章编号: 1001 - 893X(2012)08 - 1329 - 05

抑制小区间干扰的改进信漏噪比预编码方法*

范慧婧, 孙长印, 卢光跃

(西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710061)

摘要:针对下行多用户 MIMO 系统在多小区环境中系统性能下降的问题, 在传统信漏噪比(SLNR)预编码基础上, 提出在接收端采用白化滤波器抑制干扰, 发射端考虑邻小区干扰加噪声协方差矩阵的预编码方法, 消除用户间干扰的同时能很好地抑制小区间干扰, 改善系统性能。仿真结果表明, 改进算法在最大化新定义的等效信漏噪比的过程中, 由于引入的等效信道考虑了小区间干扰, 相对于传统算法, 可明显提高系统容量。

关键词:多用户 MIMO; 多小区; SLNR 预编码; 干扰抑制

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.08.022

A Modified Signal-to-leakage Plus-noise Ratio Precoding Scheme with Other-cell Interference Suppression

FAN Hui-jing, SUN Chang-yin, LU Guang-yue

(School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: The traditional signal-to-leakage plus-noise ratio(SLNR) based precoding scheme for downlink multi-user MIMO suffers from the performance loss due to the neglect of OCI (other-cell interference) in the multi-cell scenario. This paper presents an enhancement to the SLNR that uses interference suppression at the receiver and a novel precoder using the other-cell interference covariance information at the transmitter. For the broadcast channel, the proposed scheme eliminates the interference among users, while suppressing OCI as well. The simulation results show that the enhancement can significantly improve the system capacity by the use of effective channel while maximizing the defined effective SLNR.

Key words: MU-MIMO; multi-cell; SLNR pre-coding; interference suppression

1 引言

MU-MIMO(Multiple user MIMO)技术允许多个用户复用相同的时频资源发送数据, 可有效提高系统容量和频谱利用率, 是 4G 通信的突破性技术之一,

近年来受到业界广泛关注^[1]。由于用户间不能进行协作通信, 因此需在发射端对发射信号进行预编码处理, 以抑制用户间干扰。理论研究表明, 非线性的污纸编码(Dirty Paper Coding, DPC)^[2]能达到 MU-MIMO广播信道的容量区域, 是最优的预编码策略,

* 收稿日期: 2012 - 01 - 20; 修回日期: 2012 - 04 - 24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61102047); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET - 08 - 0891); 陕西省教育厅自然科学基金项目(11JK1021)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61102047); Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (NCET - 08 - 0891); The Natural Science Foundation of Education Department of Shaanxi Province (11JK1021)

但因开销巨大而难以实现^[3]。为了在性能与算法复杂度之间取得很好的折衷,许多逼近 DPC 性能的线性预编码方案被相继提出^[4-5]。其中,基于信漏噪比(Signal-to-leakage Plus-noise Ratio, SLNR)准则的预编码^[5]方案充分考虑传递给目标用户的信号对其他用户造成的干扰影响,把最大化每个用户的 SLNR 作为设计预编码的准则,不仅没有天线和复用用户数目的限制,而且可获得接近最优解的闭式解,有效地降低用户间的干扰。

目前提出的许多 MU-MIMO 预编码技术,包括 DPC 和 SLNR 都只考虑了同小区内用户间的干扰,忽略了邻小区的干扰(Other-cell Interference, OCI)。然而,对于蜂窝移动通信系统, MU-MIMO 技术在实际通信系统中,面临着严重的小区间干扰的影响,特别是小区边缘用户。来自邻小区的同频干扰会使 MU-MIMO 技术所具有的高频谱优势及性能遭到严重削弱,成为一个干扰受限系统,这对 MIMO 技术在实际系统中的应用是一个很大的挑战^[6]。

假设发射端已知信道状态信息,文献[7]给出一种多小区方案,可使 DPC 最大限度地提高系统频谱效率。多小区的 DPC 除了要求基站之间同步外,还需要额外的控制开销,如训练信号及反馈信息。实际上,多小区的 DPC 很难实现针对目标用户和干扰用户的系统总容量联合最大化^[8]。于是,一些非集中优化,且不需要小区间协作的方案被提出。其中,文献[9]给出一种接收端采用白化滤波器,且发射端考虑邻小区干扰加噪声相关矩阵的 BD 预编码算法,很好地抑制了小区间干扰。

文献[9]的不足在于算法只能适用于满足天线数约束场景,为了克服其不足,本文提出一种在接收端采用白化滤波器,且发射端考虑邻小区干扰加噪声相关矩阵的 SLNR 预编码方法,在发射端用邻小区干扰加噪声相关矩阵对发射信号进行预编码处理,接收端再利用白化滤波器将小区间干扰白化,以此消除干扰。由于改进算法在最大化信漏噪比的过程中,引入的等效信道考虑了小区间干扰,所以,在小区间干扰存在的情况下,推广后的 SLNR 方法相对于传统的 SLNR 方法,能够进一步提高系统容量,改善系统性能。同时,相对于原算法^[9],不仅没有天线数目的约束问题,而且可获得接近最优解的闭式解。

2 系统模型

考虑有 K 个用户,每个用户有 $N_{R,k}$ 根接收天线,基站有 N_T 根发射天线的 MIMO 广播信道。假设信道为平坦衰落信道,且存在 $N_{l,k}$ 个邻小区共信道干扰,系统模型如图 1 所示。

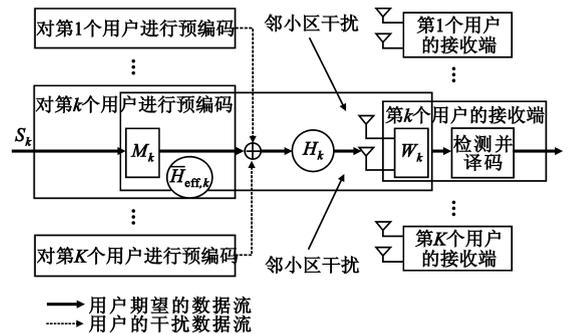


图 1 存在邻小区干扰的 MU-MIMO 系统模型
Fig.1 The model of MU-MIMO system with interference from adjacent cells

则第 k 个用户的接收信号表示为

$$y_k = H_k M_k s_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K H_k M_i s_i + H_{l,k} x_{l,k} + n_k = H_k M_k s_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K H_k M_i s_i + z_k \quad (1)$$

式中, s_k 是发送给用户 k 的数据,平均功率为 P_k ; $x_{l,k}$ 是 $N_{l,k} \times 1$ 干扰信号矢量,平均功率为 $P_{l,k}$; n_k 是服从 $N(0, \sigma_n^2)$ 的 $N_{R,k} \times 1$ 加性高斯白噪声; H_k 是 $N_{R,k} \times N_T$ 信道增益矩阵; $H_{l,k}$ 是 $N_{R,k} \times N_{l,k}$ 邻小区干扰信道增益矩阵; $z_k = H_{l,k} x_{l,k} + n_k$; M_k 是用户 k 的预编码矩阵,满足 $M_k^H M_k = I$ 。那么,用户 k 的小区间干扰加噪声的协方差矩阵可以表示为

$$R_{l,k} = H_{l,k} E[x_{l,k} x_{l,k}^H] H_{l,k}^H + \sigma_n^2 I_{R,k} = H_{l,k} Q_{l,k} H_{l,k}^H + \sigma_n^2 I_{R,k} \quad (2)$$

式中, $E[\cdot]$ 为求期望运算符; $Q_{l,k}$ 为干扰信号协方差矩阵,满足 $\text{Tr}(Q_{l,k}) = P_{l,k}$ 。对协方差矩阵 $R_{l,k}$ 的估计可通过插入导频符号^[10]或盲估计^[11]等多种方法实现。当接收端完成协方差矩阵 $R_{l,k}$ 的估计后,再利用上行链路反馈信道将信息反馈至发射端,以便对发射信号进行预编码处理。本文讨论中,均假设发射端已知协方差矩阵 $R_{l,k}$ 。

3 算法提出

对多小区 MU-MIMO 系统而言,传统 SLNR 预

编码方案只考虑了同小区用户间干扰对系统的影响,而忽略了邻小区干扰的存在。为了抑制小区间的干扰,使系统性能不因此下降,本节提出一种抑制小区间干扰的 SLNR 预编码方法,对于一给定接收机结构的多小区 MU-MIMO 系统,如图 1 所示,假设 \mathbf{W}_k 为用户 k 接收端 $N_{R,k} \times N_{R,k}$ 维的白化滤波器,对给定的 \mathbf{W}_k ,第 k 个用户 $N_{R,k} \times 1$ 维的接收信号可表示为

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{W}_k \mathbf{H}_k \mathbf{M}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{W}_k \mathbf{H}_k \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{M}_i \mathbf{s}_i + \mathbf{W}_k \mathbf{z}_k \quad (3)$$

考虑以最大化每个用户的信漏噪比为准则,对发射端信号进行预编码处理,以此消除用户间干扰。那么,用户 k 的等效信漏噪比表示为

$$SLNR_k = \frac{\|\mathbf{W}_k \mathbf{H}_k \mathbf{M}_k\|^2}{N_{R_k} \sigma_k^2 + \sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{W}_i \mathbf{H}_i \mathbf{M}_k\|^2} = \frac{\|\mathbf{H}_{ek} \mathbf{M}_k\|^2}{N_{R_k} \sigma_k^2 + \sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{H}_{ei} \mathbf{M}_k\|^2} = \frac{\mathbf{M}_k^H \mathbf{H}_{ek}^H \mathbf{H}_{ek} \mathbf{M}_k}{\mathbf{M}_k^H [N_{R_k} \sigma_k^2 \mathbf{I} + \tilde{\mathbf{H}}_{ek}^H \tilde{\mathbf{H}}_{ek}] \mathbf{M}_k} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{H}_{ek} = \mathbf{W}_k \mathbf{H}_k$ 为等效信道; $\mathbf{M}_k^H \mathbf{M}_k = \mathbf{I}$; 定义 $\tilde{\mathbf{H}}_{ek} = [\mathbf{H}_{e1}^T, \dots, \mathbf{H}_{e(k-1)}^T, \mathbf{H}_{e(k+1)}^T, \dots, \mathbf{H}_{eK}^T]^T$ 。那么,最优发射预编码矩阵 \mathbf{M}_k 选取的优化问题可表示如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_k &= \arg \max SLNR_k = \\ & \arg \max \frac{\mathbf{M}_k^H \mathbf{H}_{ek}^H \mathbf{H}_{ek} \mathbf{M}_k}{\mathbf{M}_k^H [N_{R_k} \sigma_k^2 \mathbf{I} + \tilde{\mathbf{H}}_{ek}^H \tilde{\mathbf{H}}_{ek}] \mathbf{M}_k} = \\ & \arg \max \mathbf{M}_k^H [N_{R_k} \sigma_k^2 \mathbf{I} + \tilde{\mathbf{H}}_{ek}^H \tilde{\mathbf{H}}_{ek}]^{-1} \mathbf{H}_{ek}^H \mathbf{H}_{ek} \mathbf{M}_k \end{aligned} \quad (5)$$

根据 Rayleigh-Ritz 定理,如果发射端拥有完整的信道状态信息且已知 \mathbf{W}_k ,那么,用户 k 的预编码矩阵闭式解由下式给出:

$$\mathbf{M}_k = \max \text{eigvec}((N_{R_k} \sigma_k^2 \mathbf{I} + \tilde{\mathbf{H}}_{ek}^H \tilde{\mathbf{H}}_{ek})^{-1} \mathbf{H}_{ek}^H \mathbf{H}_{ek}) \quad (6)$$

即, \mathbf{M}_k 为矩阵 $(N_{R_k} \sigma_k^2 \mathbf{I} + \tilde{\mathbf{H}}_{ek}^H \tilde{\mathbf{H}}_{ek})^{-1} \mathbf{H}_{ek}^H \mathbf{H}_{ek}$ 最大特征值对应的特征向量。由此,我们就消除了系统的用户间干扰。

以上为假设用户做单流数据传输, \mathbf{M}_k 为 $N_T \times 1$ 维矢量,当用户传输多个数据流时,预编码矩阵 \mathbf{M}_k 则为矩阵 $(N_{R_k} \sigma_k^2 \mathbf{I} + \tilde{\mathbf{H}}_{ek}^H \tilde{\mathbf{H}}_{ek})^{-1} \mathbf{H}_{ek}^H \mathbf{H}_{ek}$ 的前 L_k 个大特征值对应特征向量组成的 $N_T \times L_k$ 维矩阵, L_k 为传输的数据流个数。

从式(6)可见,用户 k 的预编码矩阵 \mathbf{M}_k 与用户接收端的白化滤波器 \mathbf{W}_k 有关,这是一个联合优化问题,为了获得接收端的白化滤波器 \mathbf{W}_k ,假设发射端进行预编码处理后已完全消除了用户间干扰,即用户 k 的接收信号简化为

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{W}_k \mathbf{H}_k \mathbf{M}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{W}_k \mathbf{z}_k = \bar{\mathbf{H}}_{\text{eff},k} \mathbf{s}_k + \mathbf{W}_k \mathbf{z}_k \quad (7)$$

式中, $\bar{\mathbf{H}}_{\text{eff},k} = \mathbf{W}_k \mathbf{H}_k \mathbf{M}_k$ 。

据此,定义 $\mathbf{K}_{I,k}$ 和 \mathbf{Q}_k 分别是 $\mathbf{W}_k \mathbf{z}_k$ 和 \mathbf{s}_k 的协方差矩阵, $\mathbf{I}_{NR,k}$ 是 $N_{R,k} \times N_{R,k}$ 单位阵,那么,在小区间干扰存在的情况下,所有用户的总交互信息可表示为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{SLNR}} &= \sum_{k=1}^K \text{lb det}(\mathbf{I}_{NR,k} + \bar{\mathbf{H}}_{\text{eff},k} \mathbf{Q}_k \bar{\mathbf{H}}_{\text{eff},k}^H \mathbf{K}_{I,k}^{-1}) = \\ & \sum_{k=1}^K \text{lb det}(\mathbf{I}_k + \bar{\mathbf{H}}_{\text{eff},k} \mathbf{Q}_k \bar{\mathbf{H}}_{\text{eff},k}^H \mathbf{K}_{I,k}^{-1}) = \\ & \text{lb det}(\mathbf{I}_S + \bar{\mathbf{H}}_S \mathbf{Q}_S \bar{\mathbf{H}}_S^H \mathbf{K}_I^{-1}) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{K}_{I,k} = \mathbf{W}_k \mathbf{R}_{I,k} \mathbf{W}_k^H$, $\mathbf{I}_S = \text{diag}(I_1, \dots, I_K)$, $\bar{\mathbf{H}}_S = \text{diag}(\bar{\mathbf{H}}_{\text{eff},1}, \dots, \bar{\mathbf{H}}_{\text{eff},K})$, $\mathbf{Q}_S = \text{diag}(Q_1, \dots, Q_K)$, $\mathbf{K}_I = \text{diag}(K_{I,1}, \dots, K_{I,K})$, 并且 $\mathbf{K}_I = \mathbf{W} \mathbf{R}_I \mathbf{W}^H$, $\mathbf{W} = \text{diag}(W_1, \dots, W_K)$, $\mathbf{R}_I = \text{diag}(R_{I,1}, \dots, R_{I,K})$ 。由于受发射功率 P_T 限制的系统容量就是互信息的最大值,即:

$$C_{\text{SLNR}} = \max_{\{Q_S: \text{Tr}(Q_S) \leq P_T\}} \mathcal{L}_{\text{SLNR}} \quad (9)$$

因此,当 $\mathbf{W} = \mathbf{R}_I^{-\frac{1}{2}}$ 时,得到系统容量为

$$C_{\text{SLNR}} = \max_{\{Q_S: \text{Tr}(Q_S) \leq P_T\}} \text{lb det}(\mathbf{I}_S + \bar{\mathbf{H}}_S \mathbf{Q}_S \bar{\mathbf{H}}_S^H) \quad (10)$$

式(10)可以通过式(6)求解。综上所述,用户 k 的预编码矩阵 \mathbf{M}_k 与用户接收端的白化滤波器 \mathbf{W}_k 有关,而 \mathbf{W}_k 仅由协方差矩阵 $\mathbf{R}_{I,k}$ 决定,又 $\mathbf{R}_{I,k}$ 可在接收端通过插入导频符号并反馈至发送端等多种估计方法获得,因此,本文提出的算法是合理且可实现的。

4 算法流程图

本节给出改进 SLNR 编码的算法流程,如图 2 所示,算法首先在接收端通过估计获得干扰加噪声协方差矩阵 $\mathbf{R}_{I,k}$ (本文讨论中,均假设发射端已知协方差矩阵 $\mathbf{R}_{I,k}$),然后根据 $\mathbf{W}_k = \mathbf{R}_{I,k}^{-\frac{1}{2}}$ 求得收端白化滤波器 \mathbf{W}_k ,并将其发送到发射端;再基于等效信道的概念,利用 \mathbf{W}_k 和 \mathbf{H}_k 求解预编码矩阵 \mathbf{M}_k ;最后在接收端利用 \mathbf{W}_k 解调。传统算法仅包括第二步,且没有考虑小区间干扰。

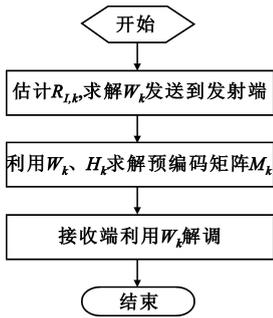


图 2 改进 SLNR 编码流程图

Fig.2 The modified SLNR pre - coding flow chart

5 性能仿真和分析

本节对传统 SLNR 算法和本文提出的改进算法进行仿真验证。假设在瑞利信道下,总发射功率为 P_T ,各发射天线等功率分配,且已知各信道状态信息,在小区间干扰存在的情况下,通过对系统和速率的比较验证算法性能。系统和速率由以下公式给出:

$$R_{SLNR} = \sum_{k=1}^K \text{lb}(1 + SINR_k) \quad (11)$$

图 3 绘出了系统和速率随 SNR (Signal - to - Noise Ratio) 的变化曲线图。当天线数满足限制条件 $N_T \geq \sum_{k=1}^K N_{R,k}$,且设置仿真参数为 $INR = 20 \text{ dB}$, $K = 2, N_{R,k} = 2, N_T = 4, N_{I,k} = 1$ 时,本文提出的算法性能优于传统 SLNR 算法性能;当设置 $N_{I,k} = 2$ 时,系统和速率虽然随着干扰的增强有所下降,但本文提出的方案性能仍较高。

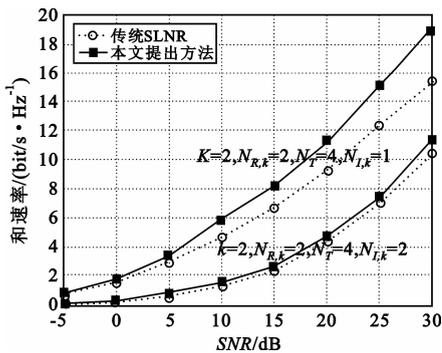


图 3 满足天线约束条件下系统和速率随 SNR 的变化曲线
Fig.3 Sum rate curves with SNR when the numbers of antennas are satisfied with constraint

由于 BD 预编码在不满足天线数约束条件 $N_T \geq \sum_{k=1}^K N_{R,k}$ 时是无法工作的,而本文提出的基于

SLNR 的改进方案是没有天线数目限制的。图 4 绘出了当天线数不满足约束条件时,分别运用传统 SLNR 方法、本文改进算法及传统 BD 算法获得的和速率随信噪比的变化曲线图,设置 $INR = 20 \text{ dB}$,其他仿真参数如图所示,发现当天线数不满足约束条件时,BD 算法已完全失效,但两种 SLNR 方法仍可正常工作,而本文提出的改进算法性能更优。

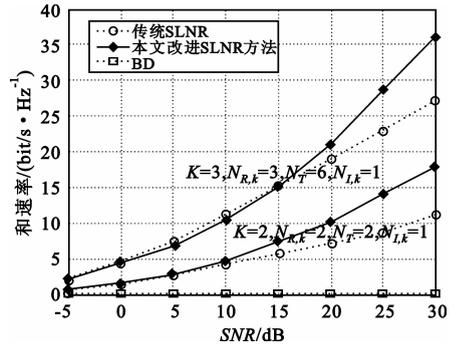


图 4 不满足天线约束条件下系统和速率随 SNR 的变化曲线
Fig.4 Sum rate curves with SNR when the numbers of antennas are not satisfied with constraint

图 5 则绘出了 $SNR = 20 \text{ dB}, K = 3, N_{R,k} = 2, N_T = 4, N_{I,k} = 1$ 时,系统和速率随 INR (Interference - noise - ratio) 的变化曲线图。当 INR 较低时,传统算法和提出算法性能差异不明显,但当 INR 较大时,也就是邻小区干扰较大时,本文提出的算法则对系统性能有明显改善。

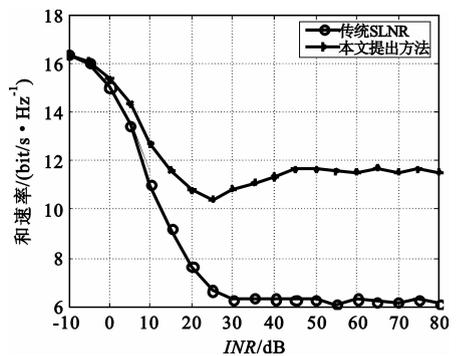


图 5 和速率随 INR 的变化曲线
Fig.5 Sum rate curves with INR

6 结论

本文针对多小区 MU - MIMO 系统,在传统 SLNR 预编码方案基础上,提出了接收端采用白化滤波器,发射端考虑邻小区干扰加噪声相关矩阵的改

进预编码方法。在小区间干扰存在的情况下,经本文改进后的 SLNR 方法与传统 SLNR 方法相比,不仅抑制了用户间干扰,更重要的是有效抑制了小区间干扰,克服了 MU-MIMO 系统存在小区间干扰时性能严重下降的问题,并且与采用同样思路的 BD 预编码算法相比,本文提出的改进 SLNR 编码方法不仅没有天线和复用用户数目的限制,而且可获得接近最优解的闭式解。仿真结果表明,该方法在消除用户间干扰的同时能很好地抑制小区间干扰,明显改善系统性能。关于基于其他准则的接收滤波器权值确定以及对系统性能的影响,将是本文进一步的研究方向。

参考文献:

- [1] Spencer Q H, Peel C H, Swindlehurst A L, et al. An introduction to the multi-user MIMO downlink[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10):60-67.
- [2] Taesang Yoo, Goldsmith A. On the Optimality of Multi-antenna Broadcast Scheduling Using Zero-forcing Beamforming [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3):528-541.
- [3] 孙宝玉, 卢光跃. MIMO 系统中动态混合天线模式调度的波束形成[J]. 电讯技术, 2010, 50(1):31-36.
SUN Bao-yu, LU Guang-yue. Dynamic Antenna Hybrid Mode Scheduler Based Beamforming in MIMO Systems[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(1):31-36. (in Chinese)
- [4] Spencer Q H, Swindlehurst A L, Haardt M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(2):461-471.
- [5] Sedek M, Tarighat A, Sayed A H. A Leakage-Based Precoding Scheme for Downlink Multi-User MIMO Channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(5):1711-1721.
- [6] 邱玲, 许杰, 刘蓓, 等. 多用户、多小区 MIMO 通信技术 [M]. 北京:人民邮电出版社, 2011.
QIU Ling, XU Jie, LIU Bei, et al. Multi-user, multi-cell MIMO communication technology [M]. Beijing: People's Post and Telecom Press, 2011. (in Chinese)
- [7] Somekh O, Zaidel B M, Shamai S. Sum rates characterization of joint multiple cell-site processing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 53(12):4473-4497.
- [8] Kang Ming, Yang Lin, Alouini Mohamed-Slim. Capacity of MIMO channels in the presence of co-channel interference [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2006, 7(1):113-125.
- [9] Shim S, Kwak J, Heath R, et al. Block Diagonalization for Multi-user MIMO with Other-cell Interference[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(7):2671-2681.
- [10] Kansal A, Batalama S N, Pados D A. Adaptive maximum SINR RAKE filtering for DS-SS multipath fading channels [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(9):1765-1773.
- [11] Honig M, Madhow U, Verdu S. Blind adaptive multiuser detection [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(4):944-960.

作者简介:

范慧婧(1989—),女,宁夏中卫人,硕士研究生,主要研究方向为多用户 MIMO 系统的预编码及下行链路干扰抑制;

FAN Hui-jing was born in Zhongwei, Ningxia Hui Autonomous Region, in 1989. She is now a graduate student. Her research interests include precoding and interference suppression on downlink of multi-users MIMO system.

Email: hj_fan@sina.com

孙长印(1963—),陕西人,2000 年于西安电子科技大学获信号与信息处理专业获博士学位,现为副教授,主要研究方向为下一代无线通信技术;

SUN Chang-yin was born in Shaanxi Province, in 1963. He received the Ph.D. degree from Xidian University in 2000. He is now an associate professor. His research direction is the next generation wireless communication technology.

Email: changyin.sun@tom.com

卢光跃(1971—),男,河南南阳人,博士,教授、博士生导师,“楚天学者”特聘教授,主要研究方向为现代移动通信中的信号处理。

LU Guang-yue was born in Nanyang, Henan Province, in 1971. He received the Ph.D. degree from Xidian University in 1999. He is now a professor and also the Ph.D. supervisor. His research interests include signal processing in modern mobile communications.

Email: tonylugy@163.com