

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2012.02.001

综 述

大气对自由空间光通信的影响机理及改善方法

李 菲, 秦来安, 吴延徽, 陆茜茜, 吴 毅

(中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 大气效应对通信链路的影响限制了自由空间光通信技术的应用, 研究其影响机理和改善方法有利于降低光通信链路的误码率, 提升通信速率及距离。总结了大气对自由空间光通信的影响机理, 指出了不同大气效应对光通信的影响形式, 其中包括光强衰减、脉冲展宽、光强起伏和闪烁、光束漂移、光束扩展、相位起伏等。综述了现有的大气影响改善方法, 主要包括大孔径接收、多波长传输、多光束传输、部分相干光传输、自适应光学等技术, 并简述了进一步开展工作的方向。

关键词: 光通信; 大气; 湍流; 激光

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2012)02-0081-08

Mechanism and Mitigation Technology of Atmospheric Effects in Free Space Optical Communication

LI Fei, QIN Lai-an, WU Yan-hui, LU Qian-qian, WU Yi

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Atmospheric effects on links limit the application of free space optical communication technology. Researches of mechanism and mitigation technologies of atmospheric effects help to decrease the bit-error-rate(BER), enhance the data rate and available distance of optical communication. The mechanism researches of atmospheric effects on free space optical communication were briefly summarized, and the various influences of atmosphere on that were described, such as intensity attenuation, optical pulse stretch, intensity scintillation, beam wander, beam spreading and phase fluctuation, etc. The existing mitigation technologies of atmospheric effects were summarized. Some technologies were described, such as large aperture receiver, multiple wavelength propagation, multiple beam propagation, partially-coherent-beam propagation, adaptive optics, etc. Lastly, future research directions were given.

Key words: optical communication; atmosphere; turbulence; laser

收稿日期: 2011-04-22; 修改日期: 2011-09-15

基金项目: 国家 863 计划项目课题 (2006AA861062) 资助

E-mail: Lifei_8149@yahoo.cn

1 引言

自由空间光通信 (free space optical communication, FSO) 技术是一种在自由空间中以光 (主要指激光) 为载体传送数据的无线宽带通信技术, 又称为“无线激光通信”(wireless optical communication)。FSO 按其使用区域划分可分为: 空间-空间、地面-空间、大气传输三种。FSO 结合了微波通信和光纤通信的优点, 具有传输容量大、建网速度快、无须授权、保密性好等特点。FSO 的这些特点使其可以应用于保密通信、城域网扩展、宽带网零公里接入、无线基站数据回传、局域网互联、应急通信等一系列领域^[1]。

FSO 具有诸多优点, 但是其广泛应用受到了很多问题的制约, 其中最主要的问题之一就是大气信道的影响。激光信号在大气信道中传输时, 主要受到大气吸收、大气散射、大气湍流等效应的影响。这些大气效应使接收光信号受到严重干扰, 通信误码率上升, 甚至出现短时间通信中断, 严重影响了 FSO 的稳定性和可靠性。所以, 如何分析和改善大气信道对 FSO 的不利影响, 已成为 FSO 研究中的一个难点和热点^[2]。

2 大气效应对自由空间光通信的影响

激光在大气信道中传输时, 将会受到大气各方面的影响, 主要包括大气吸收、大气散射、大气湍流等效应。大气吸收会造成 FSO 接收光功率降低; 大气散射不但导致接收光功率衰减, 而且还会引起激光脉冲时间展宽; 大气湍流会导致光强起伏、光束漂移、到达角起伏、焦平面光斑弥散和光束扩展。综合来说, 大气最终对 FSO 系统探测到的信号主要造成三种影响: 串扰干扰、平均信噪比降低和随机起伏^[3]。

2.1 大气衰减的影响

大气衰减效应主要是大气分子和气溶胶对光信号的吸收和散射共同造成的能量衰减。这种效应造成的主要影响是使激光在传输主轴方向上的

辐射强度受到很大衰减, 直接影响到系统的有效通信距离^[4]。

大气分子的吸收具有非常明显的波长选择性。结合光电器件生产研制情况, 目前常用的波长有 850 nm、1064 nm、1310 nm、1550 nm 波段, 而大气散射对接收信号光功率造成的衰减随工作波长的增加而减小, 所以在设计系统时应当尽可能使用波长较长的光源。

大气气溶胶对激光信号传输影响最大的是直径从 0.1 μm 到 10 μm 的微粒, 可以用瑞利 (Rayleigh) 散射和米 (Mie) 散射来近似分析大气中的粒子散射。大气散射不仅会减小传输方向上的光能量, 还会改变光斑的光强度分布, 使光斑内部有明暗之分。

2.2 大气湍流的影响

大气总是处于不停的流动, 从而形成温度、压强、密度、流速、大小等不同的气流湍流。这些湍流也总是处于不停的运动变化之中, 它们的运动相互交联、叠加, 形成了随机的大气湍流运动。

折射率是大气温度、湿度和气压等的函数, 由于大气湍流使得温、湿度和气压发生了变化进而使得空气折射率也产生变化。这种随机变化使激光的强度、相位和传播方向等参数随着湍流产生起伏, 进而使激光光束的相干性也发生退化。大气湍流对激光光束的影响程度和形式与光束直径 d 和湍流尺度 l 的相对大小相关。当 $d/l \ll 1$ 时, 湍流的主要作用是使光束随机漂移; 当 $d/l \approx 1$ 时, 湍流使光束截面产生随机偏转, 形成到达角起伏; 当 $d/l \gg 1$ 时, 光束截面内包含许多湍流, 从而引起光强闪烁、相位起伏和光束扩展等效应^[5]。对于不同工作原理和系统结构的通信机, 这些效应对性能的影响程度也各不相同。对于 IM/DD 系统, 主要关心的是闪烁效应; 而对于 BPSK 系统, 则还需要注意相位的起伏。

2.2.1 光强起伏

光强起伏通常称为闪烁, 是指通过大气信道后, 光束强度忽大忽小, 光斑忽明忽暗, 它是由于空气折射率的随机细微变化引起波前失真, 造

成接收相位的随机变化而造成的。闪烁效应是湍流效应中最基本也是最重要的一个效应, 它可引起接收机探测电流的随机涨落, 从而导致探测系统的噪声增加, 同时影响解调时的阈值判决。特别是当湍流效应较强时, 闪烁带来的噪音很可能导致通信突发性错误, 甚至使通信中断, 从而严重影响通信质量^[6-7]。

因为大气信道是随机的, 所以接收光强也是一个随机变量, 其大小可用统计平均值来描述。光强起伏强弱程度通常用对数强度起伏方差表示, 它的定义为: $\sigma_{\ln I}^2 = \langle (\ln I - \langle \ln I \rangle)^2 \rangle$, 其中 I 为瞬时光强, $\langle \rangle$ 表示系综平均。

2.2.2 相位起伏

大气湍流的随机特性不但引起激光光强闪烁, 同时也导致激光相位在时间和空间上出现起伏。相干长度 r_0 是指激光束通过随机大气信道传输时, 在其横截面上两点间相位保持相干的最长距离, 其典型的取值范围为几厘米至几十厘米。在相干长度内, 可以认为激光束的光波前是一致的。湍流越强, 则相干长度越短。

相位起伏会降低接收望远镜对通信激光的聚焦性能, 使得在接收机焦平面上的光斑面积增大。相对于衍射极限光斑, 相位起伏将使焦平面光斑面积增大 $(D/r_0)^2$ 倍, D 为接收望远镜口径。光电探测器的输出信噪比通常与数据速率和探测器面积近似地成比例。如果通过要增加探测面积来消除相位起伏的影响, 会造成通信链路的性能降低约 $(D/r_0)^2$ 倍。如果 FSO 系统在接收机焦平面处把光信号耦合到单模光纤中, 以便利用光纤通信中的现有技术, 此时相位起伏还会使空间光到光纤的耦合效率产生随机起伏, 导致附加的功率损失^[8]。

相位起伏还会导致光学接收机焦平面上的聚焦光斑产生抖动, 即聚焦光斑会脱靶或降低光纤耦合的效率。这可等效为收、发光端机视轴之间产生的随机对准误差, 会影响接收机对通信光信号的接收。

2.2.3 光束扩展与漂移

光束扩展是指接收到的光斑半径或面积的变化, 是由衍射和湍流漩涡的扩展引起的, 表现为光束在湍流大气中传播时比在真空中发散得更快, 中心轴的接收光强有一常量衰减。一般情况下湍流造成的光束扩展可以比光束自身的衍射极限大 2 到 3 个数量级, 因此, 对于相同的通信距离, 为了保证接收信噪比, 在湍流大气中所要求的激光发射功率比真空中大。

光束漂移是指激光束通过湍流大气时, 传播方向的随机起伏造成光束整体偏离预期位置, 表现为在接收平面上, 光束中心 (光斑) 以某个统计平均位置为中心, 发生快速随机性跳动, 使得通信端机的对准、接收成为困难。所以光束漂移是影响大气光通信性能的一个重要因素^[9]。在一定条件下漂移将会出现饱和趋势, 增长率减慢或趋向于一定的常数。

2.3 大气导致的光脉冲展宽

在通信系统中脉冲信号的展宽会引起信噪比下降, 误码率升高, 甚至导致信号不能够分辨, 并由此对通信速率和通信距离形成限制。通信速率越大, 脉冲展宽对系统误码率的影响越严重。为了保证通信质量, 数据传输速率不能够超过某一最大值, 否则码间干扰 (ISI) 会使误码率急剧增加^[10-12]。

2.3.1 大气色散

大气色散是造成光脉冲展宽的原因之一。包含多个波长分量的光脉冲在大气中传播时, 各个波长分量由于相速度的不同而产生了相位差, 最终导致了光脉冲的展宽, 展宽的程度则取决于传输距离与波长。

对于单纵模激光器, 色散主要来源于激光器的线宽。假设激光器线宽为 0.15 nm, 中心波长为 1320 nm, 传输距离为 100 km, 仿真结果显示色散引入的脉冲展宽为 0.259 ps, 其影响可以忽略。而对于多纵模激光器, 此时的色散来源于不同纵模之间的时延差。假设激光器有 6 个纵模, 脉冲宽度 10 ps, 传输距离 100 km, 仿真结果显示脉冲展宽了 2.3 ps, 已接近系统允许的展宽极限。

2.3.2 多径效应

大气对激光传输的散射造成某些光子的传播方向发生改变,又由于存在多次散射效应,使得部分光子到达接收端所经过的路径发生变化(即光程发生变化),这就是激光传输的多径效应。当存在多径效应时,多径散射信号与直达信号到达接收机的时间存在延迟,导致接收机收到比发射光脉冲更宽的光脉冲信号。介质对激光传输的散射越严重,多径延时越大,对应的光脉冲时间展宽也越大。

在雾中和云中典型脉冲响应的形状可以用双 GAMMA 函数来描述,它们的时间扩展可以从几微秒到几百微秒。仿真结果显示,云层光学厚度越大,最大数据传输速率越小。当光学厚度为 10 时,最大码元传输速率约为 1 Gbps。

3 大气效应影响的改善方法

大气效应对 FSO 系统的影响,可以通过加大激光发射功率、增大接收天线面积、减少光学系统损耗、提高接收灵敏度、采用更好的数据调制等方法来改善,但是这些方法都具有很大的局限性。

当前,被国内外研究者所重视的大气湍流改善抑制技术包括:大孔径接收、分集、部分相干光传输、时域处理与阈值优化、ATP 技术、自适应光学、信道编码(RS 编码、LDPC 编码等)、传输层自动请求重传(ARQ)与前向纠错(FEC)等技术^[13-16]。这里仅就在物理层上实现的各种大气影响改善技术进行介绍。

3.1 大孔径接收技术

随着接收孔径的增大,光强起伏方差逐渐减小,这种现象被称为孔径平滑效应。采用大孔径接收器不但可以降低光强起伏方差,而且可以减小光强起伏的频率,从而同时减小接收光信号衰落的可能性和频率。一般认为,接收孔径为闪烁相干半径的 2~3 倍较为合适。

大孔径接收可以有效地抑制光强起伏的影响,但同时会增加接收端机的尺寸和重量,在设计

和装配时难度较大,因此其应用受到一定限制。

阵列接收是一种空间接收分集技术,原理是使用多个独立的小孔径接收器来接收光信号,所有小孔径接收器输出信号之和表现出与单个大孔径接收器类似的闪烁平滑效果^[17-21]。在接收面积相同的情况下,阵列接收的效果优于单一大口径接收。子孔径数越大,孔径平滑的效果越明显。

3.2 多光束传输技术

多光束传输技术,是一种空间发射分集技术。通过将重叠在接收孔径处的由多个发射源发出的非相干光束进行平均,达到使光强起伏降低的效果,从而有效减小光强闪烁。由于增加发射镜数会使光学系统更加复杂,伺服控制和共轴更加困难,所以在实际应用中通常使用 2~4 个发射镜。

需要注意的是,应当尽量减小各激光发射器输出激光的相干性,使各发射光束之间距离大于第一菲涅耳半径,否则接收面上会出现亮暗条纹,导致接收光强起伏增大^[22-23]。在实际工程应用中,激光的相干性也不是越差越好,相干性变差后传输距离会受到限制,应根据实际情况选择适当的相干参数值。

3.3 多波长传输技术

地球大气折射率具有随大气层海拔高度增加而变化的特点,且大气的折射率与光的波长有关,因而来自同一目标的不同波长的光线穿过大气层时,其偏折程度也会略有不同。如果同时使用多路不同波长的激光传递信号,由于不同波长的光束传输时所经过的大气路径略有不同,即所经过的湍流涡旋不同,那么也就降低了不同光束之间的相关性。仿真计算的结果显示波长间隔越大,光强起伏方差减小越明显^[24]。但是,宽波长间隔会给光学系统、光电探测器的设计带来困难,所以在实际使用多波长传输技术时,需要进行带约束的波长间隔优化选取。

3.4 部分相干光传输技术

与完全相干光相比,部分相干光在大气中传输时受湍流影响较小,利用这一特性可使用部分相干光传输来抑制接收光强起伏。

光束的初始相干长度 r_c 对部分相干光传输的光强闪烁有重要影响。 r_c 越小, 光束相干性越差, 对光强闪烁的抑制能力也就越强。随着 r_c 的减小, 光束扩展受到大气湍流的影响会减小, 然而同时自由空间衍射引起的光束扩展将会加剧。因此, 在实际应用中, 应权衡两者的利弊根据实际需要寻求最优的光束相干长度^[25-26]。

3.5 ATP 技术

对于光束漂移, 最简单的解决方法是增大激光发散角, 直至光束的偏离在控制范围之内。但是发散角的平方与激光能量的损失成正比。发散角增加一倍, 就意味着激光能量将损失为原来的四分之一, 通信的冗余度将减小 6 dB。如果要保证系统的正常运行, 只有增加发射功率或缩短通信距离了。

另一种更为可行的办法是采用捕获、跟踪、瞄准技术, 即 ATP(acquisition、tracking and pointing) 技术, 采用自动跟踪调整发射装置, 以保证系统的收发天线之间始终保持最佳准直状态^[27]。采用 ATP 技术的 FSO 系统可有效解决因漂移、摇摆、振动等带来的影响, 虽然 ATP 技术的采用增加了系统的复杂度和成本, 但对于一个可靠的 FSO 系统而言, 其价值是明显, 也是必要的。

3.6 自适应光学技术

自适应光学(AO)技术是从根本上消除大气湍流影响的一条技术途径, 其基本原理是通过波前探测和重构引入一个“反波前畸变”来抵消大气湍流导致的波前畸变。传统的自适应光学技术基于波前的探测与重构^[28]。如果光束被直接聚焦到光电探测器表面上, 则只需补偿低阶波前畸变(例如波前倾斜), 实现光斑的质心稳定即可。如果需要把信号光聚焦耦合到光纤中, 此时光纤耦合效率将受到波前畸变的影响, 所以必须使用更高精度的波前补偿技术。

当前, AO 技术多数应用在天文观测领域。在这些应用中, 湍流导致的波前畸变发生在接收望远镜的近场区域, 光强起伏比较弱。但是对于自由空间光通信来说, 湍流分布于整个传输路径

上, 连续分布的折射率起伏导致光波相位和光强同时出现衰落。在强闪烁情况下, 光束波前出现不连续点, 这给波前探测和重构带来了困难。另外, 传统自适应光学所使用的相位共轭技术的计算量非常大, 严重影响了相位补偿的实时性。

强闪烁现象的存在使得常规自适应光学技术的应用受限, 不使用波前传感器的自适应光学技术则为这一问题的解决提供了可能方案^[29-30]。不使用波前传感器的自适应光学系统把波前校正所需的控制信号作为优化参量, 以接收光能量等系统性能指标作为优化算法的目标函数, 优化得到理想的校正效果。此外, 基于光纤光学, 无需哈特曼传感器和变形反射镜的自适应调相阵列技术也是一种可以考虑使用的方案。

4 讨 论

时至今日, 自由空间光通信中的大气影响机理与改善方法的问题仍然没有被完全地解决, 有待进一步的研究。上述各种技术都是从激光大气传输的某一机理出发, 通过某种手段来减弱大气影响的程度。这些技术各有优缺点, 受工程条件的制约, 单独使用某种技术不可能完全地消除大气影响。未来的工作可以从以下几个方面入手。

1) 研究光信号在中等强度湍流和强湍流信道传输的衰落模型。

弱湍流中激光大气传输理论的研究已经比较成熟, 而中等强度湍流和强湍流区还没有一个被广泛接收的模型。分析大气湍流信道时往往需要知道光信号衰落的方差、概率分布和时间频谱等数据, 所以光信号大气湍流传输衰落模型的准确程度直接影响人们对大气湍流信道的分析以及改善大气湍流影响技术的设计。

2) 进一步深入对大气对通信影响的机理。

目前关于大气对通信系统影响机理的研究大多集中在最常用的强度调制 / 直接探测通信系统方面, 即关注大气对光信号强度的影响; 但是对于新兴的相干光通信系统, 更需要关注的是大气对光信号频率、相位和偏振态的影响, 而这方面

的研究相对比较薄弱。

3) 深入研究适用于光通信的 AO 系统。

AO 技术能够有效地抑制光束漂移、扩展、到达角起伏、相位起伏、光强闪烁等激光大气湍流对光通信链路的影响, 现有的 AO 技术存在波前探测与重构困难、控制带宽受限等问题, 因此如何设计适合于光通信的高精度、高带宽发射机 AO 系统是非常值得研究的问题。

4) 开展原理样机及实验研究。

目前对于大气影响机理和改善方法的研究, 大多还局限在仿真计算和实验室研究阶段。针对不同的通信体制, 开发设计原理样机并进行外场实验研究, 不仅可以验证之前研究成果的有效性和实用性, 也可以为各种大气影响改善方法的工程化提供经验。因此技术的具体工程化也是一个重要研究方向。

5 结 论

本文系统总结了大气对自由空间光通信的影响机理, 指出了不同大气效应对光通信的影响形式, 其中包括光强衰减、脉冲展宽、光强起伏和闪烁、光束漂移、光束扩展、相位起伏等。文中还论述了现有大气影响的改善方法, 主要包括大孔径接收、多波长传输、多光束传输、部分相干光传输、自适应光学等技术, 最后还简述了进一步开展工作的方向。

参考文献:

- [1] Zhang Yi, Ren Hailan, Wang Zhujuan, et al. Key technologies and application of free space optical communication [J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2007, (6): 24-28(in Chinese).
张 轶, 任海兰, 王助娟, 等. 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.
- [2] Li Xiaofeng, Zhang Yongjian, Chen Yan, et al. Analysis of effects of atmospheric channel [J]. *Journal of Applied Optics*, 2003, 24(6): 14-17(in Chinese).
- [3] Yu Xiangdong, Sheng Changyu, Wang Yuhong. Some factors affecting free space optical communications and solutions [J]. *Optical Communication Technology*, 2006, 30(2): 61-63(in Chinese).
余向东, 沈常宇, 王育红. 影响自由空间光通信的几个重要因素及解决方法 [J]. *光通信技术*, 2006, 30(2): 61-63.
- [4] Xu Xiaojing, Yuan Xiuhua, Huang Dexiu. Analysis of the parameters influencing the distance of free space laser communication [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(5): 493-496(in Chinese).
徐晓静, 元秀华, 黄德修. 影响激光大气通信距离的诸因素分析 [J]. *光学精密工程*, 2002, 10(5): 493-496.
- [5] Song Zhengfang. *Applied Atmospheric Optics* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990(in Chinese).
宋正方. *应用大气光学基础* [M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- [6] Ricklin J C, Hammel S M, Eataon F D, et al. Atmospheric channel effects on free-space laser communication [J]. *J. Opt. Fiber. Commun. Rep.*, 2006, 3(2): 111-158.
- [7] Chen Dong, Li Honggang, Ni Zhibo, et al. Research on the influence of marine atmospheric turbulence to the performance of laser communication system[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2009, 4(3): 178-182(in Chinese).
陈 栋, 李红刚, 倪志波, 等. 海洋大气湍流对激光通信系统性能的影响分析 [J]. *大气与环境光学学报*, 2009, 4(3): 178-182.
- [8] Xiang Jingsong, Hu Yu. Turbulence-induced fades on coupling space light into single mode fiber [J]. *Laser Journal*, 2006, 27(4): 12-13(in Chinese).
向劲松, 胡 渝. 湍流引起的空间光到单模光纤耦合功率的衰落 [J]. *激光杂志*, 2006, 27(4): 12-13.

- [9] Zhang Wentao, Zhu Baohua. Research on the laser beam through turbulence atmosphere channel [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2007, **36**(4): 784-787(in Chinese).
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.
- [10] Wang Jia, Yu Xin. The research of pulse stretch in free-space optical communication [J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(1): 80-83(in Chinese).
王 瑾, 俞 信. 自由空间光通信系统中光脉冲展宽问题的研究 [J]. 光学技术, 2009, **5**(1): 80-83.
- [11] Chen Chunyi, Yang Huamin, Jiang Huilin, et al. Temporal dispersion of laser pulse through clouds and channel equalization [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, **29**(11): 1325-1329(in Chinese).
陈纯毅, 杨华民, 姜会林, 等. 激光脉冲云层传输时间扩展与信道均衡 [J]. 兵工学报, 2008, **29**(11): 1325-1329.
- [12] Jiang Huilin, Liu Zhigang, Tong Shoufeng, et al. Analysis for the environmental adaptation and key technologies of airborne laser communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(S): 299-302(in Chinese).
姜会林, 刘志刚, 佟首峰, 等. 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**(S): 299-302.
- [13] Chen Chunyi, Yang Huamin, Jiang Huilin, et al. Research progress of mitigation technologies of turbulence effects in atmospheric optical communication [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, **30**(6): 779-791(in Chinese).
陈纯毅, 杨华民, 姜会林, 等. 大气光通信中大气湍流影响抑制技术研究进展 [J]. 兵工学报, 2009, **30**(6): 779-791.
- [14] Liang Bo, Zhu Hai, Chen Weibiao. Equalization and de-noise techniques for optical communication in time-varied band-limited channel [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1195-1199(in Chinese).
梁 波, 朱 海, 陈卫标. 时变带限信道中光通信的均衡与去噪技术 [J]. 光子学报, 2008, **37**(6): 1195-1199.
- [15] Wang Jin, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua, et al. Suppression of turbulence noise based on adaptive filter [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(5): 750-753(in Chinese).
王 瑾, 黄德修, 元秀华, 等. 基于自适应滤波器的大气湍流噪声抑制 [J]. 光学技术, 2006, **32**(5): 750-753.
- [16] Puryear A L, Chan V W S. Optical communication through the turbulent atmosphere with transmitter and receiver diversity, wavefront control, and coherent detection [C]. *Proc. SPIE*, 2009, **7464**: 74640J.
- [17] Yang Changqi, Jiang Wenhan, Rao Changhui. Impact of aperture averaging on bit-error rate for free-space optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 212-218(in Chinese).
杨昌旗, 姜文汉, 饶长辉. 孔径平均对自由空间光通信误码率的影响 [J]. 光学学报, 2007, **27**(2): 212-218.
- [18] Rao Ruizhong, Gong Zhiben, Wang Shipeng, et al. Aperture averaging of saturated scintillation of laser propagation in the atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 36-40(in Chinese).
饶瑞中, 龚知本, 王世鹏, 等. 激光大气闪烁饱和的孔径平均效应 [J]. 光学学报, 2002, **22**(1): 36-40.
- [19] Andrew L C. Aperture-averaging factor of optical scintillations of plane and spherical waves in the atmosphere [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1992, **A9**(4): 597-600.
- [20] Rao Ruizhong. *Light Propagation in the Turbulent Atmosphere* [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2005(in Chinese).
饶瑞中. 光在湍流大气中的传播 [M]. 合肥: 安徽科技出版社, 2005.
- [21] Zhang Yixin, Zhu Tuo, Tao Chunkan. Aperture-averaging effects for weak to strong scintillations in turbulent atmosphere [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(7): 373-375

- [22] Muarosehat A. Reliability analysis of a multiple-laser-diode beacon for inter-satellite links [C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1417**: 513-524.
- [23] Kim I I, Hakakha H, Adhikari P. Scintillation reduction using multiple transmitters [C]. *Proc. SPIE*, 1997, **2990**: 102-113.
- [24] Li Kun, Ai Yong. Multiple wavelength free space optical communications on high altitude platforms [J]. *Applied Laser*, 2005, **25**(3): 171-175(in Chinese).
李坤, 艾勇. 平流层多波长自由空间光通信系统 [J]. *应用激光*, 2005, **25**(3): 171-175.
- [25] Qian Xianmei, Zhu wenyue, Rao Ruizhong. Research progress on partially coherent beam propagation in turbulent atmosphere [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, **3**(2): 82-91(in Chinese).
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): 82-91.
- [26] Wang Jiang'an, Zhao Yingjun, Wu Ronghua, et al. Influence of partially coherent beam passing through strong turbulence on bit error rate of laser communication systems [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, **30**(5): 859-863(in Chinese).
王江安, 赵英俊, 吴荣华, 等. 部分相干光通过强湍流对通信系统误码率的影响 [J]. *应用光学*, 2009, **30**(5): 859-863.
- [27] Liu Ximin, Liu Liren, Lang Haitao, et al. Study on APT technology and its control system of space laser Communication [J]. *Laser & Optronics Progress*, 2005, **42**(3): 2-6(in Chinese).
刘锡民, 刘立人, 郎海涛, 等. 星间光通信中的 APT 技术及其控制系统 [J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(3): 2-6.
- [28] Zhou Renzhong. *Adaptive Optics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996(in Chinese).
周仁忠. *自适应光学* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [29] Yang Huizhen, Cai Dongmei, Chen Bo, et al. Analysis of adaptive optics techniques without a wave-front sensor and its application in atmospheric laser communications [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(5): 680-684(in Chinese).
杨慧珍, 蔡冬梅, 陈波, 等. 无波前传感自适应光学技术及其在大气光通信中的应用 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 680-684.
- [30] Fan Ling, Qiao Chunhong, Feng Xiaoxing, et al. Elementary study on turbulence effects resulted from laser propagation in the atmosphere based on the stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2009, **4**(3): 183-189(in Chinese).
范玲, 乔春红, 冯晓星, 等. 基于 SPGD 算法的激光大气传输湍流效应校正的初步研究 [J]. *大气与环境光学学报*, 2009, **4**(3): 183-189.

作者简介: 李菲 (1981-), 男, 安徽怀远人, 博士研究生. 研究领域为激光大气传输、自由空间光通信.