# 摘要

信息技术的高速发展对网络节点间无线互连的速度和质量提出了更高的需求，自由空间光通信（FSOC）作为射频技术的重要补充，能够在点对点链路上提供极高的数据传输速率，被认为是未来异构通信网络的关键组成部分。然而大气信道中的湍流效应会使作为载波的激光束发生波前畸变，引起接收端的光束漂移、横向弥散、光强起伏等现象，导致接收光信号质量发生严重劣化。因此，研究分析大气信道特性、优化光收发机设计以减弱湍流对光传输的影响，是提高FSOC系统可靠性的主要手段。

经过多年发展，水平大气湍流信道的建模理论已经比较成熟，基于Kolmogorov类功率谱函数和扩展惠更斯-菲涅耳原理或扩展Rytov理论的水平链路闪烁指数模型成为链路性能预测的强大工具。在理解信道特性的基础上，通过高精度光电跟踪、光束参数优化、空间分集、自适应光学和新型部分相干光等技术的综合运用，近地面水平光链路的性能已经达到较高水平，有众多商用光收发机设备投入使用。另一方面，倾斜大气路径的折射率结构常数是海拔高度的函数，这增加了使用解析方法计算闪烁指数的难度，特别是对于有限内外尺度和高斯光束传播的情况，因此相关研究的进展也比较缓慢。本文从信道建模和新型部分相干光源两个方向入手，研究讨论倾斜大气链路中光束传输的起伏特性和抑制措施。

针对现有倾斜链路闪烁指数模型只适用于弱起伏条件的问题，本文根据扩展Rytov理论推导大尺度效应和小尺度效应在湍流功率谱上的截止频率的积分表达式，得到了适用于所有起伏条件的改进闪烁指数模型。改进后的模型在上行方向和下行方向的具有统一的数学形式，不仅可以用于计算大天顶角链路的闪烁指数，还包含内外尺度和接收机孔径等参数，可以同时研究多种因素对光强起伏的影响。利用这一模型，本文对不同高度的闪烁特性进行了大量分析，比较了内外尺度效应、光源尺寸、接收孔径平均、高空风速、光源空间相干性等系统和环境参数对上行链路和下行链路的不同影响。根据所得到的计算结果，结合湍流起伏能量守恒的假设，对工程领域关心的星地链路不对称性给出了定性解释，指出湍流层的分布特征与光束的衍射展宽是导致这一差异的主要原因。

以高斯谢尔模（GSM）光束为代表的部分相干光（PCB）能够以展宽为代价换取接收端闪烁指数的降低，在空间光通信中具有重要应用价值。然而高空飞行器与地面站之间的链路被证明无法通过部分相干光（PCB）改善接收质量，因此本文重点研究PCB在中低空链路中的应用，并首次提出使用均匀相关相位屏空间调制方法生成的具有凸形相干度分步的径向部分相干光（CPCB）。实验结果表明，CPCB的最大特点是在传输过程中会发生一次至多次自聚焦，因而在增强接收孔径内光能密度的同时还强化了孔径平均效应，使闪烁指数进一步降低。波动光学仿真结果表明，与均匀相关的GSM光束相比，CPCB可以将轴上接收孔径内的信噪比提升1到2 dB，而对于存在收发机对准误差的轴外接收情况，CPCB更是能够提供多达5到6 dB的信噪比增益，而且这是在不增加硬件成本的情况下实现的。对于PCB相关应用重要的光探测器相对积分时间问题，本文也结合CPCB的湍流传输做了分析，得到的结论是，相对积分时间不足对CPCB的影响没有GSM明显，因此在空间调制器件开关速度不足的情况下，CPCB是更为优化的光源选择。

本论文构建了倾斜大气星地/空地光束传输问题的完整物理图景，相关原创性研究内容是对现有湍流光通信理论和光场调控技术的补充和发展，兼具原理的可靠性和实现的可行性，对下一代空间光通信系统的设计和优化有借鉴意义和参考价值。

**关键词**：大气湍流；闪烁指数；波动光学仿真；光场调控；径向部分相干光

# Abstract

With the rapid advancement of information technology, there have been higher demands on the speed and quality of wireless interconnections between network nodes. As an important complement to the radio-frequency technique, free-space optical communications (FSOC) is capable of offering ultrahigh data transmission rate in line-of-sight (LOS) links and hence considered to be a key constituent of the future heterogeneous communication network infrastructure. Nonetheless, the turbulence effects along the atmospheric channel exerts wavefront distortions on the carrier laser beam, which lead to beam wander, extra spreading and irradiance fluctuations at the receiver end, and thereby deteriorating the optical signal to a great extent. Therefore, mitigating the turbulent effects on beam propagation through better characterization of the atmospheric channel and optimization of the optical transceiver is essential to improve the reliability of FSOC systems.

Up to date, the modeling theories for horizontal atmospheric turbulence path have been fully developed. The scintillation models based on Kolmogorov type power spectrum functions and extended Huygens-Fresnel principle or extended Rytov theory are serving as powerful tools for link performance prediction. Upon proper understanding of the link properties and integration of high-precision tracking mechanism, optimization of beam parameters, spatial diversity, adaptive optics and novel partially coherent beams, the performance of near-ground horizontal optical links has been well acknowledged and many optical transceiver have been commercially deployed. On the other side, slant atmospheric paths exhibit altitude-dependent refractive index structure constant, adding to the difficulty in calculating the scintillation index with analytic approach, especially for the case of finite inner and outer scales and Gaussian beam propagation. Consequently, related researches are currently trailing behind. The presented thesis proceeds with channel modeling as well as novel partially coherent source, dedicated to the study of the fluctuation properties and the corresponding counter-measures in slant-path atmospheric optical beam propagation.

Accounting for the fact that the present slant-path scintillation model is only applicable to weak fluctuating links, in this thesis the integral expressions for the cutoff frequencies of the large scale and small scale effects on the turbulence power spectrum are derived according to the extended Rytov theory, and a modified scintillation model suitable for general fluctuations is thus obtained. The modified model features a unified mathematical form in the uplink and the downlink. It not only can be used to calculating the scintillation index under large zenith angle, but also incorporates inner and outer scale parameters as well as aperture size, so the effects of multiple factors on irradiance fluctuations can be jointly analyzed. With the developed model, plentiful research has been carried out on the scintillation characteristics at various altitudes and specifically, effects of systematic and environmental parameters such as inner and outer scale effects, source width, receiver aperture averaging, psudo-wind speed and spatial coherence of the source are evaluated. On basis of the obtained results, the asymmetry of satellite-to-ground uplink and downlink is qualitatively explained upon the hypothesis of conservation of turbulence fluctuating energy.

Partially coherent beams (PCB) such as the Gaussian Schell-model (GSM) beams trade extra spreading for reduced scintillation at the receiver end, which can be very useful in the implementation of FSOC. However, it is proved that the optical link between a high-altitude platform and a ground-level station is unable to benefit from the use of PCB. For that reason, this study focuses on the application of PCBs in short slant paths. Particularly, for the first time a type of radial partially coherent beams with convex-shaped distribution of degree of coherence (CPCB) is proposed, which is generated by spatial modulating uniformly correlated phase screens. Experimental results reveal that, CPCB features one to multiple self-focusing during propagation, by which the more optical power can be collected by the receiving aperture and the aperture averaging effects are enhanced as well, resulting in further reduced scintillation. Wave optics simulation results indicate that, compared with uniformly correlated GSM beams, the use of CPCB will increase the on-axis signal-to-noise ratio (SNR) by 1 to 2 dB. While for the off-axis case where pointing errors exist, CPCB can provide up to 5 or 6 dB SNR gain. Most remarkably, these performance improvements come with little extra hardware cost. Regarding the relative integration time which is a vital issue for PCB-related application, analyses on the turbulence propagation of CPCB have been made in this thesis. It is concluded that, CPCB is not influenced by insufficient integration time of the photonic detector as greatly as the GSM beams. So on condition that the spatial modulator is not switching fast enough, CPCB is a better choice for the optical source.

Having established a complete physical image of beam propagation in slant satellite-/air-to-ground atmospheric path, the work in this thesis provides an expansion and improvement to the present turbulence optics theory and optical field manipulation techniques. Combined with theoretical dependability and practical feasibility, it is hoped this work will benefit the development of the next generation FSOC systems.

**Keywords**: atmospheric turbulence; scintillation index; wave optics simulation; optical field manipulation; radial partially coherent beams

# 第6章 总结与展望

近年来移动互联网、高分辨率图像传感器和云存储云计算等技术快速发展，导致数据流量急剧增加，对现有射频无线通信网络的性能提出了很大挑战。作为射频技术的重要补充，光无线技术经过多年的发展已经成为搭建视距高速链路的重要选项，在骨干节点中继、基站间互连、高层建筑间通信、空地/星地/星间通信、战场通信和应急通信等应用领域发挥了重要作用。

然而，光学性质极不稳定的大气信道对自由空间光束传输的影响十分严重，湍流畸变引起的光强起伏成为限制自由空间光通信系统性能的关键因素。由于湍流本身的不可控性，为了抑制大气湍流的不利影响，只能设法在分析信道特性的基础上从光收发机端采取应对和优化措施。针对具有不对称结构的倾斜大气湍流链路，本文致力于建立更完善的闪烁指数理论模型，通过对各种链路参数作用的深入分析，比较全面而自洽地阐述了光束在湍流涡旋中传输演化的物理过程和特定情况下闪烁特征的成因。同时，本文尝试通过新型光场调制方法设计抗湍流性能更好的非均匀部分相干光束，改善接收质量，提高接收机信噪比。总结本文研究成果和贡献，主要分为理论研究和数值仿真两个方面。

理论研究方面，本文在扩展Rytov理论的基础上，建立了适用于从弱起伏到强起伏的倾斜链路闪烁指数模型，这是对现有的基于经典Rytov理论的模型的关键改进，新的模型不仅能够处理大天顶角的高斯光束传输，还可用于分析倾斜链路上的内外尺度效应和孔径平均效应，是目前已知较为完善的一种闪烁指数模型。根据逼近原理，推导出用于界定大尺度和小尺度效应的功率谱滤波函数的截止频率，同时认识到上行链路和下行链路的唯一区别是折射率结构常数在路径上的分布，通过坐标代换得到了上下行闪烁指数的统一表达式。

利用该模型对倾斜链路的闪烁指数进行分析发现，排除光束漂移的影响后，下行链路的闪烁指数要明显高于上行链路，由此可知上行链路的光束漂移更为严重。关于内外尺度效应，整体上仍符合内尺度越大、外尺度越小闪烁指数越小的一般规律，当飞行器高度较低时外尺度效应并不明显，而内尺度效应在下行方向却不能忽略，此外大孔径接收机也会极大地抑制内尺度效应。对接收机信噪比和误码率的研究结果表明，上行链路可以通过优化光源尺寸显著改善接收性能，下行方向则不存在最优的光束尺寸。另一个重要结论是，飞行器高度较高的倾斜链路并不能利用部分相干光提高信噪比。此外，根据亥姆霍兹互易性原理，本文还提出了湍流起伏能量守恒假设，结合星地链路闪烁指数的计算结果，解释了星地上行和下行链路不对称性的成因。

本文总结归纳了基于分步式菲涅尔衍射原理的波动光学仿真方法，详细介绍了仿真的采样约束条件及其实现细节，并完整地阐述了湍流功率谱的低频采样不足问题及补偿措施即副谐波相屏增强方法，通过对副谐波方法的参数优化使计算精度和仿真效率得到兼顾。以此为基础，第5章研究了具有凸形相干度分布的新型非均匀部分相干光在湍流中的传输。文中提出，通过均匀相关相位屏的空间域调制，可以产生任意形状的空间相干度分布。实验证据表明，针对闪烁指数径向分布特征而设计的具有高斯形和超高斯形相干度分布的凸形部分相干光，在自由空间中传播时具有独特的自聚焦特性，因此受到特别关注。凸形部分相干光在水平和倾斜大气链路传输的波动光学仿真结果显示，其自聚焦特性不仅有助于提高接收孔径内的光能密度，还强化了孔径平均效应从而进一步降低了闪烁指数，因此轴上接收机的信噪比能得到1~2 dB的提升，对于存在对准误差的离轴接收情况，凸形部分相干光能提供多达6 dB的信噪比增益。此外，本文还研究了探测器相对积分时间这一对部分相干光链路至关重要的参数，仿真结果显示，与传统的高斯谢尔模光束相比，凸形部分相干光对较低的相对积分时间具有更好的鲁棒性，这意味着相同器件下更高的性能或相同性能指标下更低的器件成本，对下一代自由空间光通信光源端的设计和优化具有指导意义和实用价值。

在本文内容的基础上，未来的研究工作可以尝试从以下几个方面推进：

(1) 对于倾斜链路上行方向的光束漂移，在缺乏良好的对准跟踪机制时会成为接收光信号起伏的重要原因，若能将光束漂移效应对横向闪烁指数的贡献整合到本文介绍的倾斜链路闪烁指数模型之中，模型的完善性和实用性将得到进一步增强。

(2) 本文研究的凸形部分相干光的局部相关函数仍然是高斯谢尔模的，采用空间光调制器-旋转毛玻璃-傅里叶透镜的结构实现van Cittert-Zernike定理，可以产生非谢尔模的空间相关特性，如贝塞尔相关光束。非谢尔模的凸形部分相干光是否具有更好的湍流传输性质，将是一个非常值得探究的问题。

(3) 寻找比高斯函数和超高斯函数更加优化的相干度空间分布，同时还可以探索基于凸形相干原理的光束阵列在特定湍流条件下的传输性能，最大程度上对光源特性进行优化。

(4) 在条件允许时开展凸形部分相干光的室外传输实验，前提是要在无人机等小型平台上解决跟踪对准的问题，为凸形部分相干光的抗湍流特性提供实验数据的支撑。

自由空间光通信技术随着激光技术和半导体光电子学的发展而兴起，随着互联网技术的繁荣而逐步走向规模化、实用化，希望本文的工作能为我国的自由空间光通信研究献出绵薄之力，在这一技术领域更快地进步、成熟。