

基于空间光调制器的大气湍流模拟理论与技术进展

郝依琳, 柯熙政*

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

摘要: 为克服大气湍流对光波传输的影响并提升室内模拟精度, 系统总结了基于空间光调制器(SLM)的大气湍流模拟理论与技术进展。首先, 解析了液晶空间光调制器(LC-SLM)的相位调制原理; 然后, 结合 Zernike 多项式法、傅里叶变换谱反演法及次谐波补偿技术生成湍流相位屏, 实现对湍流的高精度模拟。分析表明: SLM 技术具有实时可调、调制精度高、适用于多波长环境等显著优势, 能有效应用于光通信性能评估、自适应光学校正及成像质量优化与提升等领域。未来通过优化液晶器件性能、提升刷新频率及多物理场耦合技术, 可进一步提升湍流模拟的真实度与实用性。

关键词: 无线光通信; 空间光调制器; 大气湍流; 数值模拟; 相位屏

中图分类号: TN91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)04-0053-07

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.04.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Advances in theory and technology of atmospheric turbulence simulation based on spatial light modulators

HAO Yilin, KE Xizheng*

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To mitigate the effects of atmospheric turbulence on optical wave propagation and improve indoor simulation accuracy, this study systematically reviews the theoretical and technological advancements in atmospheric turbulence simulation based on spatial light modulators (SLMs). First, the phase modulation principle of liquid crystal spatial light modulators (LC-SLMs) is analyzed. Subsequently, turbulence phase screens are generated using Zernike polynomial methods, Fourier transform spectral inversion, and subharmonic compensation techniques to achieve high-precision turbulence simulation. The analysis demonstrates that SLM technology offers significant advantages, including real-time tunability, high modulation accuracy, and compatibility with multi-wavelength environments, making it effective for applications such as optical communication performance evaluation, adaptive optics correction, and imaging quality optimization. Future improvements in liquid crystal device performance, refresh rates, and multi-physics coupling technology are expected to further enhance the realism and practicality of turbulence simulation.

Key words: wireless optical communication, spatial light modulator, atmospheric turbulence, numerical simulation, phase screen

0 引言

大气湍流是一种复杂且随机的流体运动现象, 对光波传播产生显著影响, 尤其在光通信、激光雷达、天

收稿日期: 2024-10-09.

基金项目: 陕西省重点产业创新项目(No.2017ZDCXL-GY-06-01)资助; 国家自然科学基金面上项目(No.61377080)资助。

作者简介: 郝依琳(2000—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线光通信理论与技术, 专注于高效率调制技术及大气信道传输研究, 致力于推动该领域的技术发展与应用。

* **通信作者:** 柯熙政(1962—), 男, 理学博士, 二级教授, 俄罗斯自然科学院外籍院士, 陕西省教学名师, 中国电子学会会士。主要研究方向为无线光通信理论与技术。



文观测等领域, 其引起的波前畸变会严重降低系统性能。由于真实大气环境的复杂性和不可控性, 直接开展湍流实验面临诸多挑战, 如实验条件难以精确调控、测量结果重复性差等。因此, 发展高精度的室内湍流模拟技术成为研究大气湍流效应的关键手段。

目前, 实验室模拟大气湍流的主要方法包括液体腔法和空间光调制器(SLM)法^[1]。液体腔法通过在液体介质中激发湍流来模拟大气湍流, 其优势在于可复现较大的湍流尺度, 但存在参数控制精度不足、实验系统复杂等问题。相比之下, SLM 法利用可编程光学器件对光波前进行动态相位调制, 能够灵活、精确地模拟湍流引起的相位起伏, 已成为实验室研究的主要技

郝依琳,柯熙政:基于空间光调制器的大气湍流模拟理论与技术进展

术路线。

基于SLM的大气湍流模拟核心在于相位屏^[2]的生成,其本质是通过数值方法重构湍流引起的随机光程差分布。现有相位屏生成方法主要依据Kolmogorov湍流理论,包括:Zernike多项式法、傅里叶变换谱反演法、分形法和分区法。其中,前3种方法严格遵循Kolmogorov统计特性,而分区法则通过稀疏谱模型,以少量正弦波分量高效模拟湍流相位结构^[3]。然而,实际观测表明,Kolmogorov谱模型无法涵盖所有湍流状态,而Non-Kolmogorov湍流模型^[4]以及各向异性条件下的Zernike相关性修正方法相继被提出^[5],进一步拓展了湍流模拟的理论框架。

本文系统梳理基于SLM的大气湍流模拟技术研究进展,探讨模拟湍流在光通信波前校正、成像系统优化等领域的应用。

1 SLM类型与原理

1.1 SLM类型

SLM根据工作原理可分为数字微镜器件、磁光SLM、液晶SLM(LC-SLM)等类型,分别通过微机电、磁光效应或液晶场效应实现光波场的动态调控。

数字微镜器件是一种基于微机电结构的SLM装置,其每个像素均由互补金属氧化物半导体(CMOS)电极进行高速、高精度控制。该器件既可用于显示系统的目标模拟以研究成像畸变^[6],又能生成动态模拟目标以满足稳像系统开发需求。基于普克尔斯效应的调制器件则通过电光效应对光波场分布进行调控,可将信息加载至一维或二维光场实现光波调制。肖胜利等人^[7]通过引入1/4波片改进了调制器结构,显著优化了光调制器的调制特性曲线。

磁光SLM通过铁磁材料的磁化状态记录信息,并基于磁光效应实现读取光波的调制。邱启东等人^[8]提出采用磁光调制技术调控入射光偏振方向,通过调节电信号强度实现矢量光偏振方向的精确控制,从而完成径向偏振光与角向偏振光的高效转换。

LC-SLM采用向列型液晶的混合场效应工作模式,通过对液晶层分区施加电场改变分子排列方向,实现对光束相位、偏振态、振幅或强度的实时空间调制。该器件凭借低功耗、轻量化及高像素密度等优势,已在无线激光通信和自适应光学领域获得广泛应用^[9],目前成为空间光调制技术的主流解决方案。鉴于LC-SLM在大气湍流模拟实验中的广泛应用,下文将重点阐述其基本理论。

1.2 LC-SLM

1.2.1 液晶特性

液晶是一种兼具流动性和光学各向异性的材料。在外加电场作用下,液晶分子会发生重新排列,从而改变其光学特性,这种现象称为电光效应^[10]。正是基于这一特性,液晶成为实现光波相位调制的理想介质。

液晶最典型的电光效应是电控双折射效应,其原理是通过外加电场调控液晶的折射率。在典型的液晶盒结构中,向列型液晶被置于正交偏振的起偏器与检偏器之间。当未施加电压时,若入射光传播方向与液晶分子长轴平行,其偏振态保持不变,因而无法通过检偏器;而当施加外部电压时,液晶分子会发生定向偏转,导致其光学性质(如折射率)发生变化,且这种变化与分子偏转角度直接相关。此时,入射光的偏振态转变为椭圆偏振态,从而能够部分或全部通过检偏器。

在利用LC-SLM模拟大气湍流时,正是通过电控双折射效应实现相位调制,进而模拟湍流对光波的动态影响。

1.2.2 LC-SLM类型

根据光束的读出方式,LC-SLM可分为透射式和反射式2种类型。透射式结构中,每个独立像素单元可对透射光束的相位或振幅进行单独调制;反射式结构则在液晶层上附加反射介质薄膜,使光束经历2次调制过程,从而显著提高光能利用率。LC-SLM的驱动方式可分为电寻址和光寻址2类^[11]。电寻址方式通过调节外加电场的强度或方向,实现对光波相位、偏振态或强度的调制;光寻址方式则通过控制入射光的强度、偏振状态或波前特性来完成光场调制。根据所用液晶材料的分子特性,LC-SLM主要分为向列型和铁电型。研究表明^[12],通过电场可有效调控向列型液晶分子的排列取向,进而改变其透光特性。然而,向列型液晶的响应速度较慢,难以满足高速调制应用的需求。为此,CLARK N A等人^[13]开发了基于铁电液晶材料的调制器,其分子取向在电场作用下可实现快速切换,响应时间可达亚微秒量级,刷新频率可提升至数千赫兹,十分适合高速光调制应用。LC-SLM的调制原理可分为振幅型和相位型:振幅型主要通过调控液晶分子排列状态或液晶层厚度等参数实现光强调制;相位型则通过改变液晶分子排列状态来调制光波相位,即通过外加电场改变液晶分子的取向排列来实现。当器件仅对入射光波的相位进行调制时,这种工作模式被称为纯相位调制^[14]。

1.2.3 LC-SLM 相位调制原理

当液晶分子长轴方向分别与基板轴线平行、垂直时,入射光束将感受的光折射率分别为 n_e 、 n_o 。考虑光束沿 z 轴方向入射至 LC-SLM 的情况,在外加电场作用下,液晶分子会发生角度偏转,其等效折射率 n_{eff} 可表示为

$$n_{\text{eff}} = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}} \quad (1)$$

其中, θ 是液晶分子长轴与 x 轴之间的夹角。假设 SLM 液晶层的厚度为 t , 光波波长为 λ 的线偏光入射到液晶层后生成的相位差为

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} [n_{\text{eff}}(\theta) - n_o] dz \quad (2)$$

通过精确调控外加电场的电压分布,即可实现对 LC-SLM 出射光相位差的控制。

2 国内外大气湍流模拟研究进展

2.1 国外研究进展

相位屏生成技术是大气湍流模拟的核心,其发展历程伴随着理论方法的创新与实验技术的持续优化。1998 年, DAYTON D C 等人^[1]首次利用向列型液晶相位调制器生成静态和动态相位屏来模拟大气湍流,实验发现调制器作为动态干扰源时每秒仅能更新 5 次相位屏,调制器的响应速度较低。随后,研究者们提出了多种改进方案;2005 年, PHILLIPS J D 等人^[15]采用傅里叶级数方法生成 2 个相位屏并加载到 LC-SLM 上模拟大气湍流,但受限于小孔径衍射效应,实验结果不够理想。2011 年, WILCOX C C 等人^[16]创新性地将 Karhunen-Loeve 多项式与 Kolmogorov 统计学相结合,并引入样条技术,构建了包含时空特性的大气湍流模型,显著降低了计算复杂度,提高了相位屏生成的灵活性和效率。2020 年, PHEHLUKWAYO S P 等人^[17]基于 Kolmogorov 湍流模型开发了 SLM 编码技术,实现了不同强度大气湍流的精确模拟,为自由空间量子通信中的湍流影响研究提供了有效手段。

在实验设备优化方面,研究者们取得了系列重要进展。2004 年, BROOKS M R 等人^[18]使用扭曲排列液晶器件测试了不同湍流条件下的大气强度分布,发现实验结果与计算机模拟在强度均值和方差变化趋势上具有一致性,但观察到相位调制时的振幅变化会影响湍流模拟效果。2007 年, SCHMIDT J D 等人^[19]开发出能动态、可重复且精确模拟大气湍流光学效应的系统,并

详细阐述了 LC-SLM 的技术参数和生成方法。2008 年, BURGER L 等人^[20]运用 Zernike 方法生成相位屏,通过傅里叶变换透镜观察远场强度模式来模拟任意传播距离的效果,验证了实验室条件下激光束强度与计算结果的一致性,同时指出 LC-SLM 在极端湍流条件下的性能限制。2011 年, SANTIAGO F 等人^[21]研究发现反射型 LC-SLM 具有更大的动态范围,更适合模拟恶劣大气条件,但需要优化其系统集成方案。2015 年, TOSELLI I 等人^[22]设计了模拟 Non-Kolmogorov 湍流的实验装置,通过将包含湍流特征的数值相位屏加载到高斯光束上进行测试,发现实验数据在解释各向异性效应时与理论模型存在一定差异,但整体趋势相符。

2.2 国内研究进展

我国学者在大气湍流相位屏模拟技术研究方面取得系列重要进展。针对 DAYTON D C 等人^[1]使用向列型液晶相位调制器时相位屏刷新频率仅 5 Hz 的问题,刘永军等人^[23]在 2006 年创新性地采用平行排列液晶装置,发现其相位调制过程中振幅保持恒定的特性,将其成功应用于大气湍流效应模拟。通过特定模式组合的理论计算和实验验证,该装置能有效再现湍流现象,但由于液晶层厚度和材料折射率各向异性的限制,仅能实现约 1 个波长的相位调制量,适用于弱湍流模拟。随着研究深入,为提高相位屏模拟精度和效率,学者们提出多种创新方法。2015 年,丁晓娜^[24]结合分形法和协方差外推法,采用随机中点位移方法生成统计一致的湍流相位屏,但该相位屏存在高频误差累积和采样点增加导致精度下降的问题。同年,艾勇等人^[25]提出功率谱反演法与低频谐波叠加相结合的方法,验证了模拟器在不同强度湍流条件下具有优良的可靠性和重复性。2020 年,张小琪等人^[26]开发基于稀疏谱模型的分区法,可高效生成成长周期湍流相位屏,大幅降低计算资源需求。2024 年,卢文雍等人^[27]通过改进次谐波法,优化了低频补偿采样方式。同年,杨亚欣等人^[28]将功率谱反演法与 Zernike 倾斜法创新结合,使模拟结果更接近实际湍流状况。

在动态湍流模拟技术方面,2013 年,卫沛锋等人^[29]建立时域模型,通过优化 LC-SLM 相位屏刷新频率实现时域平滑,使高频能量降低 31%。2014 年,段梦云等人^[30]基于纯相位 LC-SLM 搭建的模拟装置,在弱湍流条件下获得光强正态分布的精确模拟结果。2016 年,李华等人^[31]开发的多层相位屏技术成功再现实际湍流的光斑特征。2018 年,谭振坤等人^[32]采用修正 Hill 谱使波前校正精度优于 0.8 μm 。同年,张娜娜等人^[33]进

郝依琳,柯熙政. 基于空间光调制器的大气湍流模拟理论与技术进展

一步完善了 Non-Kolmogorov 湍流模拟系统。

西安理工大学柯熙政教授团队在该领域取得突出成果,通过创新方法生成湍流相位屏并加载至不同类型 SLM,成功应用于波前校正、成像质量提升等多个领域,推动了相关技术的发展与应用。本文系统总结了该团队的重要研究工作如表 1 所示。

表 1 西安理工大学团队研究进展

年份	文献	SLM 模拟湍流用途
2017	[34]	评估通信系统的性能
2017	[35]	评估当光脉冲通过大气时由湍流导致的脉冲展宽情况
2018	[36]	研究高斯光束经过大气湍流后远场光斑变化情况
2018	[32]	测试外差探测系统波前校正的效果
2019	[37]	理解大气湍流如何影响光通信信号的质量,并针对性提出改进措施
2019	[38]	比较变形镜与 SLM 在波前校正中的表现
2019	[39]	验证无波前传感器自适应光学校正 GPU 加速技术的有效性
2023	[40]	评估和改进双波前校正系统在光通信中的波前畸变校正技术

3 模拟湍流原理

3.1 创建相位屏

相位屏是一种具有空间相位分布特征的光学调制器件,其主要功能是通过改变光波前相位分布来实现波前调控。该器件表面各点的相位调制量通常对应于大气湍流引起的光波相位扰动,能够精确模拟光波在大气传输过程中经历的相位延迟或提前等波前畸变现象。在具体实现上,研究人员通过在光学平板后表面构建符合湍流统计特性的相位屏,将模拟的湍流相位扰动与光波在真空传播的理想相位分布进行叠加^[41]。这种技术手段可以准确复现大气湍流对光波传播的影响,为相关研究提供有效的实验平台。目前,基于 LC-SLM 的相位屏技术已成为大气湍流模拟的主要方法,其通过电控液晶分子取向来调控光波相位,具有响应速度快、分辨率高、可编程性强等技术优势。该技术已广泛应用于自适应光学、激光传输、光学成像等领域的研究与测试。

3.2 相位屏的生成方法

3.2.1 Zernike 多项式法

根据 Noll^[42]定义可将 Zernike 多项式在单位圆上用极坐标法表示为

$$Z_n^m(r, \theta) = R_n^m(r) \Theta_n^m(\theta) \quad (3)$$

其中, $R_n^m(r)$ 为径向函数,表达式为

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left[\frac{n+m}{2} - s \right]! \left[\frac{n+m}{2} - s \right]!} r^{(n-2s)} \quad (4)$$

$\Theta_n^m(\theta)$ 为角向函数,表达式为

$$\Theta_n^m(\theta) = \begin{cases} \sqrt{2(n+1)} \cos(m\theta), & m \neq 0 \text{ 且为偶数} \\ \sqrt{2(n+1)} \sin(m\theta), & m \neq 0 \text{ 且为奇数} \\ \sqrt{(n+1)}, & m=0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, r 是极坐标中的径向距离变量,取值范围为 0~1; θ 的取值范围为 0~2 π , s 是求和变量, m 、 n 分别是多项式的角向级次和径向级次。

若要生成相位屏,畸变波前的相位函数 $\varphi(r, \theta)$ 需要采用正交形式,可以表示为

$$\varphi(r, \theta) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i Z_i(r, \theta) \quad (6)$$

其中, $Z_i(r, \theta)$ 为第 i 项 Zernike 多项式。 a_i 为第 i 项 Zernike 多项式系数,是统计独立的 Gauss 随机变量,其协方差矩阵是由 DAI G M^[43]推导得出的;当 $i-j$ 为奇数时,2 项 Zernike 多项式系数的协方差值为 0;当 $i-j$ 为偶数时,2 项 Zernike 多项式 z_i 和 z_j 的系数协方差表达式为

$$E(z_i, z_j) = 2.246(-1)^{\frac{n_i+n_j-2m_j}{2}} [(n_i+1)(n_j+1)]^{\frac{1}{2}} \times \frac{\Gamma\left(\frac{14}{3}\right) \Gamma\left(\frac{n_i+n_j-\frac{5}{3}}{2}\right) \delta_{m_i m_j} \left(\frac{D}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}}}{\Gamma\left(\frac{n_i-n_j+\frac{17}{3}}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n_j-n_i+\frac{17}{3}}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n_j+n_i+\frac{23}{3}}{2}\right)} \quad (7)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 是伽马函数, $\delta_{m_i m_j} = (m_i = m_j) \cap (P(j, j) \cup (m=0))$, D 是孔径, r_0 是大气相干常数。 n_i 和 n_j 分别对应 2 个不同的 Zernike 多项式 z_i 和 z_j 的径向阶次, m_i 和 m_j 分别对应 2 个不同的 Zernike 多项式 z_i 和 z_j 的角向阶次。

3.2.2 谱反演法

多数情况下的湍流可近似表示为 Kolmogorov 湍流,根据其理论可以将折射率起伏三维空间功率谱密度表示为

$$\Phi_n(K) = 0.033 C_n^2 (K^2 + L_0^{-2})^{-\frac{11}{6}} \exp\left(-\left(K L_0 / 5.92\right)^2\right) \quad (8)$$

其中, K 为三维空间波数, 且 $K = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$; C_n^2 为大气湍流折射率结构常数; L_0 为外尺度, 表示大气湍流结构的最大空间尺度; l_0 为内尺度, 表示大气湍流结构的最小空间尺度。谱反演法主要采用 Hufnagel 模型, 其表达式为

$$C_n^2(h) = 5.94 \times 10^{-53} \left(\frac{v}{27} \right)^2 h^{10} \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + A \exp\left(-\frac{h}{100}\right) \quad (9)$$

其中, A 为一个经验常数, 且 $A = 1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-25}$; v 为大气中的平均风速且 $v = 21 \text{ m/s}$; h 为大气层中的垂直高度。

在惯性子区, 大气湍流是各向同性且局部均匀, 可确定相位频谱函数 $\Phi_n(K)$, 构造出的二维复随机场为

$$\tilde{S}(K_x, K_y) = a_R \sqrt{F_s(K_x, K_y)} \quad (10)$$

其中, a_R 为实部和虚部都是均值为 0、方差为 1 的随机数, $F_s(K_x, K_y)$ 为相位的二维频谱与湍流折射率空间谱密度关系函数, K_x, K_y 分别为 x 方向和 y 方向上的空间频率分量。对式(10)进行傅里叶变换即得到一个二维随机相位场为

$$S(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{S}(K_x, K_y) \exp(iKr) dK \quad (11)$$

由于傅里叶变换谱反演法所固有的局限性造成的低频不足现象, 为了精确模拟湍流相位屏, 需要对之前谱反演法产生的相位屏进行低频补偿。此时, 需要采用叠加低频次谐波来改善相位屏的低频统计特性^[36], 表达式为

$$\varphi_{\text{SH}}(m, n) = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{m'=-1}^1 \sum_{n'=-1}^1 R(m', n') f(m', n') \times \exp\left[j2\pi 3^{-p} \left(\frac{mm'}{N} + \frac{nn'}{N}\right)\right] \quad (12)$$

其中, P 为次谐波级数, N_p 为最大级数, N 为采样点数, m', n' 分别为次谐波的角向、径向频率分量; $R(m', n')$ 是一个复数函数, 表示引入随机相位信息; $f(m', n') = C 3^{-2p} r_0^{-5/6} (f_{lx}^2 + f_{ly}^2)$, $f_{lx} = 3^{-p} m' \Delta f_x$, $f_{ly} = 3^{-p} n' \Delta f_y$ 。其中, C 为常数项, f_{lx}, f_{ly} 分别为沿着 x 轴、 y 轴方向的频率分量, $\Delta f_x, \Delta f_y$ 分别为 x, y 方向采样间隔。

3.3 湍流模拟

在仿真过程中, 本文采用傅里叶变换谱反演技术生成湍流相位屏, 并将其加载到 SLM 上以产生光束波前畸变。为改善相位屏的低频统计特性, 研究分别模拟了弱、中强和强湍流条件下未叠加次谐波的 Hill 谱相位

屏, 以及叠加次谐波后的 Hill 谱相位屏。仿真参数设置为: 光束波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 传输距离为 1000 m , 相位屏宽度为 0.4 m , 其中弱、中强、强湍流对应的 r_0 分别为 $0.2, 0.04, 0.02 \text{ m}$, 计算网格为 256×256 。相关仿真结果详见文献[44]中的图 3-3、图 3-4 和图 3-5。

仿真结果表明: 在弱、中强和强湍流条件下, 未叠加次谐波生成的相位屏均表现出倾斜程度不足和低频成分缺失的问题; 而叠加次谐波后, 相位屏中的倾斜成分显著增加, 有效补偿了原先缺失的低频成分, 证实了次谐波法可以实现相位屏的低频补偿。通过相位起伏分析发现: 弱湍流条件下的相位起伏范围为 $-1.5 \sim 1 \text{ rad}$, 中强湍流为 $-5 \sim 4 \text{ rad}$, 强湍流达到 $-15 \sim 15 \text{ rad}$, 这一结果清晰地表明随着湍流强度的增加, 大气随机相位起伏量呈现明显的增大趋势。

4 应用分析

SLM 模拟大气湍流技术凭借其灵活性与高精度特性, 在光学及通信领域展现出广阔的应用前景。该技术不仅为光通信系统性能评估与优化提供了新手段, 显著提升了信号传输质量与有效距离, 同时在光学成像领域能够有效改善系统分辨率与观测效果。此外, 其为自适应光学系统的研发提供了可靠的模拟环境, 助力研究者深入理解系统特性并优化性能表现。

相较于传统湍流池或空气介质湍流箱, SLM 技术具有以下显著优势:

- 1) 动态调控能力: 基于高刷新频率与快速响应特性, 可实时调整光波相位与振幅, 精准模拟不同湍流条件下的相位屏变化;
- 2) 模拟精度优势: 通过高分辨率相位调制, 能够准确再现湍流中的高频及小尺度扰动, 生成高度逼真的湍流相位屏;
- 3) 多场景适用性: 宽波长范围兼容特性使其可适配各类光学系统, 在光通信、天文观测及激光雷达等领域具有重要应用价值;
- 4) 实验便捷性: 紧凑型设计配合灵活的操作界面, 便于实验室环境下的系统集成与实验验证, 为光学研究提供有力支撑。

然而, 该技术在实际应用中仍存在若干技术瓶颈:

- 1) 动态模拟局限性: 受限于现有刷新频率水平, 在模拟快速变化湍流时, 相邻波面间的时间连续性难以完全保证;
- 2) 器件物理约束: 液晶像素的尺寸与排列方式可能影响波前模拟精度, 尤其在处理湍流高频成分时易

引入模拟误差;

3) 环境适应性不足: 实验室条件与真实大气环境存在差异, 导致模拟结果与实际情况产生偏差。

5 结束语

基于 SLM 的大气湍流模拟技术凭借其高精度、灵活性和良好的可控性, 已成为研究和验证光学系统抗湍流能力的重要手段。通过引入 Zernike 多项式、傅里叶反演及次谐波补偿等方法, SLM 能够高效再现各种湍流条件下的相位扰动, 为光通信、自适应光学和高分辨成像等领域提供了强有力的实验支撑。尽管当前仍存在如时间相关性不足和低频失真等挑战, 但随着液晶器件性能的持续优化、系统刷新频率的提升以及多物理场耦合机制的引入, SLM 在大气湍流模拟中的准确性与实用性有望进一步增强。未来技术发展可从以下方向突破:

1) 器件性能升级: 通过提高 SLM 分辨率与调制精度, 增强其对湍流微观结构的再现能力;

2) 动态响应优化: 重点突破刷新频率与响应速度瓶颈, 实现动态湍流的实时精准模拟;

3) 多场耦合模拟: 探索 SLM 与热力学、流体力学等技术的协同应用, 构建更接近真实环境的综合湍流模型。

参考文献:

- [1] DAYTON D C, BROWNE S L, SANDVEN S P, et al. Theory and laboratory demonstrations on the use of a nematic liquid-crystal phase modulator for controlled turbulence generation and adaptive optics [J]. Applied Optics, 1998, 37(24): 5579–5589.
- [2] 任斌, 陈纯毅, 杨华民. 大气湍流光波传输数值仿真技术研究综述[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(8): 1631–1640.
- [3] LANE R G, GLINDEMANN A, DAINITY J C. Simulation of a Kolmogorov phase screen[J]. Waves in Random Media, 1992, 2(3): 209–209.
- [4] TOSELLI I, ANDREWS L C, PHILLIPS R L, et al. Free-space optical system performance for laser beam propagation through non-Kolmogorov turbulence[J]. Optical Engineering, 2008, 47(2): 026003-1–026003-9.
- [5] CHIMITT N, CHAN S. Anisoplanatic optical turbulence simulation for near-continuous C_n^2 profiles without wave propagation[J]. Optical Engineering, 2023, 62(2): 078103-1–078103-7.
- [6] 陈雪旗, 姜爱民. 基于数字微镜器件的面目标模拟实验系统研究[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 178–185.
- [7] 肖胜利, 陈利菊, 朱峰. 普克尔斯效应与光调制器[J]. 物理与工程, 2007(5): 33–35.
- [8] 邱啟东, 陈丽, 何贤飞, 等. 一种基于磁光调制的矢量光束转换系统设计[J]. 光电子技术, 2016, 36(1): 19–22.
- [9] 王康俊. 液晶空间光调制器及其应用[J]. 激光与光电子学展, 2009, 46

(6): 65–67.

- [10] YANG Y, FORBES A, CAO L, et al. A review of liquid crystal spatial light modulators: devices and applications[J]. Opto-Electronic Science, 2023, 2(8): 230026-1–230026-29.
- [11] 王永强, 刘太刚. 空间光调制器简介及其应用[J]. 焦作大学学报, 2007(3): 82–84.
- [12] SCHADT M, HELFRICH W. Voltage-dependent optical activity of a twisted nematic liquid crystal[J]. Applied Physics Letters, 1971, 18(4): 127–128.
- [13] CLARK N A, LAGERWALL S T. Submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystals[J]. Applied Physics Letters, 1980, 36(11): 899–901.
- [14] 刘伯哈, 张健, 吴丽莹. 液晶空间光调制器的纯相位调制特性研究[J]. 光学精密工程, 2006(2): 213–217.
- [15] PHILLIPS J D, GODA M E, SCHMIDT J. Atmospheric turbulence simulation using liquid crystal spatial light modulators[C]//SPIE. Proceedings of Advanced Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications III. San Diego: SPIE, 2005: 57–67.
- [16] WILCOX C C, SANTIAGO F, MARTINEZ T, et al. Performance of a flexible optical aberration generator[J]. Optical Engineering, 2011, 50(11): 116601-1–116601-7.
- [17] PHEHLUKWAYO S P, UMUHIRE M L, ISMAIL Y, et al. Influence of coincidence detection of a biphoton state through free-space atmospheric turbulence using a partially spatially coherent pump[J]. Physical Review A, 2020, 102(3): 033732-1–033732-7.
- [18] BROOKS M R, GODA M E. Atmospheric simulation using a liquid crystal wavefront controlling device[A]. San Diego: SPIE, 2004: 5553: 258–268.
- [19] SCHMIDT J D, GODA M E, DUNCAN B D. Aberration production using a high-resolution liquid-crystal spatial light modulator[J]. Applied Optics, 2007, 46(13): 2423–2433.
- [20] 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): 129–134.
- [21] SANTIAGO F, FONT C O, WILCOX C C, et al. Study on the implementation of spatial light modulator liquid crystal device atmospheric simulator for short wavelength infrared applications[C]//SPIE. Proceedings of Free-Space Laser Communication Technologies XXIII. San Francisco: SPIE, 2011, 7923: 180–186.
- [22] TOSPELLI I, KOROTKOVA O, XIAO X, et al. SLM-based laboratory simulations of Kolmogorov and non-Kolmogorov anisotropic turbulence[J]. Applied optics, 2015, 54(15): 4740–4744.
- [23] 刘永军, 胡立发, 曹召良, 等. 液晶大气湍流模拟器[J]. 光子学报, 2006(12): 1960–1963.
- [24] 丁晓娜. 基于分形的大气湍流模拟器的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [25] 艾勇, 段梦云, 徐洁洁, 等. LC-SLM 激光大气传输湍流模拟及通信实验分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3103–3109.
- [26] 张小琪, 倪小龙, 刘智, 等. 采用分区法生成稀疏谱湍流相位屏[J]. 应用光学, 2020, 41(3): 523–530.
- [27] 卢文雍, 石岩, 陈建勇, 等. 扩展重采样次谐波大气湍流模拟相位

- 屏研究[J]. 光子学报, 2024, 53(8): 75–86.
- [28] 杨亚欣, 姚海峰, 刘智, 等. 基于复合相位屏的光传输多孔径接收特性研究[J]. 应用光学, 2024, 45(5): 1085–1094.
- [29] 卫沛锋, 刘欣悦, 林旭东, 等. 自适应光学系统测试中大气湍流的时间域模拟[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 371–377.
- [30] 段梦云, 艾勇, 熊准, 等. 激光大气传输室内模拟研究[J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(3): 188–193.
- [31] 李华, 陈前荣, 王彦斌, 等. 利用液晶空间光调制实现激光大气湍流效应动态仿真[J]. 光电子·激光, 2016, 27(7): 709–715.
- [32] 谭振坤, 柯熙政, 王姣. 外差探测系统波前校正实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 121–127.
- [33] 张娜娜, 单欣, 张燕革, 等. Non-Kolmogorov 湍流对光强影响的模拟实验[J]. 光子学报, 2018, 47(6): 108–116.
- [34] 张雅. FSO 系统中阵列光束在大气湍流中的传输特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [35] 张焕杰. 部分相干高斯脉冲在大气湍流中的展宽特性[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [36] 张慧敏, 李新阳. 大气湍流畸变相位屏的数值模拟方法研究[J]. 光电工程, 2006(1): 14–19.
- [37] 孔英秀. LC-SLM 的空间相干光通信波前校正技术[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [38] 柯熙政, 韩柯娜. 液晶空间光调制器的波前模拟及波前校正[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 170–175.
- [39] 杨雅淇. 双波前校正器校正畸变波前的实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [40] 张云峰. 无波前传感自适应光学校正的 GPU 加速研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [41] 耿兴宁, 刘政, 李武周, 等. 激光在动态大气湍流中的传播特性研究[J]. 激光与红外, 2024, 54(1): 40–47.
- [42] NOLL R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. Journal of the Optical Society of America, 1976, 66(3): 207–211.
- [43] DAI G. Modified Hartmann-Shack wavefront sensing and iterative wavefront reconstruction [C]//SPIE. Proceedings of Adaptive Optics in Astronomy. Kailua-Kona: SPIE, 1994: 562–573.
- [44] 吴加丽. 无波前探测的相干光通信系统实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.