

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.01.016

引用格式:李双志,张喆,张建康,等.一种新的多址信道有效阶数估计算法[J].电讯技术,2014,54(1):84-88.[LI Shuang-zhi,ZHANG Zhe,ZHANG Jian-kang,et al.A Novel Algorithm for Multi-access Channel Effective Order Estimation[J].Telecommunication Engineering,2014,54(1):84-88.]

一种新的多址信道有效阶数估计算法*

李双志,张 喆,张建康,穆晓敏**

(郑州大学 信息工程学院,郑州 450001)

摘 要:针对多用户正交频分复用/空分多址(OFDM/SDMA)系统上行链路多址信道,基于噪声信道提出了一种新的信道有效阶数和信道冲激响应联合估计算法。该算法以最大似然为目标函数,构建了基于差分进化并行搜索信道有效阶数并进行信道冲激响应估计的联合框架。算法引入赤池信息量准则作为搜索阶数最优的评判函数,以提高信道有效阶数和信道冲激响应的估计精度。仿真验证了所提算法的有效性和可靠性,结果表明引入赤池信息量准则(AIC)在降低有效信道阶数估计误差的同时提高了时域最大似然信道估计器的性能。特别地,在误码率为 10^{-5} 时,所提算法能够获得约 1.5 dB 的性能增益。

关键词:多用户 OFDM/SDMA;信道有效阶数;赤池信息量准则;信道估计;差分进化

中图分类号:TN92 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)01-0084-05

A Novel Algorithm for Multi-access Channel
Effective Order Estimation

LI Shuang-zhi,ZHANG Zhe,ZHANG Jian-kang,MU Xiao-min

(School of Information Engineering,Zhengzhou University,Zhengzhou 450001,China)

Abstract:In order to improve the precision of channel parameter estimation,a novel channel effective order estimation scheme is proposed for multi-user Orthogonal Frequency Division Multiplexing/Space Division Multiple Access(OFDM/SDMA) uplink system in this paper. Exploiting Akaike's Information Criterion(AIC) as the evaluation function to search the optimal order,this scheme performs a joint channel effective order and channel impulse response estimation in a parallel way based on the differential algorithm. With the introduction of AIC,it can reduce the estimation errors of multi-access channel effective order. Simulation results verify the validity and reliability of the proposed scheme. It is also shown that the proposed scheme achieves a better mean square error performance than the fixed channel order scheme and improves the performance of time-domain Maximum Likelihood channel estimator.

Key words:multi-user OFDM/SDMA;channel effective order;AIC;channel estimation;differential evolution

1 引 言

多用户 OFDM/SDMA 通信机制整合了多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output,MIMO)和正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing,OFDM)两种技术优势,在抗多径衰落及提高带宽效率和可靠性方面具有巨大潜力,是未来宽带无

* 收稿日期:2013-10-08;修回日期:2013-12-16 Received date:2013-10-08;Revised date:2013-12-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271421);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61301150);高等学校博士学科点专项科研基金(新教师类)项目(20134101120001)

Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China(No. 61271421);The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(No. 61301150);The Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China(No. 20134101120001)

** 通讯作者:iexmmu@zzu.edu.cn Corresponding author:iexmmu@zzu.edu.cn

线通信领域的关键技术。基于 MIMO 的空分多址接入 (Space Division Multiple Access, SDMA) 技术作为提高移动通信系统容量的有效手段, 已成为近年来该领域的研究热点。准确的信道状态信息是 MIMO-OFDM 系统多用户检测、空时解码等的必要条件, 因此信道估计的准确性将影响系统的整体性能。

基于时域的信道估计方法^[1-3]通常将信道建模为有限长脉冲响应滤波器, 忽略幅度较小的信道链路能够降低系统计算复杂度和提高信道估计的精度^[1]。已有文献^[4]证明, 假设信道有效阶数与实际有效阶数的偏差会影响信道估计性能, 偏差估计精度越高, 对噪声和信道间干扰的鲁棒性越好。文献^[5]指出了信道有效阶数与信噪比和实际信道阶数有关, 因此应当自适应选择信道有效阶数, 使它接近最优值。在 OFDM 系统中, 解决该问题的一个较简单方案就是假设信道有效阶数为保证不产生子载波和符号间干扰的信道阶数最大值, 即 OFDM 循环前缀 (Cyclic Prefix, CP) 长度加 1。这种假设虽然简化了问题, 但在实际信道阶数较低的情况下将导致信道估计器性能的显著下降。文献^[6]从信道最大阶数出发, 逆向搜索, 忽略幅度小于一定阈值的信道抽头来确定信道有效阶数, 但该算法对阈值的选取敏感。应用赤池信息量准则 (Akaike's Information Criterion, AIC)^[7]确定信道有效阶数时, 不需要进行阈值设计, 以极小化 AIC 值来确定信道有效阶数^[8-9]。

在文献^[8]中, AIC 应用于信道估计中旨在最小化信道估计器造成的信息损失。直接应用 AIC 准则来进行信道有效阶数估计, 需要进行多次信道估计、FFT/IFFT 运算和欧氏距离的计算, 限制了其在实际通信中的应用。为此, 寻求一种算法结构简单、相对计算量小、实际应用方便的信道定阶方法是很有必要的。文献^[9]研究了基于 AIC 对单输入单输出 OFDM 系统信道阶数估计算法, 并构建 Levinson 递推算法降低运算量, 具有较高的鲁棒性。在多用户 OFDM/SDMA 系统中, 假设链路特性互异的多个移动用户联合构成输入端, 各用户的发送信号经历相互独立的信道, 链路的信道有效阶数各不相同, 它们在接收天线处混叠后等效为一个统一的混合信道矩阵, 此时必须同时获得所有用户的信道有效阶数才能使最大似然 (Maximum Likelihood, ML) 信道估计器达到最佳的估计性能。因此, 如何同时对多址信道有效阶数进行有效且快速的估计是一个重大挑战。本文针对多用户 OFDM/SDMA 系统, 以差分进化 (Differential Evolution, DE) 算法为辅助, 提出了基于 AIC 准则的信道有效阶数并行搜索算法。构建基于 AIC 准则的多用户信道有效阶数和信道冲激

响应 (Channel Impulse Response, CIR) 的目标函数作为 DE 算法的适应度函数, 然后利用 DE 在多址信道空间并行搜索有效阶数, 并进行 CIR 估计。仿真结果表明, 该算法可以较好估计 CIR 有效阶数, 提高时域 ML 信道估计器性能。

2 系统模型

假设 U 个单天线用户联合构成输入端, 基站处使用 Q 根接收天线的多用户 OFDM/SDMA 上行链路系统。第 q 根接收天线处第 s 个 OFDM 符号为 $\mathbf{Y}_q[s]$ ($q=1, \dots, Q$) 可表示为不同用户接收信号与 AWGN 的叠加, 即

$$\mathbf{Y}_q[s] = \sum_{u=1}^U \mathbf{X}^u[s] \mathbf{F}_q^u \mathbf{h}_q^u[s] + \mathbf{W}_q[s] \quad (1)$$

式中, $\mathbf{X}^u[s] \in \mathbb{C}^{K \times K}$ 为对角阵, 表示第 s 个 OFDM 符号周期内用户 u ($u=1, 2, \dots, U$) 的频域发送信号, 其对角线上元素为 $X^u[s, k]$, $k=1, 2, \dots, K$, K 为子载波个数; $\mathbf{Y}_q[s] \in \mathbb{C}^{K \times 1}$, $\mathbf{h}_q^u[s] \in \mathbb{C}^{l_q^u \times 1}$ (l_q^u 为用户 u 到接收天线 q 信道阶数) 和 $\mathbf{W}_q[s] \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 分别为频域接收信号 $Y_q[s, k]$ 、信道冲激响应 $h_q^u[s, l]$ 以及 AWGN $w_q[s, k]$ 的列向量表示; $w_q[s, k]$ 满足均值为 0、协方差为 σ_n^2 的高斯分布; $\mathbf{F} \in \mathbb{C}^{K \times K}$ 为 DFT 变换矩阵, $\mathbf{F}_q^u \in \mathbb{C}^{K \times l_q^u}$ 为 $\mathbf{F}$ 的前 l_q^u 列, 即

$$\mathbf{F}_q^u \in \mathbb{C}^{K \times l_q^u}; \mathbf{F}_q^u[k, l] = \exp(-j2\pi \frac{kl}{K}), \quad 0 \leq k \leq K-1, 0 \leq l \leq l_q^u-1 \quad (2)$$

从式(2)中可以看出, $\mathbf{F}_q^u$ 的维数随着多址用户的信道有效阶数变化, 因此文献^[1]提出的 ML 信道估计算法具有一定的局限性。文献^[2]中提出一种空间交替的广义期望最大化算法, 能够把多天线发射信道分解为若干单发送-接收天线对的参数估计问题, 避免了文献^[1]中 ML 估计过程中的矩阵求逆运算, 最终得到信道冲激响应的 ML 解。因此本文将采用该算法对信道有效阶数互异的多址信道进行估计。

3 多址信道有效阶数和 CIR 联合估计算法

在 AWGN 情形下, 时域 CIR 的 ML 估计^[3]可以表示为

$$\hat{\mathbf{h}} = \arg \max_{\mathbf{h}_q^u (u=1, \dots, U)} \frac{1}{(\pi \sigma_n^2)^K} \cdot \exp\left(-\frac{1}{\sigma_n^2} \left\| \mathbf{Y}_q[s] - \sum_{u=1}^U \mathbf{X}^u[s] \mathbf{F}_{K \times l_q^u} \mathbf{h}_q^u[l_q^u \times 1][s] \right\|^2\right) \quad (3)$$

本文基于式(3)提出一种新的多址信道有效阶

数和 CIR 联合估计框架,算法的基本思想是利用 DE 并行搜索信道有效阶数并联合迭代进行 CIR 估计,并在 DE 迭代过程中引入 AIC 准则进行定阶,最终得出多址信道有效阶数及 CIR 的 ML 估计。

3.1 基于 AIC 的定阶算法描述

赤池弘次(H. Akaike)在文献[7]中提出了 AIC 准则,用于在有限集中选择最佳模型。

AIC = -2lnf(y|θ̂(y)) + 2p (4)

式中,f(y|θ̂(y))为待估参数的概率密度函数,θ̂(y)为参数向量θ(y)的 ML 估计值,p为θ(y)中独立参数个数。

在接收天线 q 处,根据文献[9],可建立多用户系统的信道有效阶数估计问题为

AIC(l1,l2,...,lU) = ln(1/M ∑_{m=1}^M σ_m^2(l1,l2,...,lU)) + 2/K ∑_{u=1}^U lu (5)

σ_m^2(l1,l2,...,lU) = ||Y_q[s] - ∑_{u=1}^U X^u[s] F_q^u h_{q(l_u×1)}^u(m)||^2 (6)

(l1,l2,...,lU) = argmin_{1≤lu≤CP,u=1,...,U} AIC(l1,l2,...,lU) (7)

其中,M 为发射端做导频的序列个数,σ_m^2是接收端第 m 个 OFDM 符号的残差平方和。对多址信道有效阶数进行遍历性搜索时,需要进行 CP^U 次 CIR 最大似然估计,其中 CP 为 OFDM 符号的循环前缀长度,计算量大,操作复杂,限制了其在实际中的应用。

3.2 基于 DE 的联合估计算法实现步骤

DE 算法是一种基于群体智能理论的全局算法,是通过群体之间的合作和竞争,产生群体智能理论的全局算法,具有较强的全局收敛能力和鲁棒性[10]。DE 算法主要由初始化、变异、交叉和选择 4 个基本操作表征,算法步骤如下,算法流程图见图 1。

(1) 初始化

利用 Np 个维数为 U 的信道有效阶数向量 L_i^t = [L_{i1}^t, L_{i2}^t, ..., L_{iU}^t],作为每一代的种群,U 为用户数,t 表示进化代数,i 为种群中个体的标号。初始化时,种群中的每个个体在解空间内随机产生。⌈·⌉为上取整操作。

L_{iu}^t = ⌈B_L + rand(0,1) · (B_U - B_L)⌉ (8)

其中,B_U 和 B_L 分别表示解空间搜索上界和下界,B_L = 1,B_U = CP。rand(0,1)表示在(0,1)区间内均匀分布的随机数。

(2) 变异

随机选取两个个体,并以它们的差分来扰动第三个随机选取的向量,判断边界条件(步骤 1 和步

骤 2),得到变异个体 L_i^{v(t+1)}:

L_i^{v(t+1)} = ⌈L_{r3}^t + F × (L_{r2}^t - L_{r1}^t)⌉ (9)

步骤 1:若 L_{ij}^{v(t+1)} < B_L,令 L_{ij}^{v(t+1)} = 2B_L - L_{ij}^{v(t+1)};若 L_{ij}^{v(t+1)} > B_U, L_{ij}^{v(t+1)} = B_U; L_{ij}^{v(t+1)} = L_{ij}^{v(t+1)}。

步骤 2:若 L_{ij}^{v(t+1)} > B_U,令 L_{ij}^{v(t+1)} = 2B_U - L_{ij}^{v(t+1)};若 L_{ij}^{v(t+1)} < B_L, L_{ij}^{v(t+1)} = B_L; L_{ij}^{v(t+1)} = L_{ij}^{v(t+1)}。

其中,变异因子 F 在区间(0,1)内均匀分布,r1,r2,r3 ∈ {1,2,...,Np} 互不相同,并且与标号 i 也不相同。

(3) 交叉

通过式(10)的交叉操作生成试验个体 L_i^{u(t+1)} 来增加种群的多样性。rand_j(0,1) ∈ [0,1] 为均匀分布的随机数。

L_{ij}^{u(t+1)} = { L_{ij}^{v(t+1)}, rand_j(0,1) ≤ CR or j=randn(i) ; L_{ij}^t, rand_j(0,1) > CR and j ≠ randn(i) , j=1,2,...,U (10)

其中,CR 为交叉因子,randn(i) ∈ [1,2,...,U] 为随机选择的维数变量索引。

(4) 选择

按式(11)进行选择操作,生成 t+1 代个体 L_i^{t+1},进入下一代进化。

L_i^{t+1} = { L_i^{u(t+1)}, AIC(L_i^{u(t+1)}) < AIC(L_i^t) ; L_i^t, AIC(L_i^{u(t+1)}) ≥ AIC(L_i^t) (11)

上述过程反复迭代,直到 DE 算法终止条件得到满足。终止时最优 L_i^t 即为信道有效阶数估计值

arg min_{L_i^t(i=1,2,...,Np)} (AIC(L_i^t)),计算 AIC 时与 L_i^t 对应的 CIR 估计值即为 CIR 的 ML 估计。

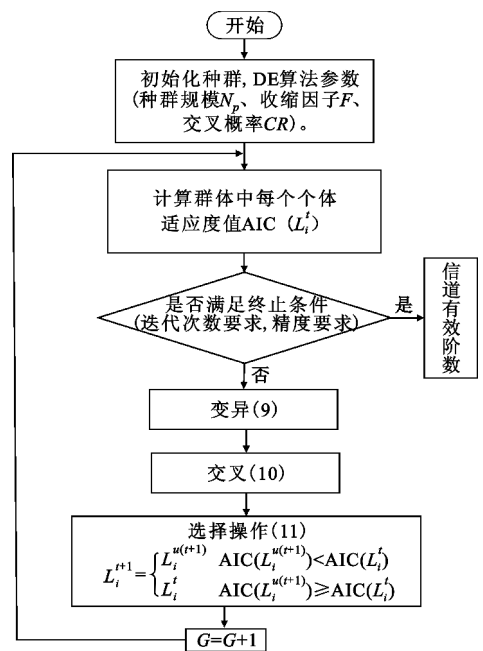


图 1 本文所提基于 DE 的联合算法流程图 Fig.1 The flowchart of the proposed joint algorithm based on DE

4 仿真分析

为评估所提算法的估计性能, 本文考虑 2×2 OFDM/SDMA 系统。参照 IEEE802. 11n WLAN 的参数设置, 每个用户所采用的子载波个数 $K=64$, 循环前缀长度 $CP=16$ 。每帧的前两个 OFDM 符号 ($M=2$) 为导频序列, 用于搜索信道有效阶数和 CIR 估计。在实际的通信系统中, 不同的用户可以采用不同的调制方式, 为了简化设定所有用户采用 4-QAM 调制。信道模型采用多径瑞利衰落信道模型, 各径的幅度衰落服从指数衰落, 相位偏移在 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布。DE 操作中, 种群规模 $N_p=20$, 变异因子 $F=0.1$, 交叉因子 $CR=0.1$ 。定义归一化均方误差函数 (Normalized Mean Square Error, NMSE) 表达式为

$$NMSE = \frac{E\left\{\sum_{k=0}^K |\hat{H}_{ML}(k) - H(k)|^2\right\}}{E\left\{\sum_{k=0}^K |H(k)|^2\right\}} \quad (12)$$

其中, $\hat{H}_{ML}(k)$ 和 $H(k)$ 分别表示信道频域传递函数最大似然估计值和真实值。

4.1 DE 算法搜索性能

图 2 为 DE 搜索算法性能曲线, 纵坐标表示 DE 算法估计多用户 CIR 有效阶数为该阶的概率。从图中可以看出, 随着信噪比的增加, 信道有效阶数收敛于实际信道阶数, 在 $E_b/N_0=30$ dB 时, 收敛到实际信道阶数的概率近 90%。这是因为随着信噪比的增加, 信道各链路信号功率大于噪声功率的概率增加, 从而使得它们成为有效信道阶数。具有不同信道阶数的发送用户在相同的发射信噪比下, 信道阶数较小的用户信道各链路的信号功率大于噪声功率的概率较大, 实际信道阶数更易成为有效阶数, 因此被检测到的概率更大。

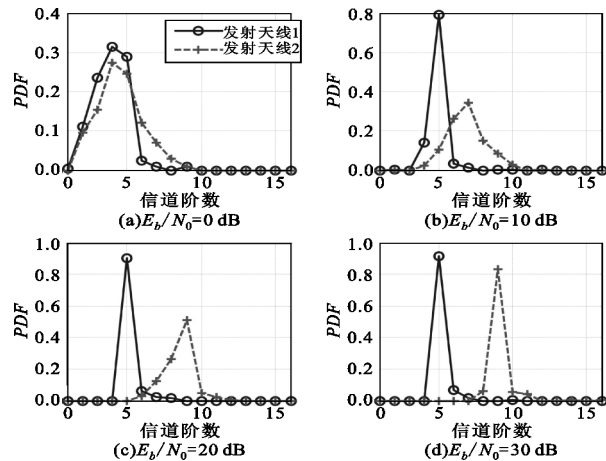


图 2 不同 E_b/N_0 下 DE 搜索算法性能
Fig. 2 The search performance of DE algorithm under different E_b/N_0

4.2 系统 NMSE 和误比特率性能

图 3 为不同信噪比下使用本文所提算法进行信道估计的 NMSE 性能曲线, 用户实际信道阶数随机产生。通过比较可以看出, 低信噪比时, 基于本文所提算法估计得到信道有效阶数, 信道估计 NMSE 性能最优; 随着信噪比的增加, 趋近基于实际信道阶数下的 NMSE 性能。与采用固定信道阶数的方案相比, 本文所提算法能获得约 4.5 dB 的性能提升。这是因为本文所提算法以信道有效阶数为基准, 在低信噪比时, 忽略噪声功率较大的实际信道链路, 能够更好地抑制噪声干扰, 改善信道估计的 NMSE 性能。在高信噪比时, 信道有效阶数收敛于实际信道阶数, 信道估计性能收敛于实际信道阶数下的 NMSE 性能。图 4 给出了上述 3 种方案下系统误比特率 (Bit Error Rate, BER) 性能的比较。从仿真结果可以看出, 本文所提算法能够有效地改善系统的信道估计性能。BER = 10^{-5} 时, 与固定信道阶数的方案相比, 本文所提算法能够获得约 1.5 dB 的性能增益。

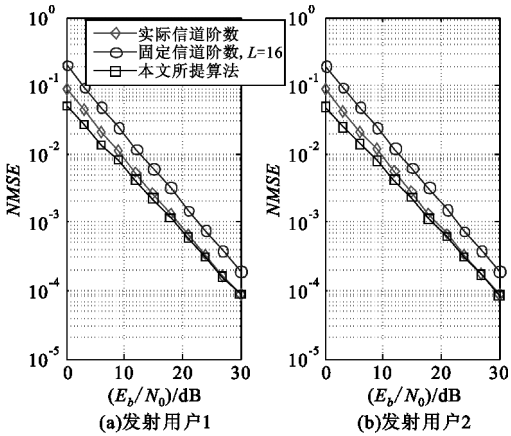


图 3 不同定阶方法下发射用户 NMSE 性能
Fig. 3 The NMSE of transmitting users under different order determination scheme

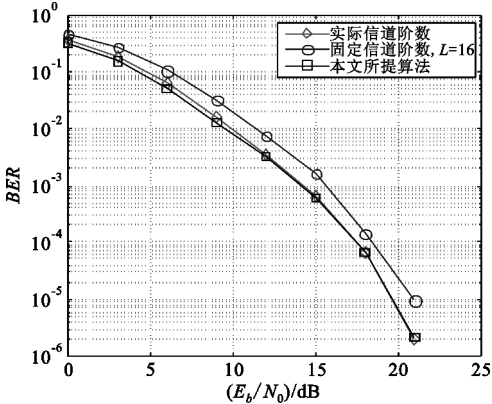


图 4 不同定阶方法下多用户 OFDM/SDMA 系统 BER 性能曲线
Fig. 4 The BER performance of multi-user OFDM/SDMA system under different order determination scheme

5 结 论

本文在分析多用户 OFDM/SDMA 系统多址信道时域 ML 信道估计算法对信道有效阶数存在依赖性的基础上,提出了一种新的多址信道有效阶数估计算法。该算法从实际通信环境出发,考虑多址用户信道链路特性的互异性,引入 AIC 准则作为搜索最优阶数的评价准则,以提高信道有效阶数和 CIR 的估计精度;构建了基于 DE 算法并行搜索信道有效阶数并进行 CIR 估计的联合框架,以提高搜索速度。仿真结果表明,该方案能够有效估计信道有效阶数,提高系统的 ML 信道估计精度,改善估计器性能,降低系统的误比特率。与传统基于固定信道阶数的方案相比, $BER = 10^{-5}$ 时,本文所提算法能够获得约 1.5 dB 的性能增益。

参考文献:

- [1] Li Y, Seshadri N, Ariyavisitakul S. Channel estimation for OFDM systems with transmitter diversity in mobile wireless channels [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(3): 461–471.
- [2] Xie Y Z, Georgiades C N. Two EM-type channel estimation algorithm for OFDM with transmitter diversity [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 51(1): 106–115.
- [3] Zhang J K, Hanzo L, Mu X M. Joint decision-directed channel and noise-variance estimation for MIMO OFDM/SDMA systems based on expectation-conditional maximization [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(5): 2139–2151.
- [4] Liavas A P, Regalia P A, Delmas J P. On the robustness of the linear prediction method for blind channel identification with respect to effective channel undermodeling/overmodeling [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000, 48(5): 1477–1481.
- [5] Wang Z, Mathew G, Xin Y, et al. A robust maximum likelihood channel estimator for OFDM systems [C] // Proceedings of 2007 Wireless Communications and Networking Conference. Hongkong: IEEE, 2007: 169–174.
- [6] Jia M, Wang Z Y, Gu X M. Joint time domain channel and channel length estimation for OFDM system [C] // Proceedings of 2007 International Conference on Communications, Computers and Signal Processing. Victoria, Canada: IEEE, 2007: 605–608.
- [7] Hirotugu A. A new look at the statistical model identification [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(6): 716–723.
- [8] Larsson E G, Liu G Q, Li J, et al. Joint symbol timing and channel estimation for OFDM based WLANs [J]. IEEE

Communications Letters, 2001, 5(8): 325–327.

- [9] Tomasoni A, Gatti D, Bellini S, et al. Efficient OFDM channel estimation via an information criterion [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(3): 1352–1362.
- [10] Zhang J K, Chen S, Mu X M, et al. Turbo multi-user detection for OFDM/SDMA systems relying on differential evolution aided iterative channel estimation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 60(6): 1621–1633.

作者简介:



李双志(1990—),男,河南南阳人,2012 年于郑州大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为多用户 OFDM/SDMA 信道估计;

LI Shuang-zhi was born in Nanyang, Henan Province, in 1990. He received the B. S. degree from Zhengzhou University in 2012. He is now a graduate student. His research concerns channel estimation for multi-user OFDM/SDMA system.

Email: shuangzhilee@gmail.com

张喆(1989—),女,河南郑州人,2009 年于空军第一航空学院获工科学士学位,现为郑州大学博士研究生,主要研究方向为多天线系统的协作接收;

ZHANG Zhe was born in Zhengzhou, Henan Province, in 1989. She received the B. S. degree from The First Aeronautic Institute of Air Force in 2009. She is currently working toward the Ph. D. degree. Her research concerns cooperative receiving for multi-antenna system.

Email: zhangzheie@qq.com

张建康(1982—),男,河南开封人,2012 年于郑州大学获博士学位,现为郑州大学讲师,主要研究方向为多天线无线通信系统及通信信号处理等;

ZHANG Jian-kang was born in Kaifeng, Henan Province, in 1982. He received the Ph. D. degree from Zhengzhou University in 2012. He is now a lecturer. His research concerns multi-antenna wireless communication system, communication signal processing, etc.

Email: iekzhang@zzu.edu.cn

穆晓敏(1955—),女,河南郑州人,1982 年于北京理工大学获学士学位,现为郑州大学教授、博士生导师,主要研究方向为多天线无线通信系统、认知无线电、通信信号处理、图像信号处理等。

MU Xiao-min was born in Zhengzhou, Henan Province, in 1955. She received the B. S. degree from Beijing Institute of Technology in 1982. She is now a professor and also the Ph. D. supervisor. Her research interests include multi-antenna wireless communication systems, cognitive radio, communication signal processing, image signal processing, etc.

Email: iexmmu@zzu.edu.cn