



基于空间光调制器的MIMO大气传输特性研究

刘哲绮 王天枢 郑崇辉 刘显著

MIMO atmospheric transmission characteristics based on spatial light modulator

LIU Zheqi, WANG Tianshu, ZHENG Chonghui, LIU Xianzhu

引用本文:

刘哲绮,王天枢,郑崇辉,等.基于空间光调制器的MIMO大气传输特性研究[J].*应用光学*,2022,43(3):544-550. DOI: 10.5768/JAO202243.0308001

LIU Zheqi, WANG Tianshu, ZHENG Chonghui, et al. MIMO atmospheric transmission characteristics based on spatial light modulator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(3): 544-550. DOI: 10.5768/JAO202243.0308001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0308001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

采用QPSK调制的50 Gbit/s高速大气激光通信传输特性研究

Transmission performance of 50 Gbit/s high-speed laser communications with QPSK modulation

应用光学. 2018, 39(5): 757-761 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0507001>

基于密集波分复用的20 Gbit/s大气激光通信

20 Gbit/s atmospheric laser communication based on dense wavelength division multiplexing

应用光学. 2017, 38(1): 136-139 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0107004>

Y波导调制器残余强度调制研究

Residual intensity modulation of Y-waveguide modulator

应用光学. 2017, 38(6): 974-978 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0605002>

自由空间宽谱部分相干光通信系统

Free space optical communication system based on wide-spectrum partially coherent laser

应用光学. 2019, 40(1): 157-161 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0108001>

基于FPGA的PPM调制可见光图像传输系统

FPGA-based PPM modulated visible light image transmission system

应用光学. 2019, 40(1): 162-166 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0108002>

基于H-PPM的可见光通信系统RS编码性能分析

RS code performance analysis of visible light communication system based on H-PPM

应用光学. 2017, 38(5): 751-757 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0502002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2022) 03-0544-07

基于空间光调制器的 MIMO 大气传输特性研究

刘哲绮^{1,2}, 王天枢^{1,2}, 郑崇辉^{1,2}, 刘显著¹

(1. 长春理工大学 空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学 光电
工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 大气湍流对无线光通信系统的影响不可忽视, 为了更准确地反映实验室模拟多输入、多输出 (MIMO) 大气湍流信道的实际特征, 提出了一种利用相位屏来模拟 MIMO 大气湍流信道的方法, 并针对基于液晶空间光调制器 (LC-SLM) 的液晶调制法展开研究, 通过实验验证该方法的可行性。实验结果表明: 通过相位屏模拟 MIMO 大气湍流信道的激光光斑发生不同程度的畸变, 湍流环境下两路激光发射系统比单路发射激光系统功率稳定性好, 在前向纠错误差极限 (3.8×10^{-3}) 下, 单个发射单个接收系统的链路代价为 10.5 dB, 2 个发射 2 个接收的 MIMO 系统的链路代价为 9.3 dB。该项研究对于实验室模拟 MIMO 大气湍流信道实验方法提供一种新思路。

关键词: 无线光通信; 多输入多输出; 模拟大气湍流; 液晶调制法

中图分类号: TN929.12

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202243.0308001](https://doi.org/10.5768/JAO202243.0308001)

MIMO atmospheric transmission characteristics based on spatial light modulator

LIU Zheqi^{1,2}, WANG Tianshu^{1,2}, ZHENG Chonghui^{1,2}, LIU Xianzhu¹

(1. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun
University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. School of Opto-electronic Engineering,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The influence of atmospheric turbulence on wireless optical communication systems cannot be ignored. In order to accurately reflect the actual features of laboratory-simulated multiple-input multiple-output (MIMO) atmospheric turbulence channels, a method using phase screens to simulate MIMO atmospheric turbulence channels was proposed. The liquid crystal modulation method based on liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM) was studied, and the feasibility of the method was verified by experiments. The experimental results show that the laser spot of MIMO atmospheric turbulence channels simulated by phase screen has different degrees of distortion. In the turbulent environment, the power stability of the two-channel laser emission system is better than that of the single-channel laser emission system. Under the forward error correction error limit (3.8×10^{-3}), the link penalty of the single-emission single-receiving system is 10.5 dB, and the link penalty of the two-emission two-receiving MIMO system is 9.3 dB. This research provides a new idea for the experimental method of simulating MIMO atmospheric turbulent channels in laboratory.

Key words: wireless optical communication; multiple-input multiple-output; simulation of atmospheric turbulence; liquid crystal modulation method

收稿日期: 2021-12-24; 修回日期: 2022-02-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (62105042)

作者简介: 刘哲绮 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事无线光通信技术方面的研究。E-mail: 2019100179@mails.cust.edu.cn

通信作者: 王天枢 (1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事无线光通信技术、超快光纤激光器及应用、光纤传感技术等方面的研究。E-mail: wangts@cust.edu.cn

引言

21世纪全球数据量爆炸式增长,更多的用户和更高的通信速率的需求对传统射频无线通信提出了新挑战。自由空间光通信(FSO)与射频无线通信方式相比有很多优势,其载波频率高、相干性好、传输容量大、保密性好、抗电磁波干扰、组网灵活方便、无需频谱占用申请^[1]。FSO 将成熟的射频通信技术与光学技术相结合,将载波从射频频段替换为光波,虽然在很多领域已经实现高速通信,但仍然面临着诸多挑战。在大气信道中传输时大气湍流效应会使通信系统性能受到严重影响,光束在传播过程中存在扩展现象,瞬时中心随机漂移导致光强闪烁,大气中的众多粒子引起光信号散射和衰减等^[2]。针对以上问题,主要技术手段有自适应光学、信道编码、部分相干光和空间分集等^[3]。其中 MIMO 通信系统的分集增益可以抑制信道衰落,既能成倍地提高传输速率,还能降低系统的误码率。在不增加发射功率情况下,提高系统的可靠性,是一种应对大气湍流效应的有效途径。液晶空间光调制器具有分辨率高、可编程、体积小、操作灵活、不需要机械运动等优点,经常被实验室用于仿真大气湍流^[4]。因此利用 LC-SLM 模拟无线光 MIMO 大气湍流通信系统,对于实验室研究大气湍流效应有重要意义。

基于 LC-SLM 的液晶调制法模拟大气湍流需要相位屏,国内外研究人员在相位屏生成及补偿上做了很多工作。1976年美国加州大学的 J. A. Fleck 首次提出“多相位屏法”来研究自由空间中的大气湍流对光束的影响,开启了利用相位屏模拟大气湍流研究的序幕^[5]。目前应用最多的相位屏生成方法有功率谱反演法和 Zernike 多项式法^[4]。功率谱反演法是 1967 年由 Mcglamery 提出的,该方法一提出就被广泛应用于数值仿真模拟大气湍流,但存在低频成分不足的缺点^[6]。1992 年英国帝国理工学院的 R. G. Lane 提出应用次谐波的方式补偿功率谱反演法低频成分的不足^[7],但是次谐波法生成的相位屏还存在高频分量不足的问题,后来将缺少低频成分的相位屏和次谐波法生成的相位屏叠加使用来补偿低频分量^[8]。2007 年意大利帕多瓦大学的 Beghi 提出了基于随机实现理论的大气湍流相位屏模拟方法,该方法可以提高重建结构函数的准确性^[9]。2008 年 Burger L 利用纯相位空间光调制器模拟大气湍流,以 Kolmogorov 湍流为例,描述了单相位屏对激光光束远场强度分布的影响^[10]。2014 年美国罗彻斯特大学光学研

究所利用空间光调制器模拟了 1 km 的厚湍流轨道角动量传输链路,分析了不同湍流强度下的信道串扰量及信道容量^[11]。2019 年北京邮电大学基于不等间距相位屏对地-星激光传输进行数值模拟,实现了不同湍流条件下不同天顶角下光传输的仿真计算^[12]。已有的液晶调制法模拟大气湍流多为单个发射单个接收系统,但还没有文献报导其模拟 MIMO 信道的研究。

本文提出了一种利用相位屏来模拟 MIMO 大气湍流信道的方法,针对液晶调制法模拟连续的大气湍流,对无线光 MIMO 的大气传输特性展开了研究,详细分析了经过大气湍流信道光束的指向偏差、功率抖动和闪烁因子等指标,最后给出无线光 MIMO 通信实验的误码率。

1 大气湍流相位屏生成方法

相位屏的生成方式主要有 2 种,分别是基于快速傅里叶变换的功率谱反演法和 Zernike 多项式法。Zernike 多项式的展开形式目前只应用于大气湍流 Kolmogorov 谱,其他湍流模型还未见涉及,而基于快速傅里叶变换的相位屏生成方法因其快速的计算优势,成为了湍流相位屏模拟的首选方法^[13]。功率谱反演法常用的折射率功率谱模型有 Kolmogorov 模型、Von Karman 模型、Tatarskii 模型等。Kolmogorov 模型适用于描述惯性区间内的大气折射率的功率谱密度,不能很好地反映超出惯性区间范围的大气折射率的变化。Von Karman 模型、Tatarskii 模型通过引入不同的内尺度和外尺度因子来提高理论和实验测量的一致性,比 Kolmogorov 模型更实用。本文采用一种改进的 Von Karman 模型^[14]:

$$\Phi_n^{mvk}(k) = 0.033C_n^2 \frac{\exp(-k^2/k_m^2)}{(k^2 + k_0^2)^{11/6}} \quad (0 \ll k \ll \infty) \quad (1)$$

式中: Φ_n^{mvk} 功率谱密度; C_n^2 为大气折射率结构常数; $k_m = 5.92/l_0$; $k_0 = 2\pi/L_0$; L_0 为湍流外尺度; l_0 为湍流内尺度。

因为基于功率谱反演法生成的相位屏缺少低频部分,所以采用三阶次谐波进行补偿。利用次谐波法生成的富含低频成分的相位屏是由多个不同相位屏加和得来的,其功率谱表达式为

$$\Phi_{LF}(x, y) = \sum_{P=1}^{N_p} \sum_{n=-1}^1 \sum_{m=-1}^1 C_{n,m} \exp[i2\pi(f_{x_n}x + f_{y_m}y)] \quad (2)$$

式中: N_p 代表补偿的阶数; P 是补偿阶数变量; n

和 m 是不同网格点对应的离散频率; $C_{n,m}$ 为傅里叶级数系数是频域内服从正态分布的二维复随机矩阵; f_{x_n} 、 f_{y_m} 为 x 和 y 方向的离散空间频率。当每个 P 值对应的频率网格间隔满足 $\Delta f_p = 1/(3^p L)$ 时, 频率网格间隔就是傅里叶变换屏网格间隔的分谐波。

2 大气湍流模拟实验

2.1 MIMO 大气湍流模拟实验装置

图 1 为相位屏模拟多输入、多输出大气湍流信道实验结构图。系统由光源部分、模拟大气湍流部分和探测部分组成。其中光源部分是由 2 个分布式反馈激光器(DFB, KONQUER KG-DFB-1550)组成, 输出波长为 1 550 nm, 功率为 7 dBm。输出光经过可调衰减器衰减到 LC-SLM 可接收功率阈值内后由准直器发射, 出射的光束先经过一个偏振片, 其主要作用是调整偏振方向, 使入射光束的偏振方向与 LC-SLM 所能调制的偏振方向相同。模拟大气湍流部分是由 2 个 LC-SLM 组成, 该设备是滨松公司生产的 X13138 型号反射型电寻址 LC-SLM, 其分辨率为 1272×1024 像素, 像素大小为 $12.5 \mu\text{m}$, 每个像素对应的相位均可以独立地在 $0 \sim 2\pi$ 区间变化, LC-SLM 头部模块的有效窗口大小 $15.9 \text{ mm} \times 12.8 \text{ mm}$, 窗口像素填充因子 96%。探测部分由红外相机和电脑组成, 红外相机是 Xencis 公司生产的 Xeva-1.7-320 型号红外 CCD 相机, 光谱范围为 $0.9 \mu\text{m} \sim 1.7 \mu\text{m}$, 该相机的分辨率为 320×256 像素, 每个像素尺寸为 $30 \mu\text{m}$, 帧速 350 帧/s。

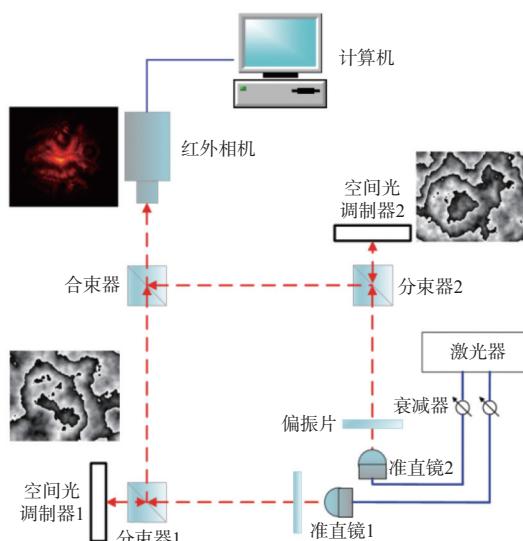


图 1 多输入多输出大气湍流信道实验结构

Fig. 1 Experimental structure of multiple-input multiple-output atmospheric turbulence channel

激光器发射 1 550 nm 波段的激光, 经准直镜 1 得到准直光束, 再经偏振片调整偏振态, 透射通过分束器 1 后在 LC-SLM 窗口上进行相位调制, 调制后的光反射回分束器 1 中, 此时光束的方向发生 90°的偏转, 入射到合束器中, 由准直镜 2 发射的另一路激光以相同的方式入射到另一个 LC-SLM 的窗口, 最后由合束器进行合束, 整个光路呈正方形分布。

2.2 MIMO 大气湍流模拟实验结果分析

本实验所生成的相位屏边长为 $D=1 \text{ m}$, 网格点数共有 2836×2836 , 湍流外尺度为 $L_0=10 \text{ m}$, 湍流内尺度为 $l_0=0.01 \text{ m}$ 。选取了由弱到强 3 个不同的大气折射率结构函数 $C_n^2=1.2 \times 10^{-16}$ 、 $C_n^2=5.8 \times 10^{-15}$ 和 $C_n^2=6.0 \times 10^{-14}$ 。平面波大气相干长度表达式^[15]为

$$r_0 = \left[0.423 k^2 \int_0^L C_n^2(z) dz \right]^{-3/5} \quad (3)$$

式中: $k=2\pi/\lambda$, $\lambda=1550 \text{ nm}$; L 为模拟传输距离 1 km。利用(2)式可以得出 3 个由弱到强不同的大气相干长度值 $r_0=1.115 \text{ m}$ 、 $r_0=0.1088 \text{ m}$ 和 $r_0=0.0268 \text{ m}$ 。功率谱反演法得到的相位屏如图 2 所示。

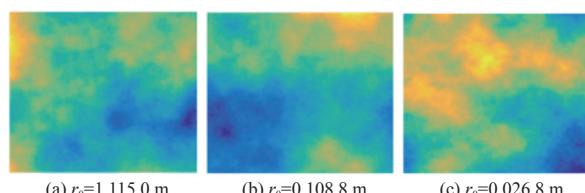


图 2 基于功率谱反演法生成的相位屏

Fig. 2 Phase screen generated based on power spectrum inversion method

实验所用的 LC-SLM 不能直接加载原始相位屏, 所以需要进行归一化处理, 且本实验所用的 LC-SLM 的分辨率为 1272×1024 像素, 不能直接加载整张母相位屏, 所以需要在生成的原始相位屏中截取适用于 LC-SLM 窗口大小的子相位屏。在同一原始相位屏以往复状轨迹截取的方式来模拟连续的动态大气湍流, 归一化往复式截取示意图如图 3(a)~(c) 所示。

在大气相干长度值 $r_0=1.115 \text{ m}$ 、 $r_0=0.1088 \text{ m}$ 和 $r_0=0.0268 \text{ m}$ 三张母相位屏上分别截取 1000 张子相位屏, 子相位屏的尺寸为 1272×1024 , 然后将其加载到 LC-SLM 中, 以 20 帧/s 速度顺序播放, 这样就能模拟连续的大气湍流。归一化截取后的相位图如图 3(d)~(f) 所示。

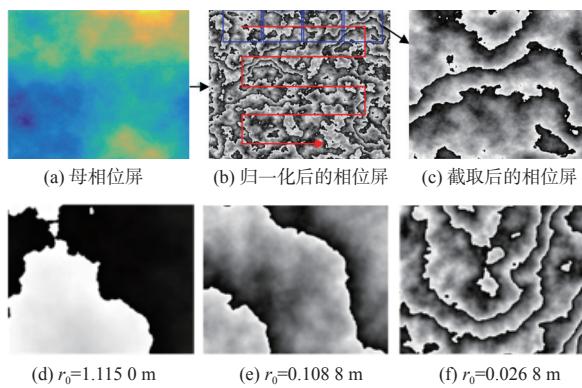


图 3 归一化往复式截取示意图及截取后的相位屏

Fig. 3 Schematic diagram of normalized reciprocating interception and intercepted phase screen

在湍流模拟实验中,对比研究了单路激光发射和两路激光发射经过模拟大气湍流信道的传输特性。仿真的传输距离为 1 km,用红外相机拍摄到不同湍流强度下的高斯光束强度分布如图 4(a)~(d)所示,分别对应无湍流、 $r_0=1.115$ m 的弱湍流、 $r_0=0.108$ 8 m 的中湍流和 $r_0=0.026$ 8 m 的强湍流。从光束强度分布图可以看出,无论单路激光发射还是两路激光发射,红外相机拍摄到的光斑都随着模拟湍流强度的增加畸变更为严重,光斑的畸变导致光能量分布不均匀,造成了光强闪烁现象。两路激光发射明显比单路激光发射拍摄到的光斑更亮,能量分布更加集中,由此可见多个发射可以起到抵抗大气湍流的作用。

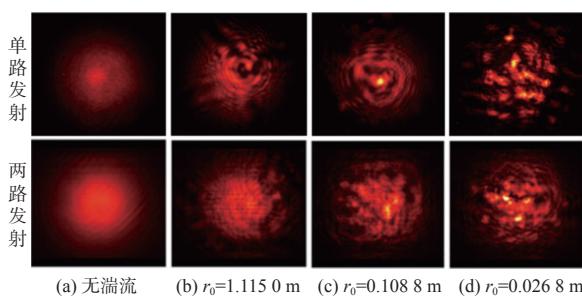


图 4 光束强度分布图

Fig. 4 Distribution diagram of beam intensity

任何光学系统都有限制光束的光瞳,所以发射端出射的光束具有一定尺寸,当激光光束尺寸小于湍流直径时,大气湍流会改变光束传播方向^[16]。接收端红外相机拍摄到的光斑会围绕统计中心点无规则地漂移,这称之为光束漂移。实验所用红外 CCD 相机镜头的焦距为 200 mm,捕获视野为 4.099°。分别在无湍流、 $r_0=1.115$ m 的弱湍流、 $r_0=0.108$ 8 m 的中湍流和 $r_0=0.026$ 8 m 的强湍流 4 种

环境下拍摄 300 张光斑图片,然后建立直角坐标系,通过算法计算光斑质心在直角坐标系中的位置,采集所有质心的坐标后画出指向偏差图,图 5 为不同湍流环境下的激光指向偏差。由于合束器将 2 束激光合为一束,单路激光发射和两路激光发射的指向偏差非常接近,仅受湍流强度影响,所以仅给出两路激光发射系统的指向偏差图。从图 5 中可以发现,在无湍流环境下指向偏差非常小,光斑的质心基本都集中在直角坐标系的原点附近。随着模拟湍流强度的增加,光束在统计中心点附近移动的漂移量增大,指向偏差散布圆的直径越来越大,并且光束处在直角坐标系原点周围的概率,也随着湍流的增强而下降。

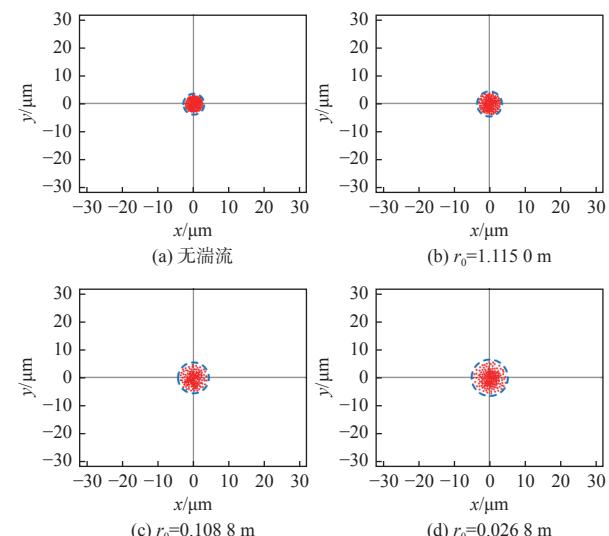


图 5 不同湍流下的指向偏差图

Fig. 5 Pointing deviation diagram under different turbulence

为了准确地测量光强闪烁现象所带来的功率抖动,我们利用功率计(Thorlabs, PM100USB)每 0.1 s 记录一次接收功率,记录时间为 300 s,对应得到 3000 个采样点,绘制的功率抖动图如图 6 所示。当 $r_0=1.115$ m 时,对应模拟的弱湍流环境,单路发射的接收功率集中在 -14.1 dBm~ -12.3 dBm 范围内,功率波动接近 ± 0.9 dB,两路发射的接收功率集中在 -12 dBm~ -10.4 dBm 范围内,功率波动接近 ± 0.8 dB;当 $r_0=0.108$ 8 m 时,对应模拟的中湍流环境,单路发射的接收功率集中在 -16.4 dBm~ -12.6 dBm 范围内,功率波动接近 ± 1.9 dB,两路发射的接收功率集中在 -14 dBm~ -10.5 dBm 范围内,功率波动接近 ± 1.75 dB;当 $r_0=0.026$ 8 m 时,对应模拟的强湍流环境,单路发射的接收功率集中在 -18.4 dBm~

-12.7 dBm 范围内, 功率波动接近 ± 2.85 dB, 两路发射的接收功率集中在-15.8 dBm~ -10.6 dBm 范围内, 功率波动接近 ± 2.6 dB。从接收光功率抖动图中可以发现, 无湍流时接收功率基本保持稳定; 当存在湍流时, 接收功率开始波动, 并随着湍流

强度的增强而波动得更加剧烈。对比功率抖动量可以发现, 相同湍流强度下两路激光发射比单路激光发射功率抖动量小, 说明在湍流环境下多路发射光通信系统比单路发射光通信系统稳定性好。

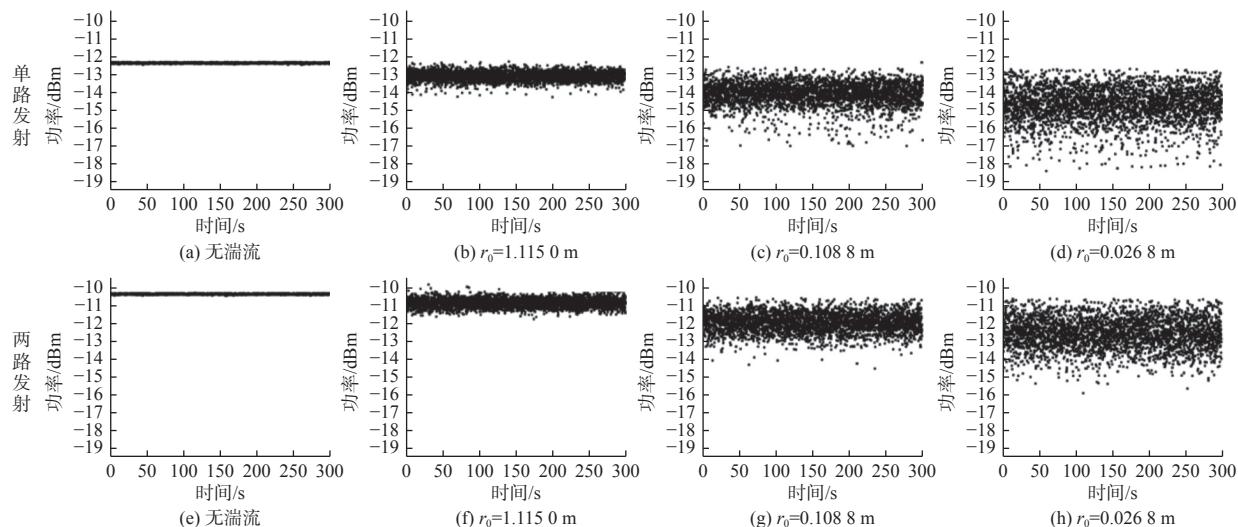


图 6 接收光功率抖动图

Fig. 6 Jitter diagram of received optical power

在测量湍流仿真系统的闪烁因子时, 将红外 CCD 相机的帧频率调节到最大 350 帧, 每次采集灰度图样 30 s, 获得 10 500 幅灰度图样。经计算处理后的每个数据点的数据值都是 1 s 内帧数据得来的, 其表示当前时刻到下 1 s 内的闪烁因子。测试了单路激光发射和两路激光发射在无湍流、 $r_0=1.115\text{ m}$ 弱湍流、 $r_0=0.108\text{ m}$ 中湍流和 $r_0=0.026\text{ m}$ 强湍流等湍流强度下 30 s 内的平均闪烁因子, 并绘制湍流强度和闪烁因子的关系曲线如图 7 所示。从图 7 中可以发现两路激光发射比单路激光

发射 30 s 内的平均闪烁因子小, 且都随着湍流强度的增加而增加。

3 MIMO 通信实验

3.1 MIMO 大气湍流传输实验装置

为了评估该模拟大气湍流通信系统数据传输的精确性, 进行了误码率测试, 实验结构如图 8 所示。首先利用任意波形发生器发射了 1 Gb/s 的 NRZ 信号, 该信号经过 2 个马赫增德尔调制器 (sumitomo, T.MXH1.5) 调制后由 2 个准直镜发射, 经过大气湍流模拟信道后由接收端接收。在合束器后搭建了由 2 个凸透镜组成的共焦扩束光学系统, 使接收端的 2 个镜头均能接收到 2 束光, 经探测器光电转换后进入示波器 (tektronix, MSO-71254), 示波器采集出的数据进入电脑后计算误码率。分集合并技术主要有等增益合并、选择性合并以及最大比合并。从降低误码率的效果上看, 等增益合并优于选择性合并, 最大比合并略优于等增益合并, 考虑到最大比合并算法的复杂性^[17], 最后接收端解调后信号处理选用等增益比合并法, 该方法将各支路信号进行同相处理后再进行合并叠加。

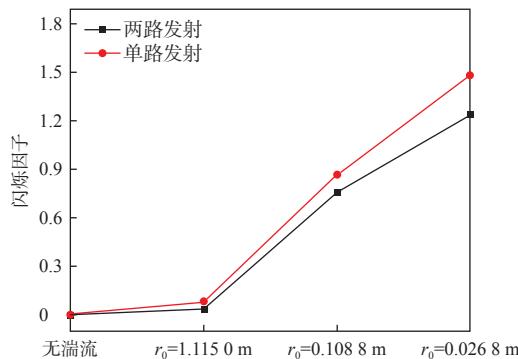


图 7 不同湍流强度下的闪烁因子

Fig. 7 Scintillation factors under different turbulence intensities

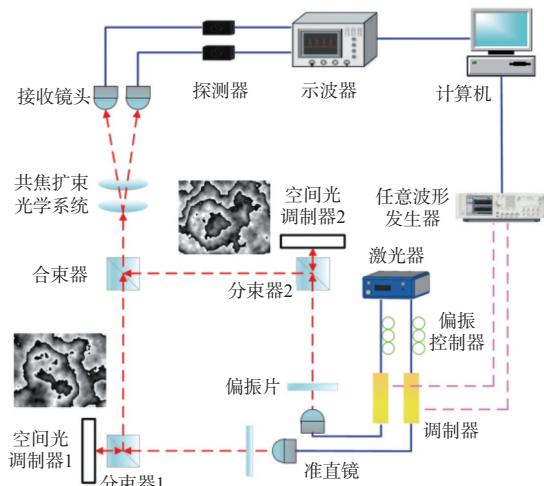


图 8 多输入多输出大气湍流信道误码率测试实验

Fig. 8 Bit error rate test experiment of multiple-input multiple-output atmospheric turbulence channel

3.2 MIMO 大气湍流传输实验结果分析

实验在基于 LC-SLM 模拟的大气湍流信道中, 对比研究了单个发射单个接收系统和两个发射两个接收的 MIMO 系统在不同强度大气湍流下的误码率和接收功率灵敏度关系。接收功率和误码率的关系如图 9 所示。

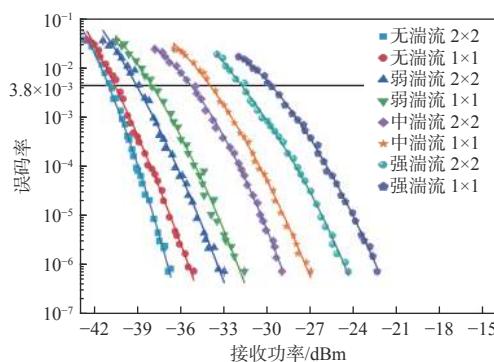


图 9 接收功率和误码率的关系

Fig. 9 Relationship between received power and bit error rate

在仿真传输 1 km 的湍流信道下, 单发单收系统在无湍流、 $r_0=1.115\text{ m}$ 弱湍流、 $r_0=0.108\text{ m}$ 中湍流和 $r_0=0.026\text{ m}$ 强湍流(误码率为 3.8×10^{-3} 的前向纠错判决门限)的接收灵敏度分别为-40.2 dBm、-37.6 dBm、-33.6 dBm 和-29.7 dBm, 而两发两收 MIMO 系统接收灵敏度分别为-40.8 dBm、-38.5 dBm、-34.9 dBm 和-31.5 dBm。此时可以发现两发两收 MIMO 系统比单发单收系统灵敏度分别高 0.6 dB、0.9 dB、1.3 dB 和 1.8 dB, 实验结果表明两发两收的 MIMO 系统在湍流信道中的通信性能得到明显提升, 且随着湍流强度的增加通信性能明显提升。

能得到明显提升, 且随着湍流强度的增加通信性能明显提升。

4 结论

本文采用功率谱反演法生成母相位屏, 并将其归一化后往复式截取处理后加载到 LC-SLM 上, 模拟 $r_0=1.115\text{ m}$ 弱湍流、 $r_0=0.108\text{ m}$ 中湍流、 $r_0=0.026\text{ m}$ 强湍流 3 种强度湍流下的 1 km 的 MIMO 信道, 完成了单发单收和两发两收的模拟传输实验。实验结果表明: 在 LC-SLM 模拟的大气湍流信道中, 2 个激光发射系统比单个激光发射系统的接收光斑能量密度高, 其功率抖动量和闪烁因子均小于单个激光发射系统。在前向纠错判决门限下(3.8×10^{-3}), 2 个发射 2 个接收的 MIMO 系统比单个发射单个接收系统灵敏度分别提高了 0.6 dB、0.9 dB、1.3 dB 和 1.8 dB。两发两收的 MIMO 系统在湍流信道中的通信性能得到明显提升, 且随着湍流强度的增加通信性能明显提升。经过计算得到单个发射单个接收系统的链路代价为 10.5 dB, 2 个发射 2 个接收的 MIMO 系统的链路代价为 9.3 dB, 可见 MIMO 系统可以在一定程度上降低链路代价。本文为实验室模拟 MIMO 大气湍流信道实验研究提供了一种新思路。

参考文献:

- [1] MORADI H, FALAHPOUR M, REFAI H H, et al. A diversity combining approach for MIMO FSO nodes with misaligned receivers[C]//2011 IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM 2011. December 5-9, 2011, Houston, TX, USA: IEEE, 2011: 1-5.
- [2] 李睿, 赵洪利, 曾德贤. 空间激光通信及其关键技术[J]. 应用光学, 2006, 27(2): 152-154.
LI Rui, ZHAO Hongli, ZENG Dexian. Free-space laser communication and its key technology[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(2): 152-154.
- [3] KAUSHAL H, KADDOUM G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 19(1): 57-96.
- [4] 郑东昊. 大气空间光通信系统理论与实验研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
ZHENG Donghao. Theoretical and experimental research on atmospheric space optical communication system[D].

- Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [5] FLECK J A, MORRIS J R, FEIT M D. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere[J]. *Applied Physics*, 1976, 10(2): 129-160.
- [6] MCGLAMERY B L. Restoration of turbulence-degraded images[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(3): 293.
- [7] LANE R G, GLINDEMANN A, DAINTY J C. Simulation of a Kolmogorov phase screen[J]. *Waves in Random Media*, 1992, 2(3): 209-224.
- [8] 吴晗玲, 严海星, 李新阳, 等. 基于畸变相位波前分形特征产生矩形湍流相屏[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 114-119.
WU Hanling, YAN Haixing, LI Xinyang, et al. Generation of rectangular turbulence phase screens based on fractal characteristics of distorted wavefront[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 114-119.
- [9] BEGHI A, CENEDESE A, MASIERO A. A stochastic realization approach to the efficient simulation of phase screens[J]. *JOSA A*, 2008, 52(2): 515-525.
- [10] BURGER L, LITVIN I A, FORBES A. Simulating atmospheric turbulence using a phase-only spatial light modulator[J]. *South African Journal of Science*, 2008, 104(3/4): 129-134.
- [11] RODENBURG B, MIRHOSSEINI M, MALIK M, et al. Simulating thick atmospheric turbulence in the lab with application to orbital angular momentum communication[J]. *New Journal of Physics*, 2014, 16(3): 033020.
- [12] LIU Xuzhou, ZHANG Qi, XIN Xiangjun, et al. Numerical simulation of ground-to-satellite laser transmission based on unequal spacing phase screen[C]//2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). August 5-8, 2019, Huangshan, China: IEEE, 2019: 1-3.
- [13] 张冬晓, 陈志斌, 肖程, 等. 基于修正大气谱的湍流相位屏高精度生成方法[J]. *光子学报*, 2020, 49(6): 100-109.
ZHANG Dongxiao, CHEN Zhibin, XIAO Cheng, et al. Generation of high-precision turbulence phase screen based on modified atmosphere spectrum[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(6): 100-109.
- [14] 杰森•D. 施密特. 光波传输数值仿真[M]. 郭汝海, 郑长彬, 曹立华, 等, 译. 1版. 北京: 国防工业出版社, 2018: 136-140.
JASON D. Numerical simulation of optical wave propagation[M]. GUO Ruhai, ZHENG Changbin, CAO Lihua, et al, Transl. 1st ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2018: 136-140.
- [15] RICHARD J S. Electromagnetic wave propagation in turbulence: evaluation and application of Mellin transforms[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012: 59-62.
- [16] 孙志文. 基于部分相干光的自由空间通信[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
SUN Zhiwen. Free space communication based on partially coherent light source[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [17] 尹霄丽, 孙志文, 崔小舟, 等. 基于空间分集的海洋无线光通信轨道角动量复用系统的性能[J]. *光子学报*, 2018, 47(11): 21-28.
YIN Xiaoli, SUN Zhiwen, CUI Xiaozhou, et al. Performance of oceanic wireless optical communication systems based on orbital angular momentum multiplexing with spatial diversity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(11): 21-28.