

基于 MIMO 模式分集相干接收的自由空间光通信 大气湍流补偿技术研究

尹涵^{1,2*}, 宋英雄^{1,2}, 李迎春^{1,2*}, 陈松^{1,2}, 黄焯恬^{1,2}

¹上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444;

²上海大学特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海 200444

摘要 针对自由空间光通信(FSO)系统中大气湍流导致大气信道折射率不稳定,进而对传输光信号造成损伤导致误码率升高等问题,本文提出了一种基于 LP₀₁、LP_{11a} 和 LP_{11b} 两模组光纤的少模分集接收结合相干检测信号处理的方案,以对抗 FSO 系统中大气湍流对系统性能的影响,从而提高接收机的性能。根据 Gamma-Gamma(G-G)大气湍流信道模型,采用基于时频域最小均方(LMS)的多人多出(MIMO)信号处理算法,通过 VPI 仿真软件模拟光场在弱、中、强三种强度大气湍流(弱、中、强大气湍流下,折射率结构参数 C_n^2 的取值分别为 2.1×10^{-16} 、 3.51×10^{-14} 、 2.6×10^{-13})条件下的传输,进行传输速率为 100 Gbit/s 的偏振复用正交相移键控(DP-QPSK)自由空间光传输仿真实验。实验结果表明,相比于单模光纤接收,采用三模光纤接收可在弱、中、强三种湍流强度下使接收性能分别提高 1.8 dB、2.5 dB 和 3 dB。

关键词 光通信; 大气湍流; Gamma-Gamma 模型; 少模光纤; 多人多出

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2306002

1 引言

由于大气湍流和指向误差的影响,自由空间光通信(FSO)链路非常脆弱。当大气折射率、气温和压力变化时,大气湍流会使传输的高斯光束发生波面扭曲,并在传输后转换为高阶模态^[1]。湍流的变化会导致接收信号受光束漂移、光束扩展、光强闪烁、到达角起伏等的影响,特别是当传输距离在 1 km 及以上时^[2],使用单模光纤(SMF)的传统光接收器将出现严重的功率衰落^[1]。目前,研究人员通常采用自适应光学补偿、相干接收、模式分集接收等技术来减轻大气湍流的影响^[3]。其中,模式分集接收使用多模/少模光纤进行信号的采集,可以将模式作为互不相关信号,将更多的光信号耦合进光纤,并且凭借模式的正交性进行分集接收^[4-5]。

目前已有一些针对自由空间光通信进行分集接收补偿的研究。2018年,Arikawa等^[6]研究了大气湍流下采用少模光纤(FMF)耦合接收偏振复用(PDM)信号的模式分集接收性能。2019年,Kumar等^[7]设计了基于分集的 1、2、4、8 阶 FSO 系统和多输入多输出 FSO(MIMO-FSO)系统,并在晴空、霾、雨等不同大气

湍流条件下进行了 Gamma-Gamma 衰落的详细性能分析;分析结果表明,多人多出无线光通信系统比单入单出(SISO)无线光通信系统具有更好的性能,随着接收分集数或多人多出(MIMO)阶数的增加,误码率(BER)降低,湍流条件下的链路可靠性增加。2019年,Li等^[8]通过实验演示了使用模式和空间分集(2个模式和2个孔径对)提高 100 Gbit/s 正交相移键控(QPSK)FSO 链路在湍流下的可靠性,并在仿真湍流下实现了小于 3.8×10^{-3} 的 BER。2020年,Krimmer等^[9]通过模拟光场在湍流大气中的传播及其与光纤的耦合发现,与使用单模光纤相比,使用少模光纤或多模光纤可以显著提高相干 FSO 链路的可靠性。2021年,Malik等^[10]提出了一种采用等增益合并(EGC)分集方法的多输入多输出系统。以上研究表明,模式分集技术在 FSO 系统中具有广阔的应用前景。采用模拟仿真的方法可以更加方便地研究模式分集技术对大气湍流的补偿效果,并且对之后的实验也具有一定的借鉴意义。因此,有必要对湍流条件下少模光纤接收分集技术的补偿进行研究,并且有必要进一步研究该补偿技术的 MIMO 均衡算法。

根据以上讨论,本团队提出了一种采用少模光纤

收稿日期: 2022-01-20; 修回日期: 2022-02-16; 录用日期: 2022-04-07

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2900800)、上海市科委项目(20511102400, 20ZR1420900)、高等学校学科创新引智计划(111)(D20031)

通信作者: *liyinchun@shu.edu.cn; **19721181yh@shu.edu.cn

接收相干检测的大气湍流补偿方案,在数字域上对经湍流损伤的信号进行补偿,而且该方案无需任何自适应光学技术。在接收端,对采集到的数字信号进行低通滤波、IQ 正交性补偿、重采样、时钟恢复处理,然后进一步对上述信号进行离线 LMS-MIMO(基于最小均方的 MIMO)均衡^[11-12]。

2 大气信道传输模型

2.1 大气湍流模型

大气湍流效应是由大气折射率波动导致的光的散射引起的,如图 1 所示。研究人员提出了描述大气湍流特性及其对光通信链路影响的模型,如对数正态分布、Gamma-Gamma 分布、负指数分布等模型^[13-14]。本文使用 Gamma-Gamma 湍流模型。该模型由 Al-Habash 等^[15]在 2001 年提出,它涵盖了大气闪烁效应、光发射机和接收机的几何形状、风速、其他大气条件之间的相互作用,以及它们对 FSO 链路性能的影响。

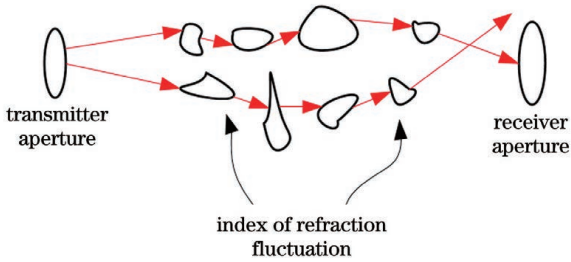


图 1 大气折射率波动示意图

Fig. 1 Schematic of atmospheric refractive index fluctuation

Gamma-Gamma 模型分别考虑了内尺度与外尺度结构参数对传输激光束的影响。与相干半径尺度相比,内尺度的湍流涡旋较小。外尺度往往比相干半径尺度大,其光强闪烁强度为

$$I = I_x I_y, \quad (1)$$

式中: I_x 表示大尺度涡旋散射对光强闪烁强度的影响; I_y 表示小尺度涡旋散射对光强闪烁强度的影响。根据 Ammar Al-Habash 理论,这两个参数均服从独立的 Gamma 分布,即

$$p(I_x) = \frac{I_x (\alpha I_y)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \exp(-\alpha I_x), I_x > 0, \alpha > 0, \quad (2)$$

$$p(I_y) = \frac{I_y (\beta I_x)^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} \exp(-\beta I_y), I_y > 0, \beta > 0, \quad (3)$$

式中: I_x 、 I_y 、 α 、 β 均大于 0; α 为大尺度散射元的有效数目; β 为小尺度散射元的有效数目; $\Gamma(x)$ 是 Gamma 函数。根据式(1)~(3),经过变量代换,可以得到 Gamma-Gamma 分布模型,即

$$p(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \cdot I^{(\alpha+\beta)/2-1} \cdot K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}), I > 0, \quad (4)$$

式中: $K_\nu(\cdot)$ 表示修正型二阶贝塞尔函数,其阶数为 $\nu = \alpha - \beta$ 。闪烁强度为 $\sigma_I^2 = (1/\alpha) + (1/\beta) + [1/(\alpha\beta)]$ 。在假设激光为平面波的情况下, α 和 β 均与大气条件有关,同时也是表示闪烁指数强度的两个参数。这两个参数的计算公式为

$$\alpha = \left\{ \exp \left[\frac{0.49\sigma_R^2}{(1 + 1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (5)$$

$$\beta = \left\{ \exp \left[\frac{0.51\sigma_R^2}{(1 + 0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (6)$$

式中: σ_R^2 为 Rytov 方差。Gamma-Gamma 函数模型对从弱到强湍流强度下的闪烁特性有一定的描述能力。在弱湍流环境下,Gamma-Gamma 模型等同于对数正态分布模型。给定不同湍流强度下的大气折射率值,即可得到对应的光强闪烁指数^[5,16],即

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (7)$$

式中: C_n^2 为大气湍流折射率结构参数,表示闪烁强度; $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长; L 为从发射端到接收端传输经过的链路长度。大气湍流折射率结构参数通常取 10^{-12} 或更高的值。参数会根据气候条件的不同而变化。在白天,它可以变化一到两个数量级。虽然 Rytov 方差可以代表基础的大气闪烁效应,但链路中的高斯光束的几何形状也起到了决定性作用。具有极大孔径的接收器的接收功率变化较小,因为其可以收集较大角度散射的光。

2.2 光纤模式数计算

图 2 展示了一个 FSO 模式分集接收的建模示意图。在自由空间,光束耦合进少模光纤,少模光纤中被激发的高阶模通过模式解复用器转换为基模。在光纤纤芯半径为 a 的阶跃型少模光纤中,LP 模的电场分布可以表示为

$$E(r, \phi) = \begin{cases} \frac{A}{J_l(U)} J_l\left(\frac{Ur}{a}\right) \begin{cases} \cos(l\phi) \\ \sin(l\phi) \end{cases}, & r \leq a \\ \frac{A}{K_l(W)} K_l\left(\frac{Wr}{a}\right) \begin{cases} \cos(l\phi) \\ \sin(l\phi) \end{cases}, & r > a \end{cases}, \quad (8)$$

式中: A 为常数,定义为模式功率的平方根^[17]; J_l 和 K_l 分别是 l 阶第一类贝塞尔函数和第二类修正型贝塞尔函数; U 和 W 为分别为归一化横向相位常数与衰减常数^[18]。光纤是圆柱对称波导,柱坐标系 (r, ϕ, z) 与直角坐标系 (x, y, z) 的转换关系为 $x = r \cos \phi, y =$

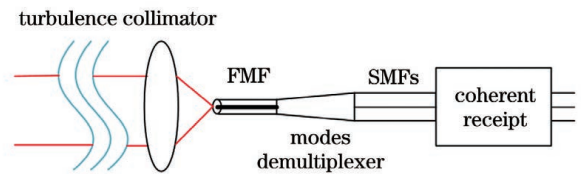


图 2 少模光纤采集 FSO 波束的建模示意图

Fig. 2 Modeling schematic for few-mode fiber (FMF) collection of free space optical communication (FSO) beam

$r \sin \phi, z = z$ 。假设圆柱上的点 M 的坐标为 (ρ, θ, z) , ρ 相当于二维极坐标中的半径, θ 是点 M 在 x - y 平面上的投影线与 x 轴正向之间的夹角, z 是点 M 到 x - y 平面的距离。当光纤纤芯和包层近似相等时, 模场分布是连续的, 即 $E(a_-) = E(a_+)$ 。由电磁场分量可得光纤模场的特征方程^[18]为

$$U \frac{J_{l+1}(U)}{J_l(U)} = W \frac{K_{l+1}(W)}{K_l(W)} \quad (9)$$

光纤支持的最大模数取决于光纤的几何形状和折射率分布, 可由对应的模式求解器模块计算得到。在弱导情况下, $LP_{l,m}$ 中的 l, m 相同时即为同一个特征方程, 这种模式称为“简并模”。一组简并模即为线性偏振模, 记为 $LP_{l,m}$ 模。对于单模光纤, 只有基本模式 LP_{01} 存在, 而两模光纤具有 LP_{01} 模式和两种简并的 LP_{11} 模式(即 LP_{11a} 和 LP_{11b} ^[17])。光纤中的归一化频率 V 定义为

$$V = \sqrt{U^2 + W^2} a = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (10)$$

式中: n_1 为光纤纤芯折射率; n_2 为包层折射率。 $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$, NA 为光纤的数值孔径。归一化频率 V 决定了光纤可传输的模式数量, V 的数值越大, 光纤可接收的模式数量就越多。当 V 值大于 2.4 时, 光纤可接收大于一种模式的光信号, 为多模光纤。本文主要讨论两模组少模光纤和单模光纤的接收性能, 因此, 所选用光纤的归一化频率 V 应满足 $2.405 < V \leq 3.832$ ^[16]。

3 仿真系统设计

图 3 是使用模式分集接收的 100 Gbit/s DP-QPSK 自由空间光传输的实验设置示意图。原始信号由伪随机码发生器(PRBS)生成后, 经串并联转换和非归零(NRZ)编码后分成两对, 分别进入两个以 1550 nm 为中心、激光线宽为 100 kHz 的单驱动 IQ 调制器。载波光源通过偏振分束器(PBS)后分为两个偏振方向(X 方向和 Y 方向)相互垂直的光波。两个 IQ 调制器分别对这两个方向的光波进行调制, 分别产生两个 25 GBaud QPSK 信号。经马赫-曾德尔干涉仪(MZM)调制后的光信号 X_I 与进行 90° 相移的光信号 X_Q 耦合为一路光信号, 得到两个偏振正交的 QPSK 信号(E_x 和 E_y), 再经过偏振合成器成为 DP-QPSK 信号进入传输链路^[19-20]。光载波进入 5 km 大气湍流信道(无线光发射孔径设置为 2 cm, 接收机孔径设置为 10 cm, 波长为 1550 nm, 信号幅值在传输过程中受大气折射率变化、光束散射和功率衰减等的影响), 之后由少模光纤接收, 接着经多模光放大器(EDFA)进行补偿, 再经过模式解复用器(将各路模式信号解出)和高斯光滤波器, 之后被送入偏振复用正交相移键控调制相干光接收机, 实现信号检测(在这一步光域信号被转化为电域信号), 然后进入数字信号处理(DSP)模块, 最后数据被采集并进行离线处理, 恢复出调制信号。表 1 列举了模拟实验中的一些参数。表 2 为实验中的大气湍流折射率结构参数。

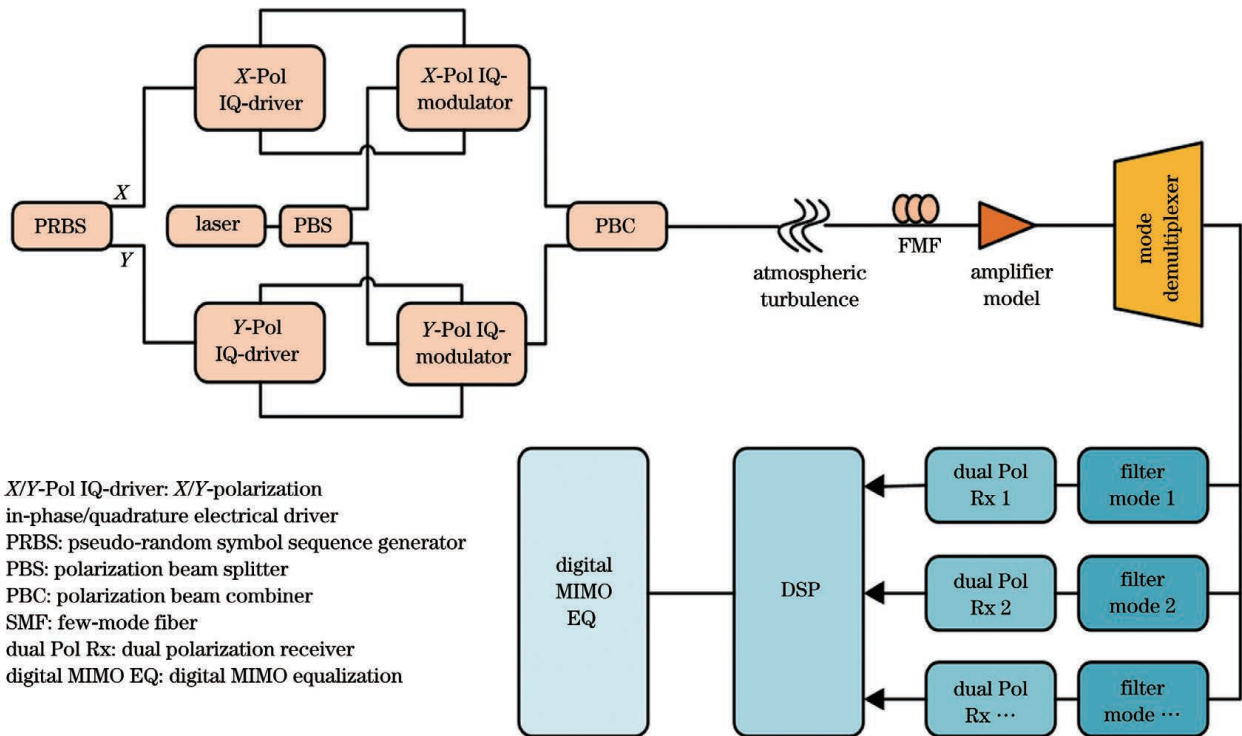


图 3 仿真系统示意图

Fig. 3 Schematic of simulation system

表 1 模拟实验中的参数
Table 1 Parameters in simulation experiment

Parameter	Value
Wavelength /nm	1550
Bit rate /($\text{Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$)	100
Sampling rate /GHz	800
Laser line width /kHz	100
Atmospheric channel length /km	5
Single/multimode fiber length /km	1
Launch waist /m	0.02
Receiver aperture diameter /m	0.10
Numerical aperture	0.1339
Core refractive index	1.4485
Value of fiber	3.8
Fiber core radius / μm	7
Supported modes	$\text{LP}_{01}, \text{LP}_{11}$
Fiber attenuation /($\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$)	0.19, 0.19
Dispersion / $[\text{ps} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km})^{-1}]$	21.1, 20.7
Differential group delay (DGD) /($\text{ps} \cdot \text{m}^{-1}$)	0, 2.1
Dual polarization transmitter insertion loss of modulator /dB	6
Dual polarization receiver insertion loss /dB	0
Dual polarization receiver responsivity of photo-diode /($\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$)	1

表 2 模拟实验中大气湍流折射率结构参数
Table 2 Refractive index structure parameters of atmospheric turbulence in simulation experiment

Turbulence condition	Refractive index structure constant C_n^2
Weak turbulence	2.1×10^{-16}
Medium turbulence	3.51×10^{-14}
Strong turbulence	2.6×10^{-13}

4 数字信号处理部分

接收到的光信号经过模式解复用后,分为承载着多个独立模态的信号。以单模态举例,接收的光信号经过偏振分束器后分成两个偏振正交的 X 光信号和 Y 光信号,接收端本振光经过偏振分束器后,得到与接收信号偏振方向相同的两个 X、Y 信号。X

偏振态本振信号与接收到的 X 偏振态光信号进行 90° 相干混频,混频后的各支路信号进行光电检测 (PIN),分为 4 路电信号 X_1, X_Q, Y_1, Y_Q [20]。相干检测得到的电信号包含了接收光信号的振幅、频率和相位信息。数字信号在仿真软件中经过低通滤波、IQ 正交性补偿、重采样、时钟恢复处理后被导出,进行离线处理。MIMO 均衡算法可以有效补偿信号损伤,因此,对上述信号离线进行一系列参数估计和补偿,其中用到的关键算法包括频偏估计、载波相位恢复、自适应 MIMO 均衡。具体步骤如图 4 所示。首先使用高斯带通滤波器进行滤波,然后对非正交的采样值估计进行补偿,使其恢复正交性,输出信号经过重采样后进入 MIMO 进行处理。采用基于 LMS 的 MIMO 均衡算法 (LMS-MIMO 算法) 对接收信号进行均衡处理,均衡处理完成后进行判决,并计算接收信号的 BER。



图 4 基于 LMS-MIMO 算法的离线处理步骤
Fig. 4 Offline processing steps based on LMS-MIMO algorithm

自适应均衡器通过一定的自适应均衡算法调整均衡器系数,使根据误差构成的代价函数最小,从而实现输出信号与期望信号的最佳匹配。LMS-MIMO 自适应

均衡器的结构如图 5 所示。少模光纤接收到三个模式的信号,每个信号有两个偏振态,分别表示为 $x_{in1}, y_{in1}, x_{in2}, y_{in2}, x_{in3}, y_{in3}$ 。每个模式的信号包含两个偏振态。

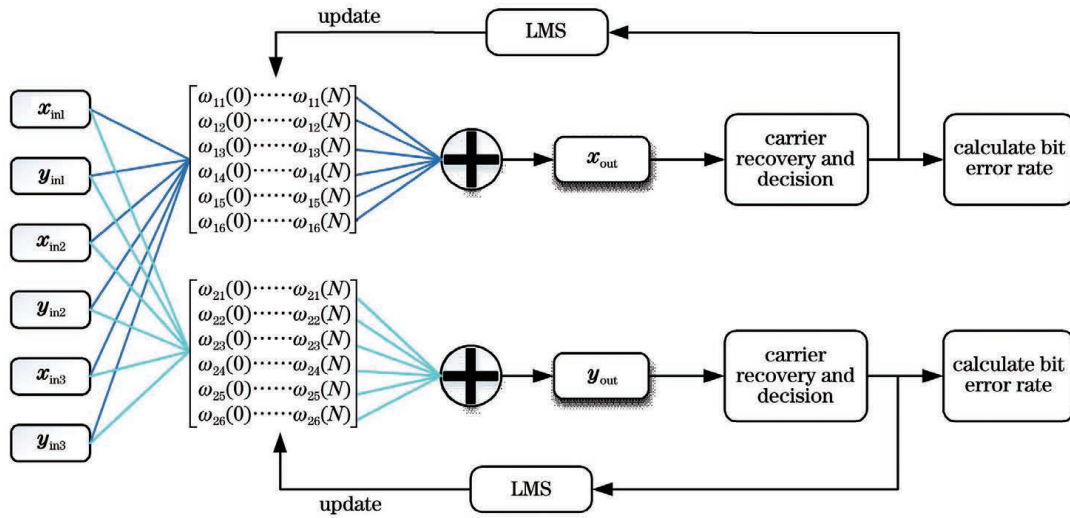


图 5 LMS-MIMO 自适应均衡器结构图

Fig. 5 LMS-MIMO adaptive equalizer structure diagram

LMS 均衡算法的主要流程如下：

- 1) 初始化均衡器系数 ω_1 和 ω_2 为
$$\begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix};$$

2) 计算均衡器输出信号

$$\begin{cases} X_{out}(n) = \{ [x_{in1}(n) & y_{in1}(n) & x_{in2}(n) & y_{in2}(n) & x_{in3}(n) & y_{in3}(n)] \omega_1 \}^T; \\ Y_{out}(n) = \{ [x_{in1}(n) & y_{in1}(n) & x_{in2}(n) & y_{in2}(n) & x_{in3}(n) & y_{in3}(n)] \omega_2 \}^T; \end{cases} \quad (11)$$

3) 计算均衡器输出信号和期望信号的误差

$$\begin{cases} e_x(n) = T_x(n) - X_{out}(n); \\ e_y(n) = T_y(n) - Y_{out}(n); \end{cases} \quad (12)$$

4) 根据误差调整均衡器参数

$$\begin{cases} \omega_1(n+1) = \omega_1(n) + \mu e_x(n) [x_{in1}(n) & y_{in1}(n) & x_{in2}(n) & y_{in2}(n) & x_{in3}(n) & y_{in3}(n)]^T; \\ \omega_2(n+1) = \omega_2(n) + \mu e_y(n) [x_{in1}(n) & y_{in1}(n) & x_{in2}(n) & y_{in2}(n) & x_{in3}(n) & y_{in3}(n)]^T; \end{cases} \quad (13)$$

式中： μ 为迭代步长。

重复步骤 2)~4)，直至达到设定的最大迭代次数或误差符合设计精度要求。

5 分析与讨论

对无湍流以及弱、中、强湍流强度下的 MIMO 模式分集相干接收 FSO 系统传输 DP-QPSK 信号的性能进行仿真验证，4 种湍流强度对应的大气湍流折射率结构参数 C_n^2 分别为 1×10^{-20} 、 2.1×10^{-16} 、 3.51×10^{-14} 和 2.6×10^{-13} 。这里主要比较同一平均发射光功率下单模光纤接收与多模式光纤空间分集接收的性能。由于训练序列的长度会影响均衡系数的大小，从而导致对接收信号判决后的精度产生影响，因此需要首先对训练序列长度进行优化。本文统计了不同训练序列长度下接收信号的均方误差 (MSE)，从而得到了 MSE 最小时所对应的训练序列长度^[13]。通过 LMS 算法确定多模接收弱、中、强湍流条件下 MIMO 算法的训练序列长度分别为 12000、18000、20000，而单模

接收弱、中、强湍流条件下的训练序列长度分别为 150000、180000、200000。在每一种湍流强度下都采集了 40 轮数据，数据序列长度约为 300000。

接下来对相同湍流强度和相同补偿光信噪比 (OSNR) 条件下单模光纤和少模光纤接收的 DSP 补偿后的效果进行比较。图 6 和图 7 为中湍流大气条件

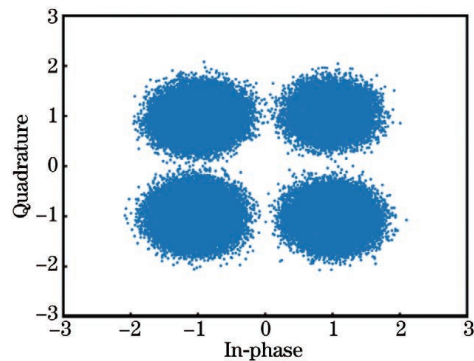


图 6 $C_n^2 = 3.51 \times 10^{-14}$ 时单模补偿后的 X 偏振态星座图
Fig. 6 Constellation of X-polarization with one mode compensation when $C_n^2 = 3.51 \times 10^{-14}$

下,单模光纤接收的 DSP 补偿后的 X 偏振态和 Y 偏振态星座图;图 8 和图 9 为中湍流大气条件下,三模光纤接收的 DSP 补偿后的 X 偏振态和 Y 偏振态星座图。分析图 6~9 可知:在中湍流强度下,当 OSNR 补偿为 12 dB 且采用单模式接收补偿时,BER 为 5.38×10^{-3} ;采用三模式接收补偿时,BER 为 3.84×10^{-3} 。通过星座图和数据对比可以发现,与传统的单模光纤相比,少模光纤的接收性能更优,接收性能得到了改善。

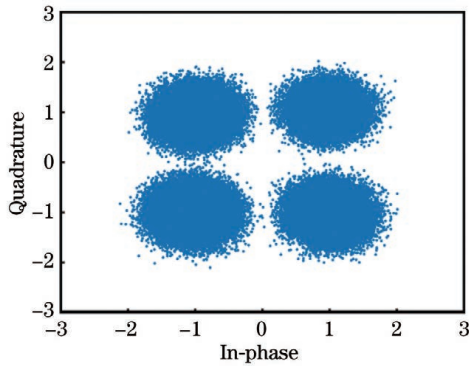


图 7 $C_n^2 = 3.51 \times 10^{-14}$ 时单模补偿后的 Y 偏振态星座图
Fig. 7 Constellation of Y-polarization with one mode compensation when $C_n^2 = 3.51 \times 10^{-14}$

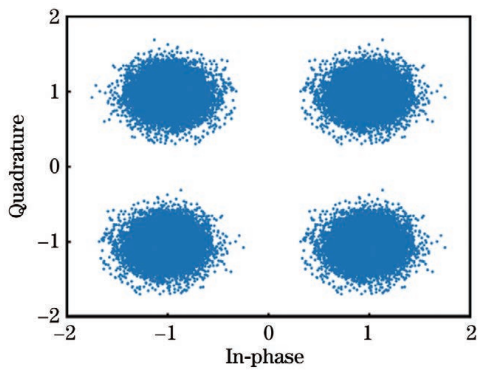


图 8 $C_n^2 = 3.51 \times 10^{-14}$ 时三模式补偿后的 X 偏振态星座图
Fig. 8 Constellation of X-polarization with three modes compensation when $C_n^2 = 3.51 \times 10^{-14}$

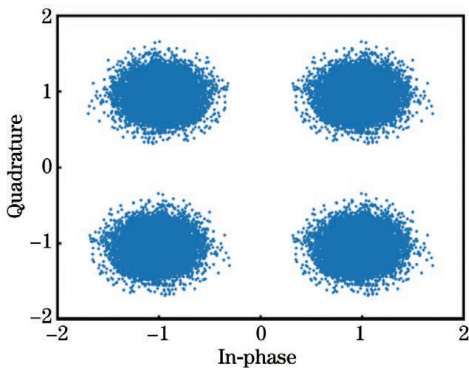


图 9 $C_n^2 = 3.51 \times 10^{-14}$ 时三模式补偿后的 Y 偏振态星座图
Fig. 9 Constellation of Y-polarization with three modes compensation when $C_n^2 = 3.51 \times 10^{-14}$

图 10 和图 11 为强湍流大气条件下单模光纤接收的 DSP 补偿后的 X 偏振态和 Y 偏振态星座图,图 12

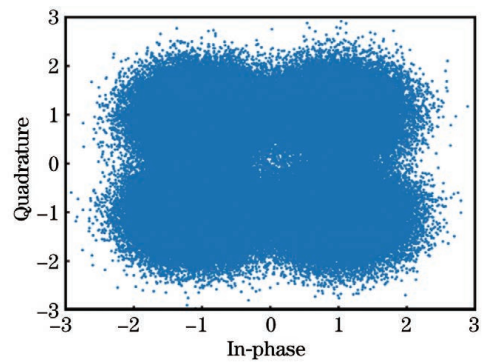


图 10 $C_n^2 = 2.6 \times 10^{-13}$ 时单模补偿后的 X 偏振态星座图
Fig. 10 Constellation of X-polarization with one mode compensation when $C_n^2 = 2.6 \times 10^{-13}$

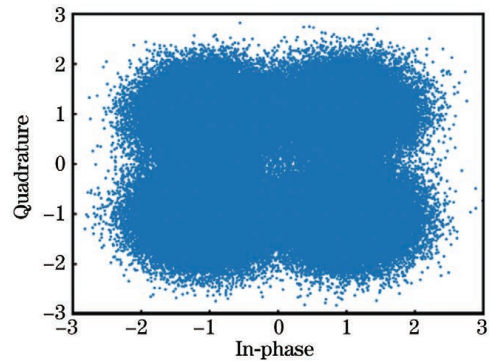


图 11 $C_n^2 = 2.6 \times 10^{-13}$ 时单模补偿后的 Y 偏振态星座图
Fig. 11 Constellation of Y-polarization with one mode compensation when $C_n^2 = 2.6 \times 10^{-13}$

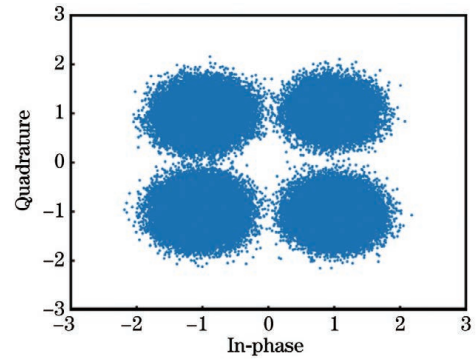


图 12 $C_n^2 = 2.6 \times 10^{-13}$ 时三模式补偿后的 X 偏振态星座图
Fig. 12 Constellation of X-polarization with three modes compensation when $C_n^2 = 2.6 \times 10^{-13}$

和图 13 为强湍流大气条件下三模光纤接收的 DSP 补偿后的 X 偏振态和 Y 偏振态星座图。分析图 10~13 可知:在强湍流强度下,当 OSNR 补偿为 15 dB 且采用单模式接收补偿时,BER 为 2.86×10^{-2} ;采用三模式接收补偿时,BER 为 6.75×10^{-3} 。通过对比可以看出,使用少模光纤接收后的信号聚集现象更明显,说明其相较于传统的单模光纤接收具有更好的补偿性能。采用少模光纤接收可以很好地补偿大气湍流效应。随着湍流强度增加,大气散射强度和光束偏移等效应增大,星座图变得模糊,经过 MIMO 算法均衡后,可以基本还原出清晰的星座图。

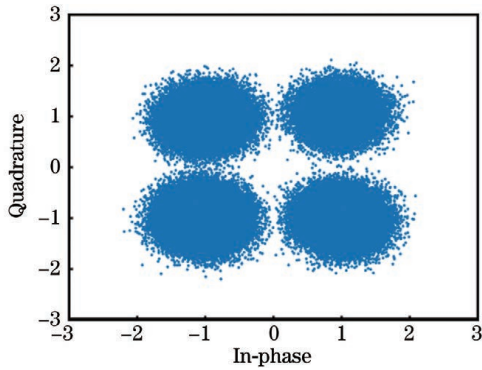


图 13 $C_n^2 = 2.6 \times 10^{-13}$ 时三模式补偿后的 Y 偏振态星座图
Fig. 13 Constellation of Y-polarization with three modes compensation when $C_n^2 = 2.6 \times 10^{-13}$

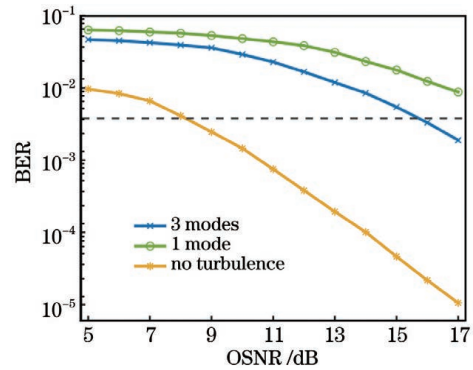


图 16 $C_n^2 = 2.6 \times 10^{-13}$ 时 OSNR 与 BER 的关系
Fig. 16 Relation diagram of OSNR and BER when $C_n^2 = 2.6 \times 10^{-13}$

图 14~16 分别给出了弱、中、强湍流条件下,单模光纤接收与多模式光纤接收后的误码性能比较,图中的虚线表示 BER 为 3.8×10^{-3} 的硬判决前向纠错 (HD-FEC) 门限。结果显示,多模接收的补偿信号可以在较低的 OSNR 条件下实现同等水平的 BER^[13]。图 14 给出了弱湍流条件下单模接收和三模接收的 MIMO 均衡后的 BER。可以看出:在 $C_n^2 = 2.1 \times 10^{-16}$ 的情况下,当 OSNR 补偿约为 8 dB 时,三模接收的 BER 达到 3.8×10^{-3} 的 HD-FEC 门限;当 OSNR

补偿为 17 dB 时,三模接收相比单模接收节省了 1.8 dB。可见,弱湍流情况下的三模接收性能优于无湍流情况下的接收性能(这里的无湍流采用单模接收)。图 15 给出了中湍流条件下,单模接收和三模接收的 MIMO 均衡后的 BER。在 $C_n^2 = 3.51 \times 10^{-14}$ 的情况下,当 OSNR 补偿为 12 dB 时,三模接收的 BER 达到 3.8×10^{-3} 的 HD-FEC 门限;当 OSNR 补偿为 17 dB 时,三模接收相比单模接收节省了 2.5 dB。图 16 显示了强湍流的条件下单模接收和三模接收的 MIMO 均衡后的 BER。在 $C_n^2 = 2.6 \times 10^{-13}$ 的情况下,当 OSNR 补偿为 16 dB 时,三模接收的 BER 达到了 3.8×10^{-3} 的 HD-FEC 门限;当 OSNR 补偿为 17 dB 时,三模接收相比单模接收节省了 3.0 dB,三模接收性能优于单模接收性能。在 OSNR 补偿相同的条件下,三模接收的 BER 远低于单模接收的 BER。实验结果表明,随着湍流强度增大,空间多样性和数字相干结合能更有效地减轻各向异性湍流的影响,MIMO 均衡算法的补偿能力提升。

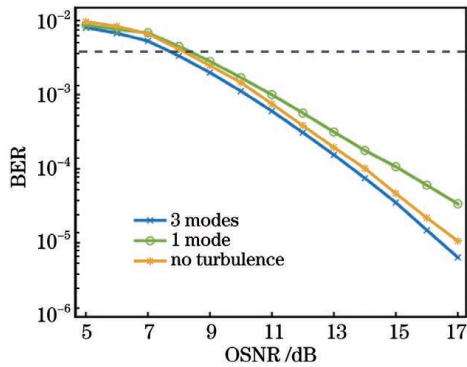


图 14 $C_n^2 = 2.1 \times 10^{-16}$ 时 OSNR 与 BER 的关系
Fig. 14 Relation diagram of optical signal-to-noise ratio (OSNR) and bit error rate (BER) when $C_n^2 = 2.1 \times 10^{-16}$

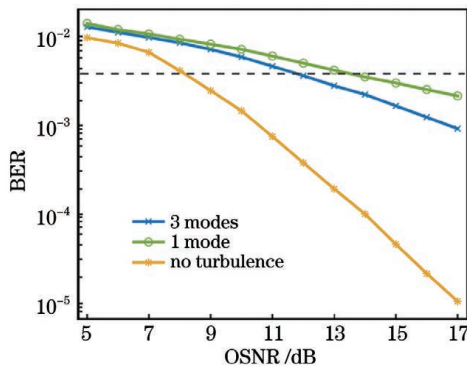


图 15 $C_n^2 = 3.51 \times 10^{-14}$ 时 OSNR 与 BER 的关系
Fig. 15 Relation diagram of OSNR and BER when $C_n^2 = 3.51 \times 10^{-14}$

6 结 论

本文提出了一种基于少模光纤 MIMO 模式分集相干接收的自由空间光传输系统。通过仿真建立模式分集接收的 100 Gbit/s DP-QPSK 自由空间光传输实验设置,对比少模分集接收方案和单模接收方案的性能。仿真结果表明,在弱、中、强三种湍流情况下,采用两模组补偿条件,将 LMS-MIMO 算法与少模光纤接收相结合,可使系统性能分别提高 1.8 dB、2.5 dB、3 dB。这说明 LMS-MIMO 算法在不同湍流强度下都能够很好地补偿信号损伤。本工作验证了利用少模光纤接收可以实现比利用单模光纤接收更好的接收效果。未来拟研究不同湍流强度下最优接收的模式数量,以及改进 MIMO 均衡或引用机器学习等算法对大气湍流系统进行补偿和创新。

参 考 文 献

[1] Huang Y T, Huang H Z, Chen H S, et al. Turbulence-resistant free-space optical communication using mode diversity preamplification and reception [C] // Conference on Lasers and

- Electro-Optics, May 9-14, 2021, San Jose, California. Washington, D.C.: OPTICA, 2021: SM4A.4.
- [2] 柯熙政, 吴加丽, 杨尚君. 面向无线光通信的大气湍流研究进展与展望[J]. 电波科学学报, 2021, 36(3): 323-339.
Ke X Z, Wu J L, Yang S J. Research progress and prospect of atmospheric turbulence for wireless optical communication[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(3): 323-339.
- [3] Yu Y L, Liaw S K, Chou H H, et al. A hybrid optical fiber and FSO system for bidirectional communications used in bridges[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 7905509.
- [4] 涂佳静, 李朝晖. 空分复用光纤研究综述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106003.
Tu J J, Li Z H. Review of space division multiplexing fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106003.
- [5] 郝晓明. 面向模式分集空间光通信系统的数字信号处理算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
Hao X M. Digital signal processing algorithm for mode diversity space optical communication system [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [6] Arikawa M, Ito T. Performance of mode diversity reception of a polarization-division-multiplexed signal for free-space optical communication under atmospheric turbulence [J]. Optics Express, 2018, 26(22): 28263-28276.
- [7] Kumar N, Khandelwal V. Simulation of MIMO-FSO system with Gamma-Gamma fading under different atmospheric turbulence conditions [C] // 2019 International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC), March 7-9, 2019, Noida, India. New York: IEEE Press, 2019: 117-124.
- [8] Li L, Song H Q, Zhang R Z, et al. Demonstration of both mode and space diversity in a 100-Gbit/s QPSK free-space optical link to increase system tolerance to turbulence [C] // 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [9] Krimmer J, Füllner C, Freude W, et al. Statistical analysis of free-space-to-fiber coupling under atmospheric turbulence [C] // OSA Advanced Photonics Congress (AP) 2020 (IPR, NP, NOMA, Networks, PVLED, PSC, SPPCom, SOF), July 13-16, 2020, Washington, DC. Washington, D.C.: OSA, 2020: NeM4B.3.
- [10] Malik S, Sahu P K. Assessment of the FSO communication system using adaptive and MIMO MPPM with pointing errors and an atmospheric turbulence channel [J]. Applied Optics, 2021, 60(6): 1719-1728.
- [11] 朱子岳, 赵梦鑫, 张一尘, 等. 高速 IM-DD 模分复用通信系统中基于神经网络的 MIMO 均衡技术[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1406003.
Zhu Z Y, Zhao M X, Zhang Y C, et al. MIMO equalization technology based on neural network in high-speed IM-DD mode division multiplexing transmission system [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1406003.
- [12] 王建英, 殷洪玺, 季秀阳, 等. 采用 mQAM 和孔径平均的水下弱湍流 MIMO 系统性能分析[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1901002.
Wang J Y, Yin H X, Ji X Y, et al. Performance analysis of MIMO UWOC systems with weak turbulence channels using mQAM and aperture averaging [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1901002.
- [13] 郝晓明, 全薇, 吴平, 等. 基于模式分集的大气湍流补偿技术研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2020, 38(3): 250-257.
Hao X M, Quan W, Wu P, et al. Simulation of atmospheric turbulence compensation system based on mode division multiplexing [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2020, 38(3): 250-257.
- [14] 陈丹, 鲁萌萌, 刘艳蓉. 湍流信道下指向误差对自适应副载波调制性能的影响[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 2206004.
Chen D, Lu M M, Liu Y R. Effect of pointing error on adaptive subcarrier modulation performance in turbulent channel [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 2206004.
- [15] Al-Habash A, Andrews L C, Phillips R L. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media [J]. Optical Engineering, 2001, 40: 1554-1562.
- [16] 王芳璧. 少模光纤模分复用系统均衡技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
Wang F B. Research on equalization technology of mode division multiplexing system based on few mode fiber [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [17] Zheng D H, Li Y, Zhou H H, et al. Performance enhancement of free-space optical communications under atmospheric turbulence using modes diversity coherent receipt [J]. Optics Express, 2018, 26(22): 28879-28890.
- [18] 吴泳佳. 卫星光通信中少模光纤耦合效率的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
Wu Y J. Research on coupling efficiency of few mode fibers in satellite optical communication [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [19] Yu Y, Yin H W, Huang Z P. Simulation study of DP-QPSK coherent detection transmission system based on Optisystem [J]. Optics and Photonics Journal, 2020, 10(6): 134-140.
- [20] 郭显成, 陈坤. DP-QPSK 相干光传输系统性能分析[J]. 信息通信, 2018, 31(4): 52-54.
Guo X C, Chen K. Performance analysis of DP-QPSK coherent optical transmission system [J]. Information & Communications, 2018, 31(4): 52-54.

Free-Space Optical Communication Atmospheric Turbulence Compensation Based on Multiple Input Multiple Output Mode Diversity Coherent Reception

Yin Han^{1,2*}, Song Yingxiong^{1,2}, Li Yingchun^{1,2*}, Chen Song^{1,2}, Huang Yetian^{1,2}

¹Key Laboratory of Special Optical Fiber and Optical Access Network, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract

Objective Free-space optical communication has a high communication rate, large capacity, good confidentiality, small size, light weight, low power consumption, and strong anti-interference ability. An instantaneous deployment or setup of

a mobile platform communication system is possible. The invention of high-power light sources overcomes the issue of optical signal attenuation in mild weather. Atmospheric turbulence can result in beam drift, beam expansion, light intensity flicker, angle of arrival fluctuation, and other influences, especially at a distance of 1 km or more, which will increase the bit error rate of the link, degrading the communication performance. For a free-space optical communication system, adaptive optical compensation, coherent reception, mode diversity reception, and other technologies have been studied to reduce the impact of atmospheric turbulence. More optical signals can be coupled into the fiber as unrelated signals, and the orthogonality of the mode can conduct diversity reception using multiaperture and multimode fiber for signal acquisition. In this study, we first introduce the turbulent atmospheric channel and the Gamma-Gamma model. We derive the electric field distribution, coupling efficiency, and normalized cutoff frequency of the few-mode fiber receiving under weak conductance. Second, we establish the simulation system of 100 Gbit/s DP-QPSK free-space optical transmission with mode diversity reception and use the LMS-MIMO (multiple input multiple output based on least mean square) equalization algorithm for digital processing. We hope that our experimental results can be helpful for the study of using mode diversity receiver technology in atmospheric turbulence.

Methods In this study, an experimental system of 100 Gbit/s DP-QPSK free-space optical transmission with mode diversity was set up. First, the optical carrier passed through the atmospheric channel and was received using few-mode fiber. Using independent transmission of signals in different modes, the few-mode fiber could transmit more signals. Additionally, the mode multiplexed signals transmitted in the few-mode fiber were damaged by mode coupling, differential group delay, and so on. The equalization of different mode signals at the receiving end was equivalent to a multiple input and multiple output system. The equalization of signals at the receiving end was MIMO equalization. Therefore, the digital single processing (DSP) part adopts a butterfly filter to construct the LMS-MIMO algorithm for dynamic equalization.

Results and Discussions The system's performance was simulated and verified, and the performance of single-mode fiber receiving and multimode fiber spatial diversity receiving at the same transmitting power was compared. First, the LMS algorithm was used to determine the training sequence length of the MIMO algorithm under weak, medium, and strong turbulence receiving conditions of multimode and single-mode fiber. Secondly, under the same turbulence intensity, the bit error rate of single-mode fiber reception and few-mode fiber reception and processing is compared. The experimental results show that few-mode fiber reception can achieve the same level of bit error rate under low optical signal-to-noise ratio compensation condition. Figs. 6–9 show the constellation diagram under the condition of medium turbulence atmosphere; Figs. 10–13 show the constellation diagram under the condition of strong turbulence atmosphere. As can be seen from the figure, single-mode optical fiber reception has a good compensation effect on atmospheric turbulence effect. The constellation map becomes fuzzy with the increase of turbulence intensity due to increased atmospheric scattering intensity, beam offset, and other effects. After balancing with MIMO algorithm, the clear constellation map was basically restored. Further, we compared the performance of single-mode fiber receiving and multimode fiber receiving under weak, medium, and strong turbulence conditions. In the case of weak, medium, and strong turbulence, the optical signal-to-noise ratio (OSNR) compensation costs of the three modes were 1.8 dB, 2.5 dB, and 3.0 dB (Fig. 14–16), respectively, indicating that the LMS-MIMO algorithm can compensate for signal damage well under different turbulence intensities.

Conclusions In this study, a free-space optical transmission system based on MIMO mode diversity coherent reception is proposed. The experimental setup of 100 Gbit/s DP-QPSK free-space optical transmission with mode diversity is established by simulation, and the performance of the scheme with less mode diversity and the scheme with single-mode diversity is compared. Simulation results show that the system's performance is improved by 1.8 dB, 2.5 dB, and 3.0 dB, respectively, under weak, medium, and strong turbulence conditions. It shows that the LMS-MIMO algorithm can compensate for signal damage well under different turbulence intensities. This work verifies that the receiving effect of few-mode fiber is better than that of single-mode fiber. To develop and innovate the atmospheric turbulence system, the ideal number of reception modes under various turbulence intensities will be investigated in the future, along with improved MIMO equalization and introducing machine learning methods.

Key words optical communication; atmospheric turbulence; Gamma-Gamma model; few-mode fiber; multiple input multiple output