# 1. 绪论

## 1.1研究背景和意义

进入二十一世纪以来，以移动互联网为代表的信息技术和基于先进半导体工艺的高速高分辨率传感器技术不断产生突破，给人们的生活带来了巨大的改变，也极大地带动促进了其他领域的科技进步。与此同时，信息量的爆炸性增长对信息的流动渠道——通信网络带来的压力也日益增大，2017年全球IP流量已达1.5 ZB (1ZB = 109 TB)，并且这一数字会在接下来的五年中增长两倍[[1](#_ENREF_1), [2](#_ENREF_2)]。为了应对高速高质量数据传输的需求，骨干网和接入网已逐渐完成铜缆向光纤的升级，凭借相干光信号的巨大带宽，网络容量得到了极大的提升。在需要无线互连的场合，微波通信长期以来占据着主流地位，然而紧张的频谱资源和性价比等因素已经让微波设备在一些特殊应用场景中显得力不从心。

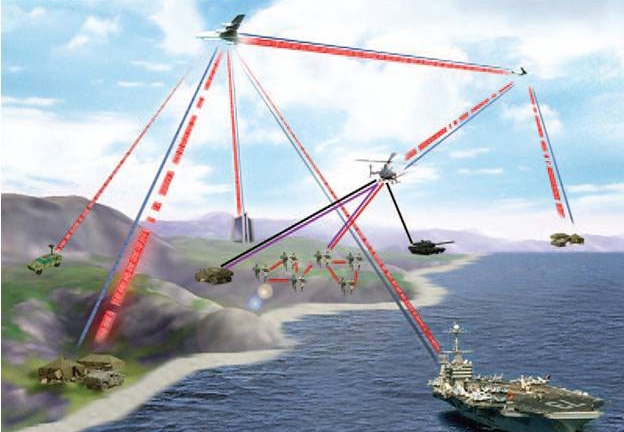


图 1-1 自由空间光通信实现网络节点间高速互连

以自由空间光通信（Free Space Optical Communications, FSOC）为代表的光无线技术，使用激光光束作为载波直接在无线光收发机之间的视线路径上进行传输，兼具无线通信的灵活性和光纤通信的带宽优势[[3-8](#_ENREF_3)]。除通信速率外，FSOC还具有如下特征：光谱不受管制，收发机可定制性极强；不存在串扰问题，可以用于射频拥塞区域的接入增强；激光束方向性好，收发光天线结构紧凑，特别适合载荷受限的卫星和飞机等平台；链路搭建方便，部署速度快；难以被干扰或窃听，在保密通信和安防领域具有重要价值。需要指出的是，发展FSOC的目的不是取代微波通信，事实上微波通信也具有不可替代的优势，特别是在民用领域，而FSOC的上述技术特点是其成为微波技术的有力补充，并已经或即将在以下领域获得重要应用：

(1) 临时链路搭建。FSOC光收发机的体积小重量轻，无需考虑布线因素，对环境条件要求低，因此调试、部署、拆除都非常灵活。此外，作为物理层设备的FSOC对通信协议透明，可以在任意协议的网络节点之间实现无缝桥接。

(2) 高层建筑互连。城市的高层建筑间常常需要超高速的互连互通，架设微波天线不仅会破坏大楼整体外观，还会引起健康方面的担忧，而一条光链路不仅可以取代数条微波链路，还可以部署在玻璃幕墙内部，对非视线的遮挡也不敏感。

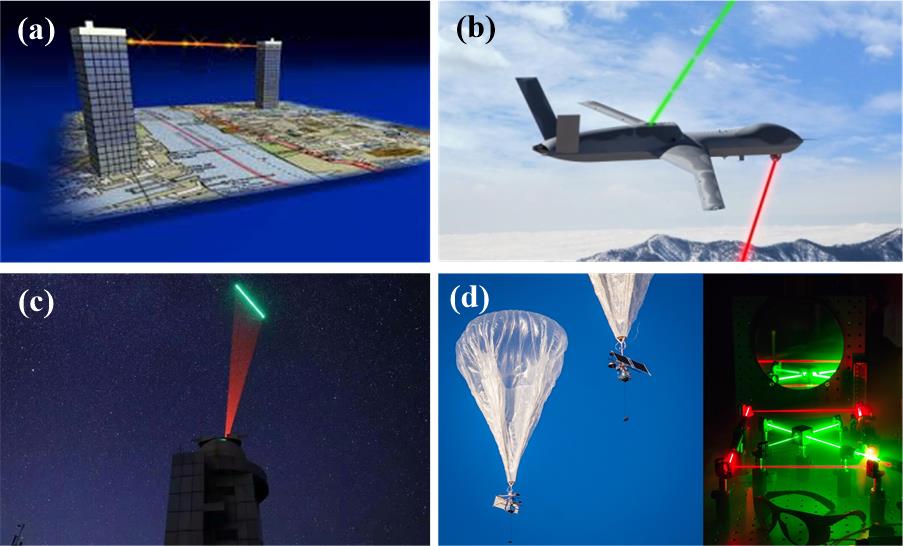


图 1-2 FSOC技术的典型应用：(a)高层楼宇间通过光链路实现互连；(b)无人机与卫星和地面站间的无线光通信；(c) 中科院“墨子号”量子科学实验卫星与国家天文台河北兴隆观测站间建立的光链路[[9](#_ENREF_9)] (d)谷歌Project Loon使用中继气球为偏远地区提供接入服务，右图为其FSO验证平台。

(3) 岛礁间通信[[10](#_ENREF_10)]。随着国家对南海主权的重视，岛礁开发进度不断加快，对于岛礁之间的通信，FSOC无论从可用性还是安全性考虑，都应占据重要位置。

(4) 卫星光通信。当前，先进遥感卫星和通信卫星的数据量急剧增加，如何将这些数据传回地面站成为关键问题，而卫星间通信也面临同样的问题。相比于动辄以吨计的微波天线，光无线设备能以数十千克的载荷实现同样的传输速度，因此各航天大国都长期致力于推进卫星光通信的实用化，这也是推动FSOC技术向前发展的一大动力。

(5) 中低空链路[[11-14](#_ENREF_11)]。我国已经成为无人机技术大国，在无人机通信中，FSOC可以作为微波数据链的备份链路，也有潜力成为下一代空地节点互连技术的主力，其无线电静默特性可以成为隐身接近的重要手段。

(6) 应急救灾[[15-17](#_ENREF_15)]。FSOC快速部署的特性对分秒必争的应急通信和灾后恢复等工作至关重要。另外，无论是地震等自然灾害后的抢险，还是矿井事故的救援，都要防范微波射频引燃泄漏易爆气体的风险[[18](#_ENREF_18), [19](#_ENREF_19)]，在这种情况下，能量效率更高的光无线技术将成为优先选项。

(7) 战场自组织网络。小型化的光无线设备能够在干扰严重的战场环境下工作，作为班组成员间通信、战车间自组织（AdHoc）网络中的备份链路，将大大提高系统的可用性和鲁棒性。

FSOC技术具有诸多优点，经过多年发展已从概念走向实用，也将在未来网络基础设施和国防航天等应用领域占据重要位置。然而，激光束直接在大气信道中传播的特点也使FSOC极易受到气象条件的影响。事实上，大雾[[20](#_ENREF_20), [21](#_ENREF_21)]、沙尘[[22](#_ENREF_22), [23](#_ENREF_23)]、云层[[24](#_ENREF_24), [25](#_ENREF_25)]和雨雪环境中激光束会受到严重的散射和吸收衰减，同时会造成光束展宽和相干度降低，大大限制FSOC系统的通信距离[[26-28](#_ENREF_26)]。然而，除了增加发射功率或降低传输速率，对这类微粒散射吸收效应并没有更有效的应对措施[[27](#_ENREF_27), [29](#_ENREF_29)]。另一方面，大气湍流也会造成光束接收质量的严重劣化。大气湍流对光束传输的影响体现为空气折射率随机起伏引起的波前畸变，导致光束在接收端发生光斑弥散、达角起伏、抖动漂移和光强起伏等现象，其本质是一种乘性噪声，在天气晴朗时是限制系统性能的关键因素。

为了减轻湍流效应带来的不利影响、改善接收光信号质量，科研工作人员在大量理论和实验工作的基础上提出了一系列技术手段，包括自动指向对准跟踪（PAT）、自适应光学（AO）、先进调制编码、新型光束、空间分集等等[[30](#_ENREF_30)]。需要指出的是，由于湍流信道特性随地理位置、气象条件、链路结构的不同而差异极大，因此大多数湍流抑制技术都存在有限的适用范围，往往需要针对不同类型的湍流信道提出专门的解决方案。

本论文致力于倾斜大气湍流信道的建模和光束传输特性分析优化。上述的卫星光通信、中低空无人机和中继气球与地面站间的链路等都属于倾斜链路，倾斜链路区别于水平链路的最大特点是，表征湍流强度的折射率结构常数是高度的函数，而且在整个传播路径上的分布极不对称，这给倾斜链路的研究增加了难度。本文首先尝试对现有的弱起伏倾斜链路闪烁指数模型进行修正，使其能够对起伏较强的链路进行分析，同时包含更多的环境和系统参数，这样模型的适用范围和预测精度都能够得到提升。但是理论模型在推导过程中使用的数学近似导致模型在传输距离较近的中低空对地链路存在较大的误差，因此对中低空光束传输本文采用基于离散相位屏的分步式波动光学仿真方法进行数值分析，特别提出并研究一种具有凸形相干度分布的新型部分相干光的传输特性，通过光场相位调控的方法提高湍流信道的信噪比。

## 1.2 国内外研究概况

自由空间光通信是具有重要经济和战略价值的尖端通信技术，长期以来世界各主要国家都给予了高度重视并进行了大量科研投入，相关理论、器件和组网技术都取得了长足发展[[31](#_ENREF_31), [32](#_ENREF_32)]。

### 1.2.1 空间光通信系统与实验进展

美国从上世纪60年代开始大力研发星地光通信系统，主要参与机构包括美国海军实验室、空军研究实验室、MIT林肯实验室、NASA喷气动力实验室等。激光技术问世后不久，部分美国研究者随即开始论证使用激光进行自由空间通信的可行性，并进行了一系列理论推导与分析。然而当时相干光湍流传输的理论模型尚未成熟，且受到光源质量和探测器件的限制，初期的研究更多地局限于理论分析和实验室内研究[[33-35](#_ENREF_33)]，极少数的在轨实验也仅仅是利用卫星上的角反射器将地面站发射的光束反射一次，用来研究链路上的达角起伏或闪烁指数等特性，并未建立完整的空间光通信系统[[36-39](#_ENREF_36)]。

1990年代初期美国通过名为光通信演示（OCD）的项目验证了卫星与地面站间的对准捕获跟踪机制和光链路搭建过程[[40](#_ENREF_40), [41](#_ENREF_41)]，但随后在空间技术研究载具（STRV-2）项目由于卫星定姿定轨精度和瞄准机制冗余不足而失败，导致美国在卫星光通信发展上短暂落后于欧洲[[42-44](#_ENREF_42)]。2012年NASA发射了月球大气与尘埃环境探测器（LADEE），次年进行了名为月球激光通信演示（LLCD）的卫星光通信实验，在38万5千公里的月球轨道与地面站间进行了为期30天的测试，这是美国首次进行双向星地光链路传输实验，上行无误码传输速率为20 Mbps，而622 Mbps的下行速率创下了当时记录[[45-49](#_ENREF_45)]。通过LLCD项目的技术积累，2011年NASA牵头启动了雄心勃勃的激光通信中继演示（LCRD）项目，目的是在提供10~100倍于传统射频系统数据速率的同时压缩设备的体积和功耗，为美国未来在太阳系内的航空探索提供通信保障。LCRD于2017年完成地面技术验证测试，2019年将作为商业卫星的载荷之一进入同步轨道，目标是与LLCD共享的两个地面站间建立1.244 Gbps的双向数据链路。在LCRD基础上，NASA还将开展LCRD集成近地轨道用户调制解调放大器终端（ILLUMA-T）和“光至猎户座”（O2O）两个卫星光通信项目。此外，美国还在进行面向飞机光通信的OCD-2[[50](#_ENREF_50)]和针对近地轨道飞行器的OPALS项目[[51](#_ENREF_51)]。

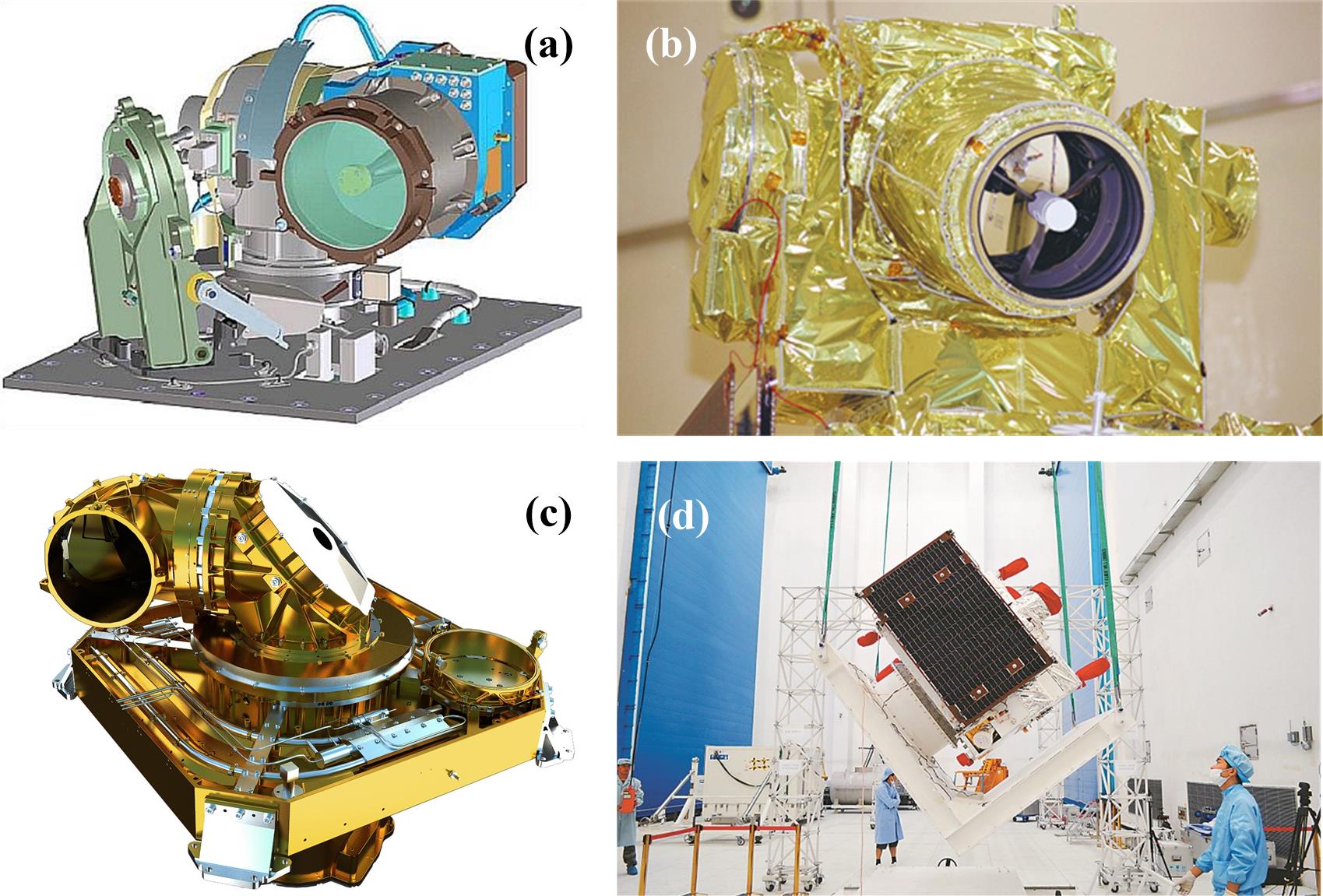


图 3 近年各国具有代表性的空间光通信项目及相关硬件：(a)美国为LCRD项目设计的卫星端光收发机构；(b)日本OICETS项目的星载光端机；(c)欧洲EDRS项目中使用的德国LCT卫星光终端；(d)中国“墨子”号量子科学实验卫星

日本是最早成功进行在轨卫星与地面间激光通信实验的国家，1994年日本通信研究实验室（CRL）与NASA合作开展了地轨激光通信演示实验，在日本本国的ETS-VI卫星和JPL位于加州平顶山的地面站间建立了1.024 Mbps的双向链路[[52-54](#_ENREF_52)]。而由日本主导的另一个更知名的项目是轨道间光通信工程测试卫星（OICETS），从2006年开始，日本宇航开发局（JAXA）与德国宇航中心（DLR）、欧洲航天局（ESA）、美国喷气动力实验室等机构在卫星光通信方面密切互动，多次进行不同国家间在轨卫星的激光通信实验，OICETS系统在实验过程中体现出较高的可用性和可靠性[[55-59](#_ENREF_55)]。

欧洲航天局于2001年进行的半导体激光星间链路实验（SILEX）首次成功建立起在轨卫星间的光通信链路，强度调制/直接探测（IM/DD）体制下通信速率为50 Mbps[[60](#_ENREF_60), [61](#_ENREF_61)]。欧洲数据中继系统（EDRS）旨在通过搭载德国LCT光模块的同步轨道卫星建立低柜卫星、飞船、无人机和地面站之间高速数据中继通道，2016年发射的EDRS-A卫星在星间和星地链路上均能达到1.8 Gbps的传输速率，目前已经开始为“哨兵”系列遥感卫星提供图像数据中继服务[[62-64](#_ENREF_62)]。计划中的第二颗中继卫星EDRS-C的发射时间已经推迟到2019年，ESA声称其数据速率将实现翻倍，从而有能力为更多商业用户同时提供服务[[65-67](#_ENREF_65)]。

国内方面，哈尔滨工业大学、长春理工大学、北京大学、中科院成都光机所、长春光机所、上海光机所、武汉大学、北京邮电大学、电子科技大学、西安理工大学、空军工程大学、中电34所、华中科技大学等单位在自由空间光通信的理论研究、组网技术和装备开发等领域也有长期的积累，并取得了一系列重要研究成果[[68-83](#_ENREF_68)]。

2011年，哈工大马晶、谭立英带领的团队自主研发的光收发机搭载于“海洋二号”卫星完成我国首次星地激光链路试验，达到上行20 Mbps、下行504 Mbps的通信速率，小于5s的系统平均捕获时间达到同期国际先进水平[[69](#_ENREF_69), [84](#_ENREF_84)]。2017年，该研究团队的光端机随实践十三号卫星升空，成功进行国际上首次高轨道星地双向高速激光通信试验，最高通信速率达到5 Gbps，平均捕获时间和跟踪稳定性等指标达到世界领先水平[[85-88](#_ENREF_85)]。同年，中科大潘建伟团队在此前的地面站间量子纠缠和密钥分发实验的基础上，成功在“墨子”号量子科学实验卫星与地面站间完成量子隐形传态、量子纠缠分发和量子密钥分发三项重要实验，建立了我国在自由空间量子通信领域的国际领先地位[[9](#_ENREF_9), [89](#_ENREF_89), [90](#_ENREF_90)]。

### 1.2.2 湍流光信道建模与光源空间调控技术进展

早在激光技术问世以先，部分前苏联科学家已经对大气的湍流现象产生兴趣并尝试对其统计特性进行描述。1940年代初期，Kolmogorov在Richardson的能量级联理论等假设上，通过量纲分析的方法得出了流体速度场结构函数的2/3次方定律，成为湍流研究的重要理论基础[[91](#_ENREF_91)]。湍流光传输的早期研究，以Tatarskii和Chernov的著作为代表[[92](#_ENREF_92), [93](#_ENREF_93)]，主要针对平面波和球面波在水平大气路径中的传输，依赖Rytov理论对闪烁指数的讨论局限于弱湍流[[94](#_ENREF_94), [95](#_ENREF_95)]。1965年，Gracheva和Gurvich首次通过实验观测到了闪烁指数的饱和现象，这极大激发了学术界对强湍流下光束传输的研究[[96](#_ENREF_96)]。为了更好地理解闪烁现象的物理本质，1970年代中期开始提出了一些光强起伏的定性描述方法，Yura通过考虑空间相干度在传输过程中的下降对Tatarskii模型做出了修正，虽然修正后的模型只能提供数量级精度的预测，但证明了闪烁指数的饱和值总是在1附近[[97](#_ENREF_97)]。1974年，Gochelashvili 和Shishov提出了用于分强湍流饱和情况下闪烁指数的渐近理论[[98](#_ENREF_98)]，Fante和Fante对其进行修正以包含内尺度效应[[99](#_ENREF_99), [100](#_ENREF_100)]，这一理论得到了广泛接受但对闪烁指数值仍存在低估的情况[[101](#_ENREF_101), [102](#_ENREF_102)]。1980年代初期，Clifford和Hill等人在Tatarskii工作的基础上提出并修正了对数振幅方差的启发式模型，说明了强湍流的饱和区存在小尺度起伏的原因[[103-105](#_ENREF_103)]。为了分析一般湍流条件下接收光场的一阶和二阶统计量，Ishimaru在1978年提出了抛物方程理论，然而其求解过程涉及大量约束条件，适用范围非常有限[[106](#_ENREF_106)]，与之相比一种同样精确、但更受欢迎的方法论是美国的Lutomirski等人和前苏联Feizulin等人提出的扩展惠更斯-菲涅耳原理[[107](#_ENREF_107), [108](#_ENREF_108)]。对于一般湍流条件下的四阶量特别是闪烁指数，Andrews和Phillips等人通过对Rytov理论的修正而引入了扩展Rytov理论[[109-111](#_ENREF_109)]，其核心思想是大尺度起伏对小尺度起伏的调制过程[[112](#_ENREF_112), [113](#_ENREF_113)]。对于部分相干光的闪烁指数，Andrews等人的处理方法是引入有效光束参数从而使用相干光传输理论进行分析[[114](#_ENREF_114), [115](#_ENREF_115)]，Gbur等人则通过模式分解的方法将部分相干光分解为有限各平面波的叠加从而在弱起伏区使用简单的平面波Ryotv公式，在强起伏区用数值方法进行计算[[116](#_ENREF_116)]。

光源特性对自由空间光链路的传输质量有重要影响，通过对光源的振幅和相位分布的调控可以显著改善FSOC系统性能。激光器的直接输出一般可以近似为TEM00模的高斯光束，这也是目前投入使用的大多数空间光发射机的光源模型，然而相干高斯光束本身比较容易受到湍流畸变的影响[[3](#_ENREF_3), [5](#_ENREF_5), [117-120](#_ENREF_117)]。

以艾利光束和贝塞尔光束为代表的无衍射光束在传播过程中受到阻碍后光场能够自行修复，一度被认为有潜力应用于湍流光通信[[121-126](#_ENREF_121)]。然而，其无衍射特性以光源横向尺度的大幅扩展为代价，发射机孔径有限的情况下光束在传输一段距离后会迅速弥散，即使在无衍射传输范围内自愈特性也无法带来闪烁指数的改善[[127-129](#_ENREF_127)]。涡旋光束是一类具有螺旋形波前的相干光束，在特定条件下对湍流引起的光强起伏有更强的抑制能力[[130](#_ENREF_130), [131](#_ENREF_131)]，通过控制螺旋的模式可以实现轨道角动量复用从而大大提升系统容量[[132-135](#_ENREF_132)]，然而湍流扰动会破坏模式间的正交性，因此涡旋光束更适合用于中近距离弱湍流信道[[136-138](#_ENREF_136)]。平顶光束可以通过低阶高斯光束参数化叠加得到，在远场呈现环形的中空振幅分布[[139](#_ENREF_139), [140](#_ENREF_140)]，研究表明尺寸大于菲涅尔区的平顶光束有降低光强闪烁的作用，而小尺寸的平顶光束则具有比一般高斯光束更为严重的闪烁[[141](#_ENREF_141), [142](#_ENREF_142)]。光束阵列作为一种发射端的空间分集技术，结合分集接收可以通过非相干叠加效应而平滑湍流导致畸变和起伏[[143-145](#_ENREF_143)]，阵列中子光束的参数和子光束间的空间排列与湍流信道的具体性质密切相关，因此在应用中需要特别注意发射机空间参数的优化[[146-149](#_ENREF_146)]。

大量理论和实验研究证实，部分相干光可以大大减轻接收端的光束闪烁，在特定链路条件下具有优异的性能表现[[6-8](#_ENREF_6), [150-152](#_ENREF_150)]。在统计光学中，高斯谢尔模（GSM）光束作为最基础的空间部分相干光得到了广泛而深入的研究[[153-156](#_ENREF_153)]。GSM光束虽然因相干度的损失而发散严重，但其对湍流扰动较不敏感的特性使人们意识到有可能在相干性和湍流抑制能力间取得更好的平衡，将部分相干的随机相位与确定性的振幅分布结合，可以得到各种各样的新型部分相干光源。部分相干平顶光束[[157-159](#_ENREF_157)]、部分相干中空光束[[160](#_ENREF_160), [161](#_ENREF_161)]、部分相干艾利光束[[162](#_ENREF_162), [163](#_ENREF_163)]、部分相干偏振光束等均匀相关的部分相干光束相继被设计并合成出来，并在特定作用域内得到了比经典GSM光束更好的传输特性。在相干度分布的存在性条件提出后，非均匀相关的新型部分相干光束也引起了学术界的兴趣[[164-166](#_ENREF_164)]，其中美国Korotkova和中国学者蔡阳健在这一领域取得了许多重要研究成果。1987年，Gori和Guattari研究了一种具有贝塞尔相关函数的谢尔模空间波前，这是最早的非GSM型的部分相干波前，将其叠加到相干高斯光源上之后光束的方向性得到了很大的改善[[167](#_ENREF_167), [168](#_ENREF_168)]，模式分解研究证明只要保留少数几个低阶模贝塞尔-谢尔模光束就能显著降低湍流传输的闪烁[[169](#_ENREF_169)]，这为光场调制开辟了新的维度，即相干度调制[[170](#_ENREF_170), [171](#_ENREF_171)]。此后，标量和电磁偏振形式的（椭圆）拉格朗日-高斯相关谢尔模光束[[172](#_ENREF_172), [173](#_ENREF_173)]、余弦-高斯相关谢尔模光束[[174](#_ENREF_174)]、复高斯相关谢尔模光束[[175](#_ENREF_175)]以及具有非均匀空间相干度分布的非谢尔模光束[[176](#_ENREF_176), [177](#_ENREF_177)]如雨后春笋般涌现，这些光束大多表现出独特的传输特性和远场分布，如可控的横向位移和自聚焦/发散、光强起伏抑制等，在空间光通信领域具有重要应用价值。总体而言，发射机光场调控技术还处于高速发展阶段，新的光束类型仍在不断被提出和验证，由于特殊的空间分布，其光束展宽和光强分布等二阶特性可借助扩展惠更斯-菲涅耳原理或平面波模式分解方法分析，而闪烁指数这样的四阶特性则要依靠数值仿真方法进行计算，从而对光束传输性能进行评价和优化。

## 1.3 本文研究内容与章节安排

本文的研究工作是在国家自然科学基金面上项目“新型部分相干光束合成机理与方法及其抗大气湍流特性研究”（No. 61275081）、“高速自由空间光通信无波前传感器自适应光学研究”（No. 61077058）和深圳市科技计划资助项目“卫星光通信新型自适应光学研究”（No. JCYJ20170307172155799）的资助下进行的。为实现提升倾斜链路自由空间光传输质量这一目标，本文提出了修正的倾斜链路闪烁指数模型，对于该模型不适用的低空近距离信道，则使用波动光学仿真方法进行分析，重点研究凸形部分相干光束的传输性能。各章节具体内容安排如下：

第一章为绪论部分，在自由空间光通信的背景下介绍了大气湍流光束传输的研究意义，对国内外湍流信道建模和新型光束传输研究进行了综述，明确了论文的研究内容和目的。

第二章对大气湍流进行概念性描述后，介绍反映湍流统计特性的Kolmogorov类功率谱模型，对处理弱起伏下光强起伏的经典Rytov理论进行阐述并定义了Rytov方差，建立闪烁指数分析方法的基本框架。针对强起伏链路引入扩展Rytov理论，阐述各种尺度的相对关系对光束传输的重要影响，推导平面波在水平链路中的闪烁指数表达式。

第三章重点研究倾斜链路一般起伏条件下的闪烁指数，围绕扩展Rytov理论中湍流功率谱滤波函数的截止频率的推导展开，通过向弱起伏下的经典Rytov理论和强起伏下的渐近理论逼近的方法，得到倾斜路径上下行链路闪烁指数的统一表达式，在此基础上研究了不同高度下若干系统和环境参数的影响，通过尺度分析和湍流强度的高度分布解释星地链路上下行方向的不对称性。

第四章系统性地总结了如何使用数值仿真研究光束在湍流中的传输，分析菲涅尔衍射积分中二次相位的采样问题，并通过虚拟平面的引入将等距采样的单步传输推广到采样间距可变的分步传输。然后，介绍生成湍流相位屏的功率谱反演法，并讨论如何通过副谐波方法补偿均匀采样时低频采样不足的问题，还给出了同样基于空间频率域随机化方法的部分相干光源相位屏的生成原理。最后，通过与Rytov理论预测的比较评价了仿真方法的准确性，并讨论了仿真参数的优化。

第五章介绍凸形部分相干光这一新型光束在湍流中的优异传输特性。提出通过调制均匀相关的高斯谢尔模相位屏产生非均匀的相干度分布，进而通过仿真和实验方法验证具有高斯形和超高斯形相干度分布的径向部分相干光在传输过程中的自聚焦现象，进而研究其在水平和倾斜湍流链路中的闪烁指数和信噪比，通过与高斯谢尔模光束的比较说明其优越性。

第六章总结了全文工作，并对未来工作进行展望。

[1] Drenski T, Rasmussen JC. ADC & DAC—Technology Trends and Steps to Overcome Current Limitations: proceedings of the 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), 2018[C]. IEEE.

[2] Cisco. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022 [M]. 2018.

[3] Kaushal H, Kaddoum G. Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques[J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2017,19(1): 57-96.

[4] CHU X, ZHAO S, CHENG Z*, et al.* Research progress of Airy beam and feasibility analysis for its application in FSO system[J]. Chinese Sci Bull, 2016,61(17): 1963-1974.

[5] Xiaoming Z, Kahn JM. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels[J]. IEEE T Commun, 2002,50(8): 1293-1300.

[6] Cai Y, Chen Y, Wang F. Generation and propagation of partially coherent beams with nonconventional correlation functions: a review [Invited][J]. J Opt Soc Am A, 2014,31(9): 2083-2096.

[7] Cai Y. Generation of various partially coherent beams and their propagation properties in turbulent atmosphere: a review: proceedings of, 2011[C].

[8] Gbur G. Partially coherent beam propagation in atmospheric turbulence [Invited][J]. J Opt Soc Am A, 2014,31(9): 2038-2045.

[9] Yin J, Cao Y, Li Y-H*, et al.* Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers[J]. Science, 2017,356(6343): 1140-1144.

[10] 刘黎军, 马静雅, 叶君华*, et al.* 长距离海岛间电力应急无线光通信系统研究[J]. 电力信息与通信技术, 2016,(7): 29-32.

[11] 安建欣, 何晓垒, 杨乾远*, et al.* 小型无人机空地无线激光通信的应用研究[J]. 光通信技术, 2017,41(6).

[12] 闫鲁生, 王峰, 吴畏*, et al.* 无人机激光通信载荷发展现状与关键技术[J]. 激光与光电子学进展, 2016,(8): 34-42.

[13] Leitgeb E, Zettl K, Muhammad SS*, et al.* Investigation in free space optical communication links between unmanned aerial vehicles (UAVs): proceedings of the Transparent Optical Networks, 2007 ICTON'07 9th International Conference on, 2007[C]. IEEE.

[14] Kaadan A, Refai H, Lopresti P. Spherical FSO receivers for UAV communication: geometric coverage models[J]. Ieee T Aero Elec Sys, 2016,52(5): 2157-2167.

[15] Ahdi F, Subramaniam S. Optimal placement of FSO relays for network disaster recovery: proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC), 9-13 June 2013, 2013[C].

[16] Harboe PB, Souza J. Free space optical communication systems: a feasibility study for deployment in Brazil[J]. J Microw Optoelectron Electromagn Appl, 2004,3(4): 58-66.

[17] 张轶, 任海兰, 王助娟. FSO的关键技术及应用[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2007,(6): 24-28.

[18] Wang W, Jiang H, Zhang Y. Analysis of Radio Frequency Risks in Flammable and Explosive Environments[J]. Advanced Materials Research, 2014.

[19] Cho Y-J, Im K, Shon D*, et al.* Improvement of Risk Assessment Using Numerical Analysis for an Offshore Plant Dipole Antenna[J]. Symmetry, 2018,10(12): 681.

[20] Aharonovich M, Arnon S. Performance improvement of optical wireless communication through fog with a decision feedback equalizer[J]. J Opt Soc Am A, 2005,22(8): 1646-1654.

[21] 宋鹏, 王建余, 宋晓梅*, et al.* 雾霾对紫外光通信性能的影响[J]. 光通信技术, 2016,40(10).

[22] 王惠琴, 王彦刚, 曹明华*, et al.* 沙尘天气下能见度对光脉冲时延和展宽的影响[J]. 光学学报, 2015,35(7): 9-16.

[23] 杨玉峰, 李挺, 李建勋*, et al.* 沙尘在FSO常用红外波段的散射特性研究[J]. 红外与激光工程, 2017,004(6): 82-87.

[24] Arnon S, Kopeika NS. Adaptive optical transmitter and receiver for space communication through thin clouds[J]. Appl Optics, 1997,36(9): 1987-1993.

[25] Wu B, Hajjarian Z, Kavehrad M. Free space optical communications through clouds: analysis of signal characteristics[J]. Appl Optics, 2008,47(17): 3168-3176.

[26] Sadot D, Melamed A, Dinur N*, et al.* Effects of aerosol forward scatter on long-and short-exposure atmospheric coherence diameter[J]. Waves in Random Media, 1994,4(4): 487-498.

[27] Arnon S, Kopeika NS. Effect of particulates on performance of optical communication in space and an adaptive method to minimize such effects[J]. Appl Optics, 1994,33(21): 4930-4937.

[28] Sadot D, Kopeika NS. Effects of practical aerosol forward scatter of infrared and visible light on atmospheric coherence diameter[J]. Opt Eng, 1995,34(1): 261-269.

[29] Rashed ANZ. Optical Wireless Communication Systems Operation Performance Efficiency Evaluation in the Presence of Different Fog Density Levels and Noise Impact[J]. Wireless Pers Commun, 2015,81(1): 427-444.

[30] Ma J, Fu Y, Tan L*, et al.* Channel correlation of free space optical communication systems with receiver diversity in non-Kolmogorov atmospheric turbulence[J]. J Mod Optic, 2018: 1-9.

[31] 白帅, 王建宇, 张亮*, et al.* 空间光通信发展历程及趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2015,52(7): 1-14.

[32] 姜会林, 安岩, 张雅琳*, et al.* 空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析[J]. 飞行器测控学报, 2015,34(3): 207-217.

[33] Kerr J, Titterton P, Kraemer A*, et al.* Atmospheric optical communications systems[J]. Proceedings of the IEEE, 1970,58(10): 1691-1709.

[34] Bufton JL, Iyer RS, Taylor LS. Scintillation statistics caused by atmospheric turbulence and speckle in satellite laser ranging[J]. Appl Optics, 1977,16(9): 2408-2413.

[35] Minott PO. Scintillation in an earth-to-space propagation path[J]. JOSA, 1972,62(7): 885-888.

[36] Fried DL. Scintillation of a ground-to-space laser illuminator[J]. Journal of the Optical Society of America (1917-1983), 1967,57(8): 980-983.

[37] Fried DL, Mevers GE, Keister MP. Measurements of Laser-Beam Scintillation in the Atmosphere[J]. Journal of the Optical Society of America, 1967,57(6): 787-797.

[38] Brookner E. Atmosphere propagation and communication channel model for laser wavelengths[J]. IEEE Transactions on Communication Technology, 1970,18(4): 396-416.

[39] Kerr JR, Dunphy JR. Experimental effects of finite transmitter apertures on scintillations[J]. JOSA, 1973,63(1): 1-8.

[40] RACHO, PORTILLO. Characterization and design of digital pointing subsytem for Optical Communication Demonstrator[J]. Proc SPIE, Free-Space Laser Communication Technology XI, Jan 1999, 1999,3615.

[41] Hemmati H. Overview of laser communications research at JPL[J]. Proc Spie, 2001: 190-193.

[42] Korevaar EJ, Schuster JJ, Adhikari P*, et al.* Description of STRV-2 lasercom experimental operations[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1997,2990.

[43] Korevaar EJ. Lessons learned for STRV-2 satellite-to-ground lasercom experiment[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2001,4272: 1-15.

[44] Korevaar EJ, Schuster JJ, Hakakha H*, et al.* Design of a ground terminal for the STRV-2 satellite-to-ground lasercom experiment[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1998,3266.

[45] 赵楠, 李进延, 宋婷婷*, et al.* 美国月球激光通信演示验证——实验设计和后续发展[J]. 激光与光电子学进展, 2014,51(4): 20-27.

[46] 宋婷婷, 马晶, 谭立英*, et al.* 美国月球激光通信演示验证--终端设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014,51(5): 21-27.

[47] DeVoe CE, Pillsbury AD, Khatri F*, et al.* Optical overview and qualification of the LLCD space terminal: proceedings of the International Conference on Space Optics—ICSO 2014, 2017[C]. International Society for Optics and Photonics.

[48] Boroson DM, Scozzafava JJ, Murphy DV*, et al.* The lunar laser communications demonstration (LLCD): proceedings of the Third IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology, 2009[C]. IEEE.

[49] Murphy DV, Kansky JE, Grein ME*, et al.* LLCD operations using the lunar lasercom ground terminal: proceedings of the Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVI, 2014[C]. International Society for Optics and Photonics.

[50] Biswas A, Wright M, Ortiz GG*, et al.* Airborne optical communications demonstrator design and pre-flight test results: proceedings of the Free-space Laser Communication Technologies XVII, 2005[C].

[51] Oaida BV, Abrahamson MJ, Witoff RJ*, et al.* OPALS: An optical communications technology demonstration from the International Space Station: proceedings of the Aerospace Conference, 2013[C].

[52] Wilson KE, Lesh JR, Araki K*, et al.* Overview of the ground-to-orbit lasercom demonstration (GOLD): proceedings of the Free-Space laser Communication Technologies IX, 1997[C]. International Society for Optics and Photonics.

[53] Shikatani M, Toyoda M, Takami H*, et al.* Ground system development for the ETS-VI/LCE laser communications experiment[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1993: 21-29.

[54] Wilson KE. An Overview of the GOLD Experiment Between the ETS-VI Satellite and the Table Mountain Facility[J]. Telecommunications & Data Acquisition Progress Report, 1996: 8-19.

[55] Jono T, Takayama Y, Kura N*, et al.* OICETS on-orbit laser communication experiments: proceedings of the Free-Space Laser Communication Technologies XVIII, 2006[C]. International Society for Optics and Photonics.

[56] Perlot N, Knapek M, Giggenbach D*, et al.* Results of the optical downlink experiment KIODO from OICETS satellite to optical ground station oberpfaffenhofen (OGS-OP): proceedings of the Free-Space Laser Communication Technologies XIX and Atmospheric Propagation of Electromagnetic Waves, 2007[C]. International Society for Optics and Photonics.

[57] Jono T, Takayama Y, Shiratama K*, et al.* Overview of the inter-orbit and the orbit-to-ground laser communication demonstration by OICETS: proceedings of the Free-Space Laser Communication Technologies XIX and Atmospheric Propagation of Electromagnetic Waves, 2007[C]. International Society for Optics and Photonics.

[58] Fujiwara Y, Mokuno M, Jono T*, et al.* Optical inter-orbit communications engineering test satellite (OICETS)[J]. Acta Astronaut, 2007,61(1-6): 163-175.

[59] Toyoshima M, Takizawa K, Kuri T*, et al.* Ground-to-OICETS laser communication experiments: proceedings of the Free-Space Laser Communications VI, 2006[C]. International Society for Optics and Photonics.

[60] Laurent B, Camus JP, Sein E. SILEX: The first European optical space communications system[J]. Acta Astronaut, 1989,22: 299-303.

[61] Faup M, Laurent B, Pera L. SILEX mission - First European experiment using optical frequencies between geostationary and low earth orbiting satellites: proceedings of the Montreal International Astronautical Federation Congress, 1991[C].

[62] Seel S, Kämpfner H, Heine F*, et al.* Space to ground bidirectional optical communication link at 5.6 Gbps and EDRS connectivity outlook: proceedings of the Aerospace Conference, 2011 IEEE, 2011[C]. IEEE.

[63] Heine F, Kämpfner H, Lange R*, et al.* Laser communication applied for EDRS, the European data relay system[J]. CEAS Space Journal, 2011,2(1-4): 85-90.

[64] Tröndle D, Pimentel PM, Rochow C*, et al.* Alphasat-Sentinel-1A optical inter-satellite links: run-up for the European data relay satellite system: proceedings of the Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVIII, 2016[C]. International Society for Optics and Photonics.

[65] Le Gallou N, Luetke W, Camuso A*, et al.* The EDRS-A and EDRS-C Data Relay Payloads: proceedings of the ICSSC-Ka-Band band conference, Florence Oct, 2013[C].

[66] Migliore R, Duncan J, Pulcino V*, et al.* Outlook on EDRS-C: proceedings of the International Conference on Space Optics—ICSO 2016, 2017[C]. International Society for Optics and Photonics.

[67] Perdigues J, Sodnik Z, Hauschildt H*, et al.* ESA's OGS upgrades for EDRS: Development status: proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2017[C]. IEEE.

[68] Tan L, Yu J, Ma J*, et al.* Approach to improve beam quality of inter-satellite optical communication system based on diffractive optical elements[J]. Opt Express, 2009,17(8): 6311.

[69] 马晶, 韩琦琦, 于思源*, et al.* 卫星平台振动对星间激光链路的影响和解决方案[J]. 激光技术, 2005,29(03): 5-9.

[70] 于思源, 谭立英, 马晶*, et al.* 激光星间链路中振动补偿技术研究[J]. 光电子·激光, 2004,15(4): 472-476.

[71] 常军, 翁志成, 姜会林*, et al.* 用于空间的三反射镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2003,23(02): 89-92.

[72] 姜会林. 空间激光通信技术与系统[M]. 国防工业出版社, 2010: 752-757.

[73] 姜会林, 刘志刚, 佟首峰*, et al.* 机载激光通信环境适应性及关键技术分析[J]. 红外与激光工程, 2007,36(z1): 567-570.

[74] 李晓峰, 胡渝. 空-地激光通信链路总体设计思路及重要概念研究[J]. 应用光学, 2005,26(06): 60-65.

[75] 刘宏阳, 张燕革, 艾勇*, et al.* Research of balanced detection techniques for high speed weak optical signal[J]. Laser Technology, 2015,39(2): 182-184.

[76] 曹阳, 艾勇, 黎明*, et al.* 空间光通信精跟踪系统地面模拟实验[J]. 光电子·激光, 2009,(1): 40-43.

[77] 姜茹, 艾勇, 单欣*, et al.* 空间光通信中GPS辅助快速捕获对准技术[J]. 光通信技术, 2015,39(4).

[78] 韩双利, 赵尚宏, 底翔. 新型战机综合航电系统及其高速光互连技术[J]. 激光与光电子学进展, 2008,45(3): 50-55.

[79] Jiang XF, Zhao SH, Hou R*, et al.* Influencing factors on fading characteristic of satellite-to-ground optical communication link in weak atmospheric turbulence[J]. Journal of Applied Optics, 2012.

[80] Li T, Guo H, Wang C*, et al.* Optical burst switching based satellite backbone network: proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2018[C].

[81] 孔英秀, 柯熙政, 杨媛. 激光器线宽对空间相干光通信系统性能的影响[J]. 仪器仪表学报, 2017,38(7): 1668-1674.

[82] 丁德强, 柯熙政. 可见光通信及其关键技术研究[J]. 半导体光电, 2006,27(02): 15-18.

[83] 孔英秀, 柯熙政, 杨媛. 空间相干光通信中本振光功率对信噪比的影响[J]. 红外与激光工程, 2016,45(2): 234-239.

[84] 马晶. 我国首次星地激光链路试验研究进展: proceedings of the 第十届全国光电技术学术交流会论文集, 北京, 2012[C]. 中国宇航学会.

[85] 刘百麟, 周佐新, 李健*, et al.* 地球静止轨道空间星载激光通信光学天线热控技术[J]. Performance of Multiple Input Multiple Output Free Space Optical Communication under Atmospheric Turbulence and Atmospheric Attenuation, 2017,(3): 221-229.

[86] Wang Q, Liu Y, Chen Y*, et al.* Precise locating approach of the beacon based on gray gradient segmentation interpolation in satellite optical communications[J]. Appl Optics, 2017,56(7): 1826.

[87] 李忠洋, 张王怡, 杜凡*, et al.* 空间光通信系统发射光束的准直特性研究(英文)[J]. 红外与激光工程, 2015,44(3): 1008-1014.

[88] 谭立英, 吴世臣, 韩琦琦*, et al.* 潜望镜式卫星光通信终端的CCD粗跟踪[J]. 光学精密工程, 2012,20(2): 270-276.

[89] Liao S-K, Cai W-Q, Liu W-Y*, et al.* Satellite-to-ground quantum key distribution[J]. Nature, 2017,549(7670): 43.

[90] Ren J-G, Xu P, Yong H-L*, et al.* Ground-to-satellite quantum teleportation[J]. Nature, 2017,549(7670): 70.

[91] Kolmogorov AN. The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds Numbers[J]. Proceedings: Mathematical and Physical Sciences, 1991,434(1890): 9-13.

[92] Tatarski VI, Silverman RA, Chako N. Wave Propagation in a Turbulent Medium[M]. McGraw, 1961: 46-51.

[93] Chernov LA, Silverman RA. Wave propagation in a random medium[M]. IET, 1960.

[94] Rytov S. Diffraction of light by ultrasonic waves[J]. Izv Akad Nauk SSSR Ser Fiz, 1937,2: 223-259.

[95] Obukhov A. Effect of weak inhomogeneities in the atmosphere on sound and light propagation[J]. Izv Akad Nauk Seriya Geofiz, 1953,2: 155-165.

[96] Gracheva M, Gurvich A. Strong fluctuations in the intensity of light propagated through the atmosphere close to the earth[J]. Soviet Radiophysics, 1965,8(4): 511-515.

[97] Yura HT. Physical model for strong optical-amplitude fluctuations in a turbulent medium[J]. JOSA, 1974,64(1): 59-67.

[98] Gochelashvily K, Shishov V. Saturated fluctuations in the laser radiation intensity in a turbulent medium[J]. Zh Eksp Theor Fiz, 1974,66: 1237.

[99] Fante RL. Inner-scale size effect on the scintillations of light in the turbulent atmosphere[J]. JOSA, 1983,73(3): 277-281.

[100] Frehlich R. Intensity covariance of a point source in a random medium with a Kolmogorov spectrum and an inner scale of turbulence[J]. JOSA A, 1987,4(2): 360-366.

[101] Parry G. Measurement of atmospheric turbulence induced intensity fluctuations in a laser beam[J]. Optica Acta: International Journal of Optics, 1981,28(5): 715-728.

[102] Phillips RL, Andrews LC. Measured statistics of laser-light scattering in atmospheric turbulence[J]. JOSA, 1981,71(12): 1440-1445.

[103] Clifford S, Ochs GR, Lawrence RS. Saturation of optical scintillation by strong turbulence[J]. JOSA, 1974,64(2): 148-154.

[104] Hill R, Clifford S. Theory of saturation of optical scintillation by strong turbulence for arbitrary refractive-index spectra[J]. JOSA, 1981,71(6): 675-686.

[105] Hill R. Theory of saturation of optical scintillation by strong turbulence: plane-wave variance and covariance and spherical-wave covariance[J]. JOSA, 1982,72(2): 212-222.

[106] Ishimaru A. Wave propagation and scattering in random media[M]. Academ. Press, 1978.

[107] Lutomirski R, Yura H. Propagation of a finite optical beam in an inhomogeneous medium[J]. Appl Optics, 1971,10(7): 1652-1658.

[108] Feizulin Z, Kravtsov YA. Broadening of a laser beam in a turbulent medium[J]. Radiophys Quant El+, 1967,10(1): 33-35.

[109] Andrews LC, Phillips RL, Hopen CY. Laser beam scintillation with applications[M]. SPIE press, 2001.

[110] Andrews LC, Phillips RL, Hopen CY*, et al.* Theory of optical scintillation[J]. J Opt Soc Am A, 1999,16(6): 1417-1429.

[111] Andrews LC, Al-Habash MA, Hopen CY*, et al.* Theory of optical scintillation: Gaussian-beam wave model[J]. Waves in Random Media, 2001,11(3): 271-291.

[112] Prokhorov A, Bunkin FV, Gochelashvily K*, et al.* Laser irradiance propagation in turbulent media[J]. Proceedings of the IEEE, 1975,63(5): 790-811.

[113] Kravtsov YA. Propagation of electromagnetic waves through a turbulent atmosphere[J]. Rep Prog Phys, 1992,55(1): 39.

[114] Korotkova O, Andrews LC, Phillips RL. Model for a partially coherent Gaussian beam in atmospheric turbulence with application in Lasercom[J]. Opt Eng, 2004,43(2): 330-341.

[115] Korotkova O, Andrews LC, Phillips RL. Speckle propagation through atmospheric turbulence: effects of a random phase screen at the source: proceedings of the Free-Space Laser Communication and Laser Imaging II, 2002[C]. International Society for Optics and Photonics.

[116] Gu Y, Gbur G. Scintillation of pseudo-Bessel correlated beams in atmospheric turbulence[J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2010,27(12): 2621-2629.

[117] Tunick A. Analysis of free-space laser signal intensity over a 2.33 km optical path: proceedings of the Atmospheric Optics: Models, Measurements, and Target-in-the-Loop Propagation, San Diego, 2007[C].

[118] Kaufmann JE. Performance limits of high-rate space-to-ground optical communications through the turbulent atmospheric channel: proceedings of, 1995[C].

[119] Andrews LC, Phillips RL, Crabbs R. Propagation of a Gaussian-beam wave in general anisotropic turbulence: proceedings of the Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans III, San Diego, California, United States 2014[C]. Proc. SPIE.

[120] Eyyuboğlu HT, Bayraktar M. SNR bounds of FSO links and its evaluation for selected beams[J]. J Mod Optic, 2015,62(16): 1316-1322.

[121] Nelson W, Palastro JP, Davis CC*, et al.* Propagation of Bessel and Airy beams through atmospheric turbulence[J]. J Opt Soc Am A, 2014,31(3): 603-609.

[122] Ituen I, Birch P, Chatwin C*, et al.* Propagation of Bessel beam for ground-to-space applications: proceedings of the Propagation through and Characterization of Distributed Volume Turbulence and Atmospheric Phenomena, 2015[C]. Optical Society of America.

[123] Efremidis NK, Christodoulides DN. Abruptly autofocusing waves[J]. Opt Lett, 2010,35(23): 4045-4047.

[124] Siviloglou GA, Christodoulides DN. Accelerating finite energy Airy beams[J]. Opt Lett, 2007,32(8): 979-981.

[125] Yalong G, Greg G. Scintillation of Airy beam arrays in atmospheric turbulence[J]. Opt Lett, 2010,35(20): 3456-3458.

[126] Indebetouw G. Nondiffracting optical fields: some remarks on their analysis and synthesis[J]. J Opt Soc Am A, 1989,6(1): 150-152.

[127] Chu X, Zhao S, Fang Y. Maximum nondiffracting propagation distance of aperture-truncated Airy beams[J]. Optics Communications, 2018,414: 5-9.

[128] Wang M, Yuan X, Deng P*, et al.* Application of Aperture Truncated Airy Beams in Free Space Optical Communications: proceedings of the SPACOMM 2018, The Tenth International Conference on Advances in Satellite and Space Communications, Athens, Greece, April 22, 2018, 2018[C]. IARIA.

[129] Mphuthi N, Botha R, Forbes A. Are Bessel beams resilient to aberrations and turbulence?[J]. J Opt Soc Am A, 2018,35(6): 1021-1027.

[130] Li J, Wang W, Duan M*, et al.* Influence of non-Kolmogorov atmospheric turbulence on the beam quality of vortex beams[J]. Opt Express, 2016,24(18): 20413-20423.

[131] Zhang Y, Ma D, Yuan X*, et al.* Numerical investigation of flat-topped vortex hollow beams and Bessel beams propagating in a turbulent atmosphere[J]. Appl Optics, 2016,55(32): 9211-9216.

[132] Willner AE, Huang H, Yan Y*, et al.* Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. Adv Opt Photonics, 2015,7(1): 66-106.

[133] Liu X, Shen Y, Liu L*, et al.* Experimental demonstration of vortex phase-induced reduction in scintillation of a partially coherent beam[J]. Opt Lett, 2013,38(24): 5323-5326.

[134] Liu X, Pu J. Investigation on the scintillation reduction of elliptical vortex beams propagating in atmospheric turbulence[J]. Opt Express, 2011,19(27): 26444-26450.

[135] Gbur G, Tyson RK. Vortex beam propagation through atmospheric turbulence and topological charge conservation[J]. J Opt Soc Am A, 2008,25(1): 225-230.

[136] Li S, Chen S, Gao C*, et al.* Atmospheric turbulence compensation in orbital angular momentum communications: Advances and perspectives[J]. Optics Communications, 2018,408: 68-81.

[137] Chen C, Yang H, Tong S*, et al.* Changes in orbital-angular-momentum modes of a propagated vortex Gaussian beam through weak-to-strong atmospheric turbulence[J]. Opt Express, 2016,24(7): 6959-6975.

[138] Cox MA, Rosales-Guzmán C, Lavery MPJ*, et al.* On the resilience of scalar and vector vortex modes in turbulence[J]. Opt Express, 2016,24(16): 18105-18113.

[139] Li Y. Light beams with flat-topped profiles[J]. Opt Lett, 2002,27(12): 1007-1009.

[140] Eyyuboğlu HT, Arpali Ç, Baykal Y. Flat topped beams and their characteristics in turbulent media[J]. Opt Express, 2006,14(10): 4196-4207.

[141] Baykal Y, Eyyuboğlu HT. Scintillation index of flat-topped Gaussian beams[J]. Appl Optics, 2006,45(16): 3793-3797.

[142] Gerçekcioğlu H, Baykal Y. Intensity fluctuations of flat-topped beam in non-Kolmogorov weak turbulence[J]. J Opt Soc Am A, 2012,29(2): 169-173.

[143] Tang H, Ou B, Luo B*, et al.* Average spreading of a radial Gaussian beam array in non-Kolmogorov turbulence[J]. J Opt Soc Am A, 2011,28(6): 1016-1021.

[144] Zhou P, Liu Z, Xu X*, et al.* Propagation of phase-locked partially coherent flattened beam array in turbulent atmosphere[J]. Opt Laser Eng, 2009,47(11): 1254-1258.

[145] 卢芳, 赵丹, 韩香娥. 湍流大气中随机相位光束阵列的斜程传输特性[J]. 光学学报, 2015,35(8): 30-35.

[146] Deng P, Kavehrad M, Liu Z*, et al.* Capacity of MIMO free space optical communications using multiple partially coherent beams propagation through non-Kolmogorov strong turbulence[J]. Opt Express, 2013,21(13): 15213-15229.

[147] Eyyuboğlu HT, Baykal Y, Cai Y. Scintillations of laser array beams[J]. Applied Physics B, 2008,91(2): 265-271.

[148] Cai Y, Chen Y, Eyyuboğlu HT*, et al.* Propagation of laser array beams in a turbulent atmosphere[J]. Applied Physics B, 2007,88(3): 467-475.

[149] 刘维慧, 吴健. 多束部分相干光通过强湍流对光强闪烁的影响[J]. 光电工程, 2004,31(4): 30-33.

[150] Voelz D, Xiao X. A brief review of spatially partially coherent beams for FSO communications: proceedings of the Atmospheric Propagation of Electromagnetic Waves III, San Jose, CA, January 24, 2009, 2009[C]. Proc. SPIE.

[151] Wang M, Yuan X, AlHarbi O*, et al.* Propagation of laser beams through air-sea turbulence channels: proceedings of the Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans VII, 2018[C]. International Society for Optics and Photonics.

[152] 钱仙妹, 朱文越, 饶瑞中. 部分相干光在湍流大气中传输的研究进展[J]. 大气与环境光学学报, 2008,3(2): 81-91.

[153] Goodman JW. Statistical Optics[M]. New York: Wiley, 2000.

[154] Walther A. Radiometry and coherence[J]. JOSA, 1968,58(9): 1256-1259.

[155] Jian W. Propagation of a Gaussian-Schell Beam Through Turbulent Media[J]. J Mod Optic, 1990,37(4): 671-684.

[156] Ricklin JC, Davidson FM. Atmospheric optical communication with a Gaussian Schell beam[J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2003,20(5): 856-866.

[157] Dan Y, Zhang B, Pan P. Propagation of partially coherent flat-topped beams through a turbulent atmosphere[J]. JOSA A, 2008,25(9): 2223-2231.

[158] Dan Y, Zhang B, Pan P. Propagation of partially coherent flat-topped beams through a turbulent atmosphere[J]. J Opt Soc Am A, 2008,25(9): 2223-2231.

[159] 季小玲, 张涛, 陈晓文*, et al.* 平顶光束通过湍流大气传输的光谱特性[J]. 光学学报, 2008,28(1): 12-16.

[160] Yuan Y, Cai Y, Qu J*, et al.* M 2-factor of coherent and partially coherent dark hollow beams propagating in turbulent atmosphere[J]. Opt Express, 2009,17(20): 17344-17356.

[161] Zhang Y, Ma D, Zhou Z*, et al.* Research on partially coherent flat-topped vortex hollow beam propagation in turbulent atmosphere[J]. Appl Optics, 2017,56(10): 2922-2926.

[162] Eyyuboğlu HT, Sermutlu E. Partially coherent Airy beam and its propagation in turbulent media[J]. Applied Physics B, 2013,110(4): 451-457.

[163] Wen W, Chu X. Beam wander of partially coherent Airy beams[J]. J Mod Optic, 2014,61(5): 379-384.

[164] Gori F, Santarsiero M. Devising genuine spatial correlation functions[J]. Opt Lett, 2007,32(24): 3531-3533.

[165] Tong Z, Korotkova O. Nonuniformly correlated light beams in uniformly correlated media[J]. Opt Lett, 2012,37(15): 3240-3242.

[166] Gu Y, Gbur G. Scintillation of nonuniformly correlated beams in atmospheric turbulence[J]. Opt Lett, 2013,38(9): 1395-1397.

[167] Gori F, Guattari G, Padovani C. Modal expansion for J0-correlated Schell-model sources[J]. Optics communications, 1987,64(4): 311-316.

[168] Chen Y, Wang F, Liu L*, et al.* Generation and propagation of a partially coherent vector beam with special correlation functions[J]. Physical Review A, 2014,89(1): 013801.

[169] Gu Y, Gbur G. Scintillation of pseudo-Bessel correlated beams in atmospheric turbulence[J]. JOSA A, 2010,27(12): 2621-2629.

[170] Wang M, Yuan X, Ma D. Potentials of radial partially coherent beams in free-space optical communication: a numerical investigation[J]. Appl Optics, 2017,56(10): 2851-2857.

[171] Wang M, Kane T, Yuan X*, et al.* Propagation of partially coherent beams with convex-shaped spatial coherence modulation in vertical turbulent links[J]. Opt Express, 2018,26(24): 32130-32144.

[172] Chen Y, Wang F, Zhao C*, et al.* Experimental demonstration of a Laguerre-Gaussian correlated Schell-model vortex beam[J]. Opt Express, 2014,22(5): 5826-5838.

[173] Chen Y, Liu L, Wang F*, et al.* Elliptical Laguerre-Gaussian correlated Schell-model beam[J]. Opt Express, 2014,22(11): 13975-13987.

[174] Mei Z, Korotkova O. Cosine-Gaussian Schell-model sources[J]. Opt Lett, 2013,38(14): 2578-2580.

[175] Sahin S, Korotkova O. Light sources generating far fields with tunable flat profiles[J]. Opt Lett, 2012,37(14): 2970-2972.

[176] Lajunen H, Saastamoinen T. Propagation characteristics of partially coherent beams with spatially varying correlations[J]. Opt Lett, 2011,36(20): 4104-4106.

[177] Cui S, Chen Z, Zhang L*, et al.* Experimental generation of nonuniformly correlated partially coherent light beams[J]. Opt Lett, 2013,38(22): 4821-4824.