

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407320

无线光通信中大气湍流抑制方法*

梁静远¹ 庞明志¹ 柯熙政^{1,2}

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048; 2. 陕西省智能协同网络军民共建重点实验室 西安 710068)

摘要:在无线光通信系统中,大气湍流会导致传输光束发生扩展、漂移和光强起伏,使得接收端信号质量严重下降,降低通信系统性能,因此,研究抑制大气湍流的方法是提升无线光通信系统性能的关键。大孔径接收技术、分集技术、部分相干光技术和自适应光学技术能够有效抑制大气湍流效应,是改善无线光通信系统性能的重要手段。详细阐述了各个关键技术抑制大气湍流的原理及其手段,这些关键技术可以通过改变传输或接收策略、调控光场结构、增大接收孔径、补偿波前畸变来改善接收信号的质量,提高通信系统的可靠性,同时分析了不同参数指标对系统性能的影响。讨论了相关抑制技术的国内外研究现状,并展示了相关技术在大气湍流的影响下对系统不同性能指标的改善情况。最后总结了当前无线光通信领域在大气湍流抑制方面所面临的挑战与亟待解决的问题,并对未来技术的发展趋势进行了展望,可为未来在该领域的发展提供参考借鉴。

关键词:无线光通信;大气湍流;湍流抑制;关键技术

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Atmospheric turbulence suppression method in optical wireless communication

Liang Jingyuan¹ Pang Mingzhi¹ Ke Xizheng^{1,2}

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

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Intelligent Collaborative Network for Civil-Military Cooperation, Xi'an 710068, China)

Abstract: Research questions: In optical wireless communication systems, atmospheric turbulence can cause the transmission beam to expand, drift and light intensity fluctuation, which will seriously reduce the signal quality of the receiving end and reduce the performance of the communication system. Therefore, the study of methods to suppress atmospheric turbulence is the key to improve the performance of optical wireless communication systems. Method and process: Large-aperture receiving technology, diversity technology, partially coherent beam technology and adaptive optics can effectively suppress the atmospheric turbulence effect, which is an important means to improve the performance of optical wireless communication systems. Detailed detail the principle of suppress atmospheric turbulence and its means. These key technologies can improve the quality of the received signals and enhance the reliability of the communication system by changing the transmission or reception strategy, regulating the structure of the optical field, enlarging the receiving aperture, and compensating for wavefront distortion. Meanwhile, the effects of different parameter indicators on the system performance are also analyzed. The current status of domestic and international research on the relevant suppression techniques is discussed, and the improvement of different performance indexes of the system under the influence of atmospheric turbulence by the relevant techniques is showed. Conclusions: Finally, the challenges and problems in atmospheric turbulence suppression in the field of optical wireless communication are summarized, and the future development trend of the technology is outlooked, which can provide a reference for the future development in this field.

Keywords: optical wireless communication; atmospheric turbulence; turbulence suppression; key technology

0 引言

无线光通信具有高信息传输速率、不需要频率的申请且具有很强的保密性等优点,这些优点使它在未来的无线通信领域中有着广泛的应用前景。然而,大气信道中大气湍流会对光信号造成严重的干扰,这种干扰会导致传输光束发生漂移、光强产生波动等负面影响,进而使无线光通信系统性能下降,使其难以发挥优势。因此,研究抑制大气湍流的方法是发挥无线光通信技术优势的关键^[1]。

目前,无线光通信中大气湍流的抑制技术主要有大孔径接收技术^[2]、自适应光学技术^[3]、分集技术^[4]以及部分相干光技术^[5],这些技术通过采用不同的方法和手段抑制大气湍流对无线光通信的影响。大气湍流抑制方法的选择需要根据具体应用场景和需求进行权衡和优化。未来随着技术的不断进步和创新,相信会有更多高效、经济、实用的抑制方法被开发出来。

本文对无线光通信中抑制大气湍流的关键技术进行了总结,阐述了相关技术的抑制原理及其手段,并讨论了相关技术的研究现状,最后,总结了大气湍流抑制技术亟待解决的问题,并对其未来的发展进行了展望。

1 无线光通信系统

无线光通信系统模型如图 1 所示,发送端主要进行信道编码,信号调制,并采用激光器或放大器进行输出,再由单个或多个天线进行发射,在不同场景下经过不同类型的信道进行传输,接收端主要是通过的单个或多个天线进行接收,然后通过空间光耦合模块和前置放大器,再经过信号的检测,最后通过信号解调、解码,从而实现通信。

在未来的发展中无线光通信技术具有广阔的市场潜力且具有独特的吸引力,但是无线光通信系统仍有许多需要完善的地方。目前,无线光通信技术面临的挑战主要是大气信道会对信号造成干扰,由于大气信道的复杂性,光信号在其传输过程中会受到湍流带来的一系列负面影响,导致信号的幅度和相位发生随机变化,使得系统性能恶化,降低通信质量。急需有效的手段抑制大气湍流造成的影响,提升通信系统性能。

2 大气湍流

2.1 大气湍流形成机理

在大气中有许多因素发生不确定的变化,比如风速、气压等随机性的变化,其经过不断地积累使得大气的折

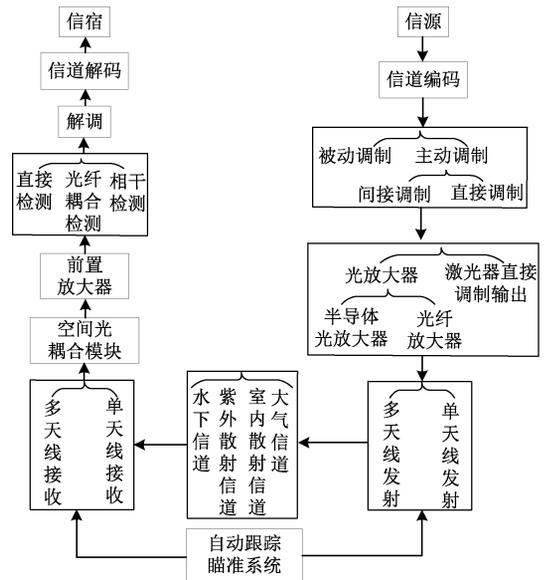


图 1 无线光通信系统模型^[6]

Fig. 1 Model of optical wireless communication system^[6]

射率的不均匀,也就形成了所谓的湍流涡旋。大气湍流的形成源于这些湍流涡旋随着风速的变化不断持续形成或消散,并在变化中不断重叠,最终形成一种不规则的湍流运动。

大气湍流的内、外尺度是描述湍流涡旋特性的重要参数,分别代表了湍流涡旋中最小和最大涡旋的特征尺度。外尺度主要影响大尺度湍流的能量传递和相互作用,而内尺度则与湍流的能量耗散密切相关。

如图 2 所示为大气湍流运动的示意图,雷诺数可以很好地描述湍流能量转换的特性,当雷诺数大到某个特定值时会形成外尺度湍流,外尺度湍流构成了湍流的初始能量,这种状态很不稳定,从而分裂成较小的湍流,能量也会传递给这些小尺度的湍流,如此继续,直到雷诺数减小到某个稳定的数值,此时能量的损耗加剧,动能几乎全部转化为热能,涡旋终止分裂,形成内尺度湍流。

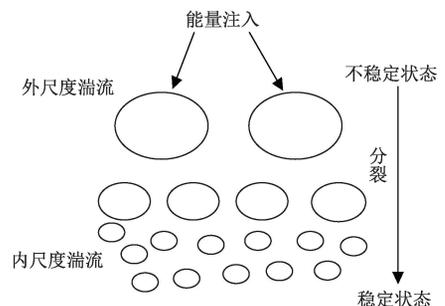


图 2 大气湍流运动示意图^[7]

Fig. 2 Schematic diagram of atmospheric turbulence^[7]

2.2 大气湍流对无线光通信的影响

当承载信号的光束经过大气信道后,大气湍流会导致信号的光功率出现波动,进而引起信号的衰落等负面影响,使得通信系统性能下降。图 3 为大气信道中各个因素对光通信性能造成的影响,其中,大气湍流尺度的不同会使得光信号以及光束质量发生不同的变化,大气湍流所引起的光强起伏、光束漂移、相位起伏以及光束扩展,导致光束波前发生畸变,系统平均信噪比下降,探测信号随机起伏。面对大气湍流对无线光通信系统造成的一系列的影响,研究抑制大气湍流的方法对无线光通信的发展具有重要意义。

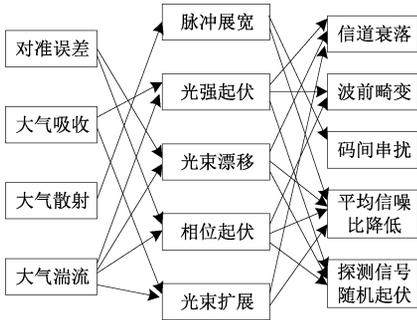


图 3 大气信道对光通信的影响^[6]

Fig. 3 The impact of atmospheric channels on optical communications^[6]

3 抑制大气湍流的关键技术

为了抑制大气湍流对无线光通信的影响,进一步提高无线光通信的系统性能以及通信质量。目前,国内外学者对提出的抑制大气湍流的方案以及相关技术有大孔径接收技术、自适应光学技术、分集技术、部分相干光技术等。

3.1 大孔径接收技术

大孔径接收技术是指利用大口径的天线或接收器接收无线信号的一种技术。在无线光通信领域中,大孔径接收技术是通过增加接收孔径尺寸来增加接收信号的强度和准确性,提高通信质量和可靠性。

1) 抑制原理

大气湍流引起的光强闪烁效应会导致接收光功率起伏,可以通过增大接收端的天线尺寸来减少光功率的起伏方差,使得接收端接收到更多的光能量,以抑制大气湍流效应对光通信性能的影响。

在无线光通信系统中,大孔径接收技术的应用较为广泛,对闪烁效应的抑制作用也尤为明显。当接收孔径增大时,光功率起伏的方差会减小,这种现象被称为孔径平滑效应^[2]。在不同大气湍流强度下,不同的接收孔径

尺寸对闪烁效应的影响也是不同的,孔径平滑因子是对孔径平滑效应的一种表征。根据不同湍流下的孔径平滑因子,可以求得接收天线的最优孔径,达到抑制湍流闪烁效应的影响。

卡塞格林望远镜^[8]接收系统是一种典型的光通信接收系统,通过增大卡塞格林望远镜口径可以提升接收光信号功率,同时其具有孔径平滑效应,可以弱化信号波动。

2) 孔径平滑效应

在远距离大气激光通信中,到达接收端平面的光场面积远远大于接收孔径,此时可以将接收到的传输激光束波前近似认定为平面波。接收光强起伏方差采用闪烁指数来表示^[9]:

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

式中: $\langle \cdot \rangle$ 表示系综平均, I 表示光强, D 表示接收孔径的尺寸,上式可以写为^[9]:

$$\sigma_I^2(D) = \frac{16}{\pi D^2} \int_0^D \rho B_I(\rho, L) \left[\cos^{-1}\left(\frac{\rho}{D}\right) - \left(\frac{\rho}{D}\right) \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{D^2}} \right] d\rho \quad (2)$$

式中: $B_I(\rho, L)$ 表示为接收孔径平面上的光强协方差函数,通过变量代换,令 $\rho = xD$,式(2)可以变换为^[9]:

$$\sigma_I^2(D) = \frac{16}{\pi} \int_0^1 x B_I(xD, L) \left[\cos^{-1}x - x \sqrt{1 - x^2} \right] dx \quad (3)$$

不同接收孔径尺寸的闪烁指数随 Rytov 方差的变化曲线如图 4 所示,从图中可以看出,当接收孔径为 10 mm 时,闪烁指数的变化范围在 0~1.2,接收孔径为 100 mm 时,闪烁指数的变化范围仅在 0~0.2,说明在接收孔径为 100 mm 时比在接收孔径为 10 mm 时受到的光强起伏程度小。且随着接收孔径的增大,整体的闪烁指数减小,说明大孔径接收可以抑制大气湍流造成的光强起伏。

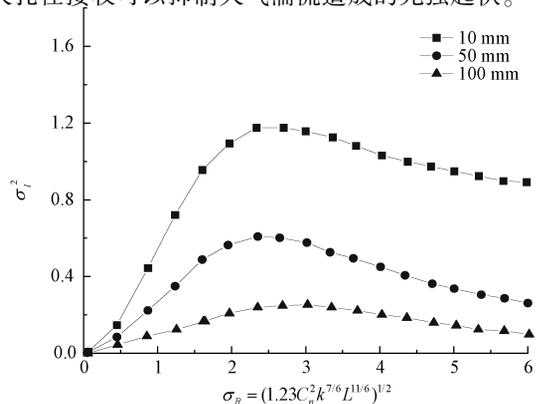


图 4 不同接收孔径下闪烁指数随 Rytov 方差的变化关系^[2]

Fig. 4 The relationship of scintillation index with Rytov variance in different receiving aperture^[2]

如图 5 所示,为不同链路下不同接收孔径对折射率结构常数 C_n^2 的影响, C_n^2 是反应大气湍流特征的重要参数^[2],从图 5(a)中可以看出,0.43 km 通信距离下的折射率结构常数集中在 $10^{-18} \sim 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 范围之间,从图 5(b)中可以看出,10.3 km 通信距离下的折射率结构常数集中在 $10^{-16} \sim 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ 范围之间,说明随着通信距离的增大,折射率结构常数变大,湍流强度也就会变大。但在通信距离一定的情况下,测量所得的折射率结构常数会随着接收孔径的增大而减小,说明孔径平滑效应可以抑制湍流效应。

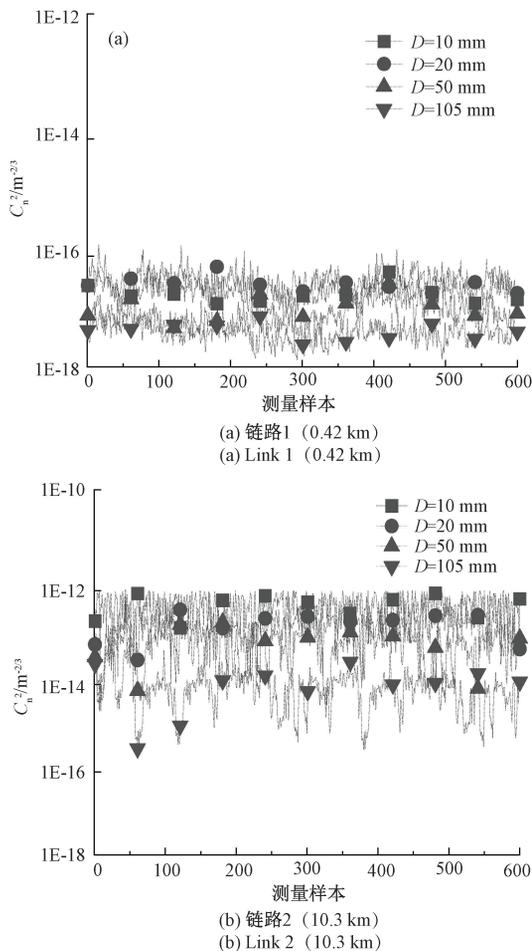


图 5 不同接收孔径下的折射率结构常数^[2]

Fig. 5 Refraction index structure constants at different reception apertures^[2]

3) 研究现状

2014 年,王宗兴^[10]采用不同尺寸的接收孔径对大气激光通信进行了实验,发现随着接收孔径尺寸的增大可以使得通信系统的误码率降低。

2019 年,Soni 等^[11]研究了不同降雨强度下对自由空间光通信系统的性能,分析了孔径平滑效应对大气湍流的抑制作用,通过采用大孔径接收,使得接收到的平均信

噪比提高了 1.58 dB。

2020 年,Dheeraj 等^[12]研究了孔径平滑效应对无线光通信系统性能的影响,研究表明,增加接收孔径,系统的误码率会降低,当接收孔径大于 11 cm 时,由于背景噪声的影响,系统性能的提高速率明显降低。

2021 年,代天君^[9]在无线激光通信系统中,采用大孔径卡塞格林望远镜作为接收系统,通过模拟实验分析了不同孔径大小对光强闪烁的影响,实验发现,采用大孔径接收比小孔径接收到的光强闪烁指数小。

2022 年,Kolosov 等^[13]研究了高斯光束在 7 km 水平大气路径上,不同湍流强度与孔径下的闪烁指数。分析了大范围闪烁条件下的概率密度函数及其性质。研究表明,在强闪烁区下的概率密度函数适用分数指数分布,弱闪烁区则适用伽马分布。

2023 年,Yura 等^[14]进行了空对地光通信实验,测量了不同仰角和湍流条件下接收孔径分别为 5 cm 和 40 cm 下的闪烁指数,研究表明,孔径平滑效应使得接收孔径越大,采集到的光功率分布越窄,闪烁指数越小,40 cm 孔径的闪烁强度降低了一个数量级。

2023 年,Harjeevan 等^[15]提出了一种基于孔径平滑优化的光通信链路,研究了在相同湍流强度下不同接收孔径的接收信噪比,研究表明,接收孔径为 30 cm 比接收孔径为 5 cm 接收信噪比高 30 dB 左右。

2024 年,廖志文^[2]根据孔径平滑效应,进行了不同传输距离的无线光通信实验,对比了不同接收孔径下的实验数据,实验结果表明,在相同的阈值参数下,随着接收孔径的增大,通信系统的衰落概率依次减小。

如表 1 所示,展示了近年来大孔径接收技术的国内外研究概况。表中可以看出,通过增大接收孔径可以降低闪烁指数和系统的衰落概率,改善系统的误码率和信噪比。

表 1 大孔径接收技术国内外研究现状

Table 1 Research status of large aperture receiving technology at home and abroad

年份	作者	性能指标	研究结论
2014	王宗兴 ^[10]	误码率	增大接收孔径可以降低误码率
2019	Soni 等 ^[11]	信噪比	大孔径接收使系统平均信噪比提高 1.58 dB
2020	Dheeraj ^[12]	误码率	接收孔径大于 11 cm 时系统性误码率降低速率明显降低
2021	代天君 ^[9]	闪烁指数	采用大孔径接收比小孔径接收到的闪烁指数小
2022	Kolosov ^[13]	闪烁指数、概率密度函数分布	不同闪烁区域的概率密度函数分布不同
2023	Yura ^[14]	光强分布、闪烁指数	接收孔径越大,光功率分布越窄,闪烁指数越小
2023	Harjeevan ^[15]	信噪比	接收孔径为 30 cm 比接收孔径为 5 cm 接收信噪比高 30 dB
2024	廖志文 ^[2]	衰落概率	随着接收孔径的增大系统的衰落概率减小

3.2 部分相干光技术

部分相干光技术应用于光学成像、无线光通信、激光材料处理等领域中。部分相干光是指介于完全相干光和非相干光之间的一种光,其在无线光通信中表现出色,与完全相干光相比,部分相干光对传输介质起伏的敏感性较小,受到湍流影响也相对较小。

1) 抑制原理

通常认为理想的点光源发出的光束是完全相干的,但是光束在大气信道中传播时,受到大气湍流的影响,其幅度和相位都会发生变化,会导致光束的相干性降低。因此,一束完全相干的光束是不存在的。然而,高相干性光束在不均匀的介质中传输容易出现散斑现象,尤其是在大气中传输受到湍流的影响导致光强分布不均匀。因此可以通过降低光相干性来抑制大气湍流效应,众多研究表明部分相干光在大气传输中受到湍流效应的影响较小,闪烁指数小于高相干光,具备更好地抗湍流能力^[5]。

图 6 为部分相干光抑制湍流示意图,部分相干光具有抑制湍流扰动的能力,原因在于其具备多色性,即使受到大气湍流的影响,部分相干光的传输效果仍优于单频率相干光。采用部分相干光传输可以减少闪烁现象,在接收端可获得更多光能量。相比之下,在湍流环境中传输的相干光会导致光束在各个方向上发生折射,因此接收端只能接收到部分光能量。

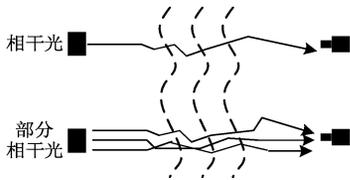


图 6 部分相干光抗湍流示意图^[9]

Fig. 6 Schematic diagram of the partially coherent optical anti-turbulence^[9]

高斯谢尔模型(Gaussian Schell mode, GSM)光束是一种典型的空间关联结构部分相干光,对于这种光束在大气湍流中的演化特性,研究发现 GSM 光束相较于完全相干光束具有更好的抗湍流能力^[5]。

2) 部分相干 GSM

光束的相干性包括空间相干和时间相干,部分相干光的形成通常是将一个随时间变化的随机振幅和相位叠加到一个完全相干光场上,则部分相干光场的光强分布表示为^[5]:

$$U'(x, y, 0; t) = U_0(x, y, 0) \exp[i\xi(x, y; t)] \quad (4)$$

式中: $U_0(x, y, 0)$ 为初始的完全相干光场分布, $\xi(x, y; t)$ 为随时间变化的相位,表示光场的部分相干性。

部分相干 GSM 在大气湍流中传输时,光束会发生扩展,则接收端的平均光强可表示为^[16]:

$$I(\rho) = K_n \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \exp\left(-\frac{2\rho^2}{\omega^2}\right) \quad (5)$$

式中: ρ 为径向矢量, K_n 为归一化常数, ω_0 为初始光束半径, ω 为接收端光束的扩展半径,可表示为^[16]:

$$\omega = \omega_0 \left[\left(1 - \frac{z}{F}\right)^2 + \left(1 + \frac{2\omega_0^2}{l_c^2} + \frac{2\omega_0^2}{\rho_0^2}\right) \left(\frac{2z}{k\omega_0^2}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中: F 表示相位曲率, ρ_0 为球面波通过大气湍流的相干长度, z 为传输距离, k 为波数, l_c 为空间相干长度。

如图 7 所示,给出了 GSM 光束分别在大气湍流和自由空间下光束半径随传播距离的变化。从图中可以看出,随着传输距离的增大,光束的扩展半径增大,且随着相干参数 $\zeta_s = 1 + 2\omega_0^2/l_c^2$ 的增大,光束扩展半径的变化曲线在自由空间和湍流条件下越接近,说明部分相干 GSM 光束的扩展受到湍流的影响更小。

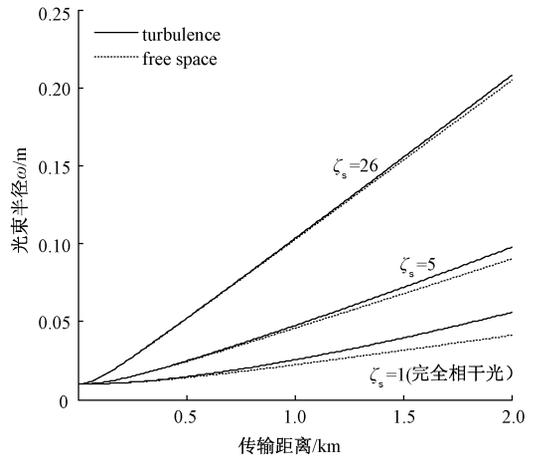


图 7 光束半径随传播距离的变化^[5]

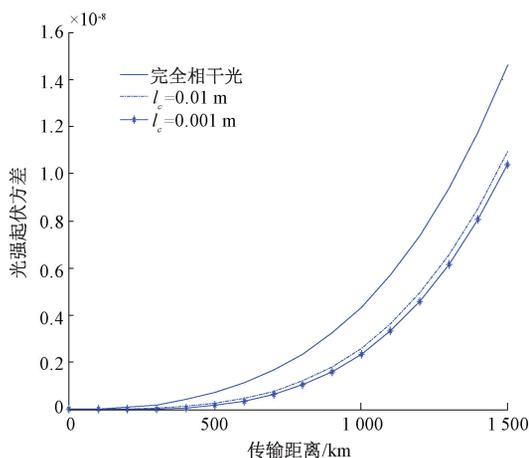
Fig. 7 Change of beam radius with propagation distance^[5]

图 8 为在相同湍流条件下,部分相干 GSM 光与完全相干 GSM 光的光强起伏方差与传输距离之间的关系曲线,从图中可以看出,部分相干光比完全相干光的光强起伏方差要小,且光束相干性越差,光强起伏越小,抗湍流能力越强。

3) 研究现状

2014 年,柯熙政等^[16]研究了部分相干 GSM 光束在大气湍流中的传输特性,研究表明,在传输距离为 10 km 内光束的空间相干长度小于 5 mm 时,受到光束漂移的影响较小。

2015 年,柯熙政等^[17]研究了部分相干 GSM 光束在大气湍流下光强起伏方差的变化,研究表明,在弱湍流环境下,部分相干光的空间相干长度为 0.001 m 时,其光强起伏方差比完全相干光降低了 8.9%,强湍流环境下,相比完全相干光的光强起伏方差降低了 24.7%。

图 8 光强起伏方差与传输距离之间的关系^[16]Fig. 8 Relationship between light intensity undulation variance and transmission distance^[16]

2016 年,柯熙政等^[18]研究了部分相干 GSM 涡旋光束在大气湍流中的传输特性,推导出了该光束在大气湍流中传输的光强表达式,研究表明,随着相干长度和拓扑荷数的减小,该光束的中心光强增大,当拓扑荷数为 0 时,光强呈现出高斯分布。

2017 年,柯熙政等^[19]研究了部分相干艾里光束的传输特性,研究表明,光束的截断因子越小,受到湍流影响就越小,光强分布就越完整。

2019 年 Wang 等^[20-21]研究了一种部分相干电磁高斯谢尔模型涡旋 (electromagnetic Gaussian Schell-mode vortex, EGSMV) 光束,验证了该光束在大气湍流传输时,其拓扑荷数越大,接收到的信息就越多,其光束的中心暗斑也就越大。

2019 年, Yu 等^[22]研究了一种厄米高斯相关谢尔模型 (Hermite-Gaussian correlated Schell-model, HGCSM) 光束,研究表明,通过改变光场的相干结构,降低光束的相干性可以减少湍流引起的光束漂移。

2019 年,张结^[23]通过采用液晶空间光调制器 (liquid crystal spatial light modulator, LC-SLM) 产生出部分相干光束,对比了不同空间相干长度的光束和完全相干光束在湍流中的传输特性,研究表明,在相同的湍流环境下,部分相干光相比完全相干光具有更小的平均漂移量和闪烁指数。

2022 年,杨宁等^[24]研究了部分相干径向偏振扭曲 (partially coherent radially polarized twisted, PCRPT) 光束在大气湍流中的传输特性,研究表明,其扭曲因子越大, M^2 因子就越小,说明光束在湍流中传输的质量就越好。

2022 年, Huang 等^[25]推导出了湍流中部分相干径向偏振涡旋光束 M^2 因子的解析表达式。研究表明, M^2 因

子随着拓扑荷数的增加以及相干长度的减小而减小,说明较大的拓扑荷数以及较小的相干长度可以抑制湍流的影响。

2023 年, Liu 等^[26]推导了部分相干扭曲椭圆涡旋 (partially coherent twisted elliptical vortex, PCTEV) 光束在大气湍流中的传播特性公式,发现小椭圆度的 PCTEV 在湍流中角宽度和 M^2 因子减小,表明具有较小初始相干长度、椭圆度及较大扭曲因子的 PCTEV 展现更强的抗湍流能力。

2023 年, Xu 等^[27]研究了具有涡旋相位的部分相干径向偏振涡旋 (partially coherent radially polarized vortex, PCRPV) 光束和部分相干方位偏振涡旋 (partially coherent azimuthally polarized vortex, PCAPV) 光束在大气湍流中的偏振特性,研究表明,增大拓扑荷数可以降低大气湍流破坏极化奇点的速度。

如表 2 所示,展示了近年来国内外不同的部分相干光束对湍流抑制的情况。这些部分相干光束都展现了良好的抗湍流能力,通过改变部分相干光束的相干性以及其他参数可以提升光束在湍流中传输的质量和减小光束漂移,使接收到的光强分布更完整。

表 2 部分相干光技术国内外研究现状

Table 2 Research status of partial coherent light technology at home and abroad

年份	作者	研究内容	研究结论
2015	柯熙政 ^[17]	部分相干 GSM 光束	相比完全相干光,光强起伏更低
2016	柯熙政 ^[18]	部分相干 GSM 涡旋光束	相干长度和拓扑荷数的减小使得光束的中心光强增大
2017	柯熙政 ^[19]	部分相干艾里光束	光束的截断因子越小,光强分布就越完整
2019	Wang ^[20-21]	EGSMV 光束	拓扑荷数越大,光束的中心暗斑就越大
2019	Yu ^[22]	HGCSM 光束	降低光束的相干性可以减少光束漂移
2019	张结 ^[23]	部分相干 GSM 光束	相比完全相干光,具有更小的平均漂移量和闪烁指数
2022	杨宁 ^[24]	PCRPT 光束	扭曲因子越大, M^2 因子就越小,传输光束质量就越好
2023	Liu ^[26]	PCTEV 光束	较小的初始相干长度、椭圆度及较大扭曲因子传输质量越好
2023	Xu ^[27]	PCRPV 和 PCAPV 光束	增大拓扑荷数可以降低大气湍流破坏极化奇点的速度

3.3 分集技术

分集技术是采用多个发射端和接收端来进行发送、接收信息。其主要目的是提高信号接收的可靠性和性能。在通信系统中,分集技术常用于降低信号传输中的多径衰落、干扰和噪声等影响因素,从而提高系统的信号质量。

1) 抑制原理

无线光通信分集技术的应用是通过多个发射天线和接收天线来进行传输信号的传输,其系统框图如图 9 所示,系统发射端将一路传输激光束由多个发射天线进行输出,到达接收端时,接收端由多个接收天线对传输激光束进行接收,每路信号经历的大气信道衰减都不相关,可以有效抑制大气湍流效应,提高整个通信系统的通信质量。

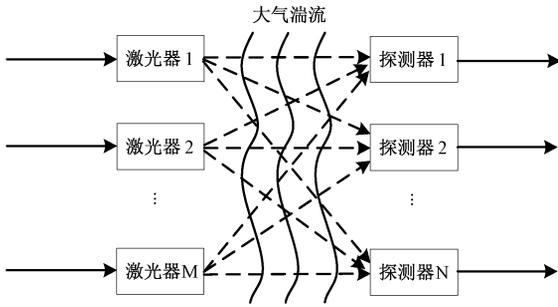


图 9 分集系统框图^[28]

Fig. 9 Block diagram of the diversity system^[28]

分集技术有发射分集和接收分集,其中发射分集是通过将两个或两个以上互不相干、相互独立的光束通过不同的路径进行传输,并在接收端进行叠加,这种方式通常也称为多光束传输技术,它可以有效的抑制大气湍流引起的光强闪烁效应;接收分集是在接收端用两个或两个以上的接收天线来进行接收,尽可能的接收更多的信号信息,这种方法可以代替大孔径接收技术,在相同接收面积的情况下,可以接收多路的信号。通过分集技术可以降低大气湍流对通信系统的影响,而且应用成本低。

2) 分集合并技术

接收端将接收到的多个衰落信号合并在一起得到增益信号,使得接收信号质量得到提升。因此,合并技术是分集接收技术最重要的一环。较为常用的分集合并技术有最大比合并(maximum ratio combining, MRC)、选择合并(selective combining, SC)和等增益合并(equal gain combining, EGC)。

MRC 是将各支路信号的电压值和噪声功率的比值作为权重,然后在接收端对每路信号进行调相校正并根据增益系数使每路信号相加,最后在被探测器接收进行相干检测,这种方式可以在接收信号不理想的情况下把信号解调出来。采用 MRC 的总输出信噪比可表示为^[29]:

$$\gamma_{\text{MRC}} = \left(\frac{\eta}{\sqrt{2N}} \right)^2 \sum_{i=1}^N \frac{I_i^2}{\sigma_v^2} = \sum_{i=1}^N \gamma_i \quad (7)$$

其中, $\gamma_{\text{MRC}} = \left(\frac{\eta I_i}{\sqrt{2N\sigma_v^2}} \right)^2$ 为单支路的信噪比。

采用 MRC 下系统的误码率为:

$$P_{e\text{MRC}} = \int_0^\infty f(I) Q\left(\frac{\eta}{\sqrt{2N\sigma_v^2}} \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} \right) dI \quad (8)$$

EGC 不需要对每路信号进行加权,是直接假设每路的权重一样,直接进行同相信号叠加,采用 EGC 和 MRC 得到的结果相似。EGC 输出的信噪比为:

$$\gamma_{\text{EGC}} = \left(\frac{\eta}{\sqrt{2N\sigma_v^2}} \right)^2 \sum_{i=1}^N I_i^2 \quad (9)$$

系统的误码率为:

$$P_{e\text{EGC}} = \int_0^\infty f(I) Q\left(\frac{\eta}{N\sqrt{2N\sigma_v^2}} \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n} \right) dI \quad (10)$$

SC 是一种较为简单的合并技术,该方式是对各个支路进行解调,使得信噪比均值相同,然后在接收端选择各个接收天线输出信号强度或信噪比最高的一条支路作为输出信号。输出信号强度表示为:

$$I_{\text{SC}} = \max \{ I_1, I_2, \dots, I_n \} \quad (11)$$

采用 SC 时需要监测各个支路寻找信噪比最大的一条支路作为输出,因为通信系统的信噪比不容易被测量,这种方式在实际应用中容易受到限制。SC 的平均系统误码率可表示为:

$$P_{e\text{SC}} = \int_0^\infty f_{\text{SC}}(I_{\text{SC}}) Q\left(\frac{\eta I_{\text{SC}}}{2\sqrt{NN\sigma_v^2}} \right) dI_{\text{SC}} \quad (12)$$

在相同湍流条件下,图 10 表示为 3 种合并方式下系统误码率和输出信噪比的关系曲线,图中得知,随着信噪比的增大,采用 3 种方式都可以使得系统误码率降低,采用 MRC 方式获得的系统性能最好,EGC 次之,SC 最差。

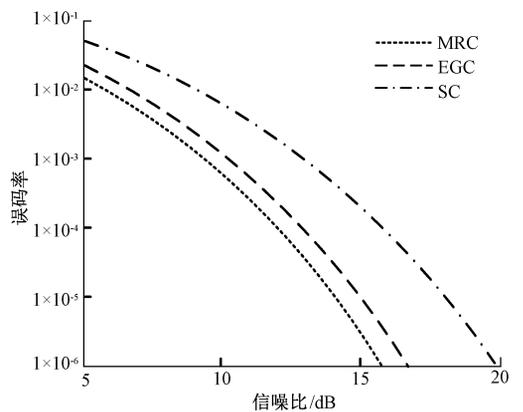


图 10 三种合并技术性能对比^[30]

Fig. 10 Performance comparison of three merger technologies^[30]

西安理工大学柯熙政团队搭建了基于外差探测的自由空间光通信外场实验^[7],采用多光束传输的方式实现了通信链路为 100 km 的超远距离激光通信。从图 11 中可看出,两光束传输时系统的平均误码率为 10^{-10} ,单光束传输时系统的平均误码率 6.5×10^{-9} ,表明采用多光束

传输可以改善系统性能。

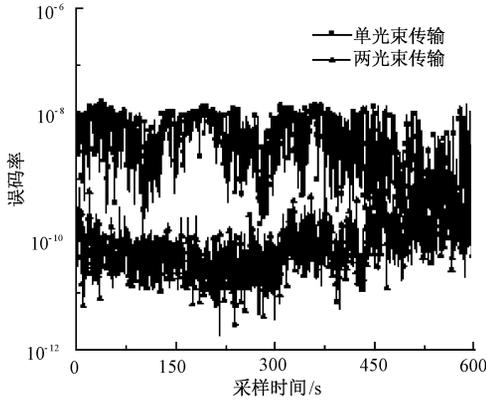


图 11 不同传输方式下误码率曲线^[7]

Fig. 11 Bit error rate curves for different transmission modes^[7]

3) 研究现状

2015 年, Kaur 等^[31]研究了在不同天气的影响下大气湍流对无线光多输入多输出 (multiple input multiple output, MIMO) 通信系统的性能, 结果表明, 无线光 MIMO 技术可以减小信道衰落和系统误码率。

2016 年, Bhatnagar 等^[32]研究了在 Gamma-Gamma 湍流信道下指向误差对光 MIMO 通信系统的影响, 推导了 EGC 和 MRC 两种方案在存在指向误差情况下的平均误码率。研究表明, MRC 在存在较大的指向误差时比 EGC 更稳健, 但在指向误差较小的情况下, EGC 方案由于其较低的实现复杂度而更优。

2017 年, 孟德帅^[30]采用空间分集接收技术进行了通信仿真实验, 结果表明, MRC 可以有效降低系统误码率, EGC 可以有效的降低系统的中断概率。

2019 年, Kumar 等^[33]分析了不同分集技术下无线光 MIMO 系统在 Gamma-Gamma 湍流信道下的性能, 结果表明, 无线光 MIMO 系统在 Gamma-Gamma 湍流信道下, 可以降低系统的误码率, 提高系统的可靠性。

2019 年, 许焱赞^[34]设计了多孔径发射和接收的空间光通信模型, 推导出了多光束发射下的光强概率分布, 通过实验表明随着接收孔径的增加, 孔径平滑因子减小, 且减小幅度降低。

2020 年, Dheeraj^[12]等研究了自由空间光卫星通信下行链路的误码率性能, 通过采用孔径平滑和空间接收分集技术来提高通信系统性能。研究表明, 在相同天顶角和湍流条件下, 单孔径接收的误码率为 3.29×10^{-4} , 采用 4 个和 9 个接收孔径的误码率分别降低到 3.917×10^{-4} 和 4.38×10^{-5} 。

2021 年, 丁珂楠^[35]针对部分相干光传输系统, 采用空间分集技术分析接收系统性能的变化, 实验结果表

明采用分集技术可以提高通信系统的信噪比。

2021 年, 柯熙政等^[7]通过外差探测技术, 采用多光束传输的方式实现了通信链路为 100 km 的超远距离激光通信, 实验结果表明, 两光束相比单光束传输, 平均光功率高出 8 dBm, 且误码率更低。

2022 年, 刘哲绮^[28]对无线光 MIMO 通信技术进行了研究, 采用 LC-SLM 模拟大气湍流的方法, 对比研究了单发射单接收 (single input single output, SISO) 系统和 MIMO 系统的大气传输特性。证明了 MIMO 通信系统较 SISO 通信系统有更低的链路代价。

2022 年, Kumar 等^[36]研究了在大气湍流和指向误差的影响下的无线光 MIMO 通信系统的误码率性能, 研究表明, 指向误差会迅速降低通信链路的增益, 所提出的 MRC 方案的信噪比增益分别比 EGC 和 SC 高 3.5 dB 和 8 dB。

2023 年, 路鸿博^[37]采用空间分集技术进行了 13 km 的光通信实验, 实验结果表明, 使用空间分集技术后的光强波动概率密度函数逐渐趋于对数正态分布, 验证了接收端的光强分布更加规则, 闪烁抑制效果更好。

表 3 总结了近年来分集技术的国内外研究现状, 分集技术可以通过改变发射端或接收端的传输方式来改善系统性能, 表中可以看出, 分集技术可以降低系统的误码率, 减小信道衰落和中断概率, 增加系统的接收功率以及提高信噪比增益。

表 3 分集技术国内外研究现状

Table 3 Research status of diversity technology at home and abroad

年份	作者	性能指标	研究结论
2015	Kaur ^[31]	衰落概率、误码率	MIMO 技术可以减小信道衰落概率和误码率
2016	Bhatnagar ^[32]	指向误差、平均误码率	指向误差大时, MRC 优于 EGC, 指向误差小时, EGC 优于 MRC
2017	孟德帅 ^[30]	误码率、中断概率	MRC 可以降低误码率, EGC 可以降低中断概率
2019	Kumar ^[33]	误码率	MIMO 技术可以降低误码率
2020	Dheeraj ^[12]	误码率	多孔径接收可以降低误码率
2021	柯熙政 ^[7]	接收光功率、误码率	多孔径发射可以提高接收光功率, 降低误码率
2022	Kumar ^[36]	指向误差、误码率、信噪比	所提的 MRC 方案可以提高信噪比增益
2023	路鸿博 ^[37]	光强概率密度	空间分集技术可以使接收光强分布更加规则

3.4 自适应光学技术

自适应光学技术是一种可以根据光学系统的变化实时调整光学元件形状和表面面貌的技术。它主要应用于天文学、光学通信、激光加工等领域, 用于提高光学系统

的性能和效果。

1) 抑制原理

自适应光学技术可以自动改善光束的波前质量。因此,把自适应光学技术应用于无线光通信系统中,对抑制大气湍流的影响具有很大的潜力。根据系统中是否有波前传感器,自适应光学系统分为两种:有波前探测的自适应光学系统和无波前探测的自适应光学系统。

(1) 有波前探测的自适应光学系统

图 12 为有波前探测的自适应光学系统,其中主要包括 3 个部分:波前传感器、波前控制器和波前校正器。其校正的大致流程为:发射光束受大气湍流影响畸变后,先经校正器初次校正并采集信息,再经分光镜分流。部分光束直接接收,另一部分送至波前传感器检测。波前控制器据检测信息重构波前,并生成电压信号驱动校正器补偿畸变,形成闭环直至校正完成。

波前传感器可以检测和测量波前信息,它是常规自适应光学系统中的主要元件,常用的波前传感器有横向剪切干涉仪、Shack-Hartmann 传感器、曲率波前传感器和点衍射干涉仪传感器;波前控制器是将波前传感器所测得的波前信息进行处理,转化成控制信号,具有波前重构和产生控制信号两个功能;波前校正器是自适应光学系统至关重要的元件,可以及时校正波前误差,常见的波前校正器有 LC-SLM 和变形镜(deformable mirror, DM)。

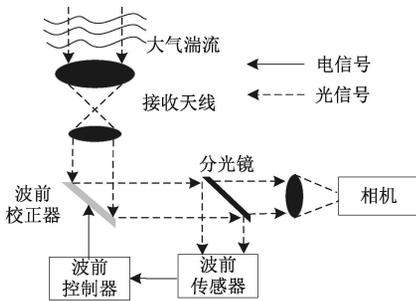


图 12 有波前探测的自适应光学系统^[7]

Fig. 12 Adaptive optical system with wavefront detection^[7]

在有波前探测的自适应光学系统中,不同的控制算法对其畸变波前的校正精度也不同,常用的控制算法有比例积分微分(proportional-integral-derivative, PID)控制算法^[38]和 Gauss-Seidel 迭代算法^[7]。迭代算法存在参数取值范围等问题,因此在实际应用中受到一定的限制。而 PID 控制算法原理简单,相比而言 PID 算法总体性能更优。

(2) 无波前探测的自适应光学系统

如图 13 是无波前探测的自适应光学系统,与有波前探测自适应光学系统相比,其不需要波前传感器对波前进行检测与波前重构。其校正过程为:波前校正器对接收到的光束进行首次校正,然后光束入射到成像探测器

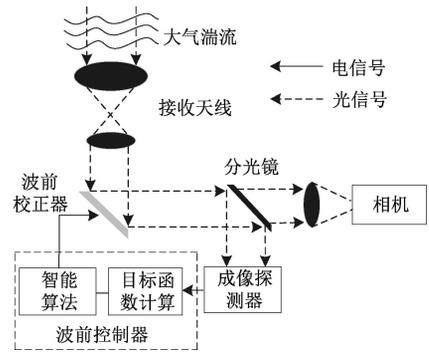


图 13 无波前探测的自适应光学系统^[39]

Fig. 13 Adaptive optics system without wavefront detection^[39]

上采集信息并将信息传送给波前控制器,波前控制器控制并驱动优化算法,转换成电信号传输到波前校正器,依次迭代,直到达到校正的目的。

在无波前探测的自适应光学系统中,波前控制器是核心,其首先采集到成像探测器传达的信息,再计算出系统所需的性能函数,根据智能算法通过多次迭代,使目标性能函数达到最优,最终得到目标函数最优时的修正相位。优化算法有模式优化和无模式优化两种:

模式优化算法需要根据 DM 各个促动面形的影响函数,并选择合适的基底模式来表示波前误差,在采用迭代模式或非迭代模式来优化基底模式系数,求解出 DM 最优的控制电压信号,最终实现波前校正的目的,该算法需要了解 DM 各个促动面形的影响函数,还需要建立模式系数与其之间的对应关系,实现比较复杂;相比之下,无模式优化算法无需依赖基底模式,直接以系统性能评价指标为导向来控制 DM,实现畸变波前校正。常见的无模式优化算法有随机并行梯度下降(stochastic parallel gradient descent, SPGD)算法、模拟退火算法、遗传算法等,其中,SPGD 算法在实际应用中最为广泛,它实现简单,收敛速度快并且具有很好的稳定性。

目前也有许多研究学者提出了经过改进的 SPGD 算法^[40-41],最终都可以很好的提升通信系统性能,提升算法收敛速度和校正效果。

2) 斯特列尔比

斯特列尔比(Strehl ratio, SR)是一个衡量光学系统光强分布优劣的重要指标,SR 直接关系到激光光束的质量,影响无线光通信系统的性能和应用效果。SR 定义为实际光轴上的远场峰值光强与具有相同功率、相位均匀的理想光轴上的峰值光强比。SR 越接近 1,表示实际光束的光能强度分布越接近理想状态,即光束质量越好。相反,SR 越小,说明光学系统的像差越大,成像质量越差。

文献[42]中对双波长无波前传感自适应光学技术

在大气湍流条件下校正远场光斑 SR 的性能进行了数值模拟研究,控制系统采用 SPGD 算法。由图 14(a)可知,经过 100 次校正后,缺少附加校正系数的校正系统内信号波束的 SR 值收敛缓慢,达到 0.89 的极限,校正过程中存在明显的抖动。相反,如图 14(b)所示,增加校正系数后,系统的 SR 值极限值提高到 0.982,系统的性能得到有效的提升。

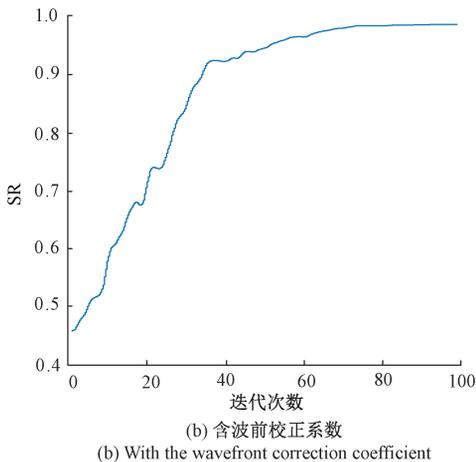
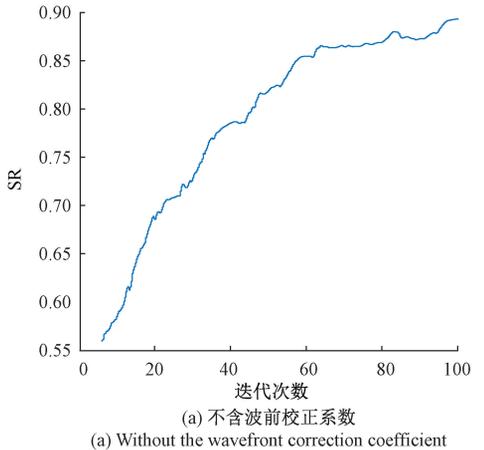


图 14 SR 随迭代次数的变化曲线^[42]

Fig. 14 SR value variation curve with the number of iterations^[42]

3) 研究现状

2014 年,Hashmi 等^[43]在星间光通信系统中采用自适应光学技术,在中等背景光噪声和强湍流条件下进行了模拟实验。实验结果表明,校正后的 SR 从 0.30 提高到了 0.75。

2015 年,Wright 等^[44]搭建了光通信望远镜地面观测通信系统并对畸变波前进行了校正,使得接收光束经校正后的 SR 从 0.03 提升至 0.66。

2017 年,Escarate 等^[45]采用两个 DM 组合的方式,提出了一种基于模型预测控制的自适应光学系统,用于改

善激光光束的质量,研究表明,镜间间距为 3 m 时,可以有效地校正激光束的幅度和相位。

2018 年,吴加丽等^[39]针对光束在大气湍流的影响下会发生畸变,并采用基于 SPGD 算法的无波前探测的自适应光学技术对畸变波前进行了校正,校正后的 SR 从 0.15 提升到 0.81。

2019 年,柯熙政等^[46]采用两个 LC-SLM 分别进行波前畸变模拟和校正,校正后的 SR 从 0.38 提升到 0.82。

2020 年,李梅^[47]研究了一种 DM 本征模式的方法对波前进行校正,校正结果的 SR 从 0.56 提升到 0.88,验证了该方法可以有效校正大气湍流引起的波前畸变,且算法收敛速度快。

2021 年,程爽^[48]提出了一种大幅度畸变波前残差校正算法,进行了外场通信实验,实验表明,该算法相较于 PID 控制算法可以降低系统的误码率。

2022 年,杨慧珍等^[49]采用自适应光学技术以大气湍流影响下的光波波前像差作为校正对象,提出了一种 K-L(karhunen-loeve)模式的 SPGD 算法,验证了该模式下的 SPGD 算法相比于常规 SPGD 算法收敛速度提升了 47.5%。

2023 年,Li 等^[40]研究了自由空间光通信在大气湍流的影响下,提出了一种先进的多反馈 SPGD(advanced multi-feedback stochastic parallel gradient descen, AMF-SPGD)算法来增强波前像差校正性能,验证了该算法可以提高 SR 和降低通信系统的误码率。

2023 年,杨尚君^[6]提出了一种采用模糊 PID 控制算法和 Hadamard 矩阵法相结合的自适应光学算法,通过实验验证了该算法的 SR 比可以达到 0.84,相较于单独采用模糊 PID 控制算法或 Hadamard 法,在强湍流下可以获得更好的校正效果。

2024 年,Han 等^[42]提出了一种基于不同波长光束对应的泽尼克多项式系数来校正波前像差的方法。实验结果表明,与加入校正系数之前相比,加入校正系数后的 SR 提高了 11%,光斑能量增加了 0.072。

表 4 总结了近年来国内外采用自适应光学技术对光束波前校正和系统性能的改善情况。表中可以看出,采用自适应光学技术可以提升 SR 以及降低系统的误码率,不同的自适应方法对 SR 的改善情况也不同,研究不同的自适应光学技术方法可以进一步提升无线光通信系统的性能。

4 大气湍流抑制技术亟待解决的问题

目前,研究学者通过采用大孔径接收技术、部分相干光技术、分集技术和自适应光学技术等技术来缓解大气湍流对无线光通信的影响。这些技术可以有效抑制大气

表 4 自适应光学技术国内外研究现状

Table 4 Research status of adaptive optics technology at home and abroad

年份	作者	研究方法	研究结论
2017	Escarate ^[45]	提出了一种基于模型预测控制的自适应光学系统	可以校正激光束的幅度和相位
2018	吴加丽 ^[39]	采用 SPGD 算法进行波前校正	SR 从 0.15 提升到 0.81
2019	韩柯娜 ^[46]	采用两个 LC-SLM 分别进行波前畸变模拟和波前校正	SR 从 0.38 提升到 0.82
2020	李梅 ^[47]	采用一种 DM 本征模式的方法对波前进行校正	SR 从 0.56 提升到 0.88
2021	程爽 ^[48]	提出了一种大幅度畸变波前残差校正算法	降低了系统误码率
2022	杨慧珍 ^[49]	提出了一种 K-L 模式的 SPGD 算法	算法收敛性提升 47.5%
2023	Li ^[40]	提出了一种 AMF-SPGD 算法	SR 有所提高,误码率降低
2023	杨尚君 ^[6]	提出了一种联合模糊 PID 控制和 Hadamard 矩阵法的算法	SR 提高到 0.84
2024	Han ^[42]	提出了一种基于不同波长光束对应的泽尼克多项式系数来校正波前像差的方法	SR 提高 11%,光斑能量增加 0.072

湍流,补偿畸变波前,提高无线光通信系统的性能,虽然这些技术可以改善光通信系统性能,但在工程实际中仍面临许多挑战,因此针对大气湍流抑制技术仍有亟待解决的问题:

1) 大气湍流的影响是随机性和动态性的,因此需要设计自适应的补偿算法来实时跟踪和抑制大气湍流引起的信号畸变。如何设计高效的自适应算法,并在实际系统中稳定地应用,是一个亟待解决的问题。

2) 波前传感技术可以实时测量大气湍流对光信号的影响,为后续的抑制操作提供准确的反馈信息。如何结合波前传感技术和补偿算法,实现对大气湍流的高效抑制,是一个重要的研究方向。

3) 利用 MIMO 技术^[50-51]可以提高系统对大气湍流的抑制能力。然而,在实际应用中,如何有效地设计和优化 MIMO 系统,以实现大气湍流的有效抑制,仍然需要深入研究。

4) 近年来,深度学习^[52-53]在信号处理领域取得了显著进展,可以用于大气湍流抑制技术中的建模和控制。如何利用深度学习提高大气湍流抑制的效果,并将其应用于实际系统中,也是一个有待解决的问题。

5) 信道均衡技术可以抑制大气湍流造成的码间串扰^[54],该技术的实现需要精确的信道模型和高效的算法支持。因此探索新的信道均衡技术和算法,有望进一步提升无线光通信系统的性能和稳定性。

5 结 论

大气湍流会降低无线光通信系统的性能,文章详细阐述了大孔径接收技术、部分相干光技术、分集技术和自适应光学技术抑制大气湍流的原理及其手段,分析了相关湍流抑制技术对无线光通信系统不同性能指标的改善情况。最后,讨论了大气湍流抑制技术亟待解决的问题。近年来研究和发 展大气湍流抑制技术成为了无线光通信领域的重要课题,在未来,大气湍流抑制技术的发展趋势

主要集中在自适应光学技术、编码调制技术、信道均衡技术以及无线光 MIMO 技术等。大气湍流抑制技术的发展趋势将呈现技术创新与优化、系统设计与优化、理论研究 与仿真分析、跨学科融合以及标准化与产业化等特点。这些趋势将共同推动无线光通信技术的不断进步和发展。

参考文献

- [1] KE X ZH, NING CH, WANG J. Crosstalk analysis of orbital angular momentum-multiplexed state under atmospheric turbulence [J]. *Infrared and laser engineering*, 2018, 47 (11): 402-408.
- [2] 廖志文. 无线光通信系统中大气湍流噪声测量研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
LIAO ZH W. Research on atmospheric turbulent noise measurement in optical wireless communication system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [3] 柯熙政, 杨尚君, 吴加丽, 等. 西安理工大学无线光通信系统自适应光学技术研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33 (8): 30-52.
KE X ZH, YANG SH J, WU J L, et al. Research progress on adaptive optics for optical wireless communication systems at Xi'an university of technology [J]. *Intense Lasers and Particle Beams*, 2021, 33 (8): 30-52.
- [4] ZHANG W, WANG L, WU X, et al. Performance evaluation of maximum ratio combining diversity technology and traditional system based on comprehensive noise analysis in underwater optical wireless communication [J]. *Photonics*, 2023, DOI: 10.3390/PHOTONICS10121388.
- [5] 韩美苗, 柯熙政, 梁静远. 部分相干光在大气湍流中传输特性的研究进展 [J]. *电波科学学报*, 2024, 39(2): 191-204.
HAN M M, KE X ZH, LIANG J Y. Progress in the study of transmission properties of partially coherent light in atmospheric turbulence [J]. *Journal of Radio Wave*

- Science, 2024, 39(2): 191-204.
- [6] 杨尚君. 无线光相干通信中的自适应光学技术及实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
YANG SH J. Adaptive optics in optical-wireless coherent communication and experimental research [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [7] 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 ZH, WU J L, YANG SH J. Progress and prospects of atmospheric turbulence research for optical wireless communication [J]. Journal of Radio Wave Science, 2021, 36(3): 323-339.
- [8] 李征, 韩旭, 柯熙政. 无线光通信一对多发射天线研究进展 [J]. 激光杂志, 2024, 45(4): 1-15.
LI ZH, HAN X, KE X ZH. Progress in the study of one-to-many transmitter antennas for optical-wireless communications [J]. Laser Journal, 2024, 45(4): 1-15.
- [9] 代天君. 远距离大气激光通信系统及大气湍流抑制技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2021.
DAI T J. Long-range atmospheric laser communication system and atmospheric turbulence suppression technology [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021.
- [10] 王宗兴. 无线光通信中大孔径及复合孔径接收天线的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
WANG Z X. Research on large aperture and composite aperture receiving antennas in optical wireless communication [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [11] SONI G G, TRIPATHI A, MANDLOI A, et al. Compensating rain induced impairments in terrestrial FSO links using aperture averaging and receiver diversity [J]. Optical and Quantum Electronics, 2019, 51(7): 1-11.
- [12] DHEERAJ D, KUMAR Y P, RAJEEV T. Performance enhancement of hybrid-SIM for optical wireless downlink communication with aperture averaging and receiver diversity [J]. IET Communications, 2020, 14(18): 3194-3202.
- [13] KOLOSOV V V, KULIKOV V A, POLNAU E. Dependence of the probability density function of laser radiation power on the scintillation index and the size of a receiver aperture [J]. Optics express, 2022, 30(2): 3016-3034.
- [14] YURA H T, ROSE T S, WICKER J M. Stellar scintillation statistics and the impact of aperture averaging on space-to-ground optical communications [J]. Optics Express, 2023, 31(23): 38049-38043.
- [15] HARJEEVAN S, RAJAN M, NITIN M, et al. Designing an optimized free space optical (FSO) link for terrestrial commercial applications under turbulent channel conditions [J]. Optical and Quantum Electronics, 2023, 55(6): 532-555.
- [16] 柯熙政, 韩美苗, 王明军. 部分相干光在大气湍流中水平传输路径上的展宽与漂移 [J]. 光学学报, 2014, 34(11): 78-82.
KE X ZH, HAN M M, WANG M J. Spreading and drifting of partially coherent light on horizontal transmission paths in atmospheric turbulence [J]. Journal of Optics, 2014, 34(11): 78-82.
- [17] 柯熙政, 张宇. 部分相干光在大气湍流中的光强闪烁效应 [J]. 光学学报, 2015, 35(1): 56-62.
KE X ZH, ZHANG Y. Light intensity scintillation effect of partially coherent light in atmospheric turbulence [J]. Journal of Optics, 2015, 35(1): 56-62.
- [18] 柯熙政, 王超珍. 部分相干涡旋光束在大气湍流中传输时的光强分布 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 83-91.
KE X ZH, WANG CH ZH. Light intensity distribution of partially coherent vortex beams during transport in atmospheric turbulence [J]. Advances in Lasers and Optoelectronics, 2016, 53(11): 83-91.
- [19] 柯熙政, 王松. 部分相干 Airy 光束在大气湍流中的光强演化 [J]. 光子学报, 2017, 46(7): 7-15.
KE X ZH, WANG S. Light intensity evolution of partially coherent Airy beams in atmospheric turbulence [J]. Journal of Photonics, 2017, 46(7): 7-15.
- [20] WNAG J, KE X ZH, WANG M J. Influence of source parameters and atmospheric turbulence on the polarization properties of partially coherent electromagnetic vortex beams [J]. Applied Optics. 2019, 58(24): 6486-6494.
- [21] WANG J, KE X ZH, WANG M J. Detecting the topological charge of partially coherent electromagnetic vortex beams through the orientation angle of polarization [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2019, 228: 11-16.
- [22] YU J, ZHU X, WANG F, et al. Experimental study of reducing beam wander by modulating the coherence structure of structured light beams [J]. Optics Letters, 2019, 44(17): 4371-4374.
- [23] 张洁. 部分相干光大气湍流传输光束参数模拟技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
ZHANG J. Partial coherent optical atmospheric turbulence transmission beam parameter simulation technique [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2019.

- [24] 杨宁, 赵亮, 许颖, 等. 部分相干径向偏振扭曲光束在非均匀大气湍流中的传输特性[J]. 激光与红外, 2022, 52(8): 1167-1176.
YANG N, ZHAO L, XU Y, et al. Transmission characteristics of partially coherent radially polarized distorted beams in non-uniform atmospheric turbulence[J]. Laser and Infrared, 2022, 52(8): 1167-1176.
- [25] HUANG K, XU Y, ZHAO L, et al. Propagation factor of partially coherent vector vortex beam in inhomogeneous turbulent atmosphere[J]. Optik, 2022, DOI: 10.1016/J.IJLEO.2022.170247.
- [26] LIU W L, XU Y G, AN B Z, et al. Beam propagation factor of a partially coherent twisted elliptical vortex beam in inhomogeneous atmospheric turbulence[J]. Journal of Russian Laser Research, 2023, 44(4): 426-438.
- [27] XU Q, XU Y, ZHAO L, et al. Polarization characteristics of partially coherent radially and azimuthally polarized beams with vortex phase propagating through atmospheric turbulence [J]. Physica Scripta, 2023, 98(10): 105504-105517.
- [28] 刘哲琦. 基于无线光 MIMO 的大气传输特性研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
LIU ZH Q. Research on atmospheric transmission characteristics based on optical wireless MIMO [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2022.
- [29] 柯熙政, 刘妹. 湍流信道无线光通信中的分集接收技术[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 88-95.
KE X ZH, LIU M. Diversity reception technique in optical wireless communication for turbulent channels[J]. Journal of Optics, 2015, 35(1): 88-95.
- [30] 孟德帅. 室外可见光通信在弱湍流信道中的性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
MENG D SH. Performance study of outdoor visible light communication in weak turbulent channels[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [31] KAUR P, JAIN V K, KAR S. Performance analysis of free space optical links using multi-input multi-output and aperture averaging in presence of turbulence and various weather conditions [J]. IET Communications, 2015, 9(8): 1104-1109.
- [32] BHATNAGAR M R, GHASSEMLOOY Z. Performance analysis of gamma - gamma fading FSO MIMO links with pointing errors [J]. Journal of Lightwave technology, 2016, 34 (9): 2158-2169.
- [33] KUMAR N, KHANDELWAL V. Simulation of MIMO-FSO system with Gamma-Gamma fading under different atmospheric turbulence conditions [C]. IEEE. 2019 International Conference on Signal Processing and Communication. IEEE, 2019: 117-124.
- [34] 许焱赞. 空间激光通信接收视场角范围扩大技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
XU Y Y. Research on field-of-view range expansion technology for space laser communication reception [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2019.
- [35] 丁珂楠. 大气部分相干光通信中的分集技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
DING K N. Research on diversity technology in atmospheric partial coherent optical communication [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [36] KUMAR D A, SANGEETHA R G, et al. Performance analysis of power series based gamma-gamma fading M-ary PSK MIMO/FSO link with atmospheric turbulence and pointing errors [J]. Telecommunication Systems, 2022, 79(4): 481-502.
- [37] 路鸿博. 近地空间激光通信链路大气湍流特性及优化研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2023.
LU H B. Research on atmospheric turbulence characteristics and optimization of near-Earth space laser communication link [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2023.
- [38] 张丹玉. 自适应光学波前畸变控制及实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
ZHANG D Y. Adaptive optical wavefront distortion control and experimental research [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [39] 吴加丽, 柯熙政. 无波前传感器的自适应光学校正[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 133-139.
WU J L, KE X ZH. Adaptive optical correction of wavefront-free sensors [J]. Advances in Lasers and Optoelectronics, 2018, 55(3): 133-139.
- [40] LI ZH K, SHANG T, LIU X CH, et al. Advanced multi-feedback stochastic parallel gradient descent wavefront correction in free-space optical communication [J]. Optics Communications, 2023, 53(3): 43-51.
- [41] 柯熙政, 张云峰, 张颖, 等. 无波前传感自适应波前校正系统的图形处理器加速[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(7): 96-104.
KE X ZH, ZHANG Y F, ZHANG Y, et al. Graphics processor acceleration for wavefront-free sensing adaptive wavefront correction systems[J]. Advances in Lasers and Optoelectronics, 2019, 56(7): 96-104.
- [42] HAN M M, KE X ZH, LIANG J Y. Study on the difference in wavefront distortion on beams caused by wavelength differences in the strong turbulence region [J]. Applied Sciences, 2024, 14(11): 4692-4705.

- [43] HASHMI A J, EFTEKHAR A A, ADIBI A, et al. Analysis of adaptive optics-based telescope arrays in a deep-space inter-planetary optical communications link between Earth and Mars [J]. *Optics Communications*, 2014, 333: 120-128.
- [44] WRIGHT M W, MORRIS J F, KOVALIK J M, et al. Adaptive optics correction into single mode fiber for a low earth orbiting space to ground optical communication link using the OPALS downlink [J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33705-33712.
- [45] ESCARATE P, AGUERO J C, ZUNIGA S, et al. Model predictive control for laser beam shaping [J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2017, 15(4): 626-631.
- [46] 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.
KE X ZH, HAN K N. Wavefront simulation and wavefront correction for liquid crystal spatial light modulators [J]. *Advances in Lasers and Optoelectronics*, 2019, 56(5): 170-175.
- [47] 李梅. 光束波前畸变的本征模式法校正实验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
LI M. Experimental study on the correction of beam front aberrations by the eigenmode method [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [48] 程爽. 自由空间相干光通信大幅度畸变波前的校正技术研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
CHENG SH. Correction techniques for large distortion wavefront in free space coherent optical communication [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [49] 杨慧珍, 苏杭, 张之. 基于 K-L 模式的 SPGD 控制算法波前校正 [J]. *中国激光*, 2023, 50(14): 141-147.
YANG H ZH, SU H, ZHANG ZH. Wavefront correction of SPGD control algorithm based on K-L mode [J]. *China Laser*; 2023, 50(14): 141-147.
- [50] 秦欢欢, 王梦凡, 柯熙政. 工业互联网下的无线光通信研究进展 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(10): 1-13.
QIN H H, WANG M F, KE X ZH. Research progress of optical wireless communication under industrial internet [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(10): 1-13.
- [51] 柯熙政, 杨尚君, 吴加丽, 等. 无线光 MIMO 技术及空时编码研究进展 [J]. *湖南科技学院学报*, 2021, 42(5): 25-32.

KE X ZH, YANG SH J, WU J L et al. Research progress of optical wireless MIMO technology and space-time coding [J]. *Journal of Hunan Institute of Science and Technology*, 2021, 42(5): 25-32.

- [52] AGARWAL H, MISHRA D, KUMAR A. A deep-learning approach for turbulence correction in free space optical communication with laguerre-gaussian modes [J]. *Optics Communications*, 2024, 556: 130249-130260.
- [53] BART M P, SAVINO N J, REGMI P, et al. Deep learning for enhanced free-space optical communications [J]. *Machine Learning: Science and Technology*, 2023. DOI: 10.1088/2632-2153/AD10CD.
- [54] 杨尚君, 柯熙政, 梁静远. 无线光相干通信智能信道均衡技术实验研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(5): 131-139.
YANG SH J, KE X ZH, LIANG J Y. Experimental research on intelligent channel equalization technology for wireless optical coherence communication [J]. *Journal of Instrumentation*, 2023, 44(5): 131-139.

作者简介



梁静远, 2015 年于西安理工大学获得硕士学位, 现为西安理工大学自动化与信息工程学院助理工程师, 主要研究方向为无线光通信系统调制解调技术。
E-mail: ljy@xaut.edu.cn

Liang Jingyuan received her M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2015. She is now an assistant engineer in the School of Automation and Information Engineering at Xi'an University of Technology. Her main research interests include modulation and demodulation technology for wireless optical communication systems.



柯熙政 (通信作者), 1996 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为西安理工大学自动化与信息工程学院教授, 俄罗斯自然科学院外籍院士, 主要研究方向为无线光理论与技术。
E-mail: xzke@263.net

Ke Xizheng (Corresponding author) received his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 1996. Now he is a professor at the School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Foreign academician of the Russian Academy of Natural Sciences. His main research interest includes theory and technology of optical wireless communication.