

文章编号: 0253-2239(2005)08-1009-4

# 空间激光通信中光强起伏尺度特征的数值分析\*

刘建国<sup>1,2</sup> 黄印博<sup>1</sup> 王英俭<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 合肥 230031)  
(<sup>2</sup> 南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

**摘要:** 利用数值模拟的方法, 定量地计算分析了空间激光通信中光强起伏问题, 得到了准直光束与聚焦光束光强起伏相关距离(不均匀元半径)随大气相干长度变化的结果; 进而分别从接收效率和性价比等不同的角度对激光通信系统接收孔径选取的参考因素进行了探讨。根据现代光通信对误码率的最低要求定义最佳接收孔径, 计算分析了聚焦光束空间激光通信系统最佳接收孔径随大气相干长度  $r_0$  的变化关系。结果表明, 最佳接收孔径随大气相干长度的减小而迅速增大。对于聚焦光束空间激光通信而言, 在大气相干长度  $r_0$  约为 4 cm 的强湍流效应情况下, 通信系统的接收孔径接近 5 倍艾里斑直径, 才能满足国际电信联盟-电信标准部对光通信的最低要求。

**关键词:** 大气光学; 接收孔径; 数值模拟; 空间激光通信

中图分类号: TN012 文献标识码: A

## Numerical Analysis of Intensity Fluctuation Scale Characteristics in Space Laser Communication

Liu Jianguo<sup>1,2</sup> Huang Yinbo<sup>1</sup> Wang Yingjian<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031  
<sup>2</sup> Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)

**Abstract:** The intensity fluctuation in space laser communication is analyzed quantitatively by using numerical simulation method, the relation of the intensity correlative scale with the atmospheric coherence length is obtained. And the referenced factors of ascertaining optimum receiving aperture are discussed. The optimum receiving aperture is defined base on the ITU-T, and the relation of optimum receiving aperture with atmospheric coherent length is educed, the result shows that the optimum receiving aperture is greatly increasing as the atmospheric coherence distance decreasing. When focused laser beam is used in space laser communication, at the strong atmospheric turbulent effect, for example  $r_0$  about 4 cm, only the receiving aperture approaches 5 times diameter of Airy spot, the lowest ITU-T demand can be satisfied.

**Key words:** atmospheric optics; receiving aperture; numerical simulating; space laser communication

## 1 引 言

空间激光通信中, 大气吸收与散射造成激光能量衰减, 而大气湍流则导致接收天线所接收到的光强在时间和空间上随机起伏, 即闪烁效应。闪烁效应相当于一个随机噪声源, 特别是在湍流效应较强时, 闪烁带来的噪声是很大的。这很可能会导致通信突发性错误, 甚至是通信中断, 从而严重影响通信质量<sup>[1]</sup>。

Tatarskii<sup>[2]</sup>指出在弱湍流效应条件下, 平面波通过湍流大气后光斑光强起伏相关距离(不均匀元

半径)与第一类菲涅耳尺度 $\sqrt{\lambda L}$ 同量级, 其中 $\lambda$ 为发射激光波长,  $L$ 为激光传输距离即通信距离; Yura<sup>[3]</sup>发现在强湍流效应下, 准直光束光强起伏相关距离随湍流效应的增加而减小。Kerr<sup>[4]</sup>通过实验证明在相同的湍流效应下, 当发射孔径相同时, 接收孔径越大, 所接收到的功率起伏方差越小; 当接收孔径相同时, 发射孔径越大, 所接收到的功率起伏方差越小。可见不同的接收孔径所对应通信信号的信噪比不同, 从而直接影响通信质量, 因此在空间激光通信中

\* 国家 863 计划(2003AA312100)和中国科学院合肥研究院物质计算科学中心资助课题。

作者简介: 刘建国(1975~), 南开大学现代光学研究所在读博士研究生, 主要从事光通信及器件的研究工作。

E-mail: luckyjgliu@163.com

收稿日期: 2004-05-31; 收到修改稿日期: 2004-11-12

根据实际需要设计合理的接收孔径对于整个系统的优化设计都是非常必要的。

对于空间激光通信,主要有地-地、地-空、空-空三种模式,基于接收效率等因素的考虑,对于主要应用于解决最后一公里问题的地-地模式或传输距离不太远的地-空模式,往往采用聚焦光束;而对于其他的远距离通信模式,则往往是接近准直光束传输。本文利用数值模拟的方法<sup>[5]</sup>,对准直光束、聚焦光束光斑光强起伏相关距离(不均匀元半径)随大气相干长度的变化关系进行了定量地计算分析;分别从接收效率和性价比等不同的角度探讨了接收孔径选取的参考因素,根据现代光通信对误码率的最低要求定义了最佳接收孔径,并确定了聚焦光束大气传输最佳接收孔径随大气相干长度<sup>[6]</sup>的变化关系。从而为空间激光通信系统优化设计提供了科学依据。

## 2 光强起伏相关距离(不均匀元半径)

### 2.1 计算参量的选择

利用数值模拟方法<sup>[5]</sup>对激光湍流大气传输进行了数值模拟计算,得到接收端光斑光强起伏的时空分布。模拟计算主要参量为:激光波长  $0.6328 \mu\text{m}$ <sup>[7]</sup>,望远镜的发射孔径  $0.6 \text{ m}$ ,计算网格  $256 \times 256$ ,发射孔径处网格间距  $0.01 \text{ m}$ ,水平传输距离  $1 \text{ km}$ 。

### 2.2 光强起伏相关距离的计算方法

读取接收面光强,光强起伏相关函数为

$$C_I(\rho) = \langle [I(r) - \bar{I}(r)] \times [U(r+\rho) - \bar{I}(r+\rho)] \rangle, \quad (1)$$

式中  $\rho$  为接收平面上两点间距离,  $I(r)$  为接收面距轴心  $r$  处的光强,  $\bar{I}(r)$  为该点光强的系统平均值。此两点间光强起伏方差分别为

$$\sigma_I(r) = \langle [I(r) - \bar{I}(r)]^2 \rangle^{1/2}, \quad (2)$$

$$\sigma_I(r+\rho) = \langle [I(r+\rho) - \bar{I}(r+\rho)]^2 \rangle^{1/2}, \quad (3)$$

所以归一化相关系数为

$$B_I(\rho) = \frac{C_I(\rho)}{\sigma_I(r)\sigma_I(r+\rho)} = \frac{\langle [I(r) - \bar{I}(r)] \times [I(r+\rho) - \bar{I}(r+\rho)] \rangle}{\langle [I(r) - \bar{I}(r)]^2 \rangle^{1/2} \langle [I(r+\rho) - \bar{I}(r+\rho)]^2 \rangle^{1/2}}, \quad (4)$$

$1/e$  是科学和工程上常用的一个比例参量,定义使归一化相关系数  $B_I(\rho)$  等于  $1/e$  的两点间距离为光强起伏相关距离  $\rho_c$ <sup>[3]</sup>。

### 2.3 准直光束光强起伏相关距离

图 1 是不同湍流效应下,准直光束大气传输光斑光强起伏相关系数  $B_I(\rho)$  随两点间距离  $\rho$  的变化

曲线,由图 1 可见  $B_I(\rho)$  随  $\rho$  的增大呈近似指数形式递减,当  $B_I(\rho)$  下降到零时表明两点光强完全不相关。图 2 则给出光强起伏相关距离  $\rho_c$  随大气相干长度  $r_0$  的变化关系,可见,当湍流效应较弱 ( $r_0 > 12 \text{ cm}$ ) 时,准直光束光强起伏相关距离  $\rho_c$  与第一类菲涅耳尺度  $\sqrt{\lambda L}$  量级相当,几乎不随  $r_0$  的变化而变化;然而当湍流效应较强 ( $r_0 < 12 \text{ cm}$ ) 时,  $\rho_c$  随大气相干长度  $r_0$  的减小而近线性的递减。

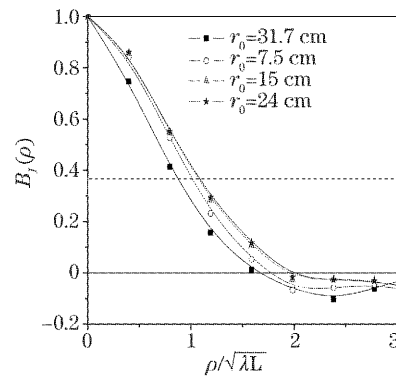


图 1 准直光束大气传输光斑光强起伏相关系数随两点间距离的变化

Fig. 1 The intensity correlative coefficient versus separation as collimated laser beam propagating

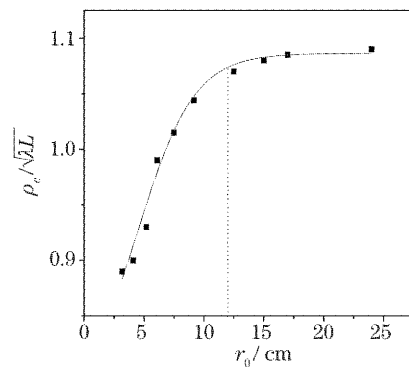


图 2 准直光束大气传输光斑强起伏相关距离随大气相干长度的变化

Fig. 2 The intensity correlative scale versus atmosphere coherent length  $r_0$  as collimated laser beam propagating

### 2.4 聚焦光束光强起伏相关距离

图 3 是不同湍流效应下,聚焦光束大气传输焦平面光斑光强起伏相关系数  $B_I(\rho)$  随两点间距离  $\rho$  的变化曲线,其中  $r_{\text{Airy}}$  代表艾里斑的半径。图 4 给出聚焦光束焦平面光强起伏相关距离  $\rho_c$  随大气相干长度  $r_0$  的变化曲线。图 4 结果表明,聚焦光束焦平面光强起伏相关距离  $\rho_c$  与艾里斑半径  $r_{\text{Airy}}$  可比拟,并且随着  $r_0$  的减小而递减。对比图 2 可以看到,相对准直光束而言,聚焦光束焦平面光强起伏的

相关距离  $\rho_c$  随着湍流效应增强而更快地减小,例如当  $r_0 = 5$  cm 时,准直光束强度起伏相关距离约为  $0.9 \sqrt{\lambda L}$ ,而聚焦光束焦平面光强起伏的相关距离仅约为艾里半径的一半,可见在强湍流效应下,聚焦光束光斑质量随湍流效应的增强更加严重地被退化<sup>[8]</sup>。

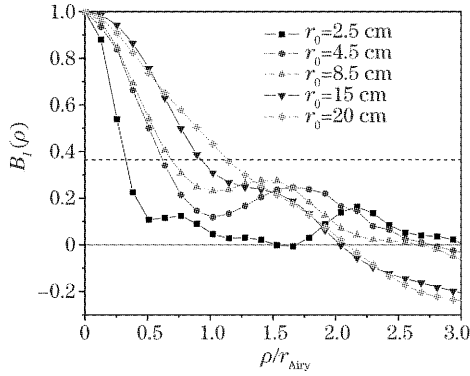


图 3 聚焦光束大气传输焦平面光斑光强起伏相关系数随两点间距离的变化

Fig. 3 The intensity correlative coefficient versus separation as focused laser beam propagating

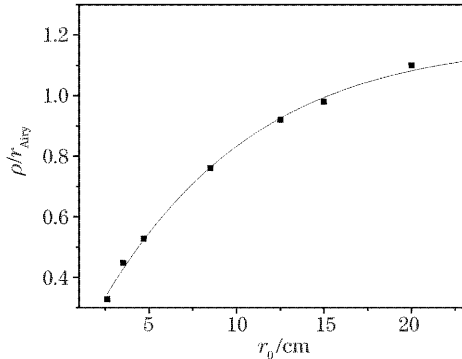


图 4 聚焦光束焦平面光强起伏相关距离随大气相干长度的变化

Fig. 4 The intensity correlative scale versus atmosphere coherent length  $r_0$  as focused laser beam propagating

### 3 孔径参量选取的参考因素

#### 3.1 计算参量的选择

仅对聚焦光束水平近地面传输和上行传输进行分析,模拟计算的主要参量为:激光波长  $0.85 \mu\text{m}$ <sup>[7]</sup>,望远镜的发射孔径  $0.3 \text{ m}$ <sup>[7]</sup>,计算网格  $256 \times 256$ ,发射孔径处网格间距  $0.01 \text{ m}$ ,通信距离分别是水平传输  $5 \text{ km}$  和上行传输  $20 \text{ km}$ 。

#### 3.2 最佳接收孔径

图 5 是不同接收孔径条件下接收效率的概率密度分布,图中横坐标为接收效率,定义为焦平面处接收孔径内的功率  $P$  与总功率  $P_t$  的比值;纵坐标是概

率密度; $D_{\text{Airy}}$  表示艾里斑直径。由图可知:由于大气湍流效应导致光斑光强在时间和空间上随机变化,不同接收孔径所得到的激光功率有一定的概率密度分布,峰值概率密度(概率密度的极大值)所对应的接收效率随接收孔径的增大而增高;另一方面,接收孔径越大,接收效率起伏方差越小,所以探测器所接收信号的信噪比  $n_{\text{SNR}}$  就越高。然而在远距离空间激光通信的系统设计中,大的接收孔径往往很难实现,这就要求我们必须根据实际需要同时考虑接收效率与性价比等因素进行合理设计。

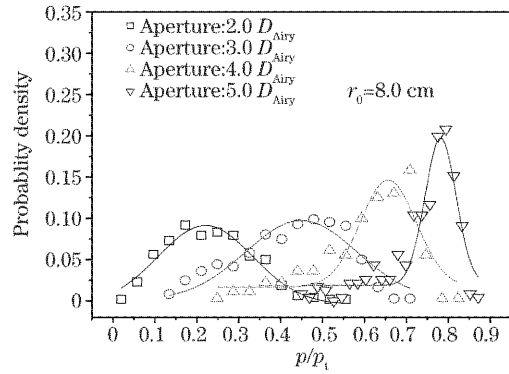


图 5 聚焦光束水平传输 5 km 时接收效率的概率密度分布  
Fig. 5 The probability density distribution of receiving efficiency as focused laser beam horizontally propagates for 5 km

图 6 中实线和虚线分别是不同湍流效应下,聚焦光束水平传输  $5 \text{ km}$  和上行传输  $20 \text{ km}$  时接收到信号的信噪比随接收孔径  $D$  的变化关系,其中  $D_{\text{Airy}}$  表示艾里斑直径, $n_{\text{SNR}}$  定义为接收功率的平均值与其平方根的比值。由图可见,两种通信模式下得到几乎一致的结果,即  $n_{\text{SNR}}$  随接收孔径的增大近似成抛物线型增长,这是由于大孔径对接收信号具有孔径平滑作用<sup>[2]</sup>;同时湍流效应越弱  $n_{\text{SNR}}$  的增长速度

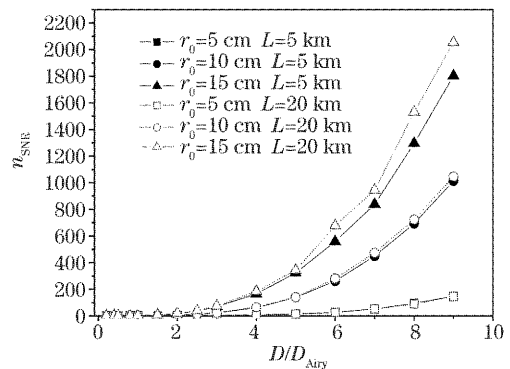


图 6 聚焦光束的信噪比随接收孔径的变化关系  
Fig. 6 The focused laser beam  $n_{\text{SNR}}$  versus receiving aperture  $D$

越快,这是由于不同湍流效应下光斑光强空间和时  
间分布的弥散程度不相同的缘故。

国际电信联盟-电信标准部 (ITU-T) 对于现代  
光通信的普遍要求是比特误码率 (Bit-error rate) 低  
于  $10^{-12}$ , 可接受的最大比特误码率是  $10^{-9}$ <sup>[9]</sup>。而  
影响误码率的直接因素是  $n_{\text{SNR}}$ , 我们忽略探测器本  
身的散粒噪声、热噪声、暗电流噪声等一切固有噪  
声, 考虑信号质量的下降仅仅是由湍流效应所致, 则  
当  $n_{\text{SNR}} \approx 6$  时, 比特误码率约为  $10^{-9}$ <sup>[9]</sup>, 定义此时  
的接收孔径为最佳接收孔径。

大气湍流运动是一个完全随机的运动过程, 大  
气相干长度往往在几厘米到几十厘米的量级范围  
内变化<sup>[10]</sup>。图 7 给出了两种通信模式下最佳接收  
孔径随大气相干长度的变化关系, 实线对应水平通  
信 5 km 的情况, 虚线对应上行传输 20 km 的情况。  
图中表明随湍流效应的减弱, 最佳接收孔径近似成  
指数形式下降, 这是由于在湍流效应较弱时, 光斑  
的能量主要集中在艾里斑内, 一定接收孔径内的功  
率起伏较小; 而在湍流效应较强时, 光斑严重破  
碎, 不均匀元尺度减小, 光强在时间和空间上的随  
机起伏较大, 一定接收孔径内的功率起伏随湍流  
效应的增强而迅速增大, 因此需要利用大接收孔  
径的孔径平滑效应才能提高接收信号的信噪比<sup>[2,10]</sup>。  
如当  $r_0$  约为 4 cm 的强湍流效应情况下, 通信系  
统的接收孔径接近 5 倍艾里斑直径, 才能满足国  
际电信联盟-电信标准部对光通信的最低要求。

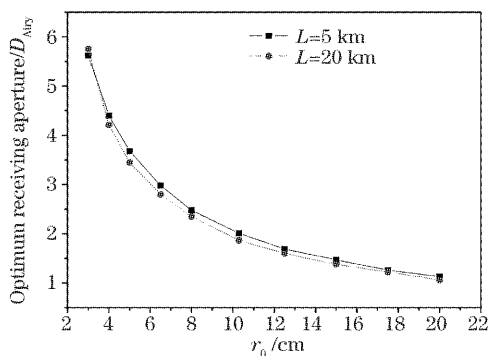


图 7 聚焦激光传输时接收孔径随大气相干长度的  
变化关系

Fig. 7 The optimum receiving aperture versus atmosphere  
coherent length  $r_0$  as focused laser beam propagating

## 4 结 论

利用数值计算的方法对空间激光通信中光斑尺  
度特征进行了定量分析, 得到在弱湍流效应下准直  
光束光斑光强起伏相关距离  $\rho_c$  (不均匀元半径) 与第

一类菲涅耳尺度  $\sqrt{\lambda L}$  同量级, 而聚焦光束光强起伏  
相关距离  $\rho_c$  (不均匀元半径) 与艾里斑半径可比拟;  
但当湍流效应较强时, 聚集光束光斑光强起伏相关  
距离  $\rho_c$  随大气相干长度减小而递减的更快, 说明在  
强湍流效应下, 聚集光束光斑质量随湍流效应的增  
强更加严重地退化。分别从接收效率和性价比等不  
同的角度对聚焦光束空间激光通信系统接收孔径选  
取的参考因素进行了探讨, 根据现代光通信对误码  
率的最低要求定义最佳接收孔径, 计算分析了系统  
最佳接收孔径随大气相干长度的变化关系。结果表  
明, 最佳接收孔径随湍流效应的增强而接近指数地  
增大。当湍流效应较强时, 需要利用大接收孔径的  
孔径平滑效应才能提高接收信号的信噪比。

## 参 考 文 献

- 1 Ma Dongtang, Wei Jibo, Zhuang Zhaowen. Performance evaluation and channel modeling of multiple-beam propagation for atmospheric laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1020~1024 (in Chinese)  
马东堂, 魏急波, 庄钊文. 大气激光通信中多光束传输性能分析和信道建模[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1020~1024
- 2 Tatarski V. I. *Wave Propagation in a Turbulent Medium* [M]. Wen Jingsong, Song Zhengfang, Zeng Zongyong *et al.* transl., Beijing: Science Press, 1978 (in Chinese)  
塔塔尔斯基. 湍流大气中波的传播理论[M]. 温景嵩, 宋正方, 曾宗泳等译. 北京: 科学出版社, 1978
- 3 H. T. Yura. Physical model for strong optical-amplitude fluctuations in a turbulent medium[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**(1): 59~67
- 4 J. Richard Kerr, James R. Dunphy. Experimental effects of finite transmitter apertures on scintillations[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1973, **63**(1): 1~8
- 5 Wang Yingjian. Discussion on some problems about the laser propagation in the atmosphere and its phase compensation[D]. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, 1996 (in Chinese)  
王英俭. 激光大气传输及其相位补偿若干问题的探讨[D]. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 1996
- 6 Wang Yingjian, Wu Yi, Gong Zhiben. The statistics of atmospheric coherence length and strehl ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(8): 1109~1113 (in Chinese)  
王英俭, 吴毅, 龚知本. 大气湍流相干长度和 Strehl 比的统计特征[J]. *光学学报*, 1996, **16**(8): 1109~1113
- 7 Chen Gang, Cai Yanmin, Chen Gaoting *et al.*. Discussion on some technological issues in space laser communications[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, **29**(3): 44~48 (in Chinese)  
陈刚, 蔡燕民, 陈高庭等. 空间激光通信技术若干问题的讨论[J]. *红外与激光工程*, 2000, **29**(3): 44~48
- 8 Rao Ruizhong, Wang Shipeng, Liu Xiaochun. Atmospheric-turbulence-degraded light intensity images: size measurement and description of deformation characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(4): 451~456 (in Chinese)  
饶瑞中, 王世鹏, 刘晓春. 被湍流大气退化的激光光斑尺度测量与形变特征描述[J]. *光学学报*, 1998, **18**(4): 451~456
- Djafar K. Mynbaev, Lowell L. Scheiner. *Fiber Optic Communications Technology* [M]. Beijing: China Machinery Press, 2002 (in Chinese)  
Djafar K. Mynbaev, Lowell L. Scheiner. 光纤通信技术[M]. 徐公权译. 北京: 机械工业出版社, 2002
- 10 J. W. Strohbehn. *Laser Beam Propagation in the Atmosphere* [M]. New York: Academic press, 1978