动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022052801

大气湍流对基于轨道角动量的自由空间光通信影响及解决方案综述

卜 洋[1]，杨 志[1]，赵丽娟[1,2]*，徐志钮[1]

（华北电力大学 1. 电气与电子工程学院；2. 河北省电力物联网技术重点实验室，河北 保定 071003）

摘 要： 基于轨道角动量(OAM)的自由空间光通信(FSOC)具有通信容量大、信息传输快等优点。FSOC系统以大气作为传输媒介，受大气吸收、散射等影响，OAM光束传输质量严重下降。从OAM复用技术和大气湍流模型出发，综述了大气湍流强度对OAM空间光通信系统传输误码率和信道容量影响的研究现状，在此基础上综述多入多出均衡技术及自适应光学技术研究现状，并分析比较了两种技术中不同算法对大气湍流影响的抑制效果，对技术发展现状进行了展望。

关键词： 自由空间光通信；轨道角动量；大气湍流；影响因素

中图分类号： TN929.11 **文章编号：** 1001－5868(2022)06－1099－10

Influence of Atmospheric Turbulence on Free Space Optical Communication Based on Orbital Angular Momentum and Solutions：A Review

BU Yang[1]，YANG Zhi[1]，ZHAO Lijuan[1,2]，XU Zhiniu[1]

（1. School of Electrical and Electronic Engineering，North China Electric Power University，Baoding 071003，CHN；
2. Hebei Key Lab. of Power Internet of Things Technology，North China Electric Power University，Baoding 071003，CHN）

Abstract： Free space optical communication (FSOC) based on orbital angular momentum (OAM) has the advantages of large communication capacity and fast information transmission. The FSOC system uses the atmosphere as the transmission medium，which will be affected by atmospheric absorption and scattering. As a result，the transmission quality of the OAM beam is seriously degraded. Based on the theory of OAM multiplexing technology and atmospheric turbulence model，this paper analyzed the influence of different turbulence intensities on the bit error rate and channel capacity of OAM beam transmission，and analyzed the research status of the mitigation effect on atmospheric turbulence by introducing multiple-input multiple-output equalization technology and adaptive optics technology respectively into FSOC system. The inhibition effects of different algorithms in the two technologies were compared and analyzed，and the technology development status was summarized and prospected.

Key words： FSOC；OAM；atmospheric turbulence；influencing factors

0 引言

自由空间光通信(Free Space Optical Communication，FSOC)系统是以大气作为传输介质的新一代通信系统，与传统的光纤通信、移动通信相比，具有可重部署能力强、抗电磁干扰性好、保密性好、传输速度快等优点。但目前FSOC系统的信息传输安全性、通信系统容量已经逐渐不能满足人们日益增长的需求[1]。因此复用技术广泛应用于光通信系统中，除了已有的波分复用、模分复用外，轨

收稿日期：2022－05－28.
基金项目：国家自然科学基金项目(62171185，62273146)；河北省自然科学基金项目(E2019502177，E2020502010)；河北省省级科技计划项目(SZX2020034)；中央高校基本科研业务费专项项目(2021MS072).
* **通信作者：**赵丽娟 **E-mail：** hdzlj@126.com

道角动量(Orbital Angular Momentum,OAM)复用作为一种新兴的复用形式,因与光波的波长、时隙、振幅特性一样,并且具有相互正交性,所以为提高光通信的速率和容量提供了一种全新的方法。

然而,基于 OAM 复用的 FSOC 系统不可避免地会受到大气湍流的干扰。OAM 复用光束在大气湍流中传输时产生的串扰主要来自两方面:一是大气湍流对不同拓扑荷数光束之间正交性的破坏;二是原始的光束能量由于受到湍流的影响会发生能量衰减,且大气中温度和压力的不均匀导致传输路径折射率不均匀,使相邻 OAM 光束之间能量发生弥散现象。同时,OAM 复用光束在大气湍流传输过程中,每一个 OAM 光束可能会受到串扰拓展出新的光束,而通信系统接收端并不具备自动识别和滤除非发射光束模式的功能,所以系统会产生串扰[2-4],导致复用通信系统变得更加复杂[5-10],因此缓解 OAM 复用光束经过大气湍流信道受到的影响变得尤为重要。

本文从 OAM 复用和大气湍流模型出发,并根据实际模型建立情况对大气湍流模型进行选择,综述不同大气湍流强度对 OAM 空间光通信系统传输误码率和信道容量的影响。目前,FSOC 系统中缓解大气湍流影响的方法有很多,本文综述了多入多出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)均衡技术和自适应光学(Adaptive Optics, AO)技术研究现状,并分析比较了两种技术中不同算法对大气湍流影响的抑制效果,对技术发展现状进行了展望。

1 轨道角动量复用

OAM 复用能够利用其本身的正交特性,将不同拓扑荷数的 OAM 光束复合到一起,并将多路信号加载到一起,从而提高信道容量和传输速率[11]。文献[12]详细介绍了 OAM 复用的调制、复用和解调。OAM 能够获得电磁涡旋波,因此在正常电磁波上添加一个方位角为 θ 的旋转因子 $e^{jl\theta}$,得到表达式为

$$U(r,\theta)=U(r)\exp(\mathrm{j}l\theta) \tag{1}$$

式中,$U(r)$代表正常电磁波的幅度值,r 代表到中心轴的径向距离,l 代表 OAM 光束拓扑荷数,j 为虚数单位。

拉盖尔-高斯模式的 OAM 光束在柱坐标系下沿 Z 轴传播方向的电场表达式为

$$U(r,\theta,z)=\sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|l|)!}}\frac{1}{\omega(z)}\left[\frac{r\sqrt{2}}{\omega(z)}\right]^{|l|}\times L_p^l\left[\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right]\exp\left[\frac{-\mathrm{j}kr^2z}{2(z^2+z_\mathrm{R}^2)}\right]\times\exp\left[\mathrm{j}(2p+|l|+1)\tan^{-1}\frac{z}{z_\mathrm{R}}\right]\exp(-\mathrm{j}l\theta) \tag{2}$$

式中,$k=2\pi/\lambda$ 为波数,λ 为波长;当 l 为 0 时,$U(r,\theta,z)$为零阶高斯光,z 为光束传输距离,$z_\mathrm{R}=\pi\omega_0/\lambda$ 为瑞利距离,$\omega(z)$代表束腰半径;$L_p^l(\cdot)$为连带拉盖尔多项式,p 为自旋角动量模式数。按照以上原理,产生 OAM 光束。

具有不同拓扑荷数的 OAM 光束满足以下正交性,如式(3)所示[13]:

$$\begin{aligned}&(U_n(r,\theta,z),U_m(r,\theta,z))=\\&\iint U_n(r,\theta,z)U_m^*(r,\theta,z)r\mathrm{d}r\mathrm{d}\phi=\\&\begin{cases}0,\forall\, l_n\neq l_m\\\iint|U_n(r,\theta,z)|^2r\mathrm{d}r\mathrm{d}\theta,l_n=l_m\end{cases}\end{aligned} \tag{3}$$

其中,$U_\mathrm{m}^*(r,\theta,z)$为 $U_\mathrm{m}(r,\theta,z)$的复共轭,利用 OAM 正交性的特点,将信息加载到 OAM 光束上,多束不同拓扑荷数的 OAM 光束复用在一起传输,实现 OAM 复用,复用形式为

$$S(t)=s_1(t)U_1+s_2(t)U_2+s_3(t)U_3+\cdots \tag{4}$$

其中,$S(t)$为携带信息的 OAM 复用光束表达形式。在接收端,由于 OAM 自身具有的正交性,可通过式(5)提取出相应的信息:

$$s_n(t)=(S(t),U_n)\begin{cases}n=m,\int U_nU_m^*=\int|U_n|^2\\n\neq m,\int U_nU_m^*=0\end{cases} \tag{5}$$

其中,$s_\mathrm{n}(t)$代表加载的信息,U_n 表示不同的 OAM 态。信号通过调制加载到 OAM 光束上,第 n 路携带信息的 OAM 光,如式(6)所示:

$$U_{n\mathrm{OAM}}(r,t)=s_n(t)U(r)\exp(\mathrm{j}l_n\theta) \tag{6}$$

其中,l_n 为第 n 路的 OAM 光的拓扑荷数,$\exp(\mathrm{j}l\theta)$是高斯光添加的螺旋光相位,为简化表达式 $U(r,\theta,z)$用 $U(r)$代替。各路 OAM 的拓扑荷数不同,因此 N 路携带信息的 OAM 光复合在一起,得到复合光束,如式(7)所示:

$$U_\mathrm{MUX}(r,\theta,t)=\sum_{n=1}^{N}s_n(t)U(r)\exp(\mathrm{j}l_n\theta) \tag{7}$$

经过大气湍流后,得到以下表达式:

$$U_\mathrm{MUX}^{Rx}(r,\theta,t)=\sum_{j=1}^{N}s'_n(t)U'(r)\exp(\mathrm{j}l_n\theta) \tag{8}$$

其中，$s'_n(t)$，$U'(r)$分别是 $s_n(t)$，$U(r)$经过大气湍流影响后的信号和光场。

在接收端，通过逆向空间相位掩膜 $\exp(-\mathrm{j}l_n\theta)$ 对携带信息的复用 OAM 光束进行解复用，得到解复用后第 n 路信号，如式(9)所示：

$$x_n(t)=\int U_{\mathrm{MUX}}^{Rx}(r,\theta,t)U_n(r)\exp(-\mathrm{j}l_n\theta)r\,\mathrm{d}r\,\mathrm{d}\theta=$$

$$s'_n(t)U'(r)U_n(r)+\int\sum_{i=1,i\neq n}^{N}s'_i(t)U'(r)U_n(r)\times$$

$$\exp(\mathrm{j}l_i\theta-\mathrm{j}l_n\theta)=s'_n(t)U'(r)U_n(r) \tag{9}$$

2 大气湍流信道模型

在大气湍流建模过程中，建立完善全面的大气湍流功率谱模型，对于研究大气湍流有着重要的作用，可以更加有效地证明大气湍流模型的真实性，以此证明提出方法在模拟湍流下的有效性。常见的大气湍流模型有 Kolmogorov 幂律谱、Tatarskii 谱、Von Karman 光谱和修正大气谱等。

最初 Kolmogorov 幂律谱因其表述简单，被广泛用于理论计算，其表达式为

$$\Phi_n(k)=0.033C_n^2k^{-11/3},1/L_0\ll k\ll 1/l_0 \tag{10}$$

其中，n 为折射率，$\Phi_n(k)$为湍流模型表达符号，C_n^2 为折射率结构常数，其取值可以反映出湍流的强度，L_0 为大气湍流外尺度，l_0 为大气湍流内尺度。理论上，此模型建立只在 $1/L_0\leqslant k\leqslant 1/l_0$ 的惯性区域内成立，为了扩大其应用范围，通常假定 L_0 无穷大，l_0 无穷小。

当内外尺度不能忽略时，Kolmogorov 幂律谱不再适用，因此 Tatarskii 引入高斯函数，得到 Tatarskii 谱[14]，其表达式为

$$\Phi_n(k)=0.033C_n^2k^{-11/3}\exp\left(-\frac{k^2}{k_m^2}\right),k\gg 1/l_0 \tag{11}$$

其中，$k_m=5.92/l_0$。在实际情况下，通常会将 Kolmogorov 谱模型和 Tatarskii 加以改进，使其在 $k<1/L_0$ 条件下也是均匀和各向同性的，改进 Tatarskii 谱模型如式(12)所示：

$$\Phi_n(k)=\begin{cases}0.033C_n^2(k^2+k_0^2)^{-11/6},0\leqslant k\ll 1/l_0\\ \dfrac{0.033C_n^2\exp(-k^2/k_m^2)}{(k^2+k_0^2)^{11/6}},0\leqslant k<\infty\end{cases} \tag{12}$$

其中，$k_0=2\pi/L_0$(或 $k_0=1/L_0$)，式(12)第一个公式符合大气基本 Kolomogorov $-5/3$ 光谱衰减规律，也被称为 Von Karman 光谱，成为很多空间光通信研究中的湍流模型。

重庆邮电大学王洋[15]、上海大学邵蔚[16]及西安电子科技大学张艳[17]等选择基于修正的 Von Karman 折射率功率谱，采用功率谱反演法模拟大气湍流相位屏，折射率功率谱模型表达式为[18]

$$\Phi_n(k)=0.033C_n^2k^{-11/3}\exp\left(-\frac{k^2}{k_m^2}\right)(k^2+k_0^2)^{-11/6} \tag{13}$$

其中，$k_0=2\pi/L_0$，$k_m=5.92/l_0$，$k=\sqrt{k_x^2+k_y^2}$，k_x 和 k_y 分别为 x 和 y 轴方向上的频率波数谱。根据折射率功率谱可以得到大气湍流相位功率谱，如式(14)所示：

$$\Phi_\varphi(k)=2\pi k^2\Delta z\Phi_n(k) \tag{14}$$

其中，$\Phi_\varphi(k)$代表大气湍流相位谱，Δz 代表两个随机相位屏之间的距离。采用功率谱反演法模拟随机相位屏构建一个复高斯随机矩阵 $h(k_x,k_y)$，随后用大气湍流相位谱对随机矩阵进行滤波后再做傅里叶变换，最终得到大气随机相位表达式：

$$\varphi(x,y)=\sum_{k_x}\sum_{k_y}h(k_x,k_y)\sqrt{\Phi_\varphi(k)}\times$$

$$\exp(\mathrm{j}(k_xx+k_yy))\Delta k_x\Delta k_y \tag{15}$$

其中，$\varphi(x,y)$为大气随机相位表达符号，Δk_x 和 Δk_y 表示 x 和 y 轴上的空间频率间隔，拉盖尔高斯光束在大气湍流传输过程中，可以等效为光束在真空与随机相位屏之间的迭代。

3 大气湍流对多 OAM 态传输性能的影响

由于大气湍流系统传播环境极其复杂，当携带信息的 OAM 复用光束在大气湍流系统中传输时，噪声会对光束产生影响。大气湍流对 OAM 复用光束产生影响主要表现在两方面，一是不同拓扑荷数的 OAM 光束之间受到干扰产生串扰，二是同一 OAM 光束上携带的信息发生码间串扰，从而导致误码率提高。因此本节综述了大气湍流强度对 OAM 空间光通信系统传输误码率和信道容量影响的研究现状，对完善 FSOC 系统性能提升方案有重要意义。

3.1 湍流强度对误码率的影响

在进行系统性能分析时，2018 年，西安理工大学柯熙政[19-20]及宁川[21]都研究了 OAM 复用光束在弱湍流下传输时和中强湍流下传输时系统中各路光束的误码率情况，图 1 和图 2 分别为大气湍流强

度 $C_n^2=1\times10^{-17}$ $m^{-2/3}$ 和 $C_n^2=5\times10^{-14}$ $m^{-2/3}$ 时，OAM 复用系统接收端信号误码率(P_e)随传输距离(z)的变化情况。其中束腰半径 $\omega_0=5$ mm，波长 $\lambda=1\,550$ nm，OAM 光束拓扑荷数分别为 2，4，6，8。系统仿真过程采用正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying，QPSK)方式进行调制，通过加性噪声与 Gamma-Gamma 分布下的乘性噪声之和来模拟大气信道中的噪声[22]。

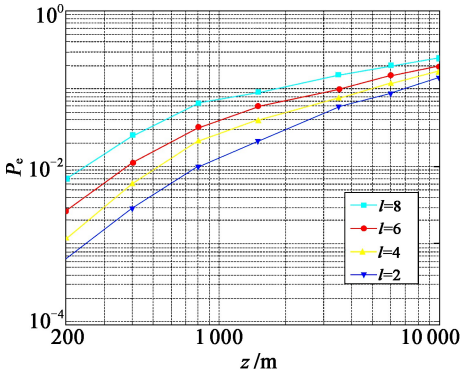


图 1 $C_n^2=7.5\times10^{-17}$ $m^{-2/3}$ 时误码率随传输距离变化情况

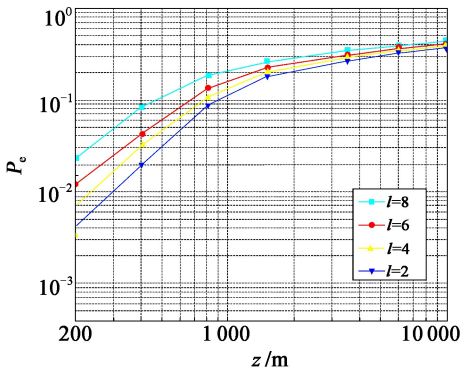


图 2 $C_n^2=2.5\times10^{-15}$ $m^{-2/3}$ 时误码率随传输距离变化情况

根据大气湍流对系统误码率影响的研究，可以通过图 1、图 2 曲线观察到，在弱湍流下，系统传输距离越长串扰越严重，在传输距离增大到 10 000 m 时，误码率会达到 0.2 以上。在中强湍流下，OAM 受到的串扰会在光束传播到一定距离后饱和，当系统传输距离增大到 10 000 m 时，误码率达到 0.4 以上，并且在同一湍流强度下，OAM 态的拓扑荷数越大，系统误码率越大[19]。

3.2 湍流强度对信道容量的影响

在湍流强度对误码率影响的研究的基础上，信道容量对空间光通信系统性能影响的研究具有潜在意义。2017 年，北京邮电大学的包媛媛通过数值仿真分析研究了不同湍流强度和传输距离下的误比特率和信道容量，分析了大气湍流效应对多态 OAM 传输性能的影响[23]。2020 年，中国科学技术大学的吴琰分析了不同大气条件对 FSOC 系统误码率、信道容量和中断概率的影响[24-25]，吉林大学的李晓燕基于逆向调制情况下分析了不同信道下的信道容量情况[26]。针对以上研究，做出如下分析，当大气湍流强度分别为 $C_n^2=1\times10^{-17}$ $m^{-2/3}$(弱)，$C_n^2=5\times10^{-16}$ $m^{-2/3}$(中)和 $C_n^2=1\times10^{-15}$ $m^{-2/3}$(强)时，通过系统信噪比变化情况，分析不同拓扑荷数 OAM 光束对系统信道容量的影响，结果如图 3～5。图中，P 为发射信号功率，N 为噪声功率，P/N 为 FSOC 系统信噪比。由图 3～5 曲线可知，当多 OAM 态的传输环境是在弱湍流的情况下，对其传输性能的影响比较小，不同拓扑荷数 OAM 光束之间的系统信道容量变化差别不大。当湍流的强度变为中湍流时，虽不同拓扑荷数的 OAM 光束的系统信道容量均会随信噪比增大而增大，但变化趋势相差不大，并最终达到饱和状态。当湍流的强度变为强湍流时，系统信道容量随着信噪比的增大逐渐出现了明显的差别。因此，可以得出结论，当系统信息在弱湍流和中湍流情况下传输时，系统性能受到影响较小。系统传输信息在强湍流情况下传输时，系统性能受到大气湍流的影响过于严重，显著降低了系统信息传递的准确性。

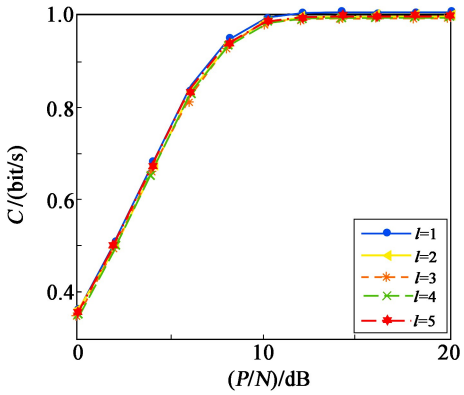


图 3 $C_n^2=1\times10^{-17}$ $m^{-2/3}$ 时信噪比对信道容量的影响

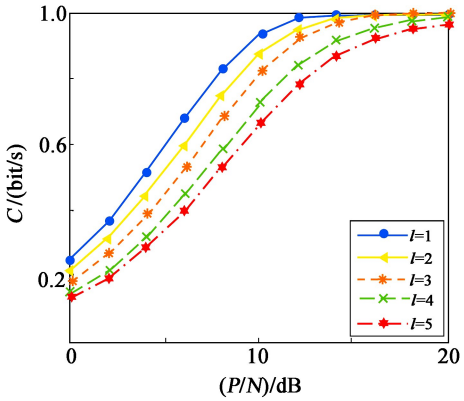


图 4 $C_n^2=5\times10^{-16}$ $m^{-2/3}$ 时信噪比对信道容量的影响

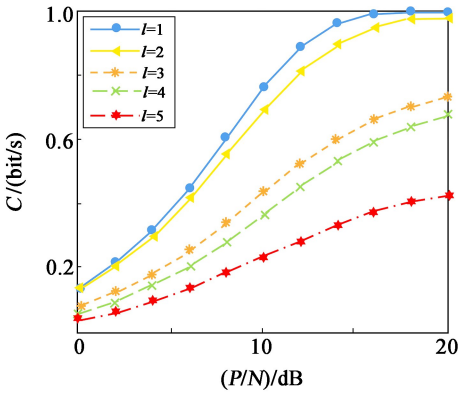


图 5　$C_n^2=1\times10^{-15}$ m$^{-2/3}$ 时信噪比对信道容量的影响

4　缓解大气湍流影响方案

本文选择的缓解大气湍流影响方案为基于 MIMO 均衡的 OAM 复用大气湍流干扰抑制方案和基于 AO 技术的波前校验方法。本节分别综述了 MIMO 均衡技术及 AO 技术发展现状，并分析比较了两种技术中不同算法对大气湍流影响的抑制效果，对技术发展现状进行了展望。

4.1　基于 MIMO 均衡的轨道角动量复用大气湍流干扰抑制方案

4.1.1　MIMO 均衡技术

MIMO 技术，即多路输入和多路输出技术，目前信号在传输过程中存在的多径效应和高斯白噪声，以及不同信道之间信号串扰等因素，都会使传输信号受到损耗。在多径衰落的空间光通信传输条件下，利用复用时间分集和空间编码等手段，能够极大提升通信系统的信道容量和可靠性，大大降低系统的误码率[27]。

无线通信系统的传播环境比较复杂，会产生多径效应使传播信号产生码间串扰，而均衡技术能够有效消除码间串扰。OAM 复用通信系统所受到的大气湍流影响类似于散射环境对MIMO无线通信系统的影响，均对信号的幅度、相位产生影响。大气湍流对 OAM 复用通信系统产生的串扰类似于 MIMO 无线通信系统的码间串扰，而信道均衡技术能够有效抑制 MIMO 无线通信系统的码间串扰。因此，研究基于 MIMO 均衡抑制串扰的方法，将会是降低大气湍流对基于 OAM 的自由空间光通信系统影响的有效手段之一。

4.1.2　MIMO 均衡技术算法研究

MIMO 均衡抑制方法是针对无线通信系统由多径效应引起码间串扰的有效抑制方法，能够利用多径衰落来增加数据传输速率以及减少信道衰落对信号传输的影响，提高系统容量[17]。2014 年，Huang 等使用 4×4 MIMO 均衡器，并利用外差检测的方法抑制大气湍流对 4 路 OAM 复用系统的干扰，其中 MIMO 均衡使用了盲自适应恒模(Constant Module Algorithm，CMA)算法[28]，并且利用 4×4 MIMO 技术和外差检测实现了自由空间 4 路 OAM 模式复用技术，其中每路 OAM 光束携带 20 Gbit/s 速率的信息，有效地降低了系统的误码率[29]。Xu 等使用 6×6 的 MIMO 均衡器抑制分数阶 OAM 复用系统受大气湍流的影响[30]。2016 年，Zou 等提出在基于 OAM 复用的 FSO 系统中把多个 OAM 等效为 MIMO 信道，采用 MIMO 均衡技术来消除湍流带来的影响[31]。2018 年 Wang 等在基于 OAM 复用的 MIMO 系统中利用最优模态选择策略和恒模算法 MIMO 均衡来保证高速通信时的通信质量[32]。

不同 MIMO 均衡算法也对 OAM 复用通信系统串扰抑制不同，要对一个系统进行均衡，需要适合的均衡器及相应的均衡算法。王桂莲[12]通过仿真分析了最小均方(Least Mean-Square，LMS)算法、递归最小二乘(Recursive Least-Squares，RLS)、CMA 算法、LMS-CMA 和 RLS-CMA 五种均衡算法，MIMO 技术算法比较如表 1 所示。

表 1　MIMO 技术算法比较

算法	所需训练序列的比例(占发送信息)/%	收敛速度/迭代误差	OAM 复用通信系统平均误码率降低数量级(弱中/强)	星座图恢复度	计算复杂度(计算次数)
RLS 算法	20	50/0～0.25	1.5～3/0.5～1.5	恢复后范围最小	$2N+1$
LMS 算法	10	700/0～0.5	1～2/0.3～1	恢复后范围较大	$2.5N^2+4.5N$
CMA 算法	0	500/0～0.4	0.5～1/0.5～1	恢复后出现相位旋转	——
LMS-CMA 算法	10	600/0～0.3	1～2/0.3～1	恢复后范围较小	——
RLS-CMA 算法	5	3 400/0～0.6	1～3/1～3	恢复后范围较小	——

根据以上算法进行综合比较，RLS 算法抑制大气湍流效果最好，CMA 算法能够有效提高频带利用率，但校正效果相对较差，RLS-CMA 能够使系统平均误码率降低最多。因此在 FSOC 系统中具体选择何种算法的 MIMO 均衡技术，可综合考虑系统性能和算法复杂度关系而定

4.1.3 基于 MIMO 均衡的轨道角动量复用大气湍流干扰抑制方案

基于 MIMO 均衡技术抑制大气湍流对 OAM 复用通信系统串扰的方案如图 6 所示，方案中选用 Kolmogorov 模型来模拟大气湍流信道，系统发送端有 N 路输入信号序列 $\boldsymbol{\mu}(n)=[\mu_1(n),\mu_2(n),\cdots,\mu_N(n)]^{\mathrm{T}}$，将每路输入的源信号传输进系统，然后经过光调制器后将电信号转换为携带信息的高斯光束，之后光束再经过 OAM 转换器转换为相应拓扑荷数的 OAM 光束，其中 OAM 转换器通过载有拉盖尔高斯模相位分布的空间光调制器（Spatial Light Modulator，SLM）实现。将得到的所有 OAM 光束通过信道复用器得到一束混合的 OAM 叠加态。OAM 复用光束传输的大气湍流信道噪声假设为高斯白噪声。受到大气湍流影响的 OAM 复用光束经过信道解复用器得到 N 路相应拓扑荷数的 OAM 光束，之后经过光调制器将 OAM 光束逆转换为高斯光束，光探测器将高斯光束转换为电信号序列 $\boldsymbol{x}(n)=[x_1(n)\cdot x_2(n),\cdots,x_N(n)]^{\mathrm{T}}$，电信号序列经过嵌有相应算法的 MIMO 均衡器得到输出信号 $\boldsymbol{y}(n)=[y_1(n)\cdot y_2(n),\cdots,y_N(n)]^{\mathrm{T}}$。

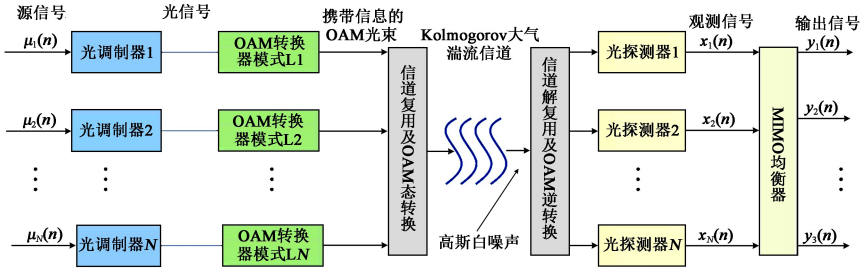


图 6 基于 MIMO 均衡抑制大气湍流对 OAM 复用通信系统串扰方案框图

研究 MIMO 均衡技术抑制串扰方法是能够降低大气湍流信道对基于轨道角动量的自由空间光通信系统影响的有效方法之一，但 MIMO 均衡方法只能校正弱湍流下的 OAM 光束串扰，且小信噪比时校正效果差，因此如何更好地降低中强湍流条件下的串扰是未来研究的重点。

4.2 基于自适应光学的波前相位方法研究

4.2.1 自适应光学技术

AO 是一种能对波前畸变进行实时探测和快速校正的新兴技术，将 AO 技术引入 OAM 复用空间光通信系统，可抑制大气湍流对 OAM 光束的影响。AO 系统安装在 FSOC 系统接收端，AO 技术对捕获或探测到的光束进行分析，然后不同的畸变驱动校正器对光束进行针对性校正，之后将校正的光束继续传输到 FSOC 系统接收端的接收设备上，最后对光束进行检测、光电转换，以及解调等操作[33]。

AO 系统主要由三个模块组成：探测模块（波前传感器）、控制模块（波前控制器）和校正模块（波前校正器）。波前传感器能够实时地探测到波前的光束畸变信息，并将其输入波前控制器，波前控制器再通过内嵌的算法输出反馈信号，然后将反馈信号输出至波前校正器，波前校正器将反馈信号加载到相应的器件（例如变形器或空间光调制器）上，对畸变的光信号进行实时补偿[34]。在研究过程中，Shack-Hartmann（SH）传感器常被作为波前传感部分，但因其采用的螺旋相前结构对 OAM 不敏感，很难检测出 OAM 光束，因此也会采用无波前传感波前技术，选择电荷耦合器件（Charge Coupled Device，CCD）相机代替 SH 波前传感器。在 AO 技术研究中，AO 系统是否采用波前传感技术和算法选择，都是 AO 技术在自由空间光通信系统中的研究关键。

4.2.2 自适应光学技术算法研究

为了抑制大气湍流对 OAM 光束的干扰，AO 技术近年来被引入 OAM 模式复用空间光通信系统[35]，2012 年，Ren 等[36]将 Gerchberg-Saxton（GS）相位恢复算法应用至 OAM 自由空间光通信链路的波前校正系统中，2015 年，Xie 等利用随机并行梯度算法（Stochastic Parallel Gradient Descent，SPGD）的无波前传感 AO 系统对畸变的 OAM 光束进行相位补偿[37]，此方案能够有效校正 OAM 复用光束，减少干扰，其优点为无需设置波前传感器和探测光束，明显降低系统复杂性，但对信息精准度不够高。

南京邮电大学邹丽等[13]基于 GS 算法相位修复分析了复用通信系统的性能，此算法在弱到中等强度的湍流中，采用 GS 算法在一定程度上可以降低系统的误码率。2016 年，赵生妹团队[38]提出一种基于信道编码和波前校正的多路 OAM 复用光通信方案，该方案利用 AO 技术减小相位畸变，然后利用信道编码进一步校正 OAM 模式误差。结果表明，该方案可显著提高链路误码率性能，即使在较强湍流情况下也能够消除大气湍流对 OAM 复用通信链路的不利影响。2017 年，北京理工大学高春清等[39]对比了 GS 算法和 SPGD 算法应用于涡旋光束大气湍流场景中的性能。AO 方案的一个前提假设是探针光束和信息光束同轴在大气湍流中传输时，二者经历的大气湍流是相似的。因此，探针光束的选择与扩束是非常关键的环节[40]。2019 年，吉林大学崔素英[33]将无波前传感波前畸变校正算法中的两种典型校正算法进行了研究，将收敛速度快但迭代次数有限的JacopoAntonello(JA)算法和实际应用多但收敛速度慢且容易陷入局部极值的 SPGD 算法进行了研究对比，并将两种算法相结合，设计出一种校正组合算法，该算法校正结果比 JA 算法更好，收敛速度比 SPGD 算法更快，因此，组合改进后的算法也可以应用到之后的 AO 系统中。周思彤提出了一种基于 Wirtinger Flow(WF)算法的相位校正方法[41]，对比 JA 算法、GS 算法、SPGD 算法的传输性能，最终得出表 2 结论。

根据以上算法进行综合比较，无波前传感器的 GS 算法和 SPGD 算法收敛速度与校正效果虽然好，但是有可能会出现局部极值的情况，基于 WF 算法的自适应光学波前校正方法实现了校正精度的提高，并简化了自适应光学系统中波前传感部分结构。从校正效果看，与传统的 GS 算法相比，WF 算法的均方根误差改进明显，从 10^{-2} 降到了 10^{-15}。这些算法各有优缺点，但都能从一定程度上实现 OAM 光束的自适应波前校正，对 OAM 光束在信息领域中的应用有重要的意义。

表 2　自适应技术算法比较

算法	优点	缺点	均方根误差	是否需要波前传感器
GS 算法	算法复杂度低，迭代次数少	为局部优化算法，可能收敛于局部最优解，校正效果差	10^{-2}	否
JA 算法	收敛速度快，校正程度较大	结构复杂，计算量大，迭代次数有限，仍处于实验室研究阶段	—	否
SPGD 算法	效率高、速度快、实用性强	迭代次数太多，存在局部极值问题，强湍流条件下校正效果较差	—	否
WF 算法	结构简单，精度高	算法复杂	10^{-15}	是

4.2.3　基于 WF 算法的相位校正通信系统方案

WF 算法由 Candes 等于 2014 年首次提出，之后北京邮电大学周思彤提出了基于 WF 算法的相位校正方法。图 7 为自适应光学空间光通信系统，在此系统中的发送端，探针光束和 OAM 光束通过合成器合成并进行同轴传输，此处的探针光束为拓扑荷数为 0 的拉盖尔高斯光束。合成光束在大气湍流中传输时，会受到影响产生相位畸变，使得探针光束和OAM光束的相位上都增加了一个随机扰动项。因为合成光束是同轴传输，所以两者受到的相位畸变是相同的。合成光束经过传播后，到达接收端，合成光束通过偏振分束器分离后得到探针光束，探针光束输入到波前传感部分进行校正。

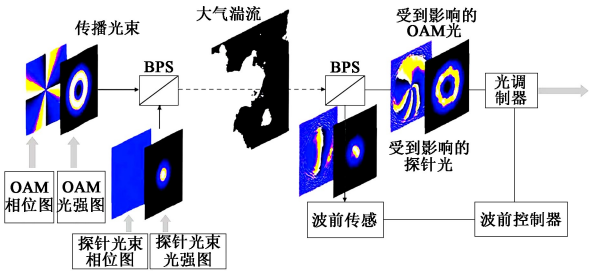


图 7　自适应光学空间光通信系统

波前传感部分的结构如图 8 所示，用 CCD 相机来记录探针光束的强度信息，计算机通过算法计算出探针光束的相位。因为发送端的探针光束拓扑荷数为零，因此其相位也为零，所以接收端计算出的探针光束的相位就是畸变相位(即受到大气湍流影响增加的相位扰动项)。畸变相位传输进SLM中，分

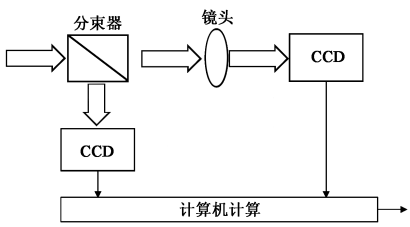


图 8　波前传感部分结构图

束器分出的 OAM 光束经过 SLM 叠加一个和畸变相位相反的相位，从而消除 OAM 光束的相位畸变。在此系统中，自适应补偿的 OAM 光束相位信息，等于经过大气湍流后的 OAM 光束相位减去计算出的探针光束畸变相位。

通过分析可知，AO 技术在修复涡旋光束效果很好，但因光学器件的成本、复杂度普遍偏高，所以在实际中 AO 技术无论选择何种算法都会存在一定缺点，因此要实现收敛精度和收敛速度的双赢，同时简化算法和系统的复杂度，是后续要完善和研究的方向。

5 总结

目前，基于轨道角动量复用的空间光通信技术是高速大容量光通信领域的研究热点，因此缓解大气湍流对 OAM 光束的影响极其重要。

本文综述了不同大气湍流强度对 OAM 空间光通信系统传输误码率和信道容量的影响，在同一湍流强度下，OAM 拓扑荷数越大，系统信息传输准确性越差。在此基础上，综述了 MIMO 均衡技术及 AO 技术发展现状，比较了两种技术中不同算法对大气湍流影响的抑制效果，其中 MIMO 均衡技术目前较成熟，但此方法目前只能校正弱湍流下的 OAM 光束间串扰，且小信噪比时校正效果差，如何降低中强湍流条件下的串扰以及算法优化是未来研究的重点。AO 技术较新颖，但目前更多处于实验阶段，系统复杂度都很高，并不能广泛应用于实际中，如何在降低系统及算法复杂度的同时，提高系统传输特性，是自适应光学技术的主要研究方向。

参考文献：

[1] Strasburg J D, Harper W W. Impact of atmospheric turbulence on beam propagation[J]. Proc. SPIE, 2004, 5413: 93-102.

[2] Malik M, O'Sullivan M, Rodenburg B, et al. Influence of atmospheric turbulence on optical communications using orbital angular momentum for encoding[J]. Opt. Express, 2012, 20(12): 13195-14065.

[3] Zhao Yufeng, Yao Yong, Xu Ke, et al. Circular polarization shift-keying modulation based on orbital angular momentum division multiplexing in free space optical communication[J]. Optics Communications, 2020, 475: 126165.

[4] Fu Shiyao, Gao Chunqing. Influences of atmospheric turbulence effects on the orbital angular momentum spectra of vortex beams[J]. Photonics Research, 2016, 4(5): 1-4.

[5] 邹 丽. 轨道角动量复用系统大气湍流干扰抑制方法研究[D]. 南京：南京邮电大学，2017.
Zou Li. Research on atmospheric turbulence interference suppression method for orbital angular momentum multiplexing system [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017.

[6] 王 翔，赵尚弘，李勇军，等. 复用技术在空间光通信中的应用研究[J]. 半导体光电，2011，31(3)：392-397.
Wang Xiang, Zhao Shanghong, Li Yongjun, et al. Application research of multiplexing technology in space optical communication[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 31(3): 392-397.

[7] Anguita J A, Neifeld M A, Vasic B V. Turbulence-induced channel crosstalk in an orbital angular momentum-multiplexed free-space optical link[J]. Appl. Opt., 2008, 47(13): 2414-2419.

[8] 张逸新，齐文辉，王建宇，等. 斜程湍流大气光通信信道的单光子轨道角动量[J]. 激光杂志，2009，30(5)：63-65.
Zhang Yixin, Qi Wenhui, Wang Jianyu, et al. Single-photon orbital angular momentum of oblique turbulent atmospheric optical communication channel[J]. Laser J., 2009, 30(5): 63-65.

[9] 陆璇辉，黄慧琴，赵承良，等. 涡旋光束和光学涡旋[J]. 激光与光电子学进展，2008(1)：50-56.
Lu Xuanhui, Huang Huiqin, Zhao Chengliang, et al. Vortex beams and optical vortices [J]. Advances in Lasers and Optoelectronics, 2008(1): 50-56.

[10] 陈 鸣，高太长，刘 磊，等. 非 Kolmogorov 湍流相位屏仿真及对光束传输模拟的影响[J]. 强激光与粒子束，2017，29(9)：39-47.
Chen Ming, Gao Taichang, Liu Lei, et al. Non-Kolmogorov turbulent phase screen simulation and its influence on beam propagation simulation[J]. Intense Laser and Particle Beam, 2017, 29(9): 39-47.

[11] Zhu Y, Zhang L, Hu Z, et al. Effects of non-Kolmogorov turbulence on the spiral spectrum of Hypergeometric-Gaussian laser beams[J]. Opt. Express, 2015, 23(7): 9137-9146.

[12] 王桂莲. 大气湍流模型对 OAM 复用通信系统的串扰及抑制方法研究[D]. 南京：南京邮电大学，2015.
Wang Guilian. Research on crosstalk and suppression method of OAM multiplex communication system based on atmospheric turbulence model[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015.

[13] 邹 丽，王 乐，张士兵，等. 基于波前校正的轨道角动量复用通信系统抗干扰研究[J]. 通信学报，2015，36(10)：76-84.
Zou Li, Wang Le, Zhang Shibing, et al. Research on anti-jamming of orbital angular momentum multiplexing communication system based on wavefront correction[J]. J. of Communications, 2015, 36(10): 76-84.

[14] Huang Y, Yuan Y, Liu X, et al. Propagation of optical coherence vortex lattices in turbulent atmosphere[J]. Appl. Sciences, 2018, 8(12): 2476.

[15] 王 洋，崔 健，廖 希，等. 基于信号检测的光无线轨道角动量复用系统研究[J]. 电子与信息学报，2021，43(11)：3156-3165.
Wang Yang, Cui Jian, Liao Xi, et al. Research on optical wireless orbital angular momentum multiplexing system based on signal detection[J]. J. of Electronics and Information, 2021, 43(11): 3156-3165.

[16] 邵 蔚. 基于轨道角动量复用的空间光通信关键技术研究[D]. 上海：上海大学，2019.
Shao Wei. Research on key technologies of space optical communication based on orbital angular momentum multiplexing[D]. Shanghai: Shanghai University, 2019.

[17] 张 艳. 基于OAM的自由空间光通信系统在大气湍流信道下的传输性能研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2019.
Zhang Yan. Research on the transmission performance of OAM-based free space optical communication system under atmospheric turbulent channel[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.

[18] Briantcev D, Trichili A, Ooi B S, et al. Crosstalk suppression in structured light free-space optical communication[J]. IEEE Open J. of the Communications Society, 2020, 1: 1623-1631.

[19] 柯熙政，宁 川，王 姣. 大气湍流下轨道角动量复用态串扰分析[J]. 红外与激光工程，2018，47(11)：402-408.
Ke Xizheng, Ning Chuan, Wang Jiao. Analysis of orbital angular momentum multiplexed state crosstalk under atmospheric turbulence[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(11): 402-408.

[20] 陈 牧，柯熙政. 大气湍流对激光通信系统性能的影响研究[J]. 红外与激光工程，2016，45(8)：115-121.
Chen Mu, Ke Xizheng. Research on the effect of atmospheric turbulence on the performance of laser communication systems[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8): 115-121.

[21] 宁 川. 轨道角动量复用及其在大气湍流下的串扰分析[D]. 西安：西安理工大学，2018.
Ning Chuan. Orbital angular momentum multiplexing and its crosstalk analysis under atmospheric turbulence[D]. Xi'an: Xi'an University of Technol., 2018.

[22] Zambrini R, Barnett S M. Quasi-intrinsic angular momentum and the measurement of its spectrum[J]. Phys. Rev. Lett., 2006, 96(11): 113901.

[23] 包媛媛. 多态轨道角动量光束产生方法的研究[D]. 北京：北京邮电大学，2017.
Bao Yuanyuan. Research on the method of generating multi-state orbital angular momentum beams[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecomm., 2017.

[24] 吴 琰，梅海平，魏合理. 联合信道条件下自由空间光通信系统性能分析[J]. 激光与光电子学进展，2020，57(5)：100-106.
Wu Yan, Mei Haiping, Wei Heli. Performance analysis of free space optical communication system under joint channel conditions[J]. Advances in Lasers and Optoelectronics, 2020, 57(5): 100-106.

[25] 吴 琰. 复杂大气对自由空间光通信影响及改善方法的研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2020.
Wu Yan. Research on the influence of complex atmosphere on free space optical communication and improvement methods[D]. Hefei: University of Science and Technol. of China, 2020.

[26] 李晓燕. 大气湍流下逆向调制自由空间光通信性能研究[D]. 长春：吉林大学，2020.
Li Xiaoyan. Research on the performance of inverse modulation free space optical communication under atmospheric turbulence[D]. Changchun: Jilin University, 2020.

[27] 刘明瀚. 基于MIMO技术轨道角动量光通信系统的优化设计[J]. 中国新技术新产品，2019(3)：37-38.
Liu Minghan. Optimal design of orbital angular momentum optical communication system based on MIMO technology[J]. China New Technology and New Products, 2019(3): 37-38.

[28] Huang H, Cao Y, Xie G, et al. Crosstalk mitigation in a free-space orbital angular momentum multiplexed communication link using 4×4 MIMO equalization[J]. Opt. Lett., 2014, 39(15): 4360-4363.

[29] Hao H, Xie G, Ren Y, et al. 4×4 MIMO equalization to mitigate crosstalk degradation in a four-channel free-space orbital-angular-momentum-multiplexed system using heterodyne detection[C]// European Conf. & Exhibition on Optical Communication. IET, 2013.

[30] Xu Z, Gui C, Li S, et al. Fractional orbital angular momentum (OAM) free-space optical communications with atmospheric turbulence assisted by MIMO equalization[C]// Integrated Photonics Research, Silicon & Nano Photonics, 2014.

[31] Li Z, Le W, Chao X, et al. Turbulence mitigation with MIMO equalization for orbital angular momentum multiplexing communication[C]// IEEE 2016 8th Inter. Conf. on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), 2016.

[32] Wang L, Jiang F, Chen M, et al. Interference mitigation based on optimal modes selection strategy and CMA-MIMO equalization for OAM-MIMO communications[J]. IEEE Access, 2018, 6: 68950-69959.

[33] 崔素英. 无波前传感自由空间光通信系统波前畸变校正算法研究[D]. 长春：吉林大学，2019.
Cui Suying. Research on wavefront distortion correction algorithm for free space optical communication system without wavefront sensing[D]. Changchun: Jilin University, 2019.

[34] 于智豪. 中强湍流条件下的大气湍流补偿若干关键技术研究[D]. 北京：北京邮电大学，2019.

Yu Zhihao. Research on some key technologies of atmospheric turbulence compensation under moderate to strong turbulence conditions [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecomm., 2019.

[35] Ren Y, Huang H, Yang J Y, et al. Correction of phase distortion of an OAM mode using GS algorithm based phase retrieval[C]// Lasers & Electro-Optics, 2012.

[36] Ren Y, Huang H, Xie G, et al. Atmospheric turbulence effects on the performance of a free space optical link employing orbital angular momentum multiplexing[J]. Opt. Lett., 2013, 38(20): 4062-4065.

[37] Xie G, Ren Y, Huang H, et al. Phase correction for a distorted orbital angular momentum beam using a Zernike polynomials-based stochastic-parallel-gradient-descent algorithm [J]. Opt. Lett., 2015, 40: 1197-1200.

[38] Zhao S, Wang L, Zou L, et al. Both channel coding and wavefront correction on the turbulence mitigation of optical communications using orbital angular momentum multiplexing[J]. Opt. Communication, 2016, 376: 92-98.

[39] 高春清，张世坤，付时尧，等. 涡旋光束的自适应光学波前校正技术[J]. 红外与激光工程，2017，46(2)：8-13.
Gao Chunqing, Zhang Shikun, Fu Shiyao, et al. Adaptive optics wavefront correction technology for vortex beams[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(2): 8-13.

[40] 江 杰，郭宏翔，边奕铭，等. 基于SPGD算法的少模光纤耦合解复用系统动态湍流补偿仿真[J]. 光学学报，2021，41(19)：9-20.
Jiang Jie, Guo Hongxiang, Bian Yiming, et al. Simulation of dynamic turbulence compensation for few-mode fiber coupling and demultiplexing system based on SPGD algorithm[J]. J. of Optics, 2021, 41(19): 9-20.

[41] 周思彤. 轨道角动量模式复用光通信系统中干扰抑制方法研究[D]. 北京：北京邮电大学，2021.
Zhou Sitong. Research on interference suppression method in orbital angular momentum mode multiplexed optical communication system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecomm., 2021.

作者简介：

卜 洋(1996－)，女，硕士研究生，主要研究方向为空间光通信；

赵丽娟(1981－)，女，博士，副教授，主要研究方向为光纤传感与光纤通信；

杨 志(1972－)，男，博士，副教授，主要研究方向为光纤传感、光纤通信和无线通信；

徐志钮(1979－)，男，博士，副教授，主要研究方向为分布式光纤传感器及其在电气设备状态监测和故障诊断中的应用。