

文章编号: 1005-5630(2025)01-0026-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202411260104

# 光场调控技术及其抗湍流负效应的研究进展

丛芮, 朱培莹, 刘大军  
(大连海事大学 理学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 光具有振幅、相位和频率等多维参量。通过调控单一参量或联合调控多参量可以实现光场调控。光场调控主要分为空域、时域、时空域联合调控等, 可通过调控光场的强度、相位、偏振、频谱等来达到特定的光学效果。近年来, 光场调控在新型光场构建等方面展现出了巨大的潜力, 并揭示了许多新颖现象, 促进了相关理论及技术的发展。概述了光场调控在空间结构光场和时空光场构建方面的研究进展及其在大气湍流中的应用, 结果表明, 光场调控是一种能够有效抵抗大气湍流负效应的有效手段。

**关键词:** 光场调控; 部分相干光; 大气湍流  
**中图分类号:** O 431 **文献标志码:** A

## Research progress on light field manipulation and its advantage in resisting turbulence

CONG Rui, ZHU Peiying, LIU Dajun  
(School of Science, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** The light has multidimensional parameters such as amplitude, phase and frequency. By controlling a single parameter or jointly manipulating multiple parameters the properties of light can be manipulated. The light field manipulation can be categorized into spatial domain, time domain and time-space domain. The characteristics can be realized by modulating intensity, phase, polarization, and frequency. In recent years, the light field manipulation has presented the potential in the production of light field, and revealed innovative phenomena. This paper overviews the research progress of theory of light field manipulation, and the application of light field manipulation in turbulent atmosphere. The results show that light field manipulation is an effective way to overcome the negative of atmospheric turbulence.

**Keywords:** light field manipulation; partially coherent beams; atmospheric turbulence

收稿日期: 2024-11-26

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11604038)

第一作者: 丛芮(2002—), 女, 硕士研究生, 研究方向为光束传输与控制。E-mail: 3238793176@qq.com

通信作者: 刘大军(1981—), 男, 副教授, 研究方向为光束传输与控制。E-mail: liudajun@dlmu.edu.cn

## 引 言

自 20 世纪第一台激光器发明以来, 激光因其高亮度、高相干性、高方向性和高单色性等特性, 逐渐成为研究的热点。通过控制光源所拥有的振幅、相位、偏振、频谱等多维参量, 可以调控光场的特性。光场调控一般可分为空域、时域以及时空域联合调控 3 个方面: 空域调控主要在空间维度上调控光场的振幅、偏振态、相位等; 时域调控主要在时间维度上调控激光脉冲形状、脉宽、啁啾以及相干特性; 时空域联合调控是在时间和空间维度上同时对光场进行联合调制, 进而实现控制复杂光场的目标。而对于光场的频域、时域或空域等维度的参量进行单一或者联合调控, 可产生具有特定分布的结构光场, 从而使光场满足生产生活中的实际应用需求<sup>[1]</sup>。近年来, 光场调控技术在光子学研究中展现出巨大的潜力。同时, 光场调控研究过程中发现的许多新的物理现象和效应进一步促进了光场调控理论和技术的发展。

## 1 国内外研究现状

1995 年, Friberg 等<sup>[2]</sup>在时空域和空频域提出了描述部分相干光的相关系数。其中一个系数描述了时空域的相关性, 另一个系数则描述了空频域的相关性。1996 年, Mandel 等<sup>[3]</sup>提出了在空间-时间域和空间-频率域中满足波动方程与广义亥姆霍兹方程的互相关函数与交叉谱密度函数的定义, 并揭示了它们通过傅里叶变换相互变换的关系, 这对深入理解光的传播方式、干涉现象、衍射效应以及光与物质之间的相互作用等光学现象具有重要的意义。2005 年, Cai 等<sup>[4]</sup>提出了一种利用非相干和部分相干光辐射实现的重合分数傅里叶变换, 并设计了相应的光学系统, 结果表明, 目标的重合分数傅里叶变换的可见度和成像质量与光源的横向尺寸、相干性及光谱宽度有密切关系。2006 年, Zhan<sup>[5]</sup>研究了圆偏振涡旋光束的特性: 将圆偏振涡旋光束分解为径向和方位偏振, 并合理匹配涡旋电荷与圆偏振的旋

向, 得到了具有强纵向分量和平顶光强分布的聚焦场, 揭示了光束的轨道角动量与自旋之间的关系。2011 年, Jiang 等<sup>[6]</sup>采用优化的三角波来驱动锆钛酸铅压电陶瓷, 成功地消除了非线性效应, 使峰值信号的提取和处理变得更加简便, 同时通过双匹配光纤布拉格光栅 (fiber Bragg gratings, FBG) 和应变放大结构的组合来实现布拉格波长的解调, 将波长扫描范围扩展至 6.3 nm, 从而实现了大范围、高精度的应变测量。2016 年, 袁小聪<sup>[7]</sup>设计了新型光学元器件, 突破了轨道角动量并行独立探测的技术难题, 并将光学旋涡应用于传统光学显微镜, 实现了表面等离子体激元的调控, 构建了新一代的表面等离子体激元显微系统。2017 年, Liu 等<sup>[8]</sup>通过数值模拟和实验发现, 部分相干涡旋光束在被障碍物阻挡后, 其相干度分布能够在焦平面实现自我重构, 从而可以通过其在焦平面的相干度分布来确定拓扑电荷。2022 年, 王亚坤等<sup>[9]</sup>通过多坐标变换, 将一维艾里光束、二维艾里光束和艾里涡旋光束分别置于不同坐标系中进行变换, 从而实现了艾里光束双瓣和内嵌涡旋在 0 至  $2\pi$  范围内的独立定向调控。2022 年, Intaravanne 等<sup>[10]</sup>提出了一种采用单层超表面生成三维 (3D) 颜色选择性偏振结构的新方法, 利用颜色与相位的联合复用以及偏振旋转设计得到了多种三维偏振结构。调节入射光的波长, 便能够在同一观察区域内生成不同的 3D 偏振结构, 实现了三维空间中的偏振控制。2023 年, Guo 等<sup>[11]</sup>研究了一种新型时空光涡旋, 在不同的时空区域内嵌入多个相位奇点, 通过调整波包设计中的各项参数, 可以在时空中灵活地控制光子轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 的大小和方向。2024 年, Li 等<sup>[12]</sup>揭示了 OAM 光束与素数之间的关联, 提出了一种快速进行质因数分解的方法。该方法利用质数筛对 OAM 光束进行调制, 在聚焦透镜后焦平面的轴上测量光强, 可直接区分因数和质因数。2024 年, 顾亮亮等<sup>[13]</sup>通过基于转角系统构建的莫尔平带结构实现了具备简并特性的设计, 从而能够生成任意形状的大面积、高功率纳米激光阵列, 并可通过调节相对相位精确控制激光的发射方向。综上所述, 近年来科研人员在新

型光束的构建、产生及应用方面都取得了巨大的进展，光场调控技术也成为了一个新的研究热点。

## 2 光场调控原理

光场传播是一个复振幅衍射的过程，为了在焦平面获得所需的光场，通常需要调整入射平面的复振幅，并通过一系列光学元件进行衍射。通常，激光从激光器射出后经过激光扩束镜等器件处理后，则可从相位、振幅、复振幅 3 个维度来进行调控。相位调制是在入射光场振幅不变的情况下，利用相位延迟器件在入射平面不同像素引入光程差来改变相位，进而得到所需光场。振幅调制是在入射平面插入数字微镜阵列或掩膜版，将不需要的像素反射到其他位置或直接阻挡吸收，从而得到振幅受调制的入射光场。复振幅调制是根据惠更斯原理，将目标光场分解为点源，并以球面波逆向传播，然后在入射平面叠加得到复振幅分布，再将此复振幅分布正向传播，可以近乎不失真地重建目标光场。利用调控光场理论可以构建目标光场，利用实验光路可以实现光场的制备。光场调控可以在空域、时域以及时空域联合等多个维度进行，通过不同的实验方法可实现对相位、振幅或复振幅的调控<sup>[14]</sup>。

### 2.1 部分相干结构光场调控基础理论

部分相干光在很多领域中表现出独特的优异性，如可以克服相干引起的散斑噪声，能提高成像信噪比及降低信号传输过程中的误码率等。在对部分相干光进行描述时，空间-频域中的部分相干光的交叉谱密度是空间位置和光场频率的函数<sup>[15]</sup>，即

$$W(r_1, r_2, \omega) = \langle E^*(r_1, \omega) E(r_2, \omega) \rangle \quad (1)$$

式中： $W$  为交叉光谱密度函数； $r = (x, y)$  为位置坐标； $\omega$  为光场的频率； $E$  为与传输方向相垂直的电场；\* 为复共轭。

要构建出具有物理意义的光束，需满足 Gori 等<sup>[16]</sup> 和 De santis 等<sup>[17]</sup> 提出的部分相干光束的非负正定条件，即

$$W(r_1, r_2) = \int p(v) H^*(r_1, v) H(r_2, v) d^2v \quad (2)$$

式中： $H(r, v)$  为任意函数； $p(v)$  为非负函数； $v$  为傅里叶空间的位置。基于式(2)，可以通过构建  $H(r, v)$  函数和  $p(v)$  非负函数，获得不同类型的部分相干光束。

部分相干光束的实验制备方法，主要有动态散射体法和模式分解法，相关示意图见图 1。

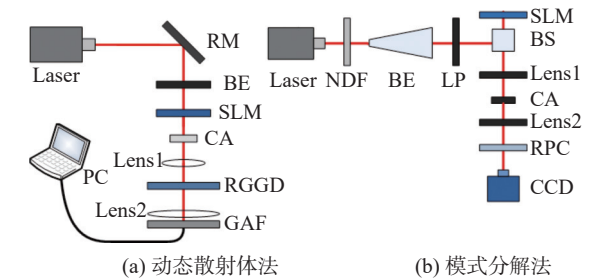


图 1 部分相干光束实验制备方法示意图  
 Laser: 激光器; RM: 反射镜; BE: 光束扩展器; SLM: 空间光调制器; NDF: 中性密度滤光片; BS: 分束器; LP: 线性偏振片; CA: 准直器; Lens1、Lens2: 透镜 1、透镜 2; RPC: 反射相位控制器; CCD: 电荷耦合器件; RGGD: 随机光栅生成设备; GAF: 光束调整装置; PC: 计算机

图 1 部分相干光束实验制备方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental preparation methods of partially coherent beam

### 2.2 时空光场调控基础理论

在时空光场的描述方面，时空光场的互相干函数<sup>[15]</sup> 为

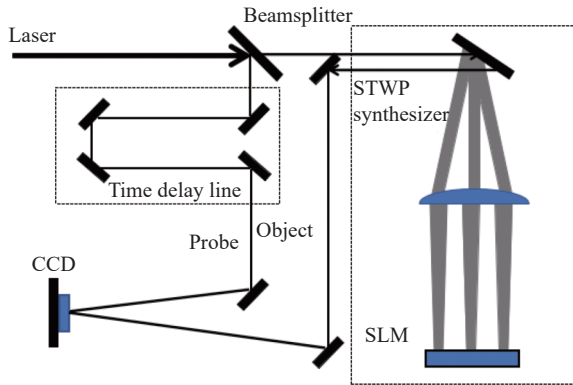
$$\Gamma(x_1, t_1, x_2, t_2) = \iint p(v_x, v_t) H(x_1, t_1; v_x, v_t) H^*(x_2, t_2; v_x, v_t) dv_x dv_t \quad (3)$$

式中： $\Gamma$  为互相干函数； $x$  为空间坐标； $t$  为时间变量； $H$  为任意函数； $p$  为非负函数； $v$  为傅里叶空间的位置。基于式(3)，可以构建出时空调控的光场。目前，已实验制备出时空涡旋光场和贝塞尔时空光学涡旋 (Bessel spatiotemporal optical vortices, BeSTOV)<sup>[18-19]</sup>。

BeSTOV 合成装置示意图见图 2，利用该装置调制波包的空间相位和光谱相位，可生成具有时空耦合场分布的 BeSTOV。该典型的 BeSTOV 合成器由衍射光栅、圆柱形透镜和空间光调制器 (spatial light modulator, SLM) 等组成。

## 3 光场调控技术的应用研究

目前，光场调控技术已在时域、空域和时空



Laser: 激光器; Beamsplitter: 分束器; STWP synthesizer: 时空光涡旋合成器; SLM: 空间光调制器; Time delay line: 时间延迟线; Probe: 探测光束; Object: 物体; CCD: 电荷耦合器件

图 2 BeSTOV 合成装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Bessel spatiotemporal optical vortices synthesizer device

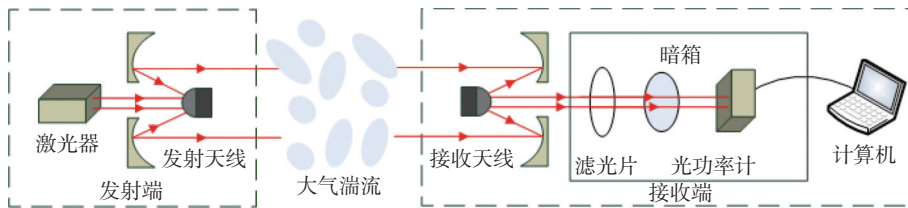


图 3 大气信道下的无线光通信原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of wireless optical communication principle under atmospheric channel

有关激光经大气湍流传输的研究, 王小妮<sup>[21]</sup>阐述了大气的湍流运动会引起光斑的漂移和闪烁等大气湍流效应, 研究了大气随机信道对激光传输的影响, 并采取有效措施克服了大气干扰, 确保系统在随机信道条件下正常运行, 有助于无线光通信的实现。2016 年, 余佳益等<sup>[22]</sup>提出一种新型特殊关联部分相干光束, 即非均匀拉盖尔-高斯关联光束, 并仿真计算了该光束在自由空间和湍流大气传输中的光强分布和关联结构函数分布演化特性。同时, 他们发现该光束经过关联结构调控后能有效降低湍流的影响。2023 年, 李征等<sup>[23]</sup>提出未来的大气湍流模型研究应聚焦于分析和对比不同光源在各类大气湍流条件下的传输特性, 深入探索大气湍流对光信号传输的影响机制, 并进一步提高抑制大气湍流干扰的能力。此外, 为了探索调控光场抗大气湍流负效应的影响, 多类型的光场, 如结构光场<sup>[24]</sup>、涡旋光场<sup>[25-26]</sup>等在大气湍流中的传输特性也引起了人们的关注。

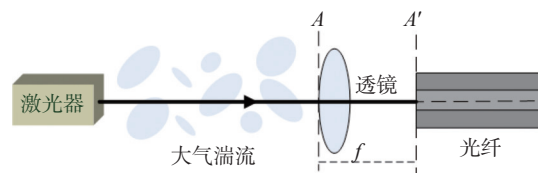
域 3 个方面形成了成熟的理论体系, 并在抗湍流干扰、提高单模光纤耦合效率等方面得到广泛应用。

### 3.1 抗大气湍流扰动

大气湍流是由于大气中气流的不规则运动引起的。大气湍流有 2 个重要参数, 分别是代表湍流涡旋中最小涡旋的内尺度和代表最大涡旋的外尺度。当光束在大气信道中传输时, 大气湍流引发的光强起伏、光束漂移、相位起伏和光束扩展等因素, 会严重干扰光信号, 从而降低光通信系统的性能。若采用光场调控技术则可以有效降低光信号传输过程中大气湍流的影响<sup>[20]</sup>。光在大气湍流中的传播示意图见图 3。

### 3.2 提高光纤耦合效率

光纤耦合效率是指光源发出的光能够传输到接收端光纤中的比例。提高光纤耦合效率可以有效提高系统的光能利用。在自由空间中, 光纤耦合效率通常比较高。然而, 当光束经过大气湍流时, 由于光强信号衰落, 传输到接收端的能量会降低, 从而导致光束的光纤耦合效率降低。采用光场相干结构调控技术可以降低大气湍流对光纤耦合效率的影响。大气湍流条件下的空间光束耦合光纤示意图见图 4。



平面 A: 孔径平面; 平面 A': 焦平面; f: 焦距

图 4 大气湍流条件下的空间光束耦合光纤示意图

Fig. 4 Schematic diagram of space beam coupling fiber under atmospheric turbulence



2019年, Liang等<sup>[27]</sup>提出了部分相干准直激光束穿过湍流生物组织到达光纤时的光纤耦合效率模型。通过研究链路参数对光纤耦合效率的影响, 他们发现对于特定的湍流组织存在最优的焦距和传输光束半径。2019年, Yu等<sup>[28]</sup>针对大容量无线光纤链路的需求, 首先研究了大气湍流条件下拉盖尔-高斯涡旋光束与抛物型光纤的耦合效率, 建立了耦合模型, 分析了湍流对耦合效率的影响, 并提出了系统优化的方法, 以抑制耦合效率的下降。2015年, Tan等<sup>[29]</sup>用高斯-谢尔模型(Gaussian Schell model, GSM)取代了以往研究中基于高斯模型的交叉谱密度函数, 给出了GSM激光源通过大气湍流后的光纤耦合效率方程, 同时指出光纤耦合效率随着源相干参数的增加而不断降低。2022年, 尹涵等<sup>[30]</sup>提出了一种基于LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>和LP<sub>11b</sub>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, 以对抗自由空间光通信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。2022年, 刘永雷等<sup>[31]</sup>详细总结了新型相干结构部分相干光场的理论构建和实验合成进展, 同时概述了其在复杂介质中的鲁棒传播特性以及在光加密、成像、鲁棒信息传递和光束整形等方面的应用。

## 4 结 论

本文总结了光场调控技术在空域、时域、时空域等方面的研究进展及其在大气湍流环境中的应用。首先, 总结了光场调控的基本原理、光场构建原理及光束实验制备方案等方面的研究工作; 随后, 论述了大气湍流对传输光场的影响, 以及在无线光通信中抑制湍流噪声、提高信号传输稳定性和可靠性等方面的工作; 最后, 讨论了调控光场在提高光纤耦合效率和信息传递等方面的研究进展。

### 参考文献:

- [1] 蔡阳健, 陈树琪. "光场调控及应用"专辑导读[J]. 光子学报, 2022, 51(1): 0151100.
- [2] FRIBERG A T, WOLF E. Relationships between the complex degrees of coherence in the space-time and in the space-frequency domains[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(6): 623 – 625.
- [3] MANDEL L, WOLF E, SHAPIRO J H. Optical coherence and quantum optics[J]. *Physics Today*, 1996, 49(5): 68 – 70.
- [4] CAI Y J, ZHU S Y. Coincidence fractional Fourier transform implemented with partially coherent light radiation[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, 22(9): 1798 – 1804.
- [5] ZHAN Q W. Properties of circularly polarized vortex beams[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(7): 867 – 869.
- [6] JIANG B Q, ZHAO J L, QIN C, et al. An optimized strain demodulation method based on dynamic double matched fiber Bragg grating filtering[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(3): 415 – 418.
- [7] 袁小聪. 光学旋涡光场调控与应用[J]. 光学与光电技术, 2016, 14(6): 13 – 16.
- [8] LIU X L, PENG X F, LIU L, et al. Self-reconstruction of the degree of coherence of a partially coherent vortex beam obstructed by an opaque obstacle[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(18): 181104.
- [9] 王亚坤, 台玉萍, 李新忠. 艾里涡旋光束的多空间维度自由调控[J]. 光子学报, 2022, 51(1): 0151116.
- [10] INTARAVANNE Y, Wang R X, Ahmed H, et al. Color-selective three-dimensional polarization structures[J]. *Light-Science & Applications*, 2022, 11(1): 320.
- [11] GUO L L, CAO Q, ZHAN Q W. Spatiotemporal optical vortex wavepackets with phase singularities embedded in multiple domains [Invited][J]. *Chinese Optics Letters*, 2023, 21(8): 080003.
- [12] LI X F, LIU X, WU Q Y, et al. Prime number factorization with light beams carrying orbital angular momentum[J]. *APL Photonics*, 2024, 9(4): 046107.
- [13] 顾亮亮, 詹其文. 基于转角系统的可重构相干纳米激光阵列[J]. 科学通报, 2024, 69(10): 1245 – 1247.
- [14] 柴源, 闫跃潇, 方红华, 等. 光场调制技术在超快激光加工中的应用(特邀)[J]. 光学学报, 2024, 44(17): 169 – 190.
- [15] WOLF E. Introduction to the theory of coherence and polarization of light[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [16] GORI F, SANTARSIERO M. Devising genuine spatial correlation functions[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(24): 3531 – 3533.
- [17] DE SANTIS P, GORI F, GUATTARI G, et al. Synthesis of partially coherent fields[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1986, 3(8): 1258 – 1262.

- [18] CHONG A, WAN C H, CHEN J, et al. Generation of spatiotemporal optical vortices with controllable transverse orbital angular momentum[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(6): 350 – 354.
- [19] CAO Q, CHEN J, LU K Y, et al. Non-spreading Bessel spatiotemporal optical vortices[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(2): 133 – 140.
- [20] 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.
- [21] 王小妮. 自适应光学与在无线激光通信中的应用 [D]. 太原: 中北大学, 2008.
- [22] 余佳益, 陈亚红, 蔡阳健. 非均匀拉盖尔-高斯关联光束及其传输特性 [J]. *物理学报*, 2016, 65(21): 214202.
- [23] 李征, 廖志文, 梁静远, 等. 大气湍流模型与大气信道模型的研究与展望 [J]. *光通信技术*, 2023, 47(3): 9 – 17.
- [24] KLUG A, PETERS C, FORBES A. Robust structured light in atmospheric turbulence[J]. *Advanced Photonics*, 2023, 5(1): 016006.
- [25] WANG S L, CHENG M J, YANG X H, et al. Self-focusing effect analysis of a perfect optical vortex beam in atmospheric turbulence[J]. *Optics Express*, 2023, 31(13): 20861 – 20871.
- [26] CAO J X, HAN L, LIANG H J, et al. Orbital angular momentum spectrum of pin-like optical vortex beams in turbulent atmosphere[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2022, 39(8): 1414 – 1419.
- [27] LIANG Q Y, HU B B, ZHANG Y X, et al. Coupling efficiency of a partially coherent collimating laser from turbulent biological tissue to fiber[J]. *Results in Physics*, 2019, 13: 102162.
- [28] YU L, ZHANG Y X. Investigation on the coupling of vortex beam into parabolic fiber in turbulent atmosphere[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 6101608.
- [29] TAN L Y, LI M N, YANG Q B, et al. Fiber-coupling efficiency of Gaussian Schell model for optical communication through atmospheric turbulence[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(9): 2318 – 2325.
- [30] 尹涵, 宋英雄, 李迎春, 等. 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 [J]. *中国激光*, 2022, 49(23): 2306002.
- [31] 刘永雷, 董震, 陈亚红, 等. 新型相干结构光场调控及应用研究进展 [J]. *光电工程*, 2022, 49(11): 3 – 30.

(编辑: 李晓莉)