

DOI:10.16136/j.joel.2025.05.0638

# 大气湍流信道下一种高斯光斑空间传输的高效耦合方法

王博文<sup>1</sup>, 张雷<sup>1,2\*</sup>, 王潼<sup>1,2</sup>, 董科研<sup>1</sup>, 庞迪月<sup>1</sup>, 于笑楠<sup>1,2</sup>

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

**摘要:** 针对大气信道下远距离通信, 高斯光束受大气湍流信道影响, 导致接收耦合能量低的问题, 提出了一种适用于大气湍流信道的高斯光斑空间传输的高效耦合方法。该方法从高斯光斑光强、闪烁指数(scintillation index,  $SI$ )分布特性的角度出发, 通过监测光强与闪烁指数的统计数值作为反馈, 控制发射端抑制湍流引起的光强闪烁, 实现了光束的高效耦合, 提升通信系统性能。并通过搭建1 km激光通信实验进行验证, 结果表明: 根据信道闪烁监测调整终端后, 平均光强从19.63  $\mu\text{W}$ 增加至24.91  $\mu\text{W}$ , 闪烁指数从0.140降低至0.088, 通信误码率(bit error rate,  $BER$ )从 $1.27 \times 10^{-6}$ 降低到 $1.07 \times 10^{-10}$ , 通信 $BER$ 在弱湍流条件下改善了4个数量级。该方法能够有效提升大气激光通信系统的性能, 为大气激光通信系统的推广与应用奠定基础。

**关键词:** 高斯光斑; 湍流信道; 耦合能量; 闪烁指数( $SI$ ); 通信误码率( $BER$ )

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-0086(2025)05-0547-08

## An efficient coupling method for spatial transmission of Gaussian spot in atmospheric turbulence channel

WANG Bowen<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>1,2\*</sup>, WANG Tong<sup>1,2</sup>, DONG Keyan<sup>1</sup>, PANG Diyue<sup>1</sup>, YU Xiaonan<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** In the context of long-distance communication in atmospheric channels, the Gaussian light beam is impacted by atmospheric turbulence, leading to the problem of low energy coupling at the receiver. In order to solve this problem, a highly efficient coupling method for Gaussian spot spatial transmission in turbulent atmospheric channels is proposed. This method takes into account the distribution characteristics of Gaussian spot intensity and scintillation index ( $SI$ ). By monitoring statistical values of intensity and scintillation index as feedback, the emission end is controlled to suppress turbulence-induced intensity scintillation, achieving efficient coupling of the light beam and enhancing communication system performance. Validation is conducted through a 1 km laser communication experiment. The results indicate that after adjusting the terminal based on scintillation monitoring, the average optical power increases from 19.63  $\mu\text{W}$  to 24.91  $\mu\text{W}$ . The scintillation index decreases from 0.140 to 0.088, and the communication bit error rate ( $BER$ ) drops from  $1.27 \times 10^{-6}$  to  $1.07 \times 10^{-10}$ . Under weak turbulence conditions, the communication  $BER$  decreases by four orders

\* E-mail: Z11980@cust.edu.cn

收稿日期: 2023-12-14 修订日期: 2024-02-04

基金项目: 吉林省重大科技专项课题“高速轻型激光通信组网终端研发”(20230301002GX)、国家重点研发计划(2022YFB3902500, 2022YFB2903402, 2021YFA0718804)、吉林省教育厅项目(JJKH20220745KJ)和吉林省教育厅科学技术研究项目(QT202102)资助项目

of magnitude. This way effectively enhances the performance of atmospheric laser communication systems, laying the foundation for the widespread adoption and application of atmospheric laser communication systems.

**Key words:** Gaussian spot; turbulent channel; coupling energy; scintillation index (SI); communication bit error rate (BER)

## 0 引言

自由空间光通信(free space optical, FSO)因通信速率高、距离远、保密性强以及功耗低等特点受到广泛关注。目前,FSO系统多采用强度调制/直接探测(intensity modulation-direct detection, IM/DD)<sup>[1]</sup>的调制方法,大气湍流<sup>[2]</sup>会造成远距离光束漂移<sup>[3]</sup>、光强闪烁<sup>[4,5]</sup>等现象,导致激光通信接收端空间光耦合效率较低,光强起伏更剧烈,系统信号误判通信误码率(bit error rate, BER)增加,降低通信链路的性能,因此,提高通信系统的光束能量耦合、降低光强闪烁十分必要。

FARID等<sup>[6]</sup>提出了在湍流和指向误差的共同作用下,采用优化波束宽度的方法可提高通信系统性能,该方法需修改波束宽度,对应到达接收端光强会随束散角发生改变,影响链路的通信裕量。DARUS-ALAM<sup>[7]</sup>提出了一种光学空间滤波器(optical spatial filter, OSF)方法来抑制光束漂移和空间噪声效应,将锥形反射器安装到针孔上实现定向反射,抑制光束漂移引起的焦点随机位移,但OSF的滤波性能主要由对应的针孔与锥形反射器决定,在进行相关加工制作时难度及成本较高。随着多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)与轨道角动量(orbital angular momentum, OAM)技术在FSO中的突破性应用, SINHA等<sup>[8]</sup>提出将正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)、空间模式复用(Spatial Mode Multiplexing, SMM)与现有的OAM-MIMO-FSO进行结合,对提高传输容量、减轻多径效应和大气湍流畸变非常有利。DREXLER等<sup>[9]</sup>、NEUNER等<sup>[10]</sup>提出利用数字自适应光学(digital adaptive optics, DAO)系统抑制大气湍流,通过多帧算法程序的被动成像功能和ShackHartmann技术相结合,进行单帧校正,但该方法对光学成像要求更高,虽然可以通过提高成像系统的分辨率进行解决,但仍需要进行大量的算法编写。综上所述,目前主要是通过对接收到的信号进行系统内部耦合和数据处理提升通信质量,对于系统结构和算法要求较高,实现成本和难度较大。

本文基于高斯光束的光强与闪烁指数(scintillation index, SI)的分布特性,提出依据信道闪烁监测进

行高效耦合的方法。通过对到达接收面的光斑各位置进行光强的探测与统计,并以此作为反馈量,提高系统光束能量耦合效率,该方法不增加系统结构成本,算法复杂度较低。同时,在湍流信道的条件下,开展了1 km的光束耦合对准实验进行了验证。

## 1 高斯光束湍流条件下闪烁分布特性

光的波动方程符合 Helmholtz 方程:

$$\nabla^2 U_0 + k^2 U_0 = 0, \quad (1)$$

式中,  $\nabla^2$  为拉普拉斯算子,在直角坐标系中可以表示为:

$$\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}. \quad (2)$$

在激光通信系统中,光波沿  $z$  轴的传播距离远远大于其横向传播,因此可以通过旁轴近似后,根据高斯光束在经过大气信道后到达接受面的光强呈高斯分布,利用直接法求解得到高斯光束的光场,公式为<sup>[11-13]</sup>:

$$U_0(r, z) = \frac{1}{\sqrt{\Theta_0^2 + \Lambda_0^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{W^2}\right) \cdot \exp\left[i\left(kz - \varphi - \frac{kr^2}{2F}\right)\right], \quad (3)$$

式中,  $\Theta_0 = 1 - z/F_0$ ,  $\Lambda_0 = 2z/(kW_0^2)$ 。

沿传播途径纵向相移、光斑半径以及  $z$  位置的曲率半径,可用  $\Theta_0$  和  $\Lambda_0$  表示为:

$$\varphi = \arctan^{-1} \frac{\Lambda_0}{\Theta_0}, \quad (4)$$

$$W = W_0 \sqrt{\Theta_0^2 + \Lambda_0^2}, \quad (5)$$

$$F = \frac{F_0 (\Theta_0^2 + \Lambda_0^2) (\Theta_0 - 1)}{\Theta_0^2 + \Lambda_0^2 - \Theta_0}. \quad (6)$$

高斯光束的光强可表示为光场的平方,在直角坐标系中可以表示为:

$$I_0(x, y, z) = \frac{1}{\Theta_0^2 + \Lambda_0^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)^2}{W^2(z)}\right], \quad (7)$$

$$W(z) = W_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi W_0^2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

基模高斯光束的归一化光强分布如图1所示。

到达接收端的光强起伏可以使用闪烁指数进行

表示,闪烁指数的定义是归一化的光强的方差<sup>[14]</sup>:

$$\sigma_I^2(r, L) = \frac{\langle I^2(r, L) \rangle}{\langle I(r, L) \rangle^2} - 1. \quad (9)$$

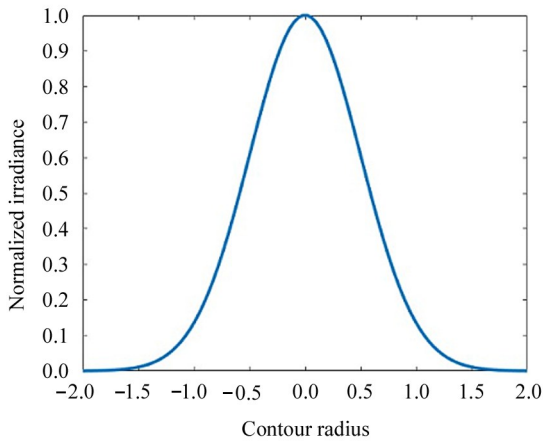


图1 高斯光斑光强分布图

Fig. 1 Diagram of intensity distribution of Gaussian spot

由于高斯光束的光强本身就呈高斯分布,即使没有湍流影响,在接收面上光强也不是均匀的,所以不能用一般分析无限大均匀平面波或球面波的方法,即在某一特定时间点对整个接收面上的光场求解空间上的光强起伏情况,可以通过分析其每一个接受点光强随时间的变化情况,求出其各个接受点的光强随时间起伏的方差。据 ANDREWS 等<sup>[15]</sup>的理论分析,在距离光轴不同的地方光强起伏方差是不相同的:

$$\sigma_I^2(r, L) = 4.42\sigma_1^2\Lambda_e^{5/6} \frac{r^2}{W_e^2} + \exp\left[\frac{0.49\sigma_R^2}{(1+0.167\sigma_R^{12/5})^{7/6}} + \frac{0.51\sigma_R^2}{(1+0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right] - 1, \quad (10)$$

式中,  $r$  为离轴距离,  $L$  为传输距离,  $\Lambda_e$  为 Snell 的有效半径,  $W_e$  为高斯光束的有效光斑半径,  $\sigma_1^2$  为 Rytov 方差,  $\sigma_R^2$  为修正后的 Rytov 方差<sup>[16]</sup>:

$$\begin{aligned} \sigma_1^2 &= 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (11) \\ \sigma_R^2 &= 3.86\sigma_1^2 \{0.04[(1+2\Theta)^2 + 4\Lambda^2]^{5/12} \times \\ &\quad \cos\left[5/6\arctan\left(\frac{1+2\Theta}{2\Lambda}\right)\right] - 11/6\Lambda^{5/6}\}, \quad (12) \end{aligned}$$

式中,  $C_n^2$  为折射率结构常数,  $k$  为波数( $k=2\pi/\lambda$ )。

由于衍射效应,高斯光束的光斑大小和相位前曲率半径随着光束在真空中传播而不断变化。在光学湍流存在的情况下,额外的衍射和折射导致光束光斑尺寸进一步扩大,进一步聚焦和散焦。额外的

衍射和折射效应定义了光束的有效光斑半径  $W_e$  和有效相位前曲率半径  $F_e$ :

$$W_e = W(1 + 1.625\sigma_1^{12/5}\Lambda)^{1/2}, \quad (13)$$

$$F_e = -\frac{z(1 + 1.625\sigma_1^{12/5}\Lambda)}{\Theta + 2.438\sigma_1^{12/5}\Lambda}. \quad (14)$$

入射端的曲率参数  $\Theta$  和菲斯耳半径  $\Lambda$  也可以通过有效值进行替换:

$$\Theta_e = 1 + \frac{z}{F_e} = \frac{\Theta - 0.813\sigma_1^{12/5}\Lambda}{1 + 1.625\sigma_1^{12/5}\Lambda} \bar{\Theta}_e = 1 - \Theta_e, \quad (15)$$

$$\Lambda_e = \frac{2z}{kW_e^2} = \frac{\Lambda}{1 + 1.625\sigma_1^{12/5}\Lambda}. \quad (16)$$

根据得到的闪烁方差可以推出相应的通信 BER<sup>[17]</sup>:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{1}{\sigma_I \sqrt{2}} \right]. \quad (17)$$

结合式(7)、式(12)及式(17)可以得出,高斯光束的光强和闪烁指数分布都与离轴距离有关,闪烁指数的大小也会影响通信 BER。当离轴距离增加时,到达接收面的光强减小、闪烁指数增大,系统通信 BER 增加,影响通信性能。

## 2 实验及分析

### 2.1 实验设计方案

为验证依据高斯光斑光强和闪烁指数分布特性及其对通信系统耦合效率提高的可行性,设计如下实验,通信系统采用 IM/DD 的调制探测方式,实验总体框图如图 2 所示。

实验系统双端由左侧信标接收/通信发射端和右侧信标发射/通信接收端组成,左侧终端采用轻小型化设计,收发为共口径,接收右侧终端用于指引标定的信标光和带有调制信息的通信光。

双端进行初始指向后,右侧信标发射端由 850 nm 激光器发射信标光至左侧信标接收端,接收端由微机电系统(micro-electro mechanical system, MEMS)振镜和波长分光镜反射进伺服相机进行光学成像。左侧终端通过上位机下发扫描指令,驱动 MEMS 振镜进行矩形螺旋扫描,当信标光进入相机视场中时,相机通过串口传输脱靶量至控制板,驱动 MEMS 振镜实现信标光跟踪。左侧通信发射板由光模块发射 1550 nm 通信光经过掺铒光纤放大器(erbium-doped fiber amplifiers, EDFA)放大后,依次经过反射镜、波长分光镜和 MEMS 振镜原路返回至右侧终端。右侧终端通过中间的红外相机生成脱靶量信息,通过控制方位、俯仰电

机进行通信光的跟踪,因相机和通信接收并非共口径,需要对跟踪后的通信光进行偏置跟踪,才可以将通信光耦合至接收孔径内。光学系统将空间光耦合到光纤接入含有雪崩光电二极管(avalanche photodiode, APD)的光模块中,经过低通滤波器整形后由模数转换(analog-to-digital converter, ADC)实现光强的采集。实验系统采集的数据以 6 ms 为一个周期向上位机传输,在每个测试位置采集 6 s 即 1 000 个数据,对采集

的点位进行统计分析,得出采集点处的光强大小及闪烁指数的变化。接收端完成数据统计后将得到的光强与闪烁指数通过射频信号返回至发射端,之后控制发射端 MEMS 振镜的偏转角度调整光束发射角度,从而调整光斑覆盖接收孔径的位置。最后将所有采集点处光强数据与闪烁指数进行对比,选择光强高并且闪烁指数低的角度作为发射端返回至最优角度,将通信最优光斑位置覆盖至接收孔径。

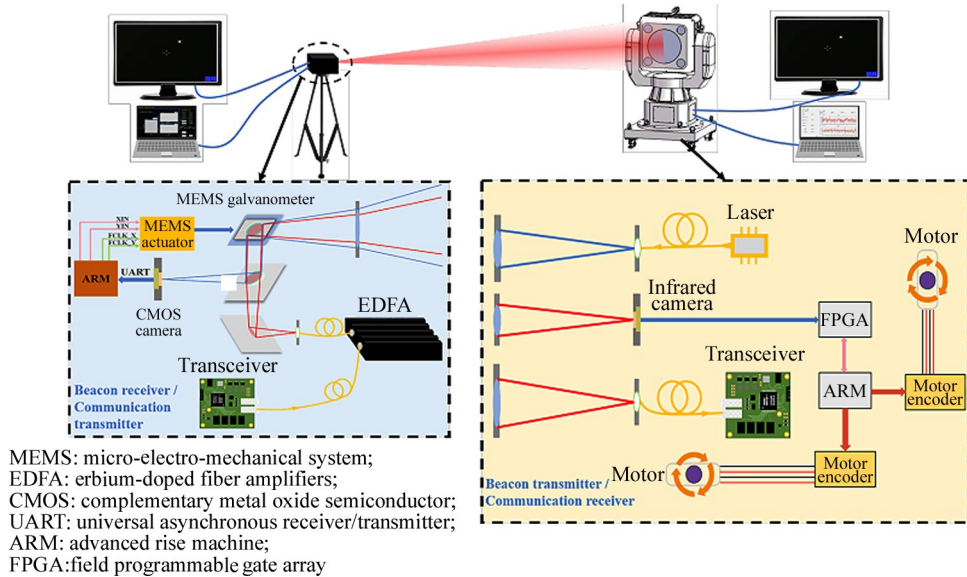


图 2 实验系统框图

Fig. 2 Block diagram of experimental system

### 2.2 实验结果与分析

在吉林省长春市长春理工大学进行通信距离为 1 km 的激光通信实验,当日情况为平均气温 18 ℃,天气状况为多云微风,实验现场如图 3 所示。

覆盖 90 mm 的接收孔径。通过调整发射端指向角度,光斑在接收端每次移动约 100 mm,光斑边缘受湍流信道影响,低于探测器探测灵敏度,因此,探测了光斑中心及附近位置 7×6 共 42 个采集点位的的光强及抖动情况,测试点位如图 4 所示。

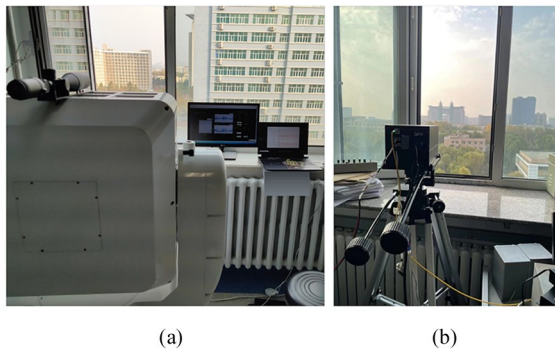


图 3 实验现场图:(a)接收端现场图;(b)发射端现场图

Fig. 3 Diagram of the experiment site:

(a) Diagram of receiving site; (b) Diagram of launch site

在通信光束散角为 1 mrad,链路距离为 1 km 的条件下,达到接收面的光斑直径大小约为 1 m,足够

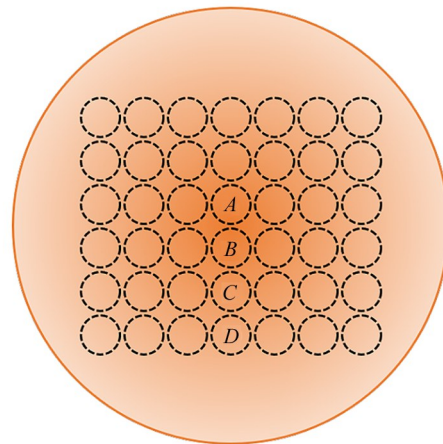


图 4 扫描点位图

Fig. 4 Scanning point bitmap

得到如图 5 所示光斑中部分点位的统计数据,图 5(a)–(d)对应图 4 中 A、B、C、D 处光斑中心至边缘部分的光信号强度图,为测试得到的实时光信号强度,虚线为采集时间段内的平均光强。从图 5(a)–(d)可以看出,随着离轴距离的增加,平均光强从中心的  $24.91 \mu\text{W}$  降到边缘处的  $11.54 \mu\text{W}$ 。图 5(e)–(h)是对应图 4 中 A、B、C、D 中 1000 个数据统计得到的概率密度曲线图。图中的柱状图为对应光强下统计的频数,根据数据得到的闪烁指数显示在图片右上角的图例中,并用虚线对统计数据拟合生成概率密度曲线。从图 5(e)–(h)中可观察到,随着离轴距离的增加,概率密度曲线由高斯分布逐渐呈对数正态分布,闪烁指数也由 0.088 增加到 0.267,说明光斑边缘相对于中心受湍流引起的信号功率波动更严重。

图 6 为对到达接收面的光斑采集 42 个点位采集数据拟合生成的接收光斑三维能量分布图和闪烁指数分布图,横纵坐标为通信发射端光束偏转角度。

图 6(a)为光斑的能量分布图,光强总体呈高斯分布,光斑中心处能量最高。图 6(a)左上角为三维光强分布图的二维平面显示,可以观察到光强从光斑中心向边缘逐渐降低。图 6(b)为光斑的闪烁指数分布图,通过三维分布图可以得出光斑中心部分的闪烁指数最低,随着离轴距离的增加,闪烁指数逐渐上升。从图 6 的三维分布图可看出,到达接收端的光斑呈高斯分布,且闪烁指数符合高斯光在湍流信道中与离轴距离的关系。

沿三维光斑光强以及闪烁分布图光斑中心处的坐标轴获取横截面数据,可以得到方位轴和俯仰轴处的光强及闪烁指数的对应关系,如图 7 所示,可以看出,高斯光斑能量最高点处的闪烁指数最低,因此,可依据此特性对通信发射端的指向进行调整,提高光束耦合效率,抑制闪烁指数。

依据高斯光斑的光强能量和闪烁指数分布特性,在初始跟踪点位附近采集光强并统计得到闪烁指数,将光强最高处和闪烁指数最低处的位置反馈

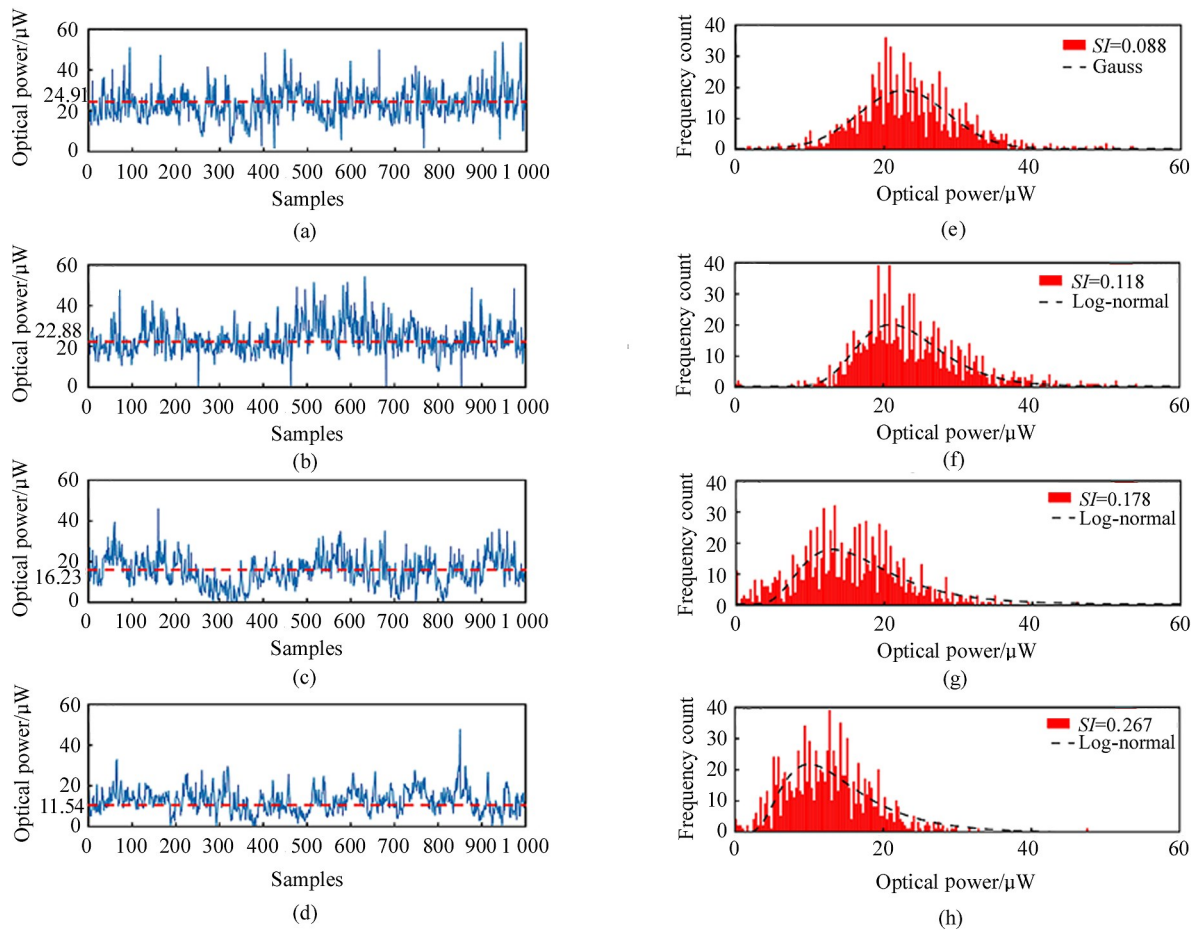


图 5 光斑中心至边缘接收光强及统计图:(a)、(e) 中心点; (b)、(f) 中心偏下点; (c)、(g) 边缘偏上点; (d)、(h) 边缘点

Fig. 5 Received optical power and statistics diagram from the center to the edge of the spot: (a), (e) Central point; (b), (f) Center below point; (c), (g) Edge up point; (d), (h) Edge point

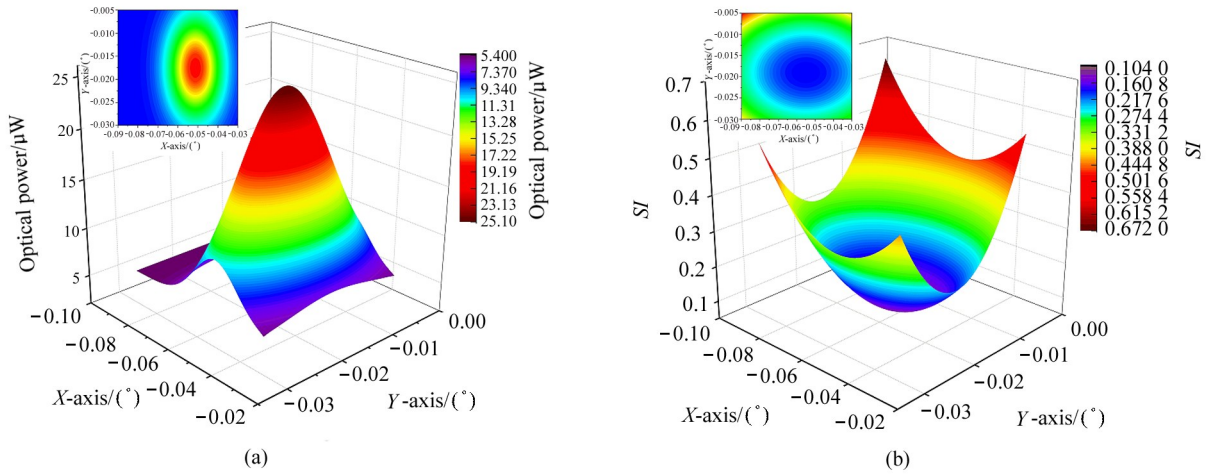


图6 接收端光斑光强以及闪烁指数曲面图:(a) 光强曲面图; (b) 闪烁指数曲面图

Fig. 6 Surface diagram of receiver spot intensity and scintillation index;

(a) Surface diagram of light intensity; (b) Surface diagram of scintillation index

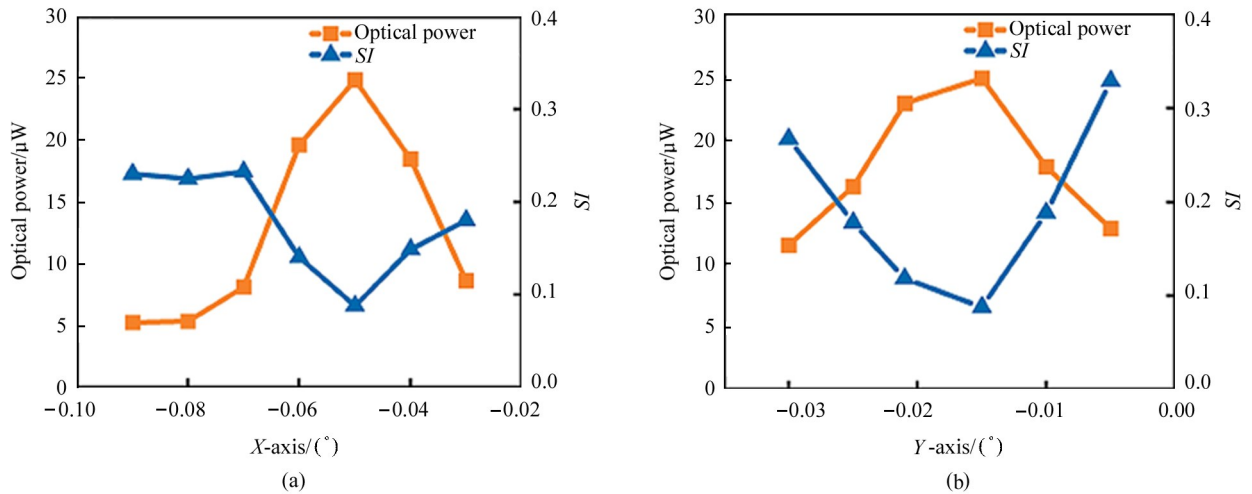


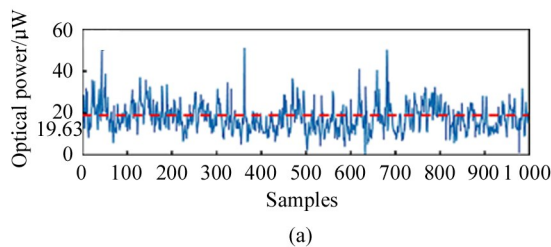
图7 接收端坐标轴处截面光强与闪烁分布图:(a) 方位轴截面分布; (b) 俯仰轴截面分布

Fig. 7 Distribution diagram of cross section intensity and scintillation index at axis of receiving end;

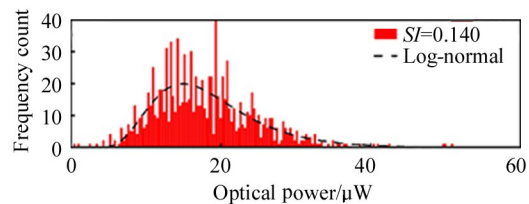
(a) Azimuth axis cross section distribution; (b) Pitch axis cross section distribution

至通信发射端并调整指向。图8为初始跟踪点与控制发射端两种情况下的信号强度图和概率分布图。从图8(a)、(c)可看出, 未经过调整时平均光强为  $19.63 \mu\text{W}$ , 概率密度曲线呈对数正态分布, 闪烁指数为  $0.140$ 。当系统控制发射端指向调整后, 从图8(b)、(d)可观察到光强增强到  $24.91 \mu\text{W}$ , 概率密度

曲线也呈典型的高斯分布, 而且闪烁指数也由  $0.140$  降低到  $0.088$ 。可见, 控制发射端调整指向可以提高高斯光束  $26.8\%$  的耦合效率, 并且显著地抑制了信号功率波动。通过连接通信板卡测试通信系统 BER 率, 未调整前的系统平均 BER 为  $1.27 \times 10^{-6}$ , 信道闪烁监测调整后平均 BER 为  $1.07 \times 10^{-10}$ , 在弱端



(a)



(c)

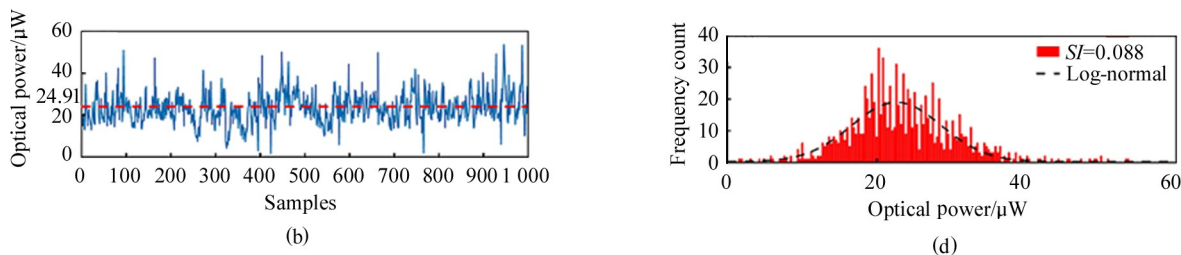


图8 控制发射端调整前后的光强统计图:(a)、(c)调整前;(b)、(d)调整后

Fig. 8 Statistical diagram of light intensity before and after adjustment of control transmitter:  
(a), (c) Before adjustment; (b), (d) After adjustment

流条件下系统 BER 减少了 4 个数量级。

### 3 结论

本文针对通信光束经过大气信道产生光轴对准偏差的问题,提出了一种基于高斯光斑特性的激光通信系统耦合方法。通过激光通信实验,验证了高斯光束经过大气信道后光强和闪烁指数与离轴距离的关系,以及根据对高斯光斑的光强与闪烁指数的监测,控制发射端调整指向后对系统的性能有明显的改善作用。实验结果表明:随着离轴距离的增加,光强由  $24.91 \mu\text{W}$  减小至  $11.54 \mu\text{W}$ ,闪烁指数由 0.088 增大至 0.267,光功率分布逐渐由高斯分布趋近于对数正态分布;经过闪烁监测对发射端调整后平均光强从  $19.63 \mu\text{W}$  增加至  $24.91 \mu\text{W}$ ,耦合效率提高了 26.8%,闪烁指数从 0.140 降低至 0.088,通信 BER 从  $1.27 \times 10^{-6}$  降低到  $1.07 \times 10^{-10}$ ,降低了 4 个数量级。基于信道闪烁监测的高斯光斑耦合方法,有效地提高了空间光能量的耦合,减小了信号功率的波动,为远距离空间激光通信的推广和应用奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] MAHMOUD A, NECMI T, FADY I. Bidirectional intensity modulated/direct detection optical OFDM WDM-PON system[J]. Optoelectronics Letters, 2023, 19(2): 83-87.
- [2] JIANG T, ZHANG J H, WANG H T, et al. Wavefront detection performance analysis of plenoptic sensor[J]. Optoelectronics Letters, 2023, 19(9): 526-531.
- [3] 程振, 楚兴春, 赵尚弘, 等. 艾里涡旋光束在大气湍流中的漂移特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1213002.
- [4] 吴鹏飞, 由广宇, 李腾. 西安地区夜间大气湍流及光强闪烁特性实验研究[J]. 光电子·激光, 2021, 32(11): 1221-1228.
- [5] 向劲松, 王应, 祁权, 等. 深空光通信接收方案的改进及误码性能分析[J]. 光电子·激光, 2019, 30(4): 382-388.
- [6] FARID A A, HRANILOVIC S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(7): 1702-1710.
- [7] DARUSALAM U, PRIAMBODO P S, RAHARDJO E T. Optical spatial filter to suppress beam wander and spatial noise induced by atmospheric turbulence in free-space optical communications[J]. Advances in Optical Technologies, 2015, 2015: 1-6.
- [8] SINHA S, KUMAR C, ARMUGHAN A, et al. Capacity enhancement analysis of an OAM-OFDM-SMM multiplexed free space communication system in atmospheric turbulence[J]. Applied Sciences, 2023, 13(6): 3897.
- [9] DREXLER K, LILLEDAHL S, LAXTON B. Digital adaptive optics for turbulence mitigation[C]//Proceedings of the Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans X, August 4, 2021, San Diego, California, United States. Bellingham: SPIE, 2021, 11834: 118340D.

- [10] NEUNER III B, LILLEDAHL S D, LAXTON B, et al. Digital adaptive optics with interferometric homodyne encoding for mitigating atmospheric turbulence [J]. *Optical Engineering*, 2023, 62(2): 023104.
- [11] 刘锡国, 刘敏, 毛忠阳, 等. 指向误差下高斯光束几何衰减模型分析 [J]. *电子学报*, 2021, 49(10): 1893-1899.  
LIU X G, LIU M, MAO Z Y, et al. Analysis of geometric attenuation model of Gaussian beam under pointing error [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(10): 1893-1899.
- [12] STSEPURO N, NOSOV P, GALKIN M, et al. Generating Bessel-Gaussian beams with controlled axial intensity distribution [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(21): 7911.
- [13] ANDREWS L C, AL-HABASH M A, HOPEN C Y, et al. Theory of optical scintillation: Gaussian-beam wave mode [J]. *Waves in Random Media*, 2001, 11(3): 271-291.
- [14] 周畅, 于笑楠, 姜会林, 等. 基于 APD 自适应增益控制的近地无线激光通信信道大气湍流抑制方法研究 [J]. *中国激光*, 2022, 49(4): 0406002.  
ZHOU C, YU X N, JIANG H L, et al. Atmospheric turbulence suppression methods for near the earth wireless laser communication channels based on avalanche photodiode adaptive gain control [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(4): 0406002.
- [15] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. *Laser beam propagation through random media* [M]. 2nd ed. Bellingham, USA: SPIE Optical Engineering Press, 2001: 1-20.
- [16] 刘贺雄, 周冰, 高宇辰. APD 探测系统的噪声特性及其影响因素研究 [J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 862-867.  
LIU H X, ZHOU B, GAO Y C. Research of noise characteristics and influence factors of APD detection systems [J]. *Laser Technology*, 2018, 42(6): 862-867.
- [17] YU X, ZHANG L, ZHANG Y, et al. 2.5 Gbps free-space optical transmission between two 5G airship floating base stations at a distance of 12 km [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(9): 2156-2159.

#### 作者简介:

张雷 (1980—), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事大气光学、自适应光学技术等方面的研究。