

基于虚拟空时信道技术的 MIMO 系统^①

张 健, 周渊平, 杨贵德

(四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

摘 要: MIMO 通信系统能够在不增加系统带宽以及功率的情况下, 提高系统的数据传输速率与频带利用率. 常规 MIMO 通信系统的每根发射天线承载单路用户数据流, 通过增加天线数目提高系统信道容量与载入用户数量, 即不同用户数据分配至不同的发射天线上, 对于发射端的天线, 一方面, 增加天线数会增加系统复杂度, 另一方面, 每根发射天线仅分配单一用户是浪费资源的. 因此, 在天线上复用多路用户是 MIMO 系统的发展趋势. 针对问题, 提出了在发射端级联虚拟空时信道模块的优化 MIMO 系统, 该模块通过系统的反馈信息自适应地调整参数, 优化无线信道, 保证传输同样数据流的情况下, 提高系统通信质量以及在同样的通信质量下与系统带宽下提高系统传输速率. 实验测试以及仿真表明, 在 2×2 规模的 MIMO 系统中, 改进的 MIMO 系统能够在相同带宽内至少提高 50% 的传输速率.

关键词: MIMO 系统; 多用户; 虚拟空时信道; 数据传输速率

MIMO System Based on the Virtual Space-Time Channel Technology

ZHANG Jian, ZHOU Yuan-Ping, YANG Gui-De

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

Abstract: The MIMO communication system can improve the data transmission rate and spectrum efficiency without increasing the bandwidth and power of system. Each transmitting antenna is allocated a single user in the conventional MIMO communication system, which can improve the channel capacity and the number of user through adding the antenna. It equals to allocating different user to different transmitting antenna. For the transmitting antenna, on the one hand, it would increase the system complexity, on the other hand, the fact that only a single user is allocated on each transmitting antenna is a waste of resource. Therefore, multiplexing multiple users on the antenna is the development trend of MIMO system. For this, we put forward an optimal MIMO system of connecting a virtual space-time channel module to transmitter. It can adaptively adjust the parameters of the module through the feedback information, and optimize the wireless channel, and improve the communication quality of system for the same data transmission rate and increase the data transmission rate for the same communication quality of system. The experiment and simulation shows that the improved MIMO system can improve data transmission rate of 50% at least for a 2×2 MIMO system.

Key words: MIMO system; multiple users; virtual space-time channel; data transmission rate

在目前的现代通信中, 多输入多输出通信技术 (MIMO: Multiple-input, multiple-output) 能有效地提高数据传输速率, 信道容量以及频带利用率^[1], 是现代移动通信的关键技术. 随着通信技术的发展, 大数据传输和处理是通信系统的主要特征, 数据传输率越来越

成为一个衡量通信系统性能的主要指标. 在常规 MIMO 通信系统中, 在相同时频资源上, 一个 $M \times M$ 规模的系统至多能提高 M 倍的数据传输速率, 进一步提高数据传输速率的方法为增加系统的天线数目, 但会增加系统的复杂度和成本. 因此, 加强天线资源复

^① 基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20130191110006)

收稿时间: 2016-06-30; 收到修改稿时间: 2016-08-08 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005658]

用是目前 MIMO 系统的主要发展目标. 第 4 代移动通信关键技术包括了正交频分复用(OFDM)技术^[2], 利用 OFDM 技术能够有效地提高系统频带利用率, 但是在子载波正交性的约束下, 系统总频宽的降低是有限的. 采用非频分正交的用户数据复用能够有效的提高频带利用率, 目前比较热门的技术为非正交多址接入技术(NOMA)^[3], 该技术在发射端主动引入干扰信息, 在接收端通过串行干扰消除技术实现每个用户的检测. NOMA 能够极大提高 MIMO 系统的频带利用率, 但是 NOMA 技术的关键是在接收机端设计一个复杂度低且可靠的串行干扰检测算法^[4].

本文针对现有 MIMO 技术开展深入研究, 提出一种基于虚拟空时信道优化的 MIMO 传输系统. 在发射端级联一个虚拟空时信道模块, 使虚拟空时信道与实际传输信道组合成综合的联合信道, 那么整个通信系统的传输特性受控于虚拟空时信道, 基于这个处理, 使 MIMO 系统的发射端每根天线能够发射同频段的不同用户数据. 在接收端利用最大似然检测^[5](MLD: Maximum likelihood detection)算法检测接收信号, 同时将当前 MIMO 系统的检测状态与实际信道状态信息反馈至发射机, 发射端对反馈信息作出处理后, 自适应地调整虚拟空时信道模块的参数, 最终整个通信系统保持良好的通信质量. 相比常规 MIMO 系统, 优化的 MIMO 系统在相同带宽下能够提高数据传输速率和频带利用率.

1 MIMO系统模型

1.1 模型分析

本文提出的基于虚拟空时信道的优化无线传输系统模型如图 1 所示. 发射端与接收端的天线数目分布 M 和 N , 接收信号表示为^[6]:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{H} \in \mathbf{R}^{N \times M}$ 表示无线传输信道矩阵, $\mathbf{x} = [x_0, x_1, \dots, x_{M-1}]^T$ 表示经过虚拟信道处理后的发射信号矢量, $\mathbf{n} = [n_0, n_1, \dots, n_{N-1}]^T$ 表示为服从均值等于零, 方差等于 σ^2 的高斯噪声矢量, $\mathbf{y} = [y_0, y_1, \dots, y_{N-1}]^T$ 为接收信号矢量.

假设第 m 根天线发射 t_m 路用户数据, 即 $x_m = w_{m1}s_{m1} + w_{m2}s_{m2} + \dots + w_{mt_m}s_{mt_m}$, ($m = 0, 1, \dots, M-1$), s_{ij} 表示第 i 根天线上的第 j 路用户数据, 令 $\mathbf{s}_m = [s_{m1}, s_{m2}, \dots, s_{mt_m}]^T$ 表示对应第 m 根发射天线的输入

用户数据向量. 每路输入用户数据 s_{ml} 通过一个相对应的虚拟信道参数 $w_{ml} = A_{ml}e^{j\theta_{ml}}$, ($l = 1, 2, \dots, t_m$), A_{ml} , θ_{ml} 分别表示第 m 根天线上的第 l 个用户对应的虚拟子信道幅值和相角. 令 $\mathbf{w}_m = [w_{m1}, w_{m2}, \dots, w_{mt_m}]^T$ 表示第 m 个虚拟信道向量, 对应第 m 个输入用户向量 \mathbf{s}_m , 在发射端虚拟信道矩阵由不同的虚拟信道向量构成, 即 $\mathbf{w} = [\mathbf{w}_0, \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_{M-1}]^T$, 那么式(1)可以表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} \mathbf{s}_0^T & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{s}_1^T & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \mathbf{s}_{M-1}^T \end{bmatrix} \mathbf{w} + \mathbf{n} \quad (2)$$

优化后的 MIMO 系统模型如图 1 所示.

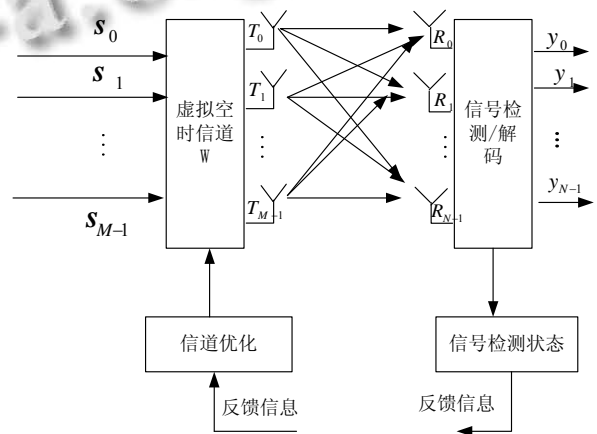


图 1 级联虚拟空时信道模块的 MIMO 系统

图 1 中, 相对与常规 MIMO 通信系统每根发射天线发射单路用户, $x_m = s_m$ 优化后的的系统每根天线 $x_m = w_{m1}s_{m1} + w_{m2}s_{m2} + \dots + w_{mt_m}s_{mt_m}$ 每路用户数据 s_{mi} 都是同频宽数据, 通过权值调整能使每根天线上的多路叠加发射数据 x_m 在良好的通信质量下发射, 因此, 基于此种方案, 优化后的系统能够提高 $(\sum_{m=0}^{M-1} t_m - M) / M$ 的系统传输速率和频带利用率, 其中 $t_i \geq 1$, 后文将验证在 2×2 MIMO 系统中, 系统至少传输 3 路以上的用户数据, 提高了 50% 频带利用率.

1.2 基于 ZC706+AD9361 实验平台的模型

ZC706 是 XILINX 公司最新开发的一款可以应用于 MIMO 通信系统的基带板, 能够支持 AD9361, AD9684 等 MIMO 系统射频模块板. 搭建 ZC706+AD9361 实验平台, 可以进行 2×2 , 4×4 等小规模 MIMO 通信系统的测试. 将基于虚拟空时信道的

MIMO 系统应用于 ZC706 实验平台, 整个 MIMO 系统包括了以下模块:

- (1) QPSK 调制模块;
- (2) 虚拟空时模块;
- (3) 发射 square-root 插值成形滤波器;
- (4) AD9361 射频发射模块;
- (5) AD9361 射频接收模块;
- (6) 时间同步模块;
- (7) 频偏校正模块;
- (8) 接收 square-root 抽取匹配滤波器;
- (9) 最大似然检测模块;
- (10) QPSK 解调模块;
- (11) 反馈模块.

发射端、接收端的功能模块如图 2、图 3 所示.

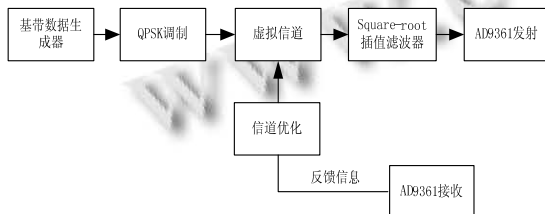


图 2 MIMO 系统发射端

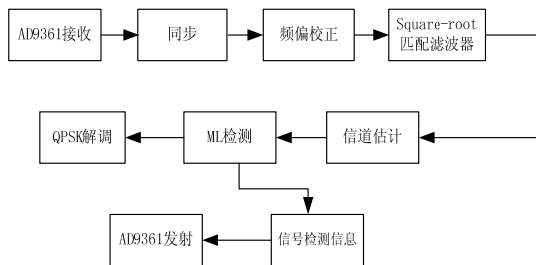


图 3 MIMO 系统接收端

图 2、图 3 中的 AD9361 模块是兼具发射与接收功能的射频发射模块. 系统将发射链路与接收端的反馈链路数据的信号分别调制至 2.4GHz 与 2.45GHz 频段发射, 实现了频分全双工的传输模式, 发射端的 square-root 插值滤波器的作用为平滑方波, 限定传输信号的带宽, 降低信号在无线信道的衰落程度, 接收端的 square-root 匹配滤波器作用是将发射端的接收的平滑模拟波整形为原基带方波.

在 ZC706 平台上搭建图 2, 图 3 的通信模型, 验证基于虚拟空时信道的 MIMO 系统的可行性.

2 虚拟空时信道模块处理机制

MIMO 无线传输数学模型由式(1)所示, 空气中的信道 \mathbf{H} 对于整个通信系统的质量影响较大, 所以提出在发射天线之前级联虚拟信道模块, 目的是改善无线信道环境^[7]. 令实际传输信道 \mathbf{H} 为慢衰落信道^[8], 那么其结构如式(3)所示:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & \dots & h_{0(M-1)} \\ h_{10} & h_{11} & \dots & h_{1(M-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{(N-1)0} & h_{(N-1)1} & \dots & h_{(N-1)(M-1)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中参数 h_{ij} 表示第 j 根发射天线至第 i 根接收天线的信道增益因子.

虚拟空时信道的处理原则: 进入模块的各个单路用户数据通过各个虚拟子信道 w_{ml} , 然后发送至相应的发射天线上. 处理过程如图 4 所示.

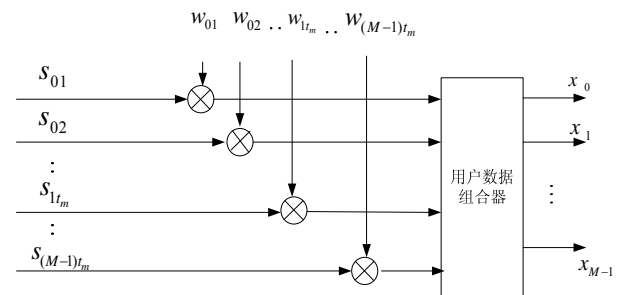


图 4 虚拟空时信道模块

图 4 中用户数据 $S_{01}, S_{02}, \dots, S_{(M-1)t_m}$, 通过对应的虚拟子信道 $w_{01}, w_{02}, \dots, w_{(M-1)t_m}$ 后, 再通过用户数据组合器, 生成对应天线的发射数据 x_0, x_1, \dots, x_{M-1} , 即 $x_m = w_{m1}S_{m1} + w_{m2}S_{m2} + \dots + w_{mt}S_{mt}$. 权值 w_{ml} 的幅值 A_{ml} 针对用户信号的功率调节, 相角 $e^{j\theta_{ml}}$ 针对用户信号的相位补偿.

令式(3)所示的无线信道的子信道增益因子 $h_{ij} = \alpha_{ij}e^{j\theta_{ij}}$, α_{ij} 为对应信道增益幅值, θ_{ij} 为信道的相位偏移. 在无线信道中, 各路数据经过的子信道的衰落是不一样的^[9], 可能出现某些子信道的衰落比较大, 即出现深衰落情况^[10]. 为保证通信质量, 那么相应子信道的发射天线数据的功率应该增大. 对于衰落比较小的子信道, 在发射端对相应的用户数据调节主要为相位补偿.

虚拟空时信道即对从接收端反馈而来的信息做自适应调整. 对传输环境恶劣的子信道 h_{ij} , 虚拟空时模块将提高天线 T_i 的发射功率, 补偿相位, 提高接收

端的信号的信噪比,降低系统的误码率.

3 计算机仿真验证

本文提出的MIMO系统相对于常规MIMO系统能够自适应的使发射数据适应当前实际信道传输. 因此,在相同的天线规模和用户数的情况下,基于虚拟空时信道的MIMO系统的通信质量比常规MIMO系统好,即接收端的信号的检测的误码率低;在相同误码率情况下,基于虚拟空时信道的MIMO系统的传输速率比常规MIMO系统要高. 为验证改进的MIMO系统正确性,首先在计算机中仿真两种系统的性能.

实验一:在相同的天线数目和发送数据信号路数情况下,比较本文提出的改进MIMO系统与常规MIMO系统的误码率性能. 仿真条件设置:2×2MIMO系统,仿真数据点数L=30000,信道H为慢衰落信道,基带数据采用QPSK调制. 仿真结果如图5所示.

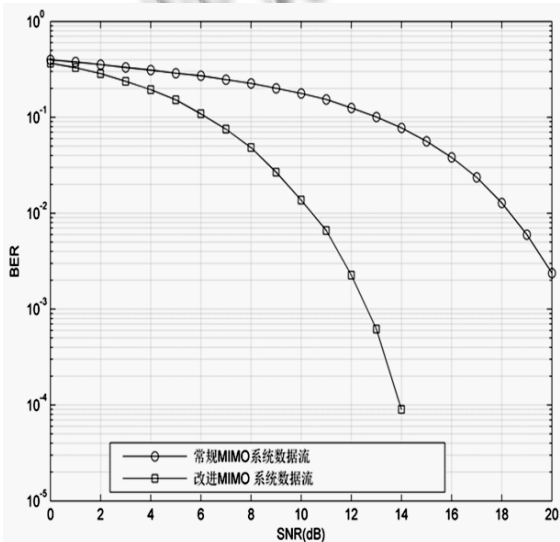


图5 同用户数据系统误码率性能对比

图5中两个系统的每根发射天线的发射一路数据信号. 其中改进的MIMO系统的误码率的性能图是在基于最佳虚拟信道时的结果. 从图中可以看出,当系统的数据传输速率相同时,在接收信噪比0~20dB的范围内,改进MIMO系统的误码率低于常规MIMO系统,因此,虚拟空时信道模块能够有效的改善信道环境,降低系统的误码率.

实验二:在实验一的基础上,只在其中一根发射天线上增加一路用户数据信号,即2根发射天线发射3路用户数据. 验证改进MIMO系统能否在传输多路数

据情况下,保持良好的通信质量,仿真结果如图6所示. 其中改进MIMO系统的误码率性能图仍然是基于最优虚拟信道时的结果.

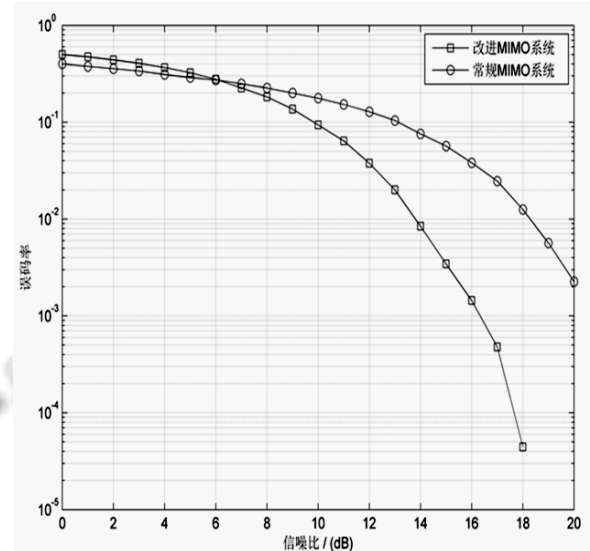


图6 不同用户数系统误码率性能对比

图6中在信噪比为0至7dB时,常规MIMO系统的误码率与改进MIMO系统的误码率基本一致,在高于7dB时,改进MIMO系统的误码率明显低于常规MIMO系统,改进MIMO系统在传输3路用户数据时仍然可以保证误码率与常规MIMO系统一致,甚至更低,这说明改进的MIMO系统能够在保证不恶化MIMO通信系统的前提下,增加用户数量. 因此,由图6,相对于常规MIMO系统2根天线发射2路用户数据,改进后的优化MIMO系统能够通过加权调节,能够传输3路用户数据,并且保持相对低的误码率,从而可知,优化的MIMO系统在同样的天线规模下能够至少提高50%的数据传输率.

计算机仿真表明,空时虚拟信道可以在不恶化通信系统通信质量的前提下,提高至少50%的数据传输率和频带利用率. 为进一步验证该系统的可靠性与实用性,本文在仿真的基础上,将该系统移植至ZC706+AD9361硬件平台上进行测试.

4 系统硬件平台搭建和测试

在本实验中,选用2个能够实现2×2规模的MIMO通信系统的ZC706+AD9361实验平台,分别作为发射端和接收端. 图2和图3中功能模块通过编程在该硬件平台上实现,图7为2×2MIMO通信系统的

ZC706+AD9361 实验平台.



图 7 ZC706+AD9361 实验平台

图 7 中绿色部分为 ZC706 基带板, 蓝色部分为 AD9361 射频板. AD9361 兼具 2 根发射天线与 2 根接收天线, 因此 ZC706 接收机能够通过 AD9361 的接收天线检测接收信号, 并能够将检测的误码率信息通过发射天线反馈至发射机. 同样, 发射机能够通过发射天线发射信号, 通过接收天线接收反馈信息, 这样构成了一个完整的发射、反馈链路.

实验测试环境为图 8 的微波暗室, 避免多径干扰, 保证了数据测量的稳定性和可靠性.

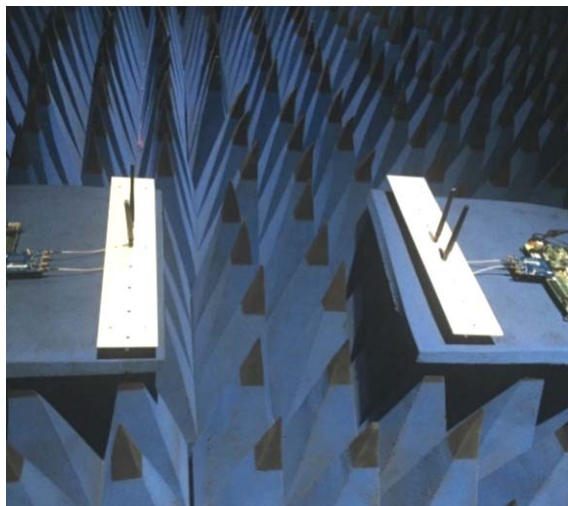


图 8 实验测试环境

在如图 8 中的微波暗室环境测试了常规 MIMO 系统与改进 MIMO 系统的误码率, 实验中每个数据是测

试 20 次的平均值. 表 1 记录了常规 MIMO 系统与改进后的 MIMO 系统传输 2 路用户数据的误码率, 表 2 记录了常规系统传输 2 路用户数据, 改进 MIMO 系统传输 3 路用户数据的误码率.

表 1 相同用户数据传输误码率性能

系统		改进 MIMO 系统	常规 MIMO 系统
误码率	虚拟信道		
$(e^{j5}, 1)$		0.1509	0.0884
$(e^{j15}, 1)$		0.1285	
$(e^{-j15}, 1)$		0.0572	
$(e^{j25}, 1)$		0.0425	
$(e^{j35}, 1)$		0.0442	
$(e^{j40}, 1)$		0.0361	
$(e^{j45}, 1)$		0.0302	
$(e^{j50}, 1)$		0.0446	
$(e^{j35}, 1)$		0.0442	

表 1 中数据的发射端信噪比 SNR=12.42dB, 第一列的的括号中的值为虚拟信道, 其中第一个值数据为第一路数据的虚拟信道参数, 第二个值为第二路数据的虚拟信道参数. 第二列为改进 MIMO 系统的误码率数据, 可以看出, 系统的误码率从 0.15 逐渐降至为 0.04 左右; 第三列的常规系统的误码率等于 0.0884 左右. 因此, 虚拟空时模块能自适应的调整信道参数, 使整个通信系统保持良好的通信质量, 在相同的数据速率情况下, 降低接收信号的误码率.

表 2 不同用户数数据传输误码率性能

系统		改进 MIMO 系统	常规 MIMO 系统
误码率	虚拟信道		
$(1, e^{-j60}, 1)$		0.1720	0.0831
$(1, e^{-j60}, e^{-j5})$		0.1243	
$(1, e^{-j60}, e^{-j10})$		0.0984	
$(1, e^{-j60}, e^{-j15})$		0.0101	
$(1, e^{-j60}, e^{-j20})$		0.1042	
$(1, e^{-j60}, e^{-j25})$		0.0837	
$(1, e^{-j60}, e^{-j35})$		0.0742	
$(1, e^{-j60}, e^{-j40})$		0.0770	

表 2 数据的发射端信噪比 SNR=11.97dB, 第一列的三个数据分别表示第 1,2,3 个用户 的虚拟信道参数, 由第二列数据可知, 改进的 MIMO 系统误码率逐渐减小, 最终稳定在 0.07 附近, 常规 MIMO 系统的误码率

稳定在 0.0831 左右, 在多增加一路数据用户的情况下, 改进 MIMO 系统仍然保持良好的通信质量, 其误码率比常规 MIMO 系统的误码率还低, 实验结果与图 6 仿真结果吻合, 即在 2 根发射天线规模的 MIMO 系统中, 优化的 MIMO 系统相对于常规 MIMO 系统能够多传输一路用户数据, 并且保证相对较低的误码率, 因此该系统有能力更多路用户数据, 在此实验基础上, 提高至少 50% 的数据传输速率和频带利用率。

5 结语

MIMO 技术是现代移动通信系统的关键技术, 该技术能够保持不增加系统带宽和功率的情况下, 提高系统的数据传输率以及频带利用率^[1]。考虑到工程系统的复杂度以及成本问题, 本文对常规 MIMO 系统进行优化, 提出了虚拟空时信道技术, 该技术的原理是通过将多用户数据流通过虚拟空时信道组合发射, 能够根据当前实际信道状态对虚拟空时信道自适应地调整, 保证系统的良好的通信质量。目前仿真和测试的结果表明, 改进后的 MIMO 系统能够实现在不损失误码率性能的前提下, 实现增加 50% 的数据传输率和频带利用率。这对今后的移动通信是十分有利的, 能够节约非常宝贵的频带资源和降低设备成本。目前系统检测算法为 MLD 算法, 在高阶调制与大规模 MIMO 系统中的复杂度较高, 系统接收端的延迟较高, 下个阶段目标为优化检测算法, 采用复杂度更低的球形检测算法, 希望在高阶调制、大规模 MIMO 系统中实现

增加频带利用率一倍以上的目标, 即 MIMO 系统的每根发射天线上传输 2 路以上的用户数据。

参考文献

- 1 肖扬.MIMO 多天线通信系统.北京:人民邮电出版社,2009.
- 2 罗仁泽.OFDM 无线移动通信系统关键技术研究[博士学位论文].成都:电子科技大学,2004.
- 3 毕奇,梁林,杨珊,陈鹏.面向 5G 的非正交多址接入技术.电信科学,2015,31(5):1-8.
- 4 徐晋.非正交多址接入中的若干关键技术研究[博士学位论文].北京:北京邮电大学,2015.
- 5 王世良.MIMO 通信系统接收端检测技术研究[博士学位论文].北京:北京邮电大学,2014.
- 6 李菊芳.下一代移动通信系统中大规模 MIMO 技术研究[硕士学位论文].泉州:华侨大学,2014.
- 7 傅海阳,陈技江,曹士珂,贾向东.MIMO 系统和无线信道容量研究.电子学报,2011,39(10):2221-2229.
- 8 黄丘林.MIMO 无线通信技术研究[博士学位论文].西安:西安电子科技大学,2007.
- 9 马优.MIMO 无线信道建模与仿真研究[硕士学位论文].成都:电子科技大学,2010.
- 10 倪振文,王俊年,徐学军.衰落相关对分布式 MIMO 信道容量的影响.湖南科技大学学报,2006,21(2):29-33.
- 11 梁童.MIMO 移动通信系统中的预编码技术研究[硕士学位论文].北京:北京邮电大学,2009.