

引用本文:郭倩,闫思雨,柯熙政.平顶光束在大气湍流信道中传输研究进展[J].光通信技术,2026,50(4):96-102.

平顶光束在大气湍流信道中传输研究进展

郭倩¹,闫思雨²,柯熙政^{2,3*}

(1.河南科技大学 材料科学与工程学院,河南 洛阳 471000;2.西安理工大学 自动化与信息工程学院,西安 710048;

3.咸阳市智能制造装备技术重点实验室,陕西 咸阳 713199)

摘要:为了解决光束在大气湍流传输时接收光斑强度均匀问题,探究了平顶光束在大气湍流中传输的理论基础,介绍了大气湍流条件下平顶光束的光强特性和散斑特性优势,进而综述了光束整形、自适应光学和多光束合成等改善光强分布的关键技术。最后结合国内外相关研究进展,总结了平顶光束在理论建模、数值模拟及实验验证方面的研究成果。

关键词:无线光通信;平顶光束;大气湍流;光传输;散斑特性

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)04-0096-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.04.015

Research progress on the propagation of flattened beams in atmospheric turbulence channels

GUO Qian¹, YAN Siyu², KE Xizheng^{2,3*}

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471000, China;

2. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

3. Xianyang Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Equipment Technology, Xianyang Shaanxi 713199, China)

Abstract: To address the issue of poor uniformity of received beam intensity during propagation through atmospheric turbulence, this paper investigates the theoretical basis of flattened beams propagation through atmospheric turbulence. The advantages of flattened beams in terms of intensity distribution and speckle characteristics under atmospheric turbulence are introduced. Furthermore, key techniques for improving intensity distribution, including beam shaping, adaptive optics, and multi-beam combination, are reviewed. Finally, in conjunction with relevant research progress both domestically and internationally, the research achievements of flattened beams in theoretical modeling, numerical simulation, and experimental verification are summarized.

Key words: wireless optical communication, flattened beam, atmospheric turbulence, optical transmission, speckle characteristics

0 引言

随着无线光通信、光学对地遥感等技术的发展,光束在大气中稳定、高效的传输尤为重要^[1-3]。大气湍

流由温度、压强等因素的随机扰动引起,其导致的折射率随机起伏会使光束出现波前畸变、强度起伏、光束漂移等现象^[4-6]。高斯光束是一种应用广泛的光束模型^[7],但大气湍流会导致其波前中心高强度区域与边缘低强度区域的同时受到影响,进而形成具有明暗反差的散斑,且高斯光束在传输过程容易受到干扰,抗干扰能力较弱^[8]。平顶光束的强度分布相对均匀,在一定程度上能减少波前畸变带来的影响,使接收光斑的强度均匀性更好^[9-11]。这一特性为改善光束在大气湍流中的传输性能提供了新的研究方向。

本文介绍近年来平顶光束在大气湍流中传输性能方面的研究进展,涵盖理论分析、数值模拟、实验验证等多个层面,旨在深入挖掘其潜力,为无线光通信领域出现的传输问题提供更有效的解决办法。

收稿日期:2025-07-25。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(61377080)资助;陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)资助。

作者简介:郭倩(1984—),女,陕西西安人,博士研究生,高级工程师。研究方向为智能检测技术、增材制造及快速成型技术。在国内外期刊及国际会议发表论文20余篇;出版机械设计相关教材3部;获授权国家发明专利及实用新型专利5件;指导省级项目1项;获省级二等奖3项、三等奖1项、优秀奖2项。

***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。



1 大气湍流和平顶光束理论及传输模型

1.1 大气湍流理论

大气中温度、湿度和风速的不均匀分布导致折射率随机变化形成大气湍流^[12]。光在大气湍流中传输时,大尺度湍流产生折射效应,小尺度湍流产生衍射效应。大气湍流强弱根据折射率结构常数 C_n^2 的数值大小进行划分。

当光在大气湍流中传输时,折射率功率谱分布示意图如图1所示。其中, k 为空间波数, L_0 和 l_0 分别为湍流外尺度和内尺度,该图仅展示谱模型在能量输入区和高频(能量耗散区)的曲线形态差异。其中,能量输入区对应于大尺度涡旋(空间波数 $k < 2\pi/L_0$),该区域的湍流能量只来源于宏观气象条件(如风速切变和热对流)的注入。在惯性区内,常用 Kolmogorov 谱来描述湍流折射率起伏对功率谱的影响,但 Kolmogorov 湍流模型模拟出的功率谱存在较大误差,因此文献[13]在能量耗散区引入高斯衰减模型,修正后可得到 Tatarskii 谱模型。但当涡旋湍流尺寸接近 L_0 (即空间波数 k 接近 $2\pi/L_0$) 时,会出现大尺度起伏现象,导致 Tatarskii 谱误差较大,此时可使用 Von Karman 谱模型对湍流低频部分进行修改,但该模型不包含对高波数区域突变因素的分析,针对此不足文献[13]提出了 Hill 谱模型,以准确刻画高波数区的突变行为。然而,实际情况下,大气湍流更接近于各向异性的 non-Kolmogorov 谱模型^[14],该模型通过引入广义幂律指数 α ,可更准确地描述湍流各向异性特征及其对激光传输闪烁指数、光束扩展和误码率等性能参量的影响。

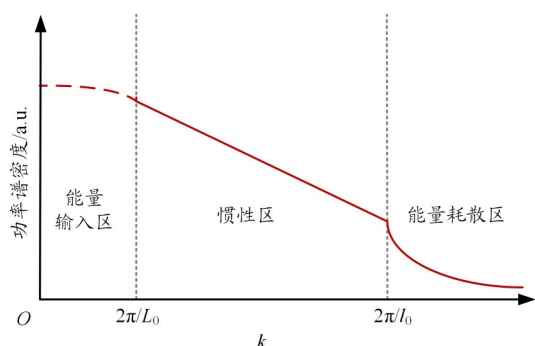


图1 折射率功率谱分布示意图

光束在湍流中传输时,湍流因素会导致光束折射率不均。当下大气湍流中传输光束的处理方法主要有^[15]:几何光学法、Rytov 方法、广义惠更斯-菲涅尔原理、统计矩直接求解、路径积分等,方法的适用条件和典型应用如表1^[16]所示。

表1 大气湍流中传输光束的主要处理方法

处理方法	适用条件	典型应用
几何光学法	弱起伏, 传输距离较短	到达角起伏, 光线漂移
Rytov 方法	弱起伏, 前向小角散射	振幅起伏, 相位起伏
广义惠更斯-菲涅尔原理	弱起伏, 前向小角散射	有限光束效应, 成像和相位校正分析
统计矩直接求解	强起伏, 前向小角散射	光强起伏, 光强空间分布
路径积分	弱、强起伏, 前向小角散射	各种效应和渐进解析解

1.2 平顶光束理论

平顶光束指光强在横截面上呈现近似均匀分布的特殊光束,光束阶数为10时的平顶光束光强分布图如图2^[17]所示。可以看出,平顶光束中心区域强度波动较小且边缘具有陡降特性^[18]。相较于高斯光束的连续衰减特性,平顶光束的中心均匀光强分布特性可实现更稳定的接收功率,其陡降特性可减少相邻光斑的重叠干扰,更适合通信需求^[10]。另外,在大气湍流中传输时,平顶光束展宽更小,抗湍流干扰能力更强^[11]。

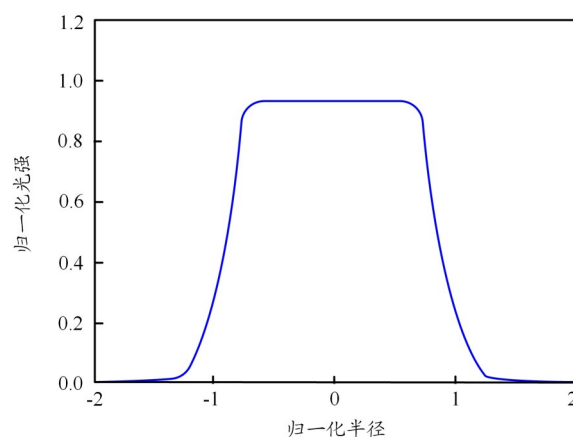


图2 平顶光束光强分布图

平顶光束可由高斯光束通过空间光束整形方法产生,比如非球面透镜法^[19]、双凸非球面透镜法^[20]、微透镜阵列整形法^[21]、液晶空间光调制器整形法^[22]等。平顶光束光场模型及其光强分布常采用超高斯光束模型^[9]、平顶高斯光束模型^[23]来描述。其中,超高斯光束模型的光强表示为

$$U(r_0, 0) = \exp \left[- \left(\frac{|r_0|}{\omega_0} \right)^M \right] \quad (1)$$

式中: r_0 是发射面的离光轴的径向距离, $U(r_0, 0)$ 表示

郭倩, 闫思雨, 柯熙政: 平顶光束在大气湍流信道中传输研究进展

在 r_0 处初始平面 ($z=0$) 上的光强分布, ω_0 为束腰半径, M 为阶数。

平顶高斯光束模型的光强分布^[23]表示为

$$U_0(r_0, 0) = \exp\left[-\frac{(M+1)r_0^2}{\omega_0^2}\right] \sum_{m=0}^M \frac{1}{m!} \left(\frac{M+1}{\omega_0^2} r_0^2\right)^m \quad (2)$$

式中: $\sum_{m=0}^M \frac{1}{m!} \left(\frac{M+1}{\omega_0^2} r_0^2\right)^m$ 为光束叠加项。其中, 求和

索引 m 表示参与合成平顶光束的各个基底模式的阶次, 该求和项描述了这 $M+1$ 个不同阶次的模式分量对平顶光束的整体贡献。平顶光束总阶数 M 越大, 参与合成的模式数量越多, 光束顶部越平坦, 边缘过渡越锐利。其中, $\frac{1}{m!}$ 用于确保求和项的权重正确。低阶平顶高斯光束可视为将多个不同束腰和振幅参数的基模高斯光束叠加^[12], 在满足平顶光束性质的情况下, 光强分布表示为

$$U_0'(r_0, 0) = \sum_{m=1}^M \alpha_m \exp\left(-\frac{mr_0^2}{\omega_0^2}\right) \quad (3)$$

式中: α_m 为高斯光束振幅分量。

除此之外, 费米-狄拉克光束模型^[24]、平顶洛伦兹光束模型^[25-26]也常被用来描述平顶光束光场分布, 此处不再赘述。

1.3 平顶光束在大气湍流中的传输模型

平顶光束因其均匀的光强分布特性在大气激光通信中具备优势, 但光束在其中传输时波前会产生复杂畸变, 导致光束扩展、光斑漂移及光强闪烁等现象。平顶光束在大气湍流中的传输示意图如图3所示, 光束从 $z=0$ 源平面向 $z>0$ 的大气湍流空间傍轴传输。假设光束从源平面点 $A(r_0, 0)$ 传输到空间中一点 $B(r, L)$, 图中 ρ 为从点 A 传输到点 B 的空间位置矢量, L 为传输距离。在 Rytov 方法下, 根据广义惠更斯-菲涅尔原理, 光场^[27-29]可以表示为

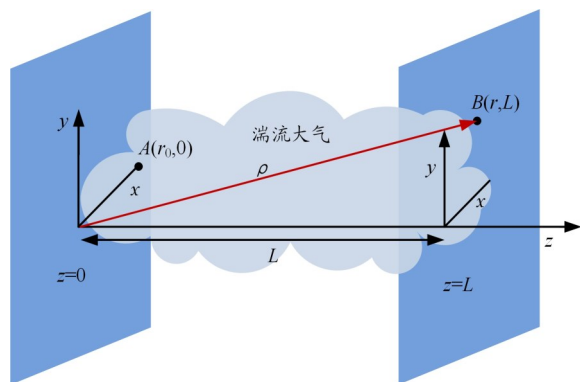


图3 平顶光束在大气湍流中的传输示意图

$$U(r, L) = -\frac{ik}{2\pi L} \exp(ikL) \iint d^2r_0 U_0(r_0, 0) \times \exp\left[\frac{ik|r_0 - r|^2}{2L} + \Psi(r, r_0)\right] \quad (4)$$

式中: $\Psi(r, r_0)$ 表示从点 A 到点 B 传播时的随机相位因子; r 为接收面的离光轴径向距离, 用来描述光束横向位置变化; d^2r_0 为源平面上的二维积分微元。

2 平顶光束在大气湍流中的光强特性

2.1 光强闪烁特性

光强闪烁特性指光束在大气湍流中传播时, 因折射率随机涨落导致的接收面光强随机波动现象, 其本质是湍流涡旋对光束波前的相位扰动引起的衍射效应^[27]。当平顶光束在大气湍流中传输时, 轴向光强会随湍流强度增加而减弱, 接收面处的光功率会因光强闪烁而产生强烈起伏, 从而导致通信传输性能下降^[30-31]。光强闪烁程度^[32]通常由闪烁指数来量化, 其表达式为

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I \rangle^2}{\langle I^2 \rangle} - 1 \quad (5)$$

式中: I 为接收光强, $\langle \cdot \rangle$ 表示系综平均。在弱起伏条件下, 闪烁指数近似等于对数强度起伏方差。根据 Kolmogorov 理论, 可得光束对数强度起伏方差^[33]为

$$\sigma_I^2 = A_0 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (6)$$

式中: A_0 为常数, 球面波时其值为 0.496, 平面波时其值为 1.23。考虑闪烁饱和效应, 采用修正 Rytov 理论进一步推出平顶光束对数强度起伏方差^[33]为

$$\sigma_I^2 = A_0 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} f(M, \sigma) \quad (7)$$

式中: σ 为光束的空间相干长度, $f(\cdot)$ 为平顶光束特性修正函数。当平顶光阶数 M 较大时, 高阶平顶光束边缘陡峭的光强分布可抑制湍流相位扰动, 使闪烁指数降低^[34]。

2.2 光束扩展特性

平顶光束在大气湍流中传输时, 不同区域的光程差因折射率随机起伏而发生变化, 当光强在横截面上的分布范围不断扩大时, 即产生了光束扩展^[35]。光束扩展具体表现为光束的束腰半径随传输距离的增加而扩大, 本质是湍流引起的相位扰动使光束能量发生了横向扩散^[31]。若初始光束的束腰半径为 ω_0 , 在传输距离 L 处的扩展半径 $\omega(L)$ ^[23] 定义为

$$\omega(L) = \omega_0 \sqrt{1 + \Delta^2(L)} \quad (8)$$

式中: $\Delta^2(L)$ 为展宽因子。平顶光束的长期展宽半径 ω_L ^[23] 为

$$\omega_L = \omega_0 \sqrt{1 + 1.33\sigma_R^2 \left(\frac{L}{k\omega_0^2} \right)^{5/6}} \quad (9)$$

式中: σ_R^2 为 Rytov 方差, $\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ 。 C_n^2 越大时, 折射率起伏越剧烈, 展宽速率增加越明显。当阶数增加时, 高阶平顶光束边缘陡峭的光强分布特性可有效抑制湍流导致的能量扩散^[31]。在实验中, $M=4$ 时的光束扩展速率显著低于 $M=1$ 时的高斯光束^[34]。除此以外, 较小的 ω_0 和较长的传输距离都会加剧光束展宽, 而长波长因衍射效应较弱, 其抗展宽性能会更优^[36]。

2.3 光束漂移特性

光束漂移指光束在大气信道中传输时受到湍流影响, 光束波阵面发生形变, 光束整体中心发生的随机偏移现象^[35]。其本质上是由于大气湍流使空气密度分布不均匀, 形成了动态变化的折射率梯度, 从而导致光束传播方向持续偏转。光束漂移特性^[37]可用漂移方差 σ^2 来表示

$$\sigma^2 = 1.7C_n^2 L^2 (2\omega_0)^{-1/3} \quad (10)$$

当光束为平顶光束时, 需要考虑湍流外尺度与光束参数的相互作用。此时光束漂移方差由湍流参数、光束特性及传输路径共同决定^[35], 表达式为

$$\sigma_0^2 = KC_n^2 L^3 \left(\frac{\lambda}{\omega_0} \right)^2 f(L_0/\omega_0) \quad (11)$$

式中: K 为湍流外尺度及光束特性相关的比例系数。实际应用中, 修正函数的常见形式^[38-39]为

$$f(L_0/\omega_0) \propto \left(1 + \frac{\omega_0^2}{L_0^2} \right)^\alpha \quad (12)$$

当 $L_0 \gg \omega_0$ 时, 湍流对光束整体相位扰动更显著, 漂移方差增强; 若 $L_0 \approx \omega_0$, 则扰动以局部相位畸变为主, 漂移方差较小。

3 平顶光束在大气湍流中的散斑特性

光束透过强散射介质时内部会发生多重散射, 不同的散射光之间发生干涉会产生分布随机的散斑^[40]。散斑是相干光在传播过程中因波前随机调制产生的随机干涉图案, 本质上是光场振幅和相位的随机涨落^[41]。

不同光束在湍流中形成的散斑特性不同。高斯光束和平顶光束的散斑特性差异源于两者初始光强分布和波前结构不同, 导致2种光束与大气湍流的相互作用存在区别^[42]。其中, 高斯光束光强中心强、边缘弱。当高斯光束通过大气湍流时, 中心高强度区域与边缘低强度区域的波前会同时受到随机调制, 但由于

能量集中在中心部分, 中心区域的波前畸变对散斑对比度的影响更大, 此时若中心区域受强湍流影响, 散斑将会发生剧烈畸变, 抗干扰能力较差^[43-44]。

平顶光束由于平顶区域光强分布均匀, 波前在横向范围内的初始相位一致性更高, 在湍流中传输时, 各子光束的干涉作用更均衡, 叠加后散斑的明暗起伏更小, 空间分布更均匀, 显著提升接收信号的稳定性和测量精度, 避免了高斯光束中心能量过度集中导致的局部强畸变问题。平顶光束的散斑特性受平顶宽度、边缘陡峭度影响更大, 平顶宽度越宽, 参与干涉的独立子波前越多, 散斑的空间分布越均匀。

平顶光束的平顶宽度通常大于高斯光束的束腰直径, 在大气湍流中传输时, 由于能量分布均匀, 局部干扰对整体散斑的影响被稀释, 抗局部干扰能力更强。高斯光束和平顶光束散斑特性的具体区别如表2所示^[8-11]。

表2 高斯光束和平顶光束散斑特性对比表

特性	高斯光束散斑	平顶光束散斑
光强分布基础	中心强、边缘弱	中心均匀、边缘陡峭
散斑对比度	高(明暗反差大)	低(明暗起伏小)
散斑尺寸	较大	较小
统计稳定性	理论模型成熟, 可预测性强	模型较复杂但实际稳定性高
抗干扰能力	弱	强

4 改善平顶光束在大气湍流中光强分布的方法

4.1 光束整形技术

光束整形技术是通过调控光束的空间能量分布、相位或偏振态, 改变其传播特性以满足特定应用需求的光学技术^[45], 主要实现方式包括相位调控、振幅调控和复合调控。其中, 相位调控利用空间光调制器、衍射光学元件等调整光束波前相位; 振幅调控通过限制光束形状, 将高斯光束转换为均匀光斑; 复合调控联合相位与振幅调控, 以适应更复杂的场景需求。

基于上述3种方式, 目前主流的光束整形技术实现方法主要有光阑法、场映射法和多孔径光束聚焦法。光阑法使用物理孔径直接裁剪光束形状^[46], 但传统硬边光阑可能因无法找到适合的孔径而产生衍射调制。针对这一问题, 可采用衍生软边光阑抑制衍射调制, 经过光阑截趾整形后的入射光会再通过一个滤波器, 使整形后的光束轮廓更平滑^[47]。场映射法^[48]通

郭倩,闫思雨,柯熙政:平顶光束在大气湍流信道中传输研究进展

过透镜阵列或光栅将输入光场映射为目标光强分布,该方法适用于单模激光束无损整形。多孔径光束聚焦法通过将入射光束分割为若干子光束,通过聚焦元件叠加重组,最终形成目标光强分布,该方法适用于空间相干性较低的多模光束^[46]。

4.2 自适应光学技术

自适应光学技术通过实时监控大气湍流引起的波前畸变,利用波前校正器对波前畸变进行校正,从而显著改善平顶光束在大气传输中的光强分布稳定性,其系统原理图如图4所示,主要包括波前传感器、波前控制器和波前校正器三部分^[48]。波前传感器常采用 Shack-Hartmann 波前传感器实时监测光束相位畸变;波前控制器根据传感器测量结果计算出所需的校正信号;波前校正器通过可变形镜动态调整镜面曲率,补偿湍流导致的波前误差^[49]。自适应光学技术可以实时校正平顶光束的波前畸变,有效减少光强的闪烁和畸变,恢复其均匀的光强分布。校正后平顶光束轴向光强波动降低,光束扩展效应减少^[50]。

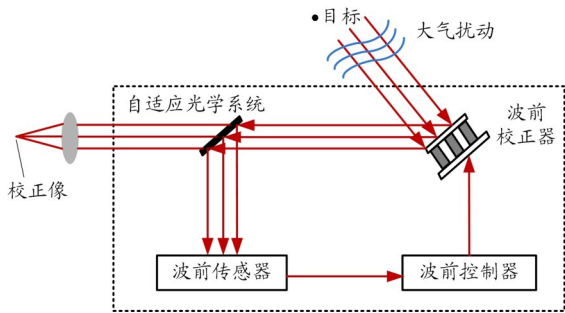


图4 自适应光束原理图

4.3 多光束合成技术

合成技术一般采用相干合成或非相干合成2种方式。在相干合成中,需要保证各子光束之间的相位一致性,通过干涉合成得到高强度的平顶光束^[51];在非相干合成中,各子光束之间不需要严格的相位匹配,通过光强叠加即可得到合成光束^[52-54]。

由于大气湍流对每个子光束的影响随机,通过合成多个子光束的光强,可以降低湍流对整体光强分布的影响,从而获得更稳定、均匀的光强分布。部分相干合成技术能抑制高阶湍流效应,尤其适用于强湍流条件下改善平顶光束光强分布^[31]。

5 平顶光束在大气湍流信道中传输的相关研究

大气湍流作为影响光束传输的关键因素,其温度、压强等随机波动会导致光束出现波前畸变、光强闪烁、光斑漂移等现象,相关研究已明确平顶光束可

有效抑制湍流对光束传输的干扰。学者们围绕平顶光束在湍流中的传输特性及光束整形技术开展了大量研究。

在光束传输特性方面,早期工作侧重理论建模。Parent A 等人^[55-56]提出不同的平顶光束建模方法,其核心思想、优势及局限如表3所示。2006年, Baykal Y 等人^[57]推导出大气湍流下平顶光束的平均光强、波束宽度等因子的表达式。2008年,季小玲等人^[58]推导出湍流情况下平顶光束的光谱传输方程。2021年,胡志蒙等人^[42]对比了自由空间和大气湍流2种环境中平顶光束的传输性能,分析指出高阶平顶光束可有效抑制光强闪烁。

表3 平顶光束建模方法对比分析

建模方法	核心思想	优势	局限
超高斯光束模型 ^[55]	通过超高斯函数逼近平顶光束的陡峭边缘	理论精度高,边缘模拟准确	计算冗余,数值实现复杂
平顶高斯光束模型 ^[18]	引入平顶高斯函数简化计算	计算简化,保留平顶光束的均匀性特征	边缘过渡平缓,长距离模拟效率低
平顶多高斯光束模型 ^[56]	多高斯光束叠加优化计算,降低冗余	计算优化,支持部分相干光	参数调整复杂,硬件依赖性强
高斯相干叠加法 ^[12]	用不同宽度的基模高斯光束相干叠加描述平顶光束	计算高效,兼容高斯传输理论	叠加比例敏感,湍流适应性有限

随着现代光学技术的发展,众多学者围绕平顶光束的生成与优化开展了深入研究。2022年,陈子怡等人^[59]利用响应曲面法快速确定了高斯光束非球面整形的最佳整形位置。2023年,舒存铭等人^[60]基于费米-狄拉克函数建立了具有平面顶部的光束模型,为高斯光束整形为平顶光束的非球面镜系统设计奠定了理论基础。2024年,张昱冬等人^[61]在平顶光束整形的基础上,提出了基于末位淘汰盖师伯格-萨克斯顿与遗传(GSGA)混合算法的平顶光束整形方法,为实现高能量利用率、高光束顶部均匀度的平顶光束整形提供了新途径。同年,黄泽帆等人^[62]针对平顶光束的光斑能量集中区域,研究了自适应轮廓提取算法,对该区域轮廓提取与均匀性进行了量化评价。

6 结束语

在长距离无线光通信中,大气湍流引起的信号光

强随机波动是制约通信性能的关键因素。平顶光束在大气湍流中传输时其散斑具有低对比度、分布均匀等优势, 该优势使得平顶光束在大尺寸区域内的散斑稳定性更好, 可有效降低大气湍流对信号的干扰, 减少信号闪烁, 提高通信的稳定性和可靠性。在未来无线光通信领域中, 可以将高斯光束转换为平顶光束, 这能调节散斑特性, 使接收信号的传输精度得到有效提升, 为推动长距离无线光通信的发展提供了思路和方法。

参考文献:

- [1] Ishimaru A. Wave propagation and scattering in random media[M]. Single Scattering and Transport Theory. New York: Academic Press, 1978.
- [2] Schulz T J. Optimal beams for propagation through random media[J]. Optics Letters, 2005, 30(10): 1093-1095.
- [3] Tomohiro S, Aristide D, Emil W. Mode analysis of spreading of partially coherent beams propagating through atmospheric turbulence[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2003, 20(6): 1094-1102.
- [4] 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.
- [5] 王玉双, 陈子阳, 刘永欣, 等. 激光经过湍流大气以及散射介质的传输[J]. 量子电子学报, 2020, 37(5): 534-546.
- [6] 赵建彤, 刘智, 姚海峰, 等. 激光传输大气湍流效应复域仿真模拟方法研究[J]. 激光与红外, 2024, 54(6): 878-884.
- [7] Cai Yangjian, Eyyuboglu T H, Baykal Y. Propagation of various dark hollow beams through an optical system in turbulent atmosphere[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(10): 1019-1026.
- [8] 王红星, 宋博, 吴晓军, 等. 近海面大气湍流中准直高斯光束光斑扩展实验[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 130-136.
- [9] De S S, Laporta P. Solid-state laser unstable resonators with tapered reflectivity mirrors: the super-Gaussian approach[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(6): 1172-1177.
- [10] 邱基斯, 樊仲维, 唐熊忻. 超高斯平顶分布光束空间整形技术研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(2): 233-238.
- [11] 刘玲. 高阶贝塞尔-高斯光束在大气湍流中的传输特性[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [12] 陶宗慧, 刘唯奇, 陈亚楠, 等. 大气信道激光通信系统光束偏振特性[J]. 兵工学报, 2022, 43(3): 481-488.
- [13] 步青华. 部分相干平顶光束在湍流大气中的传输特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [14] Toselli I, Andrews L C, Phillips R L, et al. Free space optical system performance for laser beam propagation through non-Kolmogorov turbulence[C]//Proceedings of SPIE: Free-Space Laser Communication Technologies XIX and Atmospheric Propagation of Electromagnetic Waves. San Jose: SPIE, 2007: 64570T-1-64570T-11.
- [15] 饶瑞中. 光在湍流大气中的传播[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005.
- [16] 李晓庆. 部分相干列阵激光束通过湍流大气的传输特性研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2010.
- [17] Li Yajun. Light beams with flat-topped profiles[J]. Optics Letters, 2002, 27(12): 1007-1009.
- [18] 姜其畅, 张存, 苏艳丽, 等. 平顶光束在不同系统中的传输特性比较[J]. 量子电子学报, 2022, 39(3): 334-342.
- [19] 陈凯, 李平雪, 陈檬, 等. 高斯光束整形为平顶光束的非球面镜系统设计和面形参数分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(3): 54-58.
- [20] 陈凯, 陈檬, 李港, 等. 高斯光束整形为平顶光束的双凸非球面镜的数值模拟与分析[J]. 激光与红外, 2010, 40(10): 1043-1047.
- [21] Dickey F M. Gaussian laser beam profile shaping[J]. Optical Engineering, 1996, 35(11): 3285-3295.
- [22] 陈重琳. 利用液晶空间光调制器将激光整形为平顶光束的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
- [23] Gori F. Flattened Gaussian beams[J]. Optics Communications, 1994, 107(5-6): 335-341.
- [24] Bagini V, Borghi R, Gori F, et al. Propagation of axially symmetric flattened Gaussian beams[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1996, 13(7): 1385-1394.
- [25] Shealy D L, Hoffnagle J A, Brenner K H. Analytic beam shaping for flattened output irradiance profile[C]//Proceedings of SPIE: Laser Beam Shaping VII. San Diego: SPIE, 2006: 1-11.
- [26] 吴健, 杨春平, 刘建斌. 大气中的光传输理论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005.
- [27] 步青华, 王海燕, 李相银. 部分相干平顶光束在大气湍流中空间相干性研究[J]. 大气与环境光学学报, 2009, 4(1): 13-21.
- [28] Wang Wanjun, Wu Zhensen, Shang Qingchao, et al. Propagation of Bessel Gaussian beams through non-Kolmogorov turbulence based on Rytov theory[J]. Optics Express, 2018, 26(17): 21712-21724.
- [29] Andrews C L, Beason K M. Laser beam propagation in random media: new and advanced topics[M]. Bellingham: SPIE Press, 2023.
- [30] 朱焯炜, 徐建才, 仓吉. 湍流大气中 J_0 相关部分相干平顶光束的传输特性[J]. 激光技术, 2010, 4(35): 565-568.
- [31] 亢小宁. 平顶光束在大气湍流中传输特性及通信信道 BER 研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [32] Heckenberg N R, McDuff R, Smith C P, et al. Laser beams with phase singularities[J]. Optical and Quantum Electronics, 1992, 24(9): S951-S962.
- [33] 张文涛, 朱保华. 大气湍流对激光信号传输影响的研究[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(4): 784-787.
- [34] 钟燕丽, 崔执凤, 石建平, 等. 部分相干平顶光束序列在湍流大气中传输特性[J]. 激光技术, 2010, 30(4): 542-547.
- [35] 王玲丽. 大气湍流中光束的漂移和扩展特性的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [36] 袁扬胜, 蔡阳健. 平顶光束阵列在湍流大气传输性质研究[C]. 全国光学工程博士论坛论文集, 2012: 1-5.
- [37] 强希文, 张辉, 屠琴芬, 等. 激光雷达信号大气衰减效应[J]. 应用光学, 2000(4): 21-25, 38.
- [38] 吴晓庆, 杨科科, 黄宏华, 等. 大气光学湍流模式研究: C_n^2 廓线模式[J]. 物理学报, 2023, 72(6): 393-403.
- [39] 何武光, 吴健, 杨春平. 环形光束大气传输数值模拟与分析[J]. 激光与红外, 2011, 41(2): 136-140.

郭倩, 闫思雨, 柯熙政: 平顶光束在大气湍流信道中传输研究进展

- [40] Goodman J W. Speckle phenomena in optics: theory and applications [M]. 2nd ed. Greenwood Village: Roberts & Company, 2007. ISBN: 0-9747077-9-1.
- [41] Shao Xiaopeng, Wu Tengfei, Gong Changmei. Simulation on light re-focusing through a highly scattering turbid medium using circular Gaussian distribution model[J]. Optical Engineering, 2013, 52(11): 113104.
- [42] 胡志蒙. 平顶光束无线光通信性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [43] 刘曼. 高斯相关随机表面光散射散斑场的相位奇异[D]. 济南: 山东师范大学, 2010.
- [44] Goodman J W. Statistical properties of laser speckle patterns[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1975: 9-75.
- [45] Shealy D L. Historical perspective of laser beam shaping[J]. Journal of Applied Optics, 2002, 47(7): 7028-7047.
- [46] Dickey F M. Laser beam shaping[J]. Optics and Photonics News, 2003, 14(4): 30-35.
- [47] 亓岩, 朱英杰, 张晶, 等. 激光光束整形技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(5): 57-68.
- [48] 李昕颖, 钱晓凡, 孟妮妮. 光束整形衍射光学元件的优化算法[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 59-66.
- [49] 刘超, 陈善球, 廖周, 等. 自适应光学技术在通信波段对大气湍流的校正[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2605-2610.
- [50] 刘欢. 基于自适应光学的光束稳定性控制技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2025.
- [51] 李彬, 叶一东, 颜宏, 等. 激光场相干叠加光束合成技术[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(10): 152-156.
- [52] 叶顺流, 王绪安, 朱少岚, 等. 平顶高斯光束相干合成在大气湍流中的传输[J]. 激光与红外工程, 2011, 40(7): 1347-1351.
- [53] 季小玲, 汤明玥. 一维线阵离轴高斯光束通过湍流大气的传输特性[J]. 物理学报, 2006, 55(9): 4968-4973.
- [54] 季小玲, 李晓庆. 湍流对离轴列阵高斯光束相干与非相干合成的影响[J]. 物理学报, 2008, 57(12): 7674-7679.
- [55] Parent A, Morin M, Lavigne P. Propagation of Super-Gaussian field distribution[J]. Optical And Quantum Electronics, 1992, 24(9): S1071-S1079.
- [56] Tovar A A. Propagation of flat-topped multi-Gaussian laser beams[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2001, 18(8): 1897-1904.
- [57] Baykal Y, Eyyuboglu H T. Scintillation index of flat-topped Gaussian beams[J]. Applied Optics, 2006, 45(16): 3793-3797.
- [58] 季小玲, 张涛, 陈晓文, 等. 平顶光束通过湍流大气传输的光谱特性[J]. 光学学报, 2008, 1(25): 12-16.
- [59] 陈子怡, 陈檬, 王春磊, 等. 高斯光束非球面整形系统整形特性研究[J]. 光电工程, 2022, 49(4): 66-75.
- [60] 舒存铭, 唐泽斌, 谢玉林. 高斯光束整形为平顶光束的非球面镜系统设计及优化[J]. 黄冈师范学院学报, 2023, 43(3): 54-57.
- [61] 张昱冬, 赵秋烨, 方振, 等. 基于末位淘汰 GSGA 算法的平顶光束整形研究[J]. 中国激光, 2024, 51(6): 150-156.
- [62] 黄泽帆, 张玉莹, 董雷岗, 等. 平顶光束的光斑能量集中区域轮廓提取与均匀性评价[J]. 应用激光, 2024, 44(5): 181-189.