

文章编号: 2095-4980(2018)06-1099-06

基于 V-MIMO 系统的信号检测与最优权值搜索

刘 权, 周渊平

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 介绍了虚拟多输入输出(V-MIMO)系统中在一根天线上发射多路信号时的信道估计、信号检测方法以及最优权值的搜索算法。V-MIMO 系统采用最小均方(LMS)算法 2 次进行信道估计, 防止一帧数据中信道衰弱造成的信道估计误差, 保证了信道估计的准确性; V-MIMO 系统采用最大似然(ML)检测算法, 提高了检测的准确性, 降低了误码率; 同时采用遍历和变步长 breaklocal 算法, 分别针对较少用户和较多用户数据传输的情况搜索最优权值, 降低了系统的计算复杂度。在 2×2 , 1×2 , 2×3 , 2×4 的实际测试中, 在不增加功率和带宽的基础上, V-MIMO 系统传输效率至少提高了 70%, 同时减少了发射天线的数量。

关键词: 传输效率; 频谱利用率; 最优权值; 虚拟信道

中图分类号: TN911.23

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201806.1099

Signal detection and optimal weights of search method based on V-MIMO system

LIU Quan, ZHOU Yuanping

(School of Electronic & Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: Some algorithms in the Virtual-Multi-Input Multi-Output(V-MIMO) system by an antenna launching multiplexing data are introduced, such as channel estimation, signal detection method and the optimal weights of search algorithm. Firstly, the Least Mean Square(LMS) algorithm is applied to two channel estimation in V-MIMO system, to prevent the channel estimation error caused by the weakness in the data channel during a frame time, guaranteeing the accuracy of channel estimation. Secondly, V-MIMO system utilizes the Maximum Likelihood(ML) detection algorithm to improve the detection accuracy and reduce the bit error rate. Finally, the traversal algorithm and variable step breaklocal algorithm are adopted respectively for less users and more users data transmission to search the optimal weights, which reduce the computational complexity of the system in 2×2 , 1×2 , 2×3 , 2×4 of the actual test, V-MIMO system improve the transmission efficiency of at least 70% on the basis of invariable power and bandwidth, and reduce the number of the transmitting antenna.

Keywords: transmission efficiency; spectrum efficiency; optimal weights; virtual channel

数据通信中, 多输入输出(MIMO)通信已成为一种主流的通信方式。目前 MIMO 通信系统主要为分集模式与空分复用模式, 分集模式主要对抗无线信道中的深衰落^[1-2], 空分复用模式提高 MIMO 系统信息传输速率^[3-6]。国内外比较流行的 MIMO 通信技术是利用空间中多个子信道的原理来实现多路数据的并行传输, 能够在不增加带宽和发射功率的情况下, 提高信道的容量和频谱利用率^[7-10]。但是 M 根天线只能发射 M 路数据, 要进一步提高数据传输率就只能增加天线的数目, 这样会带来成本的增加和实际应用的困难。因此, 一根天线上传输多路用户数据就成为研究的方向, 本文提出的虚拟多输入输出(V-MIMO)系统在不增加带宽和功率的情况下, 通过在一根天线上复用多路数据, 构建一个虚拟的空时信道对数据进行加权处理, 影响实际真实信道的相关性, 保证通信系统的有效性。同时通过适用于 V-MIMO 虚拟空时信道系统的特殊最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)信道估计、最大似然(ML)信号检测算法、最优权值的搜索算法来保证通信质量。

1 V-MIMO 系统的介绍

1.1 V-MIMO 空时信道的理论构建

在 MIMO 系统发射端虚拟一个预空时信道，通过调整预空时信道的权值改善实际传输的信道 H ，使之利于多路用户复用的 MIMO 系统传输，并且能够减小由多路用户数据带来的人为干扰，保证系统的通信质量。

假设在第 m 根天线 x_m 复用 U_m 路用户数据，每根发射天线数据满足： $x_m = w_{m,1}s_{m,1} + w_{m,2}s_{m,2} + \dots + w_{m,U_m}s_{m,U_m}$ ($m=1,2,\dots,M$)，其中 s_{ij} 表示第 i 根发射天线上的第 j 路用户数据。令 $S_m = [s_{m,1}, s_{m,2}, \dots, s_{m,U_m}]^T$ 表示第 m 根发射天线输入用户数据向量； $w_{m,l} = A_{m,l}e^{j\theta_{ml}}$ ($m=1,2,\dots,M; l=1,2,\dots,U_m$) 表示第 m 根发射天线上的第 l 路用户数据 $s_{m,l}$ 的预空时子信道权值， $A_{m,l}, \theta_{ml}$ 表示权值的幅值与相位。令 $w_m = [w_{m,1}, w_{m,2}, \dots, w_{m,U_m}]^T$ 表示第 m 个预空时信道的向量，对应第 m 根发射天线输入用户向量 S_m 。则系统传输模型^[11]等效于：

$$Y = \begin{bmatrix} h_{11}w_1^T & h_{12}w_2^T & \dots & h_{1M}w_M^T \\ h_{21}w_1^T & h_{22}w_2^T & \dots & h_{2M}w_M^T \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ h_{N1}w_1^T & h_{N2}w_2^T & \dots & h_{NM}w_M^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_M \end{bmatrix} + n = HS + n \quad (1)$$

对于式(1)，传输矩阵是实际信道和虚拟信道的组合信道，实际信道的相关性可由虚拟信道来动态调整，当方程只有一个解时，即为常规的 MIMO 系统，当传输矩阵的秩小于用户数时，即是 V-MIMO 系统。这时系统的误码率会上升，这是一根天线传输多路用户数据产生的用户干扰造成的，此时调整虚拟信道权值来改变传输矩阵的秩，找到一个合适的权值使式(1)具有唯一解，提高数据传输的质量。

1.2 基于 Zynq-7000 通信平台的 V-MIMO 系统功能流程介绍

V-MIMO 系统是一套基于虚拟信道的闭环无线通信系统，主要包括以下模块：数据产生模块、QPSK 调制模块、虚拟空时模块、成形滤波器模块、AD9361 射频接收和发射模块、时频同步模块、信道估计模块、检测模块、解调模块和反馈模块，发射端和接收端的功能模块如图 1~2 所示。图 1 中，基带数据产生后，经过基带数据处理模块，每个模块代码在发射端的 iio-oscilloscope 软件的开源代码中实现。射频数据由 AD9361 射频板自行处理发射与接收。图 2 中，基带数据由解调、帧同步、频偏补偿、匹配滤波、信道估计、信号检测、串口反馈等功能组成，接收端的代码同样在 iio-oscilloscope 软件的开源代码中实现。

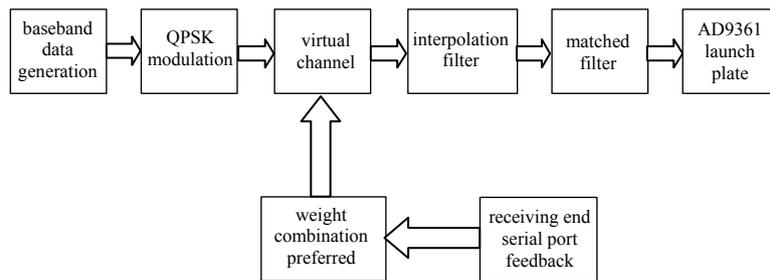


Fig.1 V-MIMO system transmitter
图 1 V-MIMO 系统发射端

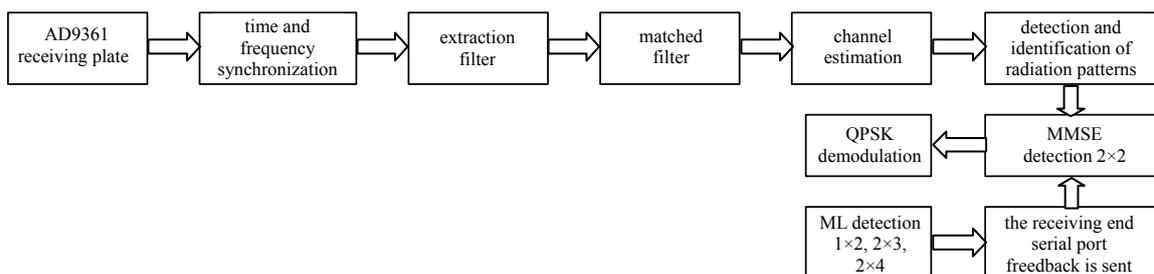


Fig.2 V-MIMO system receiver
图 2 V-MIMO 系统接收端

2 信道估计

2.1 帧结构设计

V-MIMO 系统中,数据帧结构采用导引序列正交的方式^[12],每路用户数据的导引序列相互正交。但在实际测试过程中,信道在一帧的时间里会发生变化。在帧结构里加入 2 段导引序列,估计 2 次信道的首尾状态取平均值,使估计信道更加接近于实际信道。

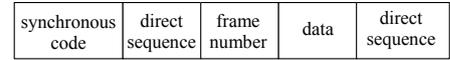


Fig.3 Frame structure
图 3 帧结构

2.2 MMSE 信道估计

MIMO 系统中,信道建模采用平坦衰落信道模型,信号的带宽小于信道的相干带宽。第 i 根天线上的第 k 路发射用户数据至第 j 根接收天线之间的子信道的估计量 \hat{h}_{ji}^k 等于:

$$\hat{h}_{ji}^k = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{m=i}^L w_{i,k} h_{jm}^k s_{il}^k s_{ml}^k + s_{il}^k n_{jl}}{\sum_{l=1}^L |s_{il}^k|^2} = w_{i,k} h_{ji}^k + \frac{\sum_{l=1}^L s_{il}^k n_{jl}}{\sum_{l=1}^L |s_{il}^k|^2} \quad (2)$$

式中: s_{il}^k 表示第 i 根发射天线的第 k 路用户数据的导引序列在 l 时刻的值; h_{ji}^k 表示第 k 路用户数据从第 i 根发射天线上传输至第 j 根接收天线的信道衰落系数; $w_{i,k}$ 表示第 i 根发射天线的第 k 路用户数据的权值。MMSE 算法能够很好地减弱噪声的影响,同时对于信道的缓慢变化,通过 2 次信道估计的平均值作为真实的估计信道,大大提高了信道估计的准确性。

2.3 系统测试实验结果与分析

由图 4 的估计信道星座图可以看到,信道是一种静态的信道,不会发生特别大的变化,在一帧数据的传输过程中有一些变化,但是通过上面的信道估计方式可以尽可能地接近与现实中的信道。此时 MMSE 算法估计出来的综合信道是虚拟信道和实际信道共同作用的结果。通过改变权值 $w_{i,k}$,可以调节 V-MIMO 系统的无线信道,从而改善系统的通信质量。但是这对信号检测提出了更高的要求,通过一个接收信号和信道信息来检测 2 个或多个发射信号的信息,将是下一步检测必须解决的问题。

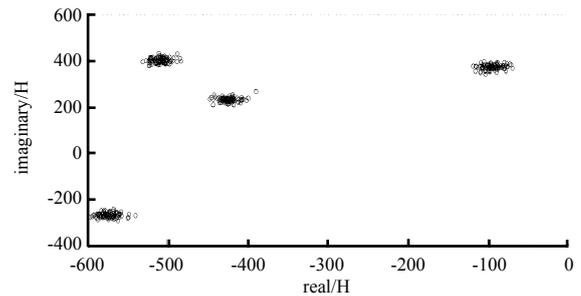


Fig.4 V-MIMO system channel estimation constellation
图 4 V-MIMO 系统信道估计星座图

3 信号检测与权值搜索

3.1 信号检测算法仿真

仿真条件:信噪比范围 0~15 dB,瑞利衰落信道,2 个发射端,2 个接收端,输入信号是随机的 0,1 信号,通过 QPSK 调制,高斯白噪声,信号点数 40 000 点。仿真结果如图 5 所示,由仿真图可知,在常规 MIMO 系统 2×2 模式中,ML 检测算法的效果明显好于 MMSE 算法和迫零(Zero-Forcing, ZF)算法,MMSE 算法效果次之,ZF 算法的效果最差。

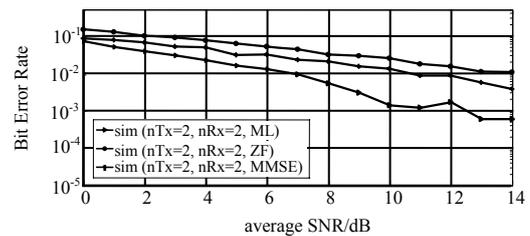


Fig.5 Detection algorithm simulation
图 5 检测算法仿真

3.2 ML 检测在 V-MIMO 系统中的应用原理

在 V-MIMO 系统中,接收天线的数量比用户数据量少,因此采用 ML 检测方法^[13-15],已知接收信号 \mathbf{Y} 和信道 \mathbf{H} 的信息。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{S} = W_1 X_1 + W_2 X_2 + \dots + W_n X_n \quad (3)$$

\mathbf{S} 的 QPSK 信号 X_1 和 X_2 的组合与 \mathbf{Y} 的最接近的组合来检测多路信号(本 V-MIMO 系统中,受限于硬件系统,权值只考虑了相位,没有进行幅度的调整)。

3.3 权值搜索方式

在最优权值搜索过程中,采用遍历的搜索算法是最精确的最优权值的搜索算法,但复杂度较高。假设一根天线复用 N 路用户数据,发射天线的个数为 T ,权值的搜索步长为 S ,则搜索权值的迭代次数为 $(360/S)^{T \times N}$ 。当天线的数量和用户数增加时,计算复杂度极高,因此对于用户数低的系统可以采用遍历的权值搜索组合,对于用户数较高的系统则要采取其他的低复杂度的搜索算法。

图(6)为 1T2D 模式,信号点数为 40 000,权值(相位)遍历步长为 3,信噪比为 13 dB,一根天线功率衰减为 13 dB,固定其中一个权值为 0,改变另外一个权值(等效于同时改变 2 个权值)。

图(7)为 2T3D 模式,信号点数为 40 000,权值(相位)遍历步长为 3,信噪比为 13 dB,2 根天线功率衰减为 10 dB,固定其中一个权值为 0,改变另外 2 个权值(等效于同时改变 3 个权值)。

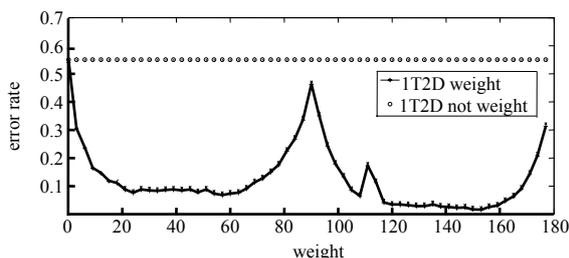


Fig.6 V-MIMO system 1T2D weight traversal
图 6 V-MIMO 系统 1T2D 的权值遍历

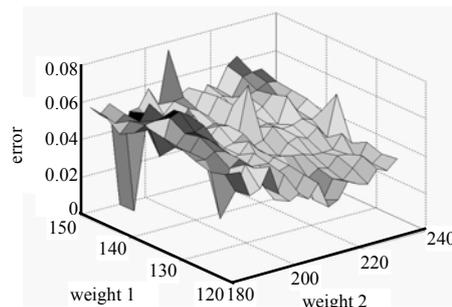


Fig.7 V-MIMO system 2T3D weight traversal
图 7 V-MIMO 系统的 2T3D 权值遍历

由图(6)~图(7)可知,权值对误码率有很大影响:有些权值对误码率有好的影响,有些权值对误码率有坏的影响。因此,需要找出最优的权值组合,才能大大降低一根天线复用多路数据产生的误码率,同时能够提高数据的传输率(2T4D 模式图像是 4 维空间,在此没有进行图像的说明。同时 2T4D 复杂度比较高,遍历不实际,需要采用新的权值搜索算法)。

本文提出一种新的适用 V-MIMO 系统多路数据的权值搜索算法,即变步长 breaklocal 算法。假设用户数为 n ,初始权值组合 $\mathbf{W}_N = [W_1, W_2, W_3, \dots, W_n]$,权值的调整步长为 $\text{step}(0 < \text{step} < 3)$,变步长控制位 θ 。

$$\mathbf{W}_{N+1} = \mathbf{W}_N + \theta \times \text{step} \quad (4)$$

$$\theta = \begin{cases} \Delta X \\ -\Delta X \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta X = \{10, 5, 1, 0.5, 0.1\}$; θ 是等概率随机产生的数,将 ΔX 分成若干从大到小的档位,当初始权值设定后,权值采用小步长的搜索方式,会搜索到一个局部的最优权值,此时在局部最优权值的基础上采用大步长的改变权值,跳出此时的局部最优的状态,再继续原来小步长的搜索方式。同时判断此时的局部最优是不是比上次的局部最优要好,如果误码率比上次的差,则回到上次的权值状态,同时将突破局部最优的步长降一档。这样可以搜索到一个相对的全局最优。

4 V-MIMO 系统硬件平台搭建与结果分析

4.1 实际硬件平台的搭建

V-MIMO 系统是一款基于 Zynq_7000+AD9361 的 2 发 2 收的闭环通信系统。如图 8 所示,它由发射板和接收板两部分组成,其中发射板中主要经过基带数据生成器、基带 QPSK 调制器,数据再经过在 ARM 里面的软件算法加权值合并、插值滤波、匹配滤波等过程后,通过 AD9361 射频发射板用 4.2 GHz 的载频发射出去。软件部分通过发射板的 HDMI 端口与显示器端口连接, Linux 系统和软件代码通过 SD 卡嵌入在发射板上,实现通信算法的编程与调试。接收板包含 AD9361 接收板,软件进行时域同步、频偏估计、频偏补偿、抽取滤波、匹配滤波、信道估计和信号检测,最后通过硬件进行解调。如图 9 所示,接收端的数据信息在接收端显示器的界面上显示参数,包括误码率、SNR、传输模式、传输点数、检测方式、捕获点数、信号的时域与频域图像等。同时将检测的误码率信息和帧号信息通过 UART 串口传输到接收端的 OTG 端口,发射板根据反馈的信息动态调整权值组合,使信道的相关性变弱,进而降低误码率,实现高效的信息传输。

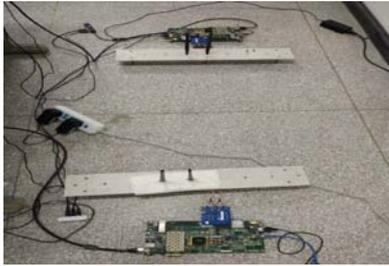


Fig.8 V-MIMO system hardware platform
图 8 V-MIMO 系统硬件平台

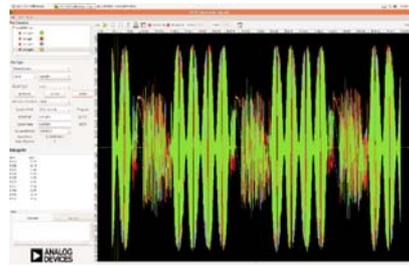


Fig.9 Receiving software interface
图 9 接收端软件界面

发射端的界面可以动态或手动的调整权值大小,本系统中,权值的大小代表相位的改变,界面上有多个权值模式可以选择,包括 1T2D 模式、2T2D 模式、2T3D 模式、2T4D 模式等。界面上不仅可以手动调整发射板的载波频率,避开生活中同频信号干扰,而且可以调整信号的发射功率,保证在不增加发射功率的前提下,提升数据的传输速率。

4.2 系统测试结果的分析

采用变步长 breaklocal 权值搜索算法的系统测试结果如表 1 所示: V-MIMO 系统 1T2D,2T3D 的误码率与普通 2T2D 的不加权 MIMO 系统误码率相比要稍好一些, V-MIMO 系统 2T4D 的误码率比普通 2T2D 的不加权 MIMO 系统要稍差一点。1T2D,2T3D 的误码率基本差不多。从误码率的角度可以看出, V-MIMO 系统能够在常规 MIMO 的基础上很大程度的降低误码率。同时, V-MIMO 系统利用虚拟信道的权值来实现一根天线发射多路数据,采用特殊的 ML 检测算法检测信号,比常规 MIMO 系统的一根天线发一路信号的误码率还要低。由于系统 AGC 硬件的限制,调整权值仅限于调整相位的大小,没有考虑幅度。由此可见, V-MIMO 系统利用虚拟信道与真实信道级联形成综合信道,来降低实际信道的相关性,同时闭环反馈误码率,选择最优的权值来匹配传输环境。实际的测试结果和理论仿真模型的结果基本一致。于是得出结论, V-MIMO 系统比 MIMO 系统在不增加带宽和功率的基础上,数据传输率和频谱效率可以提高 70%,同时减少了天线的数量。

表 1 不同模式的测试结果

Table1 Test results for different modes		
	model	BER
MIMO	2×2	0.045 6
	2×2	0.010 5
V-MIMO	1×2	0.033 2
	2×3	0.030 8
	2×4	0.074 9

5 结论

V-MIMO系统数据传输效率提高了至少70%,信道估计采用MMSE信道估计取平均的算法,能够很好的估计出信道参数,同时避免了环境噪声和信道衰落的影响。权值搜索算法中,针对V-MIMO系统能够更加趋近于实际应用,低用户数据传输时,采用权值遍历的方式,搜索出最优的权值,这种方式可以保证最好的传输质量。但对于多用户数据传输时,遍历算法复杂度太高,无法实际应用,变步长breaklocal权值搜索算法相对于遍历算法而言,计算的复杂度会大大降低。该系统在实际应用中前景广阔。

参考文献:

- [1] TANBOURGI R, DHILLON H S, JONDRAL F K. Analysis of joint transmit-receive diversity in downlink MIMO heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(12): 6695-6709.
- [2] HERNADEZ-AQUINO R, ZAIDI S A R, MCLERNON D, et al. Energy efficiency analysis of two-tier MIMO diversity schemes in Poisson cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(10): 3898-3911.
- [3] MUKHERJEE A, SWINDLEHURST A L. Modified waterfilling algorithms for MIMO spatial multiplexing with asymmetric CSI[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2012, 1(2): 89-92.
- [4] AL-DOORI B, LIU Xian. The impact of efficient transport blocks management on the downlink power in MIMO spatial multiplexing of LTE-A[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(12): 1796-1800.
- [5] SEO J H, JUNG T J, KIM H M, et al. Improved polarized 2x2 MIMO spatial multiplexing method for DVB-NGH system[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2015, 61(4): 729-733.
- [6] BHARAH B N, MURTHY C R. Power-controlled reverse channel training in a multiuser TDD-MIMO spatial multiplexing system with CSIR[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(9): 4345-4356.
- [7] 李菊芳. 下一代移动通信系统中大规模 MIMO 技术研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2014. (LI Jufang. The next generation

- mobile communication system in large-scale MIMO technology research[D]. Xiamen,China:Xiamen University, 2014.)
- [8] 马优. MIMO 无线信道建模与仿真研究[D]. 成都:电子科技大学, 2010. (MA You. MIMO wireless channel modeling and simulation study[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2010.)
- [9] 王复苏. MIMO 系统同步技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2009. (WANG Fusu. Study on synchronous technology of MIMO system[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2009.)
- [10] 杨春萍,王键,李道本. MIMO-OFDM 系统的同步算法[J]. 中南大学学报, 2010,41(2):578-584. (YANG Chunping,WANG Jian,LI Daoben. Synchronous algorithm of MIMO-OFDM system[J]. Journal of Central South University, 2010,41(2): 578-584.)
- [11] 张健,周渊平,杨贵德. 基于虚拟空时信道技术的 MIMO 系统[J]. 计算机系统应用, 2017,26(3):51-56. (ZHANG Jian, ZHOU Yuanping,YANG Guide. MIMO system based on virtual space-time channel technology[J]. Computer System Applications, 2017,26(3):51-56.)
- [12] 胡倩,颜彪,邱孟栋,等. 基于导频信号的 MIMO-OFDM 同步技术[J]. 信息传输与接入技术, 2010,36(5):23-25. (HU Qian, YAN Biao,QIU Mengdong,et al. MIMO-OFDM synchronization based on pilot signal[J]. Information Transmission and Access Technology, 2010,36(5):23-25.)
- [13] 黄丘林. MIMO 无线通信技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010. (HUANG Qiulin. Research on MIMO wireless communication technology[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2010.)
- [14] 刘明辉. OFDM-MIMO 系统接收机关键技术研究及 FPGA 实现[D]. 成都:电子科技大学, 2008. (LIU Minghui. Key technology research and FPGA implementation of OFDM-MIMO system receiver[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2008.)
- [15] 王世良. MIMO 通信系统接收端检测技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2014. (WANG Shiliang. Research on the receiving end detection technology of MIMO communication system[D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.)

作者简介:



刘 权(1993-), 男, 湖北省黄冈市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为信号与信息处理.email:2273217972@qq.com.

周渊平(1955-), 男, 成都市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信息传输与处理、智能天线、MIMO 多天线处理.

(上接第 1086 页)

- [14] AL-SHUWAILI A,SIMEONE O,BAGHERI A,et al. Joint uplink/downlink optimization for backhaul-limited mobile cloud computing with user scheduling[J]. IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks, 2017,3(4): 787-802.
- [15] KNOPP S,DAUZERE-PERES S,YUGMA C. A batch-oblivious approach for complex job-shop scheduling problems[J]. European Journal of Operational Research, 2017,263(1):50-61.
- [16] DIAMOND S,BOYD S. CVXPY:a python-embedded modeling language for convex optimization[J]. The Journal of Machine Learning Research, 2016,17(1):2909-2913.
- [17] KLINTBERG E,GROS S. A parallelizable interior point method for two-stage robust MPC[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017,25(6):2087-2097.

作者简介:



孟 敏(1981-), 女, 江苏省东台市人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为云计算、网络安全等.email: 2273217972@qq.com.