

协同信道空时优化 MIMO 无线传输系统

杨贵德* 周渊平 夏文龙
(四川大学电子信息学院 成都 610064)

摘 要: 该文提出一种基于虚拟信道的空时优化多输入多输出(MIMO)无线传输系统。通过在发射端产生不同的空时虚拟信道,与实际空间无线信道级联,构成系统的整体传输信道即协同空分信道。系统可以根据接收端的反馈信息采用模拟退火算法来优化虚拟信道,改善误码率(BER)性能。利用虚拟信道方法,可以使一根 MIMO 发射天线在同一时间、同一频段传输多路叠加合并后的数据信号,从而可以使发射的不同数据信号的总路数超过发射天线的数量,突破了现有 MIMO 系统在同一时间、同一频段最多只能发射与发射天线数量相等的不同数据信号的传统方式,可以显著提高系统的频谱效率。仿真结果和基于 ZC706 和 AD9361 硬件平台的微波暗室实际测试结果充分验证了新 MIMO 系统的有效性。

关键词: MIMO 系统; 虚拟信道; 模拟退火算法; 误码率; 频谱效率

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)01-0102-06

DOI: 10.11999/JEIT170321

Cooperative Channel MIMO Wireless Transmission System with Space-time Optimization

YANG Guide ZHOU Yuanping XIA Wenlong

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: A space-time optimized Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) wireless transmission system based on virtual channel method is proposed. At the transmitter, various space-time virtual channels are generated that are connected with the actual space wireless channels to form the cooperative space division channels. According to the feedback information from the receiver, the Bit Error Rate (BER) can be significantly improved by using the simulated annealing algorithm to optimize the virtual channels. Moreover, by using the virtual channel method, it allows one MIMO antenna to transmit multiple superposed data streams in one frequency band at the same time, therefore it can transmit more number of different data streams than the number of transmit antennas, breaking the conventional way that the number of different data streams to be transmitted is equal to the number of transmit antennas. Thus, the proposed MIMO system can significantly improve the spectral efficiency. Simulation results and experimental test results based on ZC706 and AD9361 hardware platforms in microwave anechoic chamber fully demonstrate the effectiveness of the proposed MIMO system.

Key words: MIMO system; Virtual channel; Simulated annealing algorithm; Bit Error Rate (BER); Spectral efficiency

1 引言

多输入多输出(MIMO)无线传输系统通过在发射端和接收端分别采用多根天线,因而具有空间分集和空间复用两种功能,可以在不增加带宽和发射功率的情况下,显著提高系统的容量、频谱效率和可靠性等,是现代通信技术的一个重要进展,已经

成为第 4 代(4G)移动通信系统的关键技术^[1-3]。

在即将到来的第 5 代(5G)移动通信系统中,各种业务和应用场景层出不穷,比如自动驾驶、超高清视频、虚拟现实(VR)、增强现实(AR)以及物联网(IoT)等,人们对高速数据传输的需求越来越高,为了提高系统的数据传输率,需要更多频谱,然而目前可用的频谱资源已经十分稀缺^[4,5]。因此,为了解决频谱资源短缺的问题,研究如何提高频谱效率具有十分重要的意义。目前在提高频谱效率方面,业界已经进行了许多探索,比较热门的研究技术有非正交多址接入(NOMA)^[6-8]和大规模 MIMO^[9-11]技术。其中, NOMA 技术的基本思想是在发射端通过

收稿日期: 2017-04-12; 改回日期: 2017-08-30; 网络出版: 2017-09-22

*通信作者: 杨贵德 changkongck@163.com

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20130191110006)

Foundation Item: University Doctoral Research Foundation of China (20130191110006)

功率复用算法, 对不同的用户分配不同的信号功率, 采用非正交发送, 在接收端通过串行干扰消除(SIC)算法根据不同大小的功率区分不同的用户, 实现信号的解调^[12-14]。相比正交多址接入(OMA)技术, NOMA 技术虽然可以获得更高的频谱效率, 但是串行干扰消除(SIC)算法会造成处理延时, 使接收机的实现复杂度大幅提升^[15]。而大规模 MIMO 技术的主要特征是部署大量的天线, 是现有 MIMO 技术的扩展。但是现有 MIMO 技术对通信系统性能的提升十分有限, 不仅受制于无线信道的状态, 比如信道相关性, 会造成 MIMO 系统的性能明显下降, 而且在相同的时频资源内, 一个 $M \times M$ 的 MIMO 系统最多只能提高 M 倍数据传输率^[16], 每增加一路数据信号就得至少在发射端和接收端各增加一根天线和相应的元器件, 从而增加了系统的复杂度和硬件成本。总之, 现有 MIMO 技术还有许多方面有待改善。

本文针对现有 MIMO 技术展开研究, 提出一种基于虚拟信道的空时优化 MIMO 无线传输系统, 即协同信道空时优化 MIMO 无线传输系统。该系统可以在发射端通过信道向量模拟的方法, 产生不同的空时虚拟信道, 组成一个虚拟信道向量, 与实际空间无线信道级联, 构成系统的整体传输信道即协同空分信道。这样, 系统的整体传输性能就不再完全依赖于实际的空间无线信道, 而是在很大程度上受控于虚拟信道。因此, 可以通过调整与优化虚拟信道, 来调整实际空间无线信道的相关性, 从而优化协同空分信道的整体特性, 使其最有利于接收端进行信号检测。此外, 利用虚拟信道方法, 可以使一根 MIMO 发射天线在同一时间、同一频段传输多路叠加合并后的数据信号, 从而可以使发射的不同数据信号的总路数超过发射天线的数量, 突破了现有 MIMO 系统在同一时间、同一频段最多只能发射与发射天线数量相等的不同数据信号的传统方式。相比现有 MIMO 系统, 本文提出的新 MIMO 系统在相同的带宽下, 具有更高的传输可靠性、数据传输率和频谱效率。

新 MIMO 系统的关键是找到可以改善实际空间无线信道的相关性, 使系统性能达到最优的虚拟信道向量。为此, 本文采用了具有全局搜索能力的模拟退火优化算法来寻找系统的最优虚拟信道向量。仿真结果充分验证了本文提出的虚拟信道方法和模拟退火优化算法的有效性, 新 MIMO 系统相比现有 MIMO 系统体现出两点优越性: (1)在保持相同数据传输率时, 新 MIMO 系统具有更好的误码率(BER)性能; (2)新 MIMO 系统可以通过一根 MIMO 发射天线在同一时间、同一频段发射 3 路 QPSK 数

据信号, 相比现有 MIMO 系统通过两发射天线发射 2 路 QPSK 数据信号, 不仅可以在节省一根发射天线和相应元器件成本的前提下提高 50%的数据传输率和频谱效率, 还能在信噪比(SNR)大于一定范围时, 获得比现有 MIMO 系统更低的 BER。

2 系统模型

本文提出的协同信道空时优化 MIMO 无线传输系统的基本结构如图 1 所示。系统的发射端主要包括信道向量模拟组合、调制/编码、空时优化算法模块; 接收端主要包括解调、信号检测/解码、信道辨识及系统状态信息模块。系统的核心模块是信道向量模拟组合模块, 它的主要功能是产生空时虚拟信道, 进行空时信号处理, 并根据反馈信息采用空时优化算法模块动态调整和优化空时虚拟信道的性能。

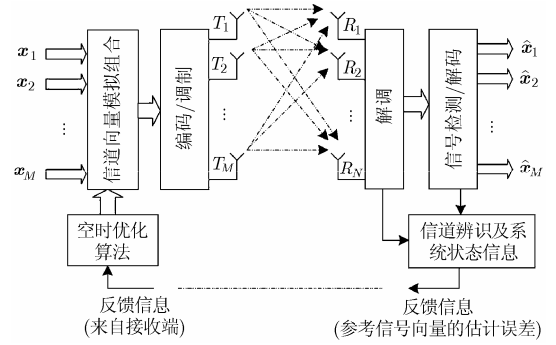


图1 协同信道空时优化 MIMO 无线传输系统的基本结构

在图 1 中, 发射端和接收端分别配置有 M 和 N 根天线。在发射端有 M 个输入信号向量, 每个输入信号向量对应一根发射天线。令 $\mathbf{x}_m = [x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mL_m}]^T$ ($m = 1, 2, \dots, M$) 表示第 m 个输入信号向量, 包括 L_m 路数据信号 x_{ml} ($l = 1, 2, \dots, L_m$)。令 $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1^T \ \mathbf{x}_2^T \ \dots \ \mathbf{x}_M^T]^T$ 表示系统输入信号向量, 包括发射端的 M 个输入信号向量。当系统输入信号向量进入信道向量模拟组合模块后, 它的每一路数据信号 x_{ml} 需要经过一个相对应的虚拟信道 $w_{ml} = A_{ml}e^{j\theta_{ml}}$, 其中 A_{ml} 和 θ_{ml} 分别表示虚拟信道 w_{ml} 的振幅和相位。为了对应发射端的 M 个输入信号向量, 可以用 $\mathbf{w}_m = [w_{m1}, w_{m2}, \dots, w_{mL_m}]^T$ 表示第 m 个虚拟信道向量, 用 $\mathbf{w} = [\mathbf{w}_1^T \ \mathbf{w}_2^T \ \dots \ \mathbf{w}_M^T]^T$ 表示系统的虚拟信道向量。输入信号向量 $\mathbf{x}_m$ 经过对应的虚拟信道向量 $\mathbf{w}_m$ 后, 送至编码/调制模块进行叠加合并, 再进行射频调制后从第 m 根天线发射出去。所以, 第 m 根天线发射的信号可以表示为

$$s_m = w_{m1}^* x_{m1} + w_{m2}^* x_{m2} + \cdots + w_{mL_m}^* x_{mL_m} \\ = \sum_{l=1}^{L_m} w_{ml}^* x_{ml} \quad (1)$$

在接收端, 收到的信号可以表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{H}$ 是 $M \times N$ 的实际空间无线信道矩阵, $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \cdots, s_M]^T$ 表示经过处理后从 M 根天线发射的 $M \times 1$ 信号向量, $\mathbf{n} = [n_1, n_2, \cdots, n_N]^T$ 是 $N \times 1$ 的加性高斯白噪声向量, 其每个元素是独立同分布的, 且均值为 0, 方差为 σ^2 , $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \cdots, y_N]^T$ 是 $N \times 1$ 的接收信号向量。

由于利用虚拟信道方法, 每一根 MIMO 发射天线可以在同一时间、同一频段发射 L_m 路不同的数据信号 x_{ml} , M 根 MIMO 发射天线一共可以发射 $\sum_{m=1}^M L_m$ 路不同的数据信号, 突破了现有 MIMO 系统在同一时间、同一频段最多只能发射与发射天线数量相等的不同数据信号的传统方式。很明显相比现有 MIMO 系统, 本文提出的新 MIMO 系统在相同的带宽下, 具有更高的数据传输率和频谱效率。但是由于发射的数据信号路数大于了发射天线数量, 即 $\sum_{m=1}^M L_m > M$, 传统的线性检测算法比如最大比合并(MRC)、迫零(ZF)、最小均方误差(MMSE)等算法不能有效地将发射信号检测出来, 因此, 信号检测/解码模块将采用最大似然检测(ML)算法进行信号检测。

为了找到全局最优虚拟信道向量, 新 MIMO 系统通过在发射端发射参考信号向量 $\mathbf{x}_R$, 在接收端采用 ML 检测算法估计出参考信号向量 $\hat{\mathbf{x}}_R$, 并计算出参考信号向量的误差 $E[\|\mathbf{x}_R - \hat{\mathbf{x}}_R\|^2]$ 作为反馈信息反馈到发射端, 然后发射端根据反馈信息, 采用空时优化算法模块来调整与优化虚拟信道向量的性能, 这样经过多次反馈与优化的循环操作找到全局最优虚拟信道向量, 使其最有利于接收端进行信号检测, 从而使估计的参考信号向量的误差达到最小。本文采用的优化算法是模拟退火算法, 用来搜索全局最优虚拟信道向量。

3 模拟退火算法

模拟退火算法是简单实用的随机搜索算法, 具有很好的全局搜索能力, 能避免陷入局部最优, 通过模拟固体物质退火过程中温度降低时固体状态的变化, 来搜索目标函数的最优值^[17]。它的基本思想最早是由 Metropolis 等人提出的, 其出发点是物理中固体物质的退火过程与一般组合优化问题之间具

有相似性, 因此, 很适合用来解决组合优化问题。模拟退火算法是一种很通用的全局优化算法, 目前已经在各个工程领域得到了广泛的应用^[18]。下面将介绍采用模拟退火算法搜索全局最优虚拟信道向量的过程。

由于接收端采用的是 ML 检测, 所以, 发射端发射的参考信号向量 $\mathbf{x}_R$ 被估计为

$$\hat{\mathbf{x}}_R = \arg \min_{\mathbf{x}_R \in C^{\sum_{m=1}^M L_m}} \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{s}\|^2 \quad (3)$$

其中, C 表示信号的星座集, $\sum_{m=1}^M L_m$ 表示发射的数据信号总路数, $\mathbf{x}_R \in C^{\sum_{m=1}^M L_m}$ 表示发射端发射的参考信号向量 $\mathbf{x}_R$ 一共有 $C^{\sum_{m=1}^M L_m}$ 种组合。很明显, 从式(1)和式(3)可以看出 $\hat{\mathbf{x}}_R$ 估计的精确性受到虚拟信道向量 $\mathbf{w}$ 的影响。

新 MIMO 系统中将参考信号向量的估计误差作为反馈信息反馈到发射端, 因此, 可以用参考信号向量的估计误差来定义模拟退火算法的目标函数, 即

$$f(\mathbf{w}) = E[\|\mathbf{x}_R - \hat{\mathbf{x}}_R\|^2] \quad (4)$$

在发射端根据反馈的参考信号向量的估计误差, 即目标函数值, 来调整和优化系统虚拟信道向量 $\mathbf{w}$, 使目标函数值达到最小, 从而找到全局最优虚拟信道向量 $\mathbf{w}_{\text{opt}}$ 。

模拟退火算法实现步骤:

(1) 设置内循环的初始迭代次数为 $k = 0$, 最大迭代次数为 K ; 外循环的初始迭代次数为 $i = 0$ 。令 $T = T_0$, T_0 是一个较高的初始温度。并随机选择一个初始解 $\mathbf{w}^k$, 然后计算目标函数值 $f(\mathbf{w}^k)$;

(2) 根据新解产生器 $\mathbf{w}^{k+1} = \mathbf{w}^k + e\beta$, 由初始解 $\mathbf{w}^k$ 通过随机扰动产生一个新解 $\mathbf{w}^{k+1}$, 并计算目标函数值 $f(\mathbf{w}^{k+1})$ 。其中 e 表示随机扰动, 服从 Cauchy 分布, β 是与初始值及取值范围有关的步长值;

(3) 计算 $\Delta f = f(\mathbf{w}^{k+1}) - f(\mathbf{w}^k)$;

(4) 如果 $\Delta f < 0$, 则接受新解 $\mathbf{w}^{k+1}$; 否则给出一个服从均匀分布 0 到 1 之间的随机数 r , 如果 $\exp\left[\frac{-f(\mathbf{w}^{k+1})}{T}\right] > r$, 则接受新解 $\mathbf{w}^{k+1}$;

(5) 在 T 温度下, 重复一定次数的扰动和新解接受过程, 即令 $k = k + 1$, 如果 $k < K$, 则返回第(2)步;

(6) 令 $k = 0, i = i + 1$, 根据降温公式 $T = \alpha T$ 降温, 其中 α 在 0.50~0.99 之间取值;

(7) 检验退火过程是否满足终止条件, 如果满

足,则以当前解为全局最优解输出,即 $\mathbf{w}_{\text{opt}} = \mathbf{w}^{k+1}$; 否则,返回第(2)步。

从上述步骤可以看出,模拟退火算法包括两个循环,一个内循环和一个外循环。内循环实际上是一个 Metropolis 过程,是在某个温度下寻找最优解,理论上需要经过无数次迭代才能稳定,实际上 K 选择一个有限值;外循环按照一定的退火方案逐渐降低温度,重复 Metropolis 过程,要求 T 趋于 0 时终止,实际上 T 选择一个接近 0 的值,或者当找到全局最优解时,停止迭代。

4 仿真结果与分析

为了更清楚地展示本文提出的新 MIMO 系统在传输可靠性、数据传输率及频谱效率方面的优越性能,本节对新 MIMO 系统和现有的 MIMO 系统进行了仿真比较。假设信道模型为静态信道,仿真中采用了 QPSK 和 16QAM 两种调制方式。模拟退火算法的初始温度设置为 $T_0 = 30$,内循环最大迭代次数为 $K = 30$,温度冷却系数为 $\alpha = 0.96$ 。

图 2 比较的是在 2 发 2 收条件下,新 MIMO 系统与现有 MIMO 系统发射 2 路 QPSK 数据流和 2 路 16QAM 数据流的 BER 性能。从图中可以看出,不论是采用 QPSK 调制,还是采用 16QAM 调制,新 MIMO 系统的 BER 性能都要远远优于现有 MIMO 系统。尤其是在 $\text{BER} = 10^{-3}$ 处,当采用 QPSK 调制时,新 MIMO 系统相比于现有 MIMO 系统可以获得约 8 dB 的 SNR 增益;当采用 16QAM 调制时,新 MIMO 系统相比于现有 MIMO 系统可以获得约 7.2 dB 的 SNR 增益。该实验充分证明了在相同的收发天线数目,相同的调制方式和发射相

同路数的数据流情况下,即在数据传输率相同的条件下,相比现有 MIMO 系统,新 MIMO 系统可以通过调整和优化空时虚拟信道,来改善实际空间无线信道的相关性,从而优化协同空分信道的整体特性,在相同的 BER 条件下,获得更高的 SNR 增益。

图 3 展示了 1 发 2 收 2 路 QPSK 数据流和 3 路 QPSK 数据流的新 MIMO 系统与 2 发 2 收 2 路 QPSK 数据流的现有 MIMO 系统的 BER 性能。从图中可以看出,1 发 2 收 2 路 QPSK 数据流的新 MIMO 系统在数据传输率与现有 MIMO 系统一样的情况下,不仅可以节约一根发射天线及相应元器件成本,而且在相同 SNR 条件下,其 BER 还远远低于现有 MIMO 系统。在 $\text{BER} = 10^{-3}$ 的时候,新 MIMO 系统相比现有 MIMO 系统可以获得约 9.5 dB 的 SNR 增益,这就为新 MIMO 系统进一步增加发射的数据流路数,提高数据传输率,提供了有利的条件。因此,当 1 发 2 收的新 MIMO 系统发射 3 路 QPSK 数据流时,相比现有 MIMO 系统,其可以在节约一根发射天线及相应元器件成本的同时使数据传输率提高了 50%,不仅如此,由图可知,在 SNR 大于 8 dB 的时候,其 BER 仍然明显低于现有 MIMO 系统。

图 4 给出在 2 发 2 收 2 路 QPSK 数据流的新 MIMO 系统中,在 $\text{SNR} = 9$ dB 时,采用内循环次数分别为 $K = 10$, $K = 20$ 和 $K = 30$ 的模拟退火算法的收敛特性。由图可以看出,当 $K = 10$ 时,模拟退火算法的收敛速度较慢,大约要迭代 80 次才能收敛,即才能找到最优解;当 $K = 20$ 时,大约迭代 15 次就能收敛;而当 $K = 30$ 时,收敛速度较快,只需迭代约 3 次就收敛。由此可以得出结论,内循环次数的设置对模拟退火算法的收敛速度具有明显的影

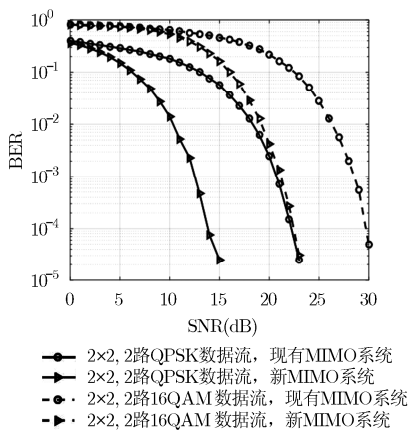


图 2 在 2 发 2 收条件下,现有 MIMO 系统与新 MIMO 系统发射 2 路 QPSK 数据流和 2 路 16QAM 数据流的 BER 性能比较

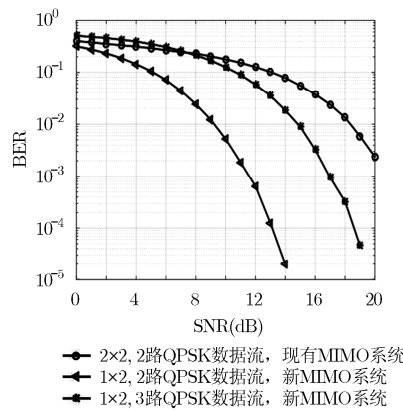


图 3 1 发 2 收 2 路 QPSK 数据流和 3 路 QPSK 数据流的新 MIMO 系统和 2 发 2 收 2 路 QPSK 数据流的现有 MIMO 系统的 BER 性能比较

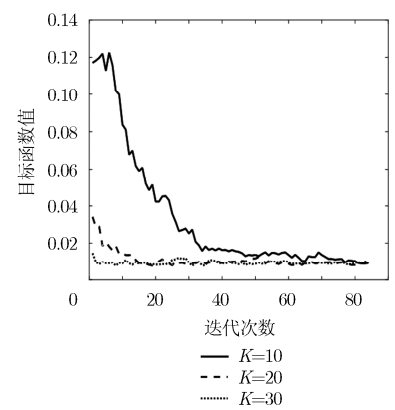


图 4 2 发 2 收 2 路 QPSK 数据流的新 MIMO 系统中,采用不同内循环次数的模拟退火算法的收敛特性

响,无论内循环次数设置的大还是小,模拟退火算法最终都能收敛,即该算法的收敛性在动态条件下具有较好的鲁棒稳定性。但是,内循环次数也不宜设置得太大或者太小,太大了虽然收敛速度快但计算复杂度高,太小了虽然计算复杂度低但收敛速度慢。因此,只有设置合理的内循环次数,才能在计算复杂度和收敛速度方面寻求一个更好的折中,从而更快地找到全局最优解。所以,根据图 4 展示的模拟退火算法的收敛特性,在图 2,图 3 的仿真中,我们采用了内循环次数为 $K = 30$ 的模拟退火算法来为新 MIMO 系统搜索全局最优虚拟信道向量。

5 基于 ZC706 和 AD9361 硬件平台的实验测试

为了验证本文提出的新 MIMO 系统在理论分析和仿真中具有优越性能,搭建了基于 ZC706 和 AD9361 硬件平台的 MIMO 系统进行了实际测试和验证。其中 ZC706 是 Xilinx 公司开发的一款面向高端应用的 Zynq-7000 系列全可编程基带开发板,采用的是 ARM+FPGA 的体系结构。将 ARM 和 FPGA 结合在一起,不仅能运行基于 Linux 等操作系统,而且还可以通过可扩展外设 FMC 插槽支持 AD9361 等射频收发器,具有软件定义无线电设计功能。而 AD9361 是 ADI 公司开发的一款面向 3G 和 4G 基站应用的高性能、高集成度的射频捷变收发器,具有 2 个独立的发射通道和 2 个独立的接收通道,支持 2 发 2 收的 MIMO。

因此,本文采用 ZC706 和 AD9361 开发板搭建了 MIMO 无线通信系统硬件平台,并且为了避免多径干扰,保证测试数据的稳定性和有效性,将实验环境选择在微波暗室,如图 5。目前,在相同的条件和条件下,通过实际测试得到了 5 组包括新 MIMO 系统和现有 MIMO 系统的测试数据结果,如表 1 所示。从表 1 中的测试数据可以看出,相比 2 发 2 收 2 路 QPSK(或 16QAM)数据流的现有 MIMO 系统,在相同数据传输率和传输带宽的条件下,2 发 2 收 2 路 QPSK(或 16QAM)数据流的新 MIMO 系统具有更低的 BER。此外,1 发 2 收 2 路 QPSK 数据流的新 MIMO 系统,在仅使用一根发射天线的条件下,就可以获得同 2 发 2 收 2 路 QPSK 数据流的现有 MIMO 系统相同的数据传输率和更低的 BER。充分验证了本文提出的观点,即利用虚拟信道优化的方法,不仅可以改善系统的 BER 性能,还可以允许一根 MIMO 天线发射多路叠加合并后的数据信号,使发射的不同数据信号的总数量超过发射天线的数量。因此,实际测试的数据结果与本文的理论分析和仿真结果相符合。当然,这只是目前

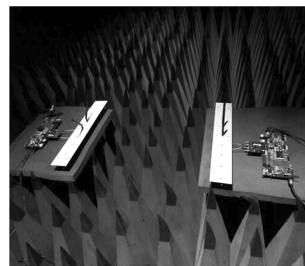


图 5 实验测试环境(微波暗室)

表 1 新 MIMO 系统和现有 MIMO 系统的测试数据结果展示

实验对象	误码率 (BER)	数据传输 率(Mbps)	传输带宽 (MHz)
2 发 2 收 2 路 QPSK 数据流的现有 MIMO 系统	0.0451	15.3600	3.8400
2 发 2 收 2 路 QPSK 数据流的新 MIMO 系统	0.0062	15.3600	3.8400
1 发 2 收 2 路 QPSK 数据流的新 MIMO 系统	0.0290	15.3600	3.8400
2 发 2 收 2 路 16QAM 数据流的现有 MIMO 系统	0.1920	30.7200	3.8400
2 发 2 收 2 路 16QAM 数据流的新 MIMO 系统	0.0680	30.7200	3.8400

的一些实测结果,接下来我们将对 2 发 2 收 3 路 QPSK 数据流、4 路 QPSK 数据流以及 4 发 4 收 MIMO 系统等进行测试。

6 结束语

本文提出了一种基于虚拟信道的空时优化 MIMO 无线传输系统,利用虚拟信道方法,可以使一根 MIMO 发射天线在同一时间、同一频段传输多路叠加合并后的数据信号,从而可以使发射的不同数据信号的总路数超过发射天线的数量,突破了现有 MIMO 系统在同一时间、同一频段最多只能发射与发射天线数量相等的不同数据信号的传统方式,可以显著提高系统的频谱效率。此外,可以通过优化虚拟信道,改善系统的 BER 性能。仿真结果显示,相比现有 MIMO 系统,本文提出的新 MIMO 系统在相同的带宽下,不仅能显著地降低系统的 BER,还能在节约一根发射天线及相应元器件成本的前提下,提高 50% 的数据传输率和频谱效率。采用基于 ZC706 和 AD9361 开发板搭建了 MIMO 无线通信系统硬件平台在微波暗室进行测试,得到了较好的测试结果,也充分验证了新 MIMO 系统的有效性。因此,具有十分重要的研究意义,今后将对接收端检测算法复杂度降低和发射端的虚拟信道设计与优化方面展开进一步的理论研究和实际验证测试,争取进一步提高系统的频谱效率。

参考文献

- [1] ZHANG Q, JIN S, MCKAY M, *et al.* Power allocation schemes for multicell massive MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(11): 5941–5955. doi: 10.1109/TWC.2015.2444856.
 - [2] HONG X M, WANG C X, THOMPSON J, *et al.* On space-frequency correlation of UWB MIMO channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(9): 4201–4213. doi: 10.1109/TVT.2010.2075947.
 - [3] LIU Y, AI B, and CHEN B H. Impact of mutual coupling on LTE-R MIMO capacity for antenna array configurations in high speed railway scenario[C]. *IEEE Vehicular Technology Conference*, Nanjing, China, 2016: 1–5.
 - [4] NTT DOCOMO, Inc. 5G radio access: Requirement, concept and techniques[R]. 5G White Paper, Tokyo, Japan, 2014.
 - [5] RIMAL B P, VAN D P, and MAIER M. Mobile edge computing empowered fiber-wireless access networks in the 5G era[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(2): 192–200. doi: 10.1109/MCOM.2017.1600156CM.
 - [6] AL-ABBASI Z Q and SO D K C. Power allocation for sum rate maximization in non-orthogonal multiple access system [C]. *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Hong Kong, 2015: 1649–1653.
 - [7] DO N T, COSTA D B D, DUONG T Q, *et al.* A BNBF user selection scheme for NOMA-based cooperative relaying systems with SWIPT[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(3): 664–667. doi: 10.1109/LCOMM.2016.2631606.
 - [8] DING Z G, DAI H Y, and POOR H V. Relay selection for cooperative NOMA[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(4): 416–419. doi: 10.1109/LWC.2016.2574709.
 - [9] ALWAKEEL A S, MEHANA A H, and GHONEIM A. Pilot hopping in massive MIMO systems with MMSE channel estimation[C]. *International Conference on Computing, Networking and Communications*, Silicon Valley, CA, USA, 2017: 298–302.
 - [10] UPADHYA K, VOROBYOV S A, and VEHKAPERA M. Superimposed pilots are superior for mitigating pilot contamination in massive MIMO[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(11): 2917–2932. doi: 10.1109/TSP.2017.2675859.
 - [11] SONG N, YANG T, and SUN H. Overlapped subarray based hybrid beamforming for millimeter wave multiuser massive MIMO[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2017, 24(5): 550–554. doi: 10.1109/LSP.2017.2681689.
 - [12] SUN Q, HAN S F, PAN Z G, *et al.* On the ergodic capacity of MIMO NOMA systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2015, 4(4): 405–408. doi: 10.1109/LWC.2015.2426709.
 - [13] SUN R J, WANG Y, WANG X S, *et al.* Transceiver design for cooperative nonorthogonal multiple access systems with wireless energy transfer[J]. *IET Communications*, 2016, 10(15): 1947–1955. doi: 10.1049/iet-com.2016.0120.
 - [14] DIAMANYOULAKIS P D, PAPPI K N, DING Z G, *et al.* Wireless-powered communications with non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(12): 8422–8436. doi: 10.1109/TWC.2016.2614937.
 - [15] SHIEH S L, LIN C H, HUANG Y C, *et al.* On gray labeling for downlink non-orthogonal multiple access without SIC[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(9): 1721–1724. doi: 10.1109/LCOMM.2016.2584040.
 - [16] WINTERS J H. On the capacity of radio communication systems with diversity in a rayleigh fading environment[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1987, SAC-5(5): 871–878. doi: 10.1109/JSAC.1987.1146600.
 - [17] 王青, 肖怀铁, 张安. 基于模拟退火算法的 MIMO 雷达稀疏线阵设计[J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(8S): 272–276.
WANG Q, XIAO H T, and ZHANG A. MIMO radar sparse linear array design based on simulated annealing algorithm [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(8S): 272–276.
 - [18] 田景文, 高美娟. 人工神经网络算法研究及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 182–190.
- 杨贵德: 男, 1990 年生, 博士生, 研究方向为无线通信空时域信号处理.
- 周渊平: 男, 1955 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信系统、空时域信号处理.
- 夏文龙: 男, 1976 年生, 博士, 讲师, 研究方向为无线通信系统、空时域信号处理.