

文章编号: 1001-4322(2005)03-0321-04

强湍流效应下激光大气传输短曝光光斑统计分析

刘建国, 黄印博, 王英俭

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所 大气光学中心, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 利用数值模拟的方法, 对强湍流效应下激光大气传输焦平面短曝光光斑的统计特性进行了初步分析, 并与实验结果进行了对比。结果表明: 在强湍流效应下, 焦平面短曝光光斑破碎成一系列的小光斑, 这些破碎光斑的等效半径与爱里斑半径近似相等; 接收器中心置于光轴轴心处, 当接收孔径等于爱里斑直径时, 接收的均值光强最大。

关键词: 激光传输; 湍流大气; 破碎光斑; 爱里斑

中图分类号: TN012 **文献标识码:** A

近年来, 激光空间通信以其发射光束窄、信息容量大、传输速率快、覆盖空间广、保密性能好等特点倍受人们的青睐。无论是地对地、地对空、还是空对地之间的激光通信, 必然要受到大气的影 响, 如大气吸收与散射造成激光能量的衰减, 大气湍流则严重地影响激光传输的质量。特别是由大气湍流效应所引起的激光光束的扩展、漂移、以及光强起伏(闪烁), 很可能导致通信突发性错误, 甚至是通信中断, 因此大气湍流效应已经成为激光空间通信研究中的重要课题之一^[1]。定量研究空间激光通信中接收平面上光强分布的时空特征, 了解大气湍流所导致的光强起伏特性, 以及合理选择探测器的接收孔径, 不但可以降低激光空间通信中的误码率, 提高通信质量, 还可为激光空间通讯系统的设计提供科学依据。Tatarskii 在柯尔莫哥洛夫理论的基础上, 利用小扰动理论对激光在弱湍流效应下的传输特性进行了比较全面的阐述^[2]。而 Kerr 和 Dumphy 等人发现, 在强湍流效应下聚焦光束焦平面短曝光光斑会破碎成一系列小光斑^[3]。文中在上述结论的基础上, 利用数值模拟的方法, 对强湍流效应下激光大气传输焦平面短曝光光斑的统计特性进行了初步分析, 并与实验结果进行了对比。结果表明: 在强湍流效应下, 焦平面短曝光光斑会破碎成一系列的小光斑, 而且这些破碎光斑的等效半径与爱里斑半径近似相等; 接收器中心置于光轴轴心处, 当接收孔径为爱里斑直径时, 接收的均值光强最大。

1 实验原理及光路图

如图 1 为实验系统原理图, 波长为 632.8 nm 的氦氖激光器 L1 发射一束激光, 经由平行光管 P1 扩束成口径为 0.12 m 的准直光束, 经分光镜 M1, M2 反射后, 由望远镜扩束成口径为 0.6 m 的平台光束, 通过湍流大气传输至 1.0 km 处, 并透过分光镜 M3 聚焦到漫反射屏 DR 上, 利用高速 CCD 拍摄漫反射屏上的光斑, 采样频率为 250 frames/s; 同时氦氖激光器 L2 发射一束激光, 经过分光镜 M3 反射沿原光路返回, 最后经分光镜 M2 透射后被哈特曼传感器接收, 并利用到达角起伏与大气相干长度的关系反演出大气相干长度^[4]。

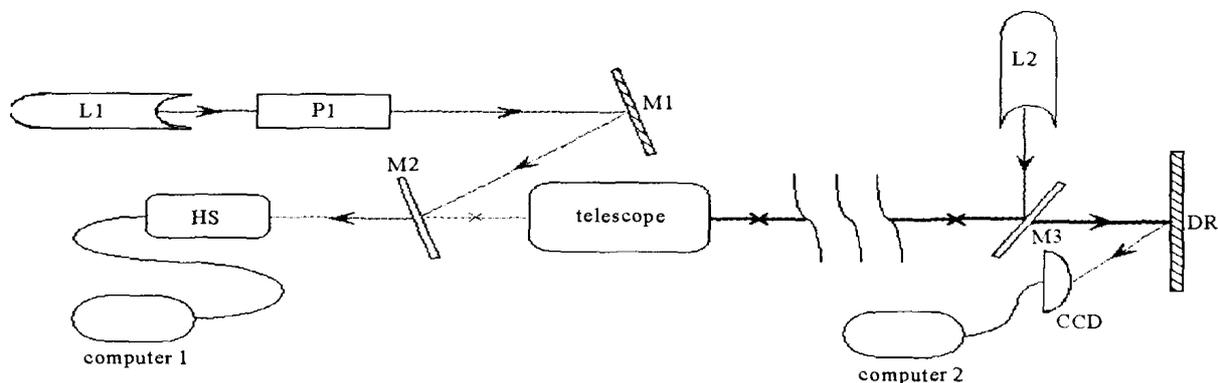


Fig. 1 Layout of experimental system

图 1 实验系统原理图

• 收稿日期: 2004-09-30; 修订日期: 2005-01-04

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题; 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—), 男, 硕士, 主要从事激光大气传输的数值模拟研究; 合肥 1125 信箱 2 室; E-mail: luckyjgliu@163.com.

2 数值结果与实验结果的对比分析

利用 4 维传输程序对聚焦光束湍流大气传输焦平面处短曝光光斑的光强分布特征进行了数值分析^[5,6]。计算网格为 256×256 , 发射孔径处网格间距为 0.01 m, 相屏数为 40; 计算中采用的系统参数与实验系统参数一致, 即传输波长为 632.8 nm, 望远镜的发射孔径为 0.6 m, 水平传输距离为 1 km。

2.1 破碎光斑的尺度特征

如图 2 所示是激光湍流大气传输焦平面处光强分布的一个例子, 为方便比较, 图 2(a) 给出了数值模拟的焦平面处爱里斑的大小, 图 2(b) 是在实验条件下数值模拟的一幅短曝光图像, 图 2(c) 是实验观测结果。可以直观地看到, 在强湍流效应(大气相干长度 $r_0 = 4.7$ cm)下, 聚焦光束焦平面处的短曝光光斑破碎成一系列小光斑, 使得靶面上的光强分布极不均匀。

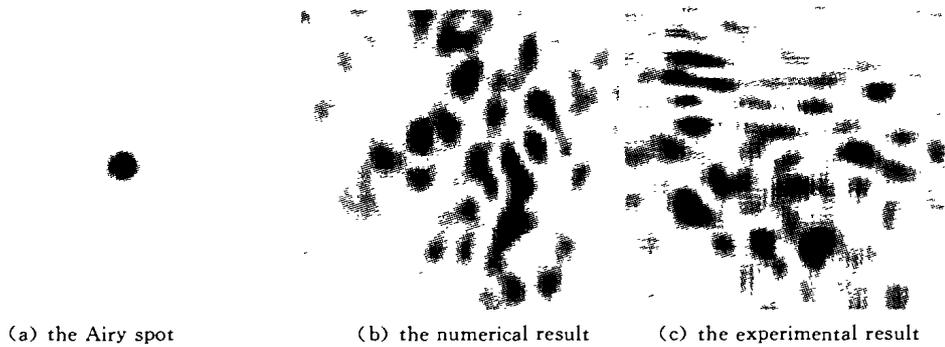


Fig. 2 Airy spot, numerical result and experimental result of a short-exposure image with $r_0 = 4.7$ cm

图 2 爱里斑图像、数值模拟及实验测量的一幅短曝光图像

为了进一步定量分析破碎光斑的尺度, 我们首先读取焦平面内光强的极大值点, 并确定为破碎光斑中心, 例如点 (k, l) 为一光强极大点, 沿 x, y 坐标轴的正向分别对光强求微分, 而微分值将分别在 $(k, l+r_x)$ 和 $(k+r_y, l)$ 处改变符号或等于零, 从而确定破碎光斑的等效半径为 $r = \sqrt{r_x r_y}$ 。在对实验数据的分析中, 采用了与数值计算相同的方法。

图 3(a) 为破碎光斑等效半径的概率密度分布, 图 3(b) 是其概率分布图。图中 r_A 代表爱里斑的大小。由图 3(a) 可知, 破碎光斑等效半径的概率密度分布近似满足高斯分布, 并且破碎光斑等效半径的期望值 r_c (概率密度峰值所对应的破碎光斑的等效半径) 近似等于爱里斑半径, 只不过数值计算结果比实验结果的陡峭度更大^[7], 这可能是由于数值计算中相干长度是一个定值, 而在实验中有限时间内测量的相干长度是有一定分布的。如图 3(b) 所示, 绝大多数的破碎光斑等效半径近似等于爱里斑半径。

图 4(a) 是破碎光斑等效半径的期望值随大气相干长度的变化。由图可知, 在强湍流效应下破碎光斑等效半径与爱里斑半径近似相等。图 4(b) 是聚焦光束在强湍流效应下 ($r_0 = 4.7$ cm), 上行传输不同传输距离时所得破碎光斑等效半径的期望值。如图 4 所示, 破碎光斑等效半径的期望值与爱里斑半径的比值几乎是不随传输距离变化的, 即便是传输距离达到 400 km, 破碎光斑等效半径期望值仍与爱里斑半径相当。

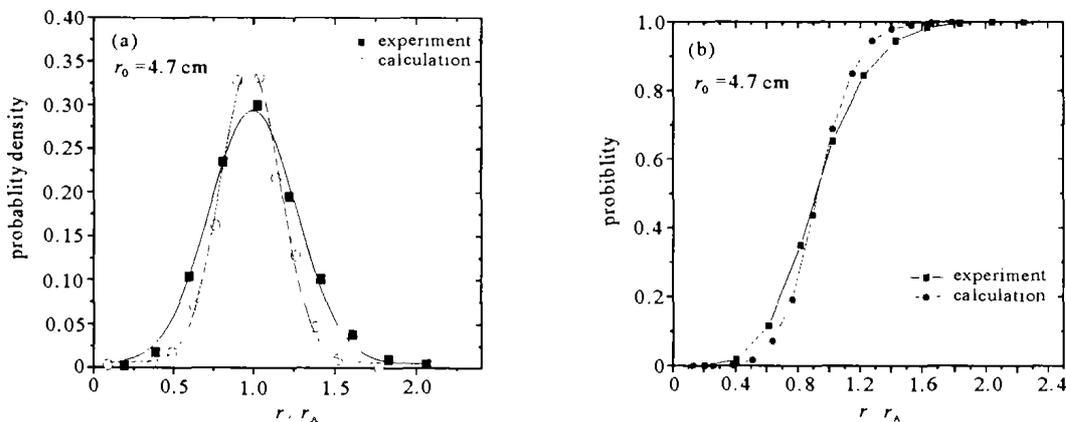


Fig. 3 Probability density and probability of the broken spot size

图 3 破碎光斑等效半径的概率密度分布及概率分布

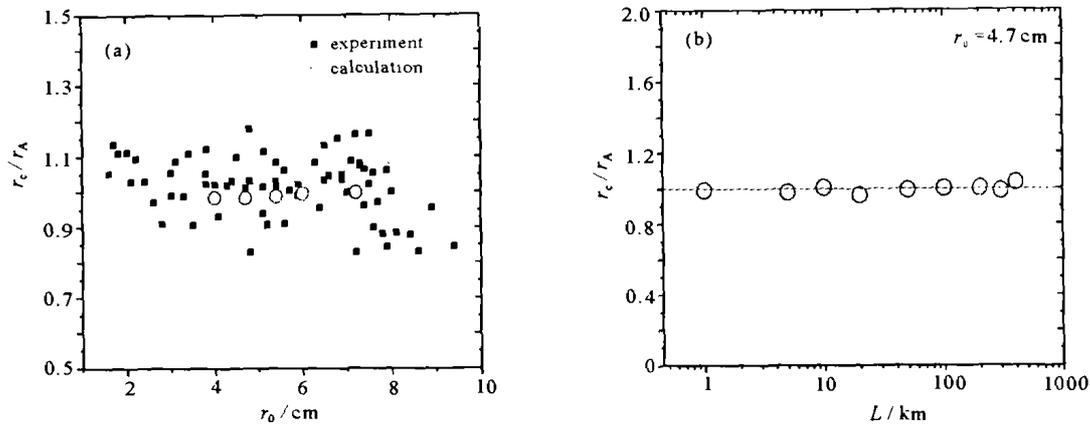


Fig. 4 Expected value of broken spot radius vs r_0 and distance L

图 4 破碎光斑等效半径的期望值随大气相干长度及传输距离的变化

2.2 不同接收孔径内的光强起伏特征

将接收器中心置于光轴轴心处,进一步研究不同接收口径时的光强起伏特征。图 5(a)、图 5(b)分别是光强起伏的标准偏差和均值光强随接收孔径的变化。图中,均值光强定义为 $\langle I \rangle = E_S/S$, 式中 S 是面积, E_S 是短曝光图像中 S 面积内的激光功率, $\langle \rangle$ 表示求系综平均值; I_c 表示大气相干长度 r_0 为 5.4 cm 时爱里斑半径内的均值光强。

由图 5(a)可知,当接收孔径较小时,由于大气湍流效应的影响,其接收的光强起伏很大,随着接收孔径的增加,光强起伏的标准偏差呈指数递减,这是由于孔径的平滑效应所致。但由图 5(b)可以看到,当探测器接收孔径大于爱里斑直径时,接收到的光强均值随着接收孔径的增大而接近线性地下降;而当探测器接收孔径小于爱里斑直径时,均值光强随接收孔径的减小也快速地减小。这主要是由于接收孔径较小,接收孔径内的光强起伏很大,探测器时而接收到光斑的亮区,时而接收到光斑的暗区所致。当探测器接收孔径约等于爱里斑直径时,所接收到的均值光强最大。

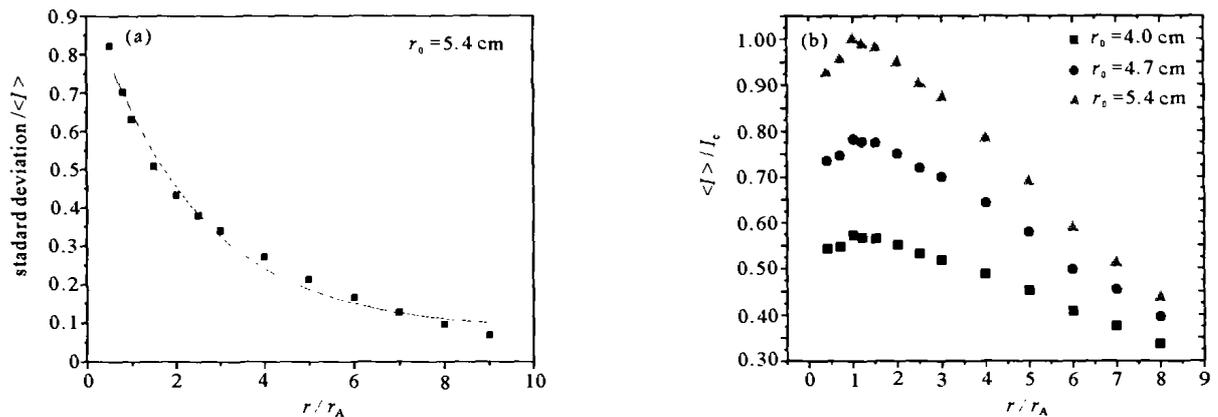


Fig. 5 Standard deviation and average intensity in the focal plane vs receive aperture

图 5 光强起伏的标准偏差和均值光强随接收孔径的变化

图 6(a)、图 6(b)分别是强湍流效应下,接收孔径等于爱里斑直径时光强的概率密度分布与概率分布。由图 6(a)可以看到,虽然探测器接收孔径等于爱里斑直径时所接收到的均值光强最大,但探测器所接收到的均值光强概率密度分布并非满足正态分布,而是发生左偏,即概率密度最大的光强比均值光强小;大于均值光强的概率远比小于均值光强的概率少,如图 6(b) 所示。

3 结 论

本文利用数值模拟的方法,对强湍流效应下激光大气传输焦平面短曝光光斑的统计特性进行了初步分析,并与实验结果进行了对比。结果表明,聚焦光束在强湍流效应下传输时,焦平面短曝光光斑破碎成一系列小光斑,这些破碎光斑的等效半径与爱里斑半径相当,并且在强湍流效应下,破碎光斑尺度与爱里斑尺度的比值几乎不随大气相干长度和传输距离的变化而变化。接收器中心置于光轴轴心,当接收孔径等于爱里斑直径时,所

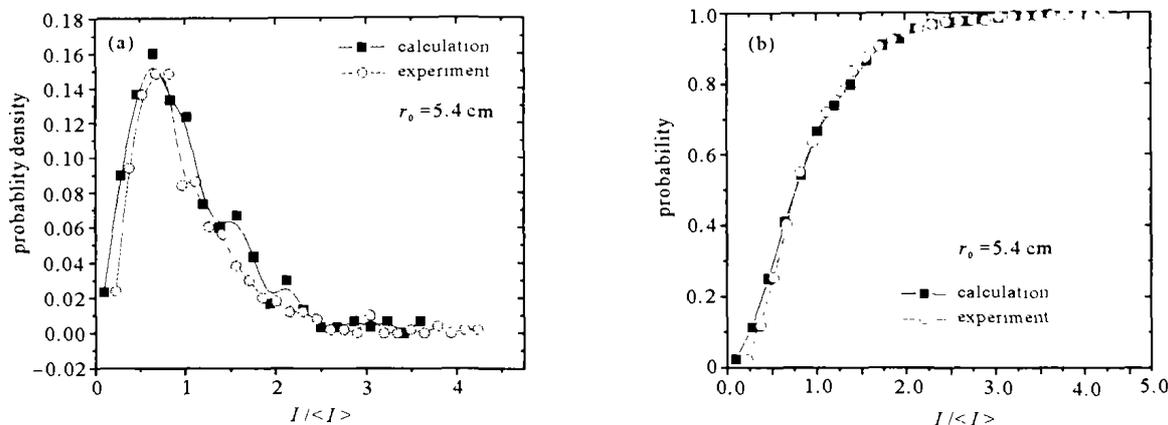


Fig. 6 Probability density and probability of average value intensity in the diffraction limit on the focal plane

图 6 接收孔径等于爱里斑直径时光强的概率密度分布与概率分布

接收到的均值光强最大,大于均值光强的概率远比小于均值光强的概率小。这些结论为合理选择探测器的接收孔径,降低激光空间通信中的误码率,提高通信质量,以及激光空间通讯等系统设计提供了参考依据。

致谢 冯绚同学、毕振波同学参加了实验工作,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 马东堂,庄钊文,魏急波,等. 空间激光通信中的大气闪烁问题研究[J]. 中国激光,2002,29:277—280. (Ma D T, Zhuang Z W, Wei J B, et al. Studies of laser atmospheric scintillation problem in space laser communication. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29:277—280)
- [2] 塔塔尔斯基. 湍流大气中波的传播理论[M]. 北京:科学出版社,1978. (Tatarskii. Wave propagation in a turbulent media. Beijing: Science Press, 1978)
- [3] Kerr J R, Dunphy J R. Experimental effects of finite transmitter apertures on scintillations[J]. *J Opt Soc Am*, 1973, 63(1): 1—8.
- [4] Gong Z B, Wang Y J, Wu Y. Finite temporal measurements of the statistical characteristics of the atmospheric coherence length[J]. *Appl Opt*, 1998, 37(21): 4541—4543.
- [5] 王英俭. 激光大气传输及其相位补偿的若干问题探讨[D]. 合肥:中国科学院安徽光学精密机械研究所,1996. (Wang Y J. Some study on the laser propagation in the atmosphere and its phase compensation. Doctor dissertation. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1996)
- [6] 石小燕,王英俭,黄印博. 发射系统遮拦比对均强聚焦光束光斑扩展的影响[J]. 强激光与粒子束,2003,15(12):1181—1183. (Numerical analysis on the uniform focused beam spreading induced by atmosphere turbulence with different obscuring ratio. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(12):1181—1183)
- [7] 饶瑞中,王世鹏,刘晓春. 实际大气中激光闪烁的概率分布[J]. 光学学报,1999,19(1):81—86. (Rao R Z, Wang S P, Liu X C. Probability distribution of laser irradiance scintillation in a real turbulent atmosphere. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(1):81—86)

Statistical properties of short-exposure images with strong turbulent effects

LIU Jian-guo, HUANG Yin-bo, WANG Ying-jian

(Center for Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 1125, Hefei 230031, China)

Abstract: Numerical simulation was used to quantitatively analyze the statistical properties of short-exposure images with strong turbulent effects. Moreover, we compared the numerical results with the experimental results. The analytic results show that the short-exposure images break into some small spots with strong turbulent effects. For example, the coherence length of atmosphere is equal to 4.7 cm. In addition, the equivalent scale of these broken spots is comparable with the Airy spot. Moreover, when the receive aperture is equal to the dimension of Airy spot, the received average intensity on the axis is the largest.

Key words: Laser propagation; Turbulent atmosphere; Broken spot; Airy spot