

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0277-04

# 空间激光通信中的大气闪烁问题研究

马东堂 庄钊文 魏急波 熊 辉

(国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073)

**摘要** 介绍了空间激光通信中大气闪烁问题的研究进展;分析了激光大气闪烁效应对空间激光通信的影响;阐述了不同发射镜数目、各发射镜之间的距离和接收天线孔径对大气闪烁效应的影响,给出了利用自适应光学系统减弱大气闪烁效应的原理;提出了解决空间激光通信中大气闪烁问题的思路。

**关键词** 大气闪烁, 空间激光通信, 多发射镜天线, 自适应光学

**中图分类号** TN911 **文献标识码** A

## Studies of Laser Atmospheric Scintillation Problem in Space Laser Communication

MA Dong-tang ZHUANG Zhao-wen WEI Ji-bo XIONG Hui

(College of Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract** Results are described of recent contributions to the problem of laser atmospheric scintillation in space laser communication in this paper. The effects of laser atmospheric scintillation on the space laser communication are presented. The reduction in scintillation with different number of transmit apertures, different distance between two transmit apertures and different size of receive aperture is introduced. The method of using adaptive optics to reduce intensity scintillation is also given. A way to solve the problem of laser atmospheric scintillation in space laser communication is introduced at last.

**Key words** atmospheric scintillation, space laser communication, multiple-aperture antenna, adaptive optics

## 1 引 言

空间激光通信中,影响激光传输质量的主要因素有三个:分子吸收、大气粒子散射和大气湍流。大气湍流会导致光束漂移和展宽、光强起伏。这种光强起伏即大气闪烁。该现象将导致通信突发性错误,甚至是几毫秒的通信中断。无论在星地间激光通信、中低轨道星际激光通信,还是地面站间激光通信中,大气闪烁都是至关重要的问题。该问题的研究已成为空间激光通信研究的重要课题之一。

近十几年来,人们进行了大量的激光大气闪烁问题的实验和数值模拟研究。如 Kim, Isaac I. 等做的 TerraLink™8-155 大气闪烁测量实验<sup>[1]</sup>, Toyada, Masahiro 等进行的 ETS-VI 与地面站间的激光链路闪烁效应实验<sup>[2]</sup>, Flatté 和 Martin 等做的数值模拟研究<sup>[7,8]</sup>。所有这些实验和数值模拟旨在探讨大气闪烁的特性、分布规律和减弱大气闪烁效应的方法。

本文重点介绍近期大气闪烁问题研究的进展,

分析大气闪烁的原理和对空间激光通信的影响。最后给出一些研究思路。

## 2 理论分析

激光的大气闪烁效应是指接收端探测器表面的光强在时间和空间上的随机变化。大气闪烁频率大多在 1000 Hz 以下,峰值频率约为几十至 100 Hz 之间。当光束直径比湍流尺寸大时,光束界面内包含多个湍流漩涡<sup>[1]</sup>,每个漩涡对各自入射光束独立散射和衍射,导致接收端的光强忽大忽小,如图 1 所示。图中大小不同的不规则小球表示湍流漩涡。

精确描述大气闪烁的理论公式非常复杂。相关

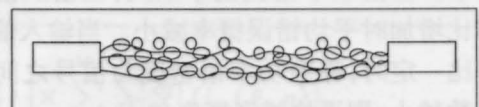


图 1 激光在大气湍流中的传输

Fig. 1 Laser propagation through atmospheric turbulence

科技文献<sup>[5,10]</sup>中多采用对数-正态分布<sup>[10]</sup>来描述光强分布的规律,分布公式为

$$p(I, \sigma_x^2) = \frac{1}{2I\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left\{-\frac{[\ln(I) + 2\sigma_x^2]}{8\sigma_x^2}\right\} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_x^2$  为对数强度起伏方差, 表示激光束的强度起伏。在满足柯尔莫哥洛夫谱条件下,  $\sigma_x^2$  为

$$\sigma_x^2 = AC_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2)$$

式中为  $L$  传输距离,  $C_n^2$  是折射率结构常数,  $A$  为常数, 对球面波和平面波, 分别为 0.496 和 1.23。在弱湍流区 ( $\sigma_x^2 < 0.35$ ), 实验结果<sup>[3,10]</sup> 已证实了对数-正态分布的合理性, 尤其当  $\sigma_x^2 < 0.1$  时, 实验结果与理论公式吻合得非常好<sup>[10]</sup>。

在强湍流区,  $\sigma_x^2$  的变化要复杂得多, (2) 式无法与实验测量结果相吻合<sup>[10]</sup>。激光束在近地面水平传输时, 经不太远距离  $\sigma_x^2$  即可达到 1 以上。而  $\sigma_x^2$  在达到 1 ~ 2 后将不再随湍流强度增大和传输距离加长而增大, 反而有可能减小, 这种现象称为闪烁饱和效应。

强湍流时的光强概率分布更接近指数衰减分布<sup>[10]</sup>:  $\exp(-I)$ 。多发射镜天线时, 光强概率分布可表示为:

$$p(I, n) = \frac{I^{n-1} e^{-nI} n^n}{\Gamma(n)} \quad (3)$$

式中函数  $\Gamma(n) = (n-1)!$ 。当  $n \rightarrow \infty$ ,  $I = 1$  时, 式(3)近似为对数-正态分布。当  $n = 1$  时, 式(3)服从指数衰减分布。

### 3 大气闪烁对空间激光通信的影响

大气闪烁对空间激光通信的影响主要表现在系统检测概率下降, 出现通信数据传输突发性错误, 甚至通信中断; 影响系统跟踪、瞄准的有效性。

#### 3.1 大气闪烁对信号检测、接收性能的影响

系统的检测性能是指在假定信号与噪声的条件下, 通信系统的平均风险或某种判决概率与输入信号噪声功率比之间的关系。在二元通信系统中, 通常指系统的平均错误概率与输入信号噪声功率比之间的关系。根据最小错误概率准则, 当输入信号噪声功率比增加时平均错误概率减小。当输入信号噪声功率比一定时, 噪声功率谱密度与信号之间时间相关系数越小, 则平均错误概率越小。

出现大气闪烁时, 接收端出现信号强度起伏, 相当于增加了一个大的噪声源, 增加了噪声与取样信

号之间的相关性, 通信系统的平均错误概率增加, 信号检测概率下降。

考虑弱湍流的情况, 根据式(1), 取  $\sigma_x^2 = 0.3$  进行计算, 结果表明: 当判决门限设置在平均值点时探测概率仅为 29%, 而要得到 95% 的探测概率, 需要将判决门限降低 10 dB。无闪烁时, 判决门限设置在平均值点时探测概率为 99%。由此说明由于大气闪烁的影响, 系统衰减裕量要增加 10 dB ~ 20 dB。

#### 3.2 大气闪烁对跟踪、瞄准系统性能的影响

捕获、瞄准和跟踪 (APT-Acquisition, Pointing, Tracking) 技术是空间激光通信的核心技术之一。实验<sup>[2]</sup>表明, 星地间的激光通信中, 湍流引起了上行链路卫星上的信号接收端光强起伏。这种现象导致接收功率超过探测器灵敏度的最长时间是 50 ms。而对于下行链路该时间是 0.3 s。经分析, 出现该现象的原因是: 上行链路的大气闪烁造成卫星上的接收功率衰减, 导致卫星上的精跟踪镜角度不停变化, 从而增加了下行链路地面接收探测器探测失效时间。大气闪烁的随机性 (每天的情况都不同, 而不是季节性的), 使得精确跟踪不具有可预测性, 从而增加了跟踪的难度。

### 4 减弱大气闪烁效应的方法

#### 4.1 多发射镜天线减弱大气闪烁

文献[1~3, 5, 10]的实验结果表明, 多发射镜天线的使用可有效地减弱大气闪烁效应。文献[10]的实验中, 激光束传输距离分别取为: 1.2 km, 10.4 km。信道条件为: 近地水平大气链路。

该实验的结果表明, 当发射镜数目 (激光器数目) 分别为 1, 2, 4, 8, 16, 接收天线口径为 5.1 cm 时, 大气闪烁引起的接收光强起伏依次减小。如图 2(a), (b) 所示<sup>[10]</sup>。比较图 2(b) 和图 2(a), 显然传输 10.4 km 时的光强分布远比传输 1.2 km 时的情况差, 前者的光强起伏远大于后者。图 2(a) 中的曲线与公式(1)吻合较好。

分析图 2(b) 可知, 采用单个发射镜时强度起伏很大, 曲线更接近于指数衰减分布。随着发射镜的数目增加, 曲线更接近于对数-正态分布。多个发射镜对于大气闪烁效应的减弱是相当明显的。考虑到设备复杂度, 发射镜越多光学系统越复杂, 伺服控制和共轴越困难。实际应用中折衷考虑, 发射天线数目选择 2~4 个比较适宜。

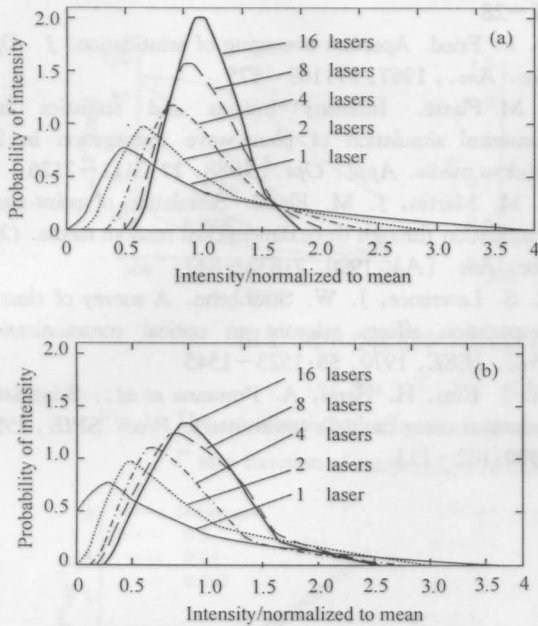


图2 传输距离为 1.2 km (a)和 10.4 km(b)时接收端的光强概率分布

Fig.2 Probability vs. intensity for the range 1.2 km (a) and 10.4 km (b) (18" spacing)

#### 4.2 利用自适应光学系统减弱大气闪烁

初期的自适应光学的发展主要应用于天文学和强激光武器领域,设备庞大、价格昂贵、技术复杂。现在已逐渐走向实用化、小型化。应用自适应光学减弱大气闪烁效应非常有效。用哈特曼-夏克波前传感器探测信号接收端发射的信标光的波前,用变形镜调整要发射的信号激光的波前使其与信标光的波前共轭。这样只要自适应光学系统足够好,即可在接收端得到与该处信标光同等质量的信号光。

文献[4]中采用蒙特卡罗法对该思路进行了计算机模拟,发现自适应光学系统孔径的大小和波前传感器的动态范围是影响结果的主要因素。

#### 4.3 适当的波长、接收天线口径和发射天线间距

根据对式(2)的分析可知,  $\sigma_x^2$  与波数  $k$  的7/6次方成正比。而波数  $k = 2\pi/\lambda$ , 因而  $\sigma_x^2$  与波长  $\lambda$  的-7/6次方成正比。波长越大,  $\sigma_x^2$  应当越小, 大气闪烁越弱。而实际上并非如此, 由于存在闪烁饱和效应, 弱湍流时上述结论成立, 而强湍流时情况正好相反。实验测量<sup>[3]</sup>的结果证实了此结论。此时,  $\sigma_I^2 = 1 + A'(\sigma_x^2)^{-2/3}$ 。波长越长, 大气闪烁越强。

利用多发射镜天线发送多个独立激光束时, 发射天线间的距离和接收天线孔径的设计必须考虑相关长度(闪烁相干半径):  $r_0 = \sqrt{\lambda L}$ 。式中,  $\lambda$  是激光波长,  $L$  是传输距离。对于 785 nm 的激光进行

1.2 km 距离的传输时, 发射天线间距应大于 3 cm。10.4 km 距离的传输时, 发射天线间距应大于 9 cm, 对于 1550 nm 的激光传输 10.4 km 距离时, 发射天线间距应大于 12.7 cm。

接收天线的孔径对闪烁有孔径平滑效应<sup>[6]</sup>。当接收孔径远小于闪烁相干半径时, 接收孔径上的各点光强相干性强, 出现较大闪烁效应; 当接收孔径远大于闪烁相干半径时, 由于孔径内大于闪烁相干半径的两点间的闪烁不相关, 闪烁减少。经仿真计算, 取接收孔径为闪烁相干长度的 2~3 倍较合适。接收天线的孔径对于强湍流和远距离的激光传输影响较大。实验结果<sup>[10]</sup>较好地说明了接收天线孔径对大气闪烁的影响, 如图 3 所示。

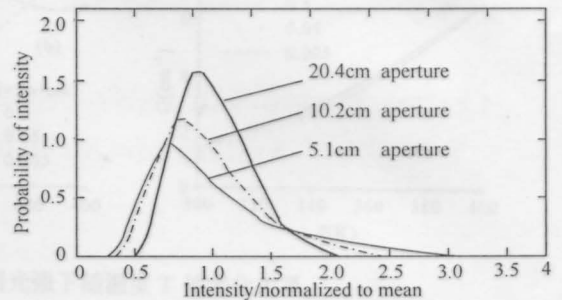


图3 不同接收孔径对应的光强分布

Fig.3 Effect of aperture size on signal fluctuations (10.4 km)

根据文献[10]介绍的测量结果, 发射天线间距对于传输距离为 10.4 km 时的作用明显, 间距小于 9 cm 时的大气闪烁效应远比间距大于 9 cm 时的情况严重得多。

## 5 结论和进一步的研究

综上所述, 通过多发射镜天线(多个独立光源), 合适的激光波长(需综合考虑), 合适的接收天线口径, 适当的发射天线间距, 自适应光学应用和尽可能高的激光发射功率(受限于激光器功率和眼睛安全限制), 可以有效地减弱大气闪烁效应。此外, 还可利用前向纠错编码方法消除大气闪烁的影响, 保证空间激光通信的可靠性。我们正在寻求更准确描述大气闪烁的分布公式, 进行更准确的大气闪烁测量实验。

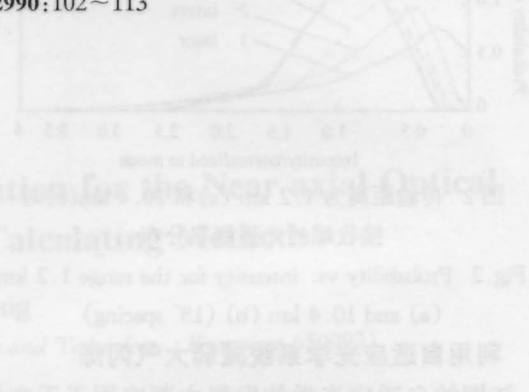
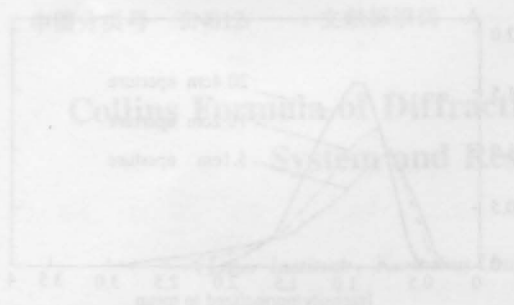
### 参 考 文 献

- 1 I. I Kim, J. Koontz, H. H. Adhikari *et al.*. Measurement of scintillation and link margin for the Terralink laser communication system. *Proc. SPIE*, 1999,

3232:100~118

- 2 M. Toyoda, M. Toyoshima, T. Fukazawa *et al.*. Measurement of laser-link-scintillation between ETS-VI and a ground optical station. *Proc. SPIE*, 1997, **2990**:287~295
- 3 I. I. Kim, M. Mitchell, E. J. Korevaar *et al.*. Measurement of scintillation for free-space laser communication at 785 nm and 1550 nm. *Proc. SPIE*, 1999, **3850**:49~62
- 4 P. R. Barbier, D. W. Rush, M. L. Plett *et al.*. Performance improvement of a laser communication link incorporating adaptive optics. *Proc. SPIE*, 1998, **3432**:93~102
- 5 A. Consortini. Scintillation and other turbulence effects in laser atmospheric propagation. *Proc. SPIE*, 1996, **2730**:

- 21~28
- 6 D. L. Fried. Aperture averaging of scintillation. *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, **57**:169~175
- 7 J. M. Flatté. Intensity images and statistics from numerical simulation of plane-wave propagation in 3-D random media. *Appl. Opt.*, 1988, **27**:2111~2126
- 8 J. M. Martin, J. M. Flatté. Simulation of point-source scintillation through three dimensional random media. *Opt. Soc. Am. (A)*, 1990, **7**:838~847
- 9 R. S. Lawrence, J. W. Strohbehn. A survey of clear-air propagation effects relevant to optical communication. *Proc. IEEE*, 1970, **58**:1523~1545
- 10 I. I. Kim, H. Harel, A. Prasanna *et al.*. Scintillation reduction using multiple transmitters. *Proc. SPIE*, 1997, **2990**:102~113



Abstract: This paper presents a new method for calculating the diffraction coefficients of a near-field optical system. The method is based on the colling equations of diffraction calculations for the near-field optical system and research on calculating. The results show that the method is simple and efficient, and it can be used to calculate the diffraction coefficients of a near-field optical system with high accuracy.

关键词: 近场光学系统; 衍射系数; 计算; 精度

1-柯林斯公式

Abstract: This paper presents a new method for calculating the diffraction coefficients of a near-field optical system. The method is based on the colling equations of diffraction calculations for the near-field optical system and research on calculating. The results show that the method is simple and efficient, and it can be used to calculate the diffraction coefficients of a near-field optical system with high accuracy.

关键词: 近场光学系统; 衍射系数; 计算; 精度

1-柯林斯公式

通过光学系统时,其衍射效应可以视为来自系统出射光线的衍射。文中研究了柯林斯公式在计算近场光学系统衍射系数时的应用,并给出了具体的计算方法。结果表明,该方法具有较高的精度,且计算量较小,适用于近场光学系统的衍射系数计算。

关键词: 近场光学系统; 衍射系数; 柯林斯公式; 计算; 精度

通过光学系统时,其衍射效应可以视为来自系统出射光线的衍射。文中研究了柯林斯公式在计算近场光学系统衍射系数时的应用,并给出了具体的计算方法。结果表明,该方法具有较高的精度,且计算量较小,适用于近场光学系统的衍射系数计算。

关键词: 近场光学系统; 衍射系数; 柯林斯公式; 计算; 精度