

# 被湍流大气退化的激光光斑: 尺度测量与形变特征描述

饶瑞中 王世鹏 刘晓春

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学研究室, 合肥 230031)

**摘 要** 根据数值方法获得的在湍流大气中传播的激光束的长曝光光斑空间分布特征, 确定了 CCD 成像技术中的背景信号的大小, 进而解决了光斑尺度的测量问题。从数值分析和实验测量两方面分析了被湍流大气退化的光斑的形变特征的描述方法, 引入了对应于工程应用的高于一定阈值的最大光斑半径和占空比。最后根据数值计算的结果提出了湍流大气中光场的局域增强现象。

**关键词** 光传播, 大气湍流, 光斑尺度与特征。

## 1 引 言

激光在湍流大气传播过程中出现的一系列光学特性的改变严重制约了它的工程应用。对于这些光学特性的改变的定量描述已成为工程应用的迫切要求。光学特性的最直观的改变便是光强空间分布即光斑形状的改变, 包括通常所谓的扩展<sup>[1]</sup>与破碎即随机空间峰的出现<sup>[2]</sup>等。在弱起伏区, 已有解析方法处理了这些问题: 对中等起伏区, 理论和实验都没有很好地解决这个问题。困难之处在于: 在此条件下, 理论上尚无有效的解析方法, 只能借助于数值计算<sup>[3]</sup>; 实验上准确测量光斑尺度受到技术条件的限制。

为探讨湍流大气中光斑图像的尺度测量及其特征描述等问题, 作者于 1996 年 5 月在合肥进行了传输距离  $L = 1000 \text{ m}$  的湍流大气中激光光斑的实验观测。所用的光源是波长  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  的基模 He-Ne 激光, 通过 CCD 将聚焦于漫反射板上的光斑由计算机以每秒 50 幅图像的采样率实时记录, 图像的分辨率为  $256 \times 128$ 。为对有关问题进行多方面分析, 也进行了数值运算, 其原理同文献[3], 使用下列有关参数: 发射光束是光腰为  $30 \text{ mm}$  的高斯光束, 相当于准直光束,  $1000 \text{ m}$  的湍流路径上使用 20 个随机相位屏, 垂直于传播方向的有限平面分为  $256 \times 256$  的网格, 接收平面上光场的菲涅耳长度  $l_f = (\lambda L / 2\pi)^{1/2}$  与网格宽度之比为 15:1, 其它有关大气和光学参量也尽量和实验一致。湍流谱采用 Von Karman 谱, 对应于最大与最小空间频率的内外尺度分别为  $4.7 \text{ cm}$  和  $15.9 \text{ m}$ , 起伏强度由闪烁指数  $\beta_0^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$  (式中  $C_n^2$  为大气折射率结构常数,  $k$  为波数,  $L$  为光传输距离) 表示。

在由数值方法获得的湍流大气中的长曝光光斑空间分布特征的基础上, 尝试确定 CCD 的背景信号, 从而利用 CCD 成像技术解决光斑尺度的准确测量问题。在光斑尺度准确测量的

基础上，分析短曝光光斑的空间分布特征的描述方法并引入对应于工程应用的特征参量。

### 2 长曝光光斑的空间分布特征

湍流大气光学研究中，当处理光源为高斯分布的激光束的扩展问题时，通常对被湍流退化了的光斑的空间分布都作了一个隐含的假定，即它仍然服从高斯分布，从而才有所谓的短时扩展和长时扩展的概念。这个假定实际决定了解决这类问题的思路与方法，应予进行深入的探讨。

图 1 给出了湍流大气中短曝光光斑的实际情形，以及同样长的湍流路径上闪烁指数  $\beta_0^2 = 0.00566$  时的数值模拟结果。可以看出，即使在很弱的起伏条件下，短曝光光斑的空间分布通常是无规的，当湍流强度增加时会越来越严重的光斑破碎现象。在这种情况下，通常意义下的扩展概念已不能反映光斑的真实情况。

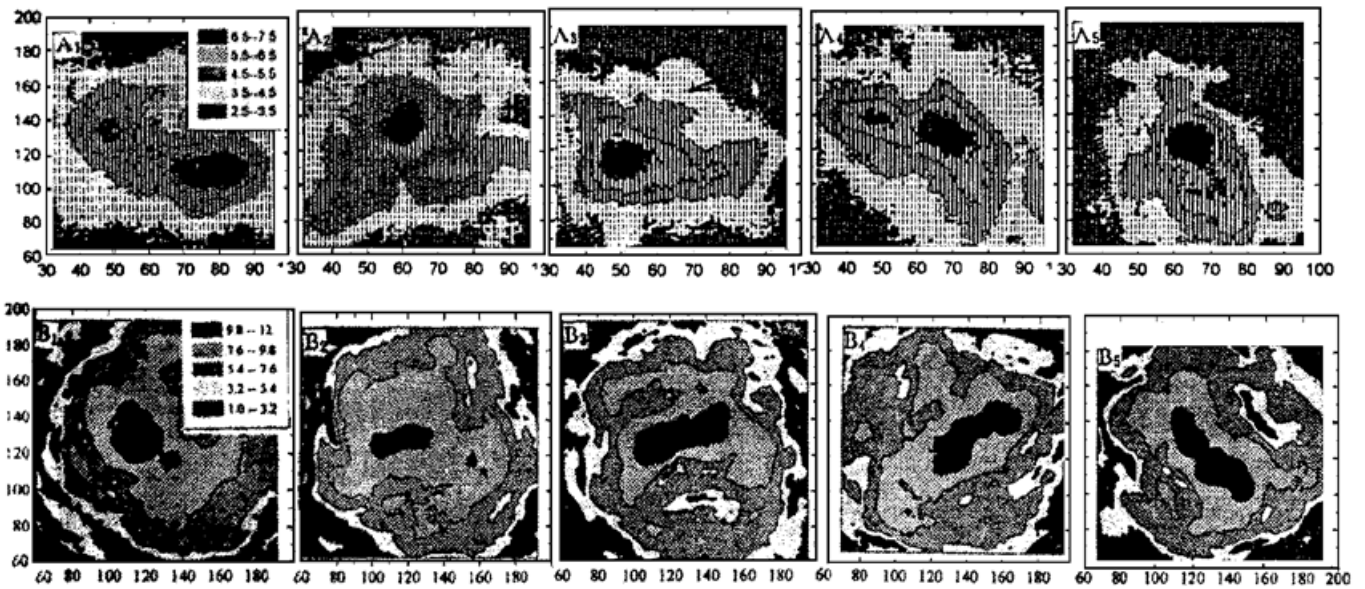


Fig. 1 The short-term intensity images of the laser beam in the turbulent atmosphere:  $A_1 \sim A_5$ : experimental results;  $B_1 \sim B_5$ : numerical simulations. In the legends are the values as the logarithm on base 2 of the light intensity

另一方面，由于长曝光光斑是连续长时间短曝光光斑的积累结果，可以合理地想象，它应具有稳定的空间分布特征。图 2 是实测的和数值计算的结果，它是 600 幅连续图像的平均结果，数值模拟对应闪烁指数  $\beta_0^2 = 0.0283$  的情况。从图 2 发现长曝光光斑可能近似具有高

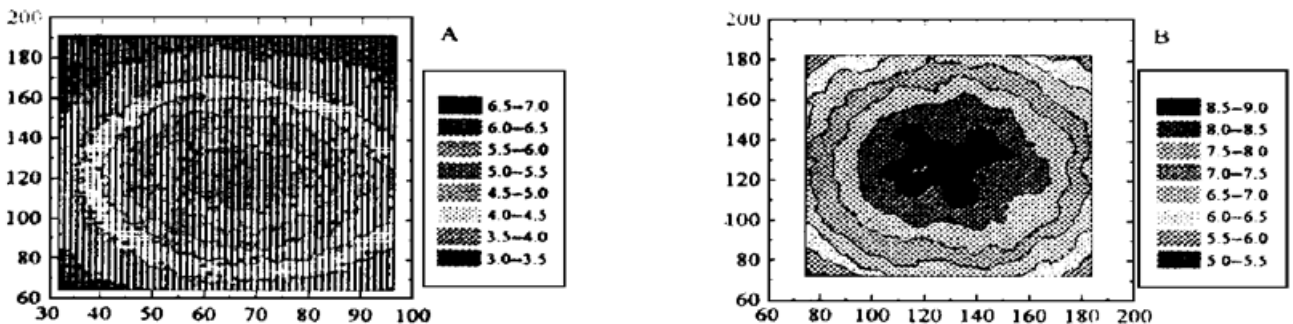


Fig. 2 The long-term intensity images of the laser beam in the turbulent atmosphere: (a): Experimental results; (b): Numerical simulations. In the legends are the values as the logarithm on base 2 of the light intensity

斯空间分布特征,但由于测量时的背景信号,尚不能直接验证这一推测。为此利用数值模拟方法,对起伏强度从弱到中等和情况计算 600 次随机实现的光斑分布,进行统计平均以模拟长曝光光斑。

若光强服从高斯空间分布,峰值强度为  $I_0$ ,束腰为  $w$ ,则在垂直于光轴的截面上距光轴  $r$  处的强度  $I$  为

$$I = I_0 \exp(-2r^2/w^2) \tag{1}$$

即光强的对数与半径的平方成线性关系:

$$\ln I = \ln I_0 - (2/w^2)r^2 \tag{2}$$

将此二量进行线性拟合,线性相关系数反映了线性拟合的程度。不同湍流强度下线性相关系数的变化趋势示于图 3。

从图 3 可以看出:在中等以下起伏条件下长曝光光斑具有很好的高斯空间分布特征。随着闪烁指数  $\beta_0^2$  的增加,长曝光光斑缓慢地偏离高斯空间分布。这里应该指出的是,(2)式所表示的线性关系是光强的对数与半径的平方的关系,即光强的分布是轴对称的。从图 2 可以看出,即使长曝光光斑也不能遵守严格意义下的高斯分布——光强的分布也必须是轴对称的。所以这里实际上运用了广义的高斯分布,即用光强高于一定值所占有的面积除以圆周率来表示半径的平方。

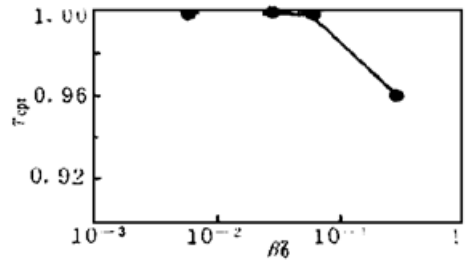


Fig. 3 The linear-fitting coefficient of equation (2) for the simulated long-term intensity images as a function of turbulent scintillation index  $\beta_0^2$

### 3 CCD 背景信号的确定与光斑测量

利用 CCD 成像技术,测量信号中总是存在着一个背景信号。如果不能正确地确定这个背景信号,也就无法确定光斑尺度。而从 CCD 器件本身难以准确确定这个背景,长期以来使用 CCD 测量光斑尺度的困难也源于此。

根据上节数值分析所得的长曝光光斑具有很好的高斯分布这一特点,就可根据 CCD 实测的长曝光光斑的光强空间分布定出这个背景信号。设长曝光的光强信号为  $S$ ,背景信号为  $S_b$ ,最大信号为  $S_0$ ,则按(2)式有

$$\ln(S - S_b) = \ln(S_0 - S_b) - (2/w^2)r^2 \tag{3}$$

上式可转化为带约束的线性反演问题(因为  $S_0$  是已经确定了),它可通过下述的数值迭代方法求解。

首先将  $S_b = 0$  代入(3)式对数据进行线性拟合,由常数项可得一个新值  $S'_b$ ,令  $(S_b + S'_b)/2$  为  $S_b$  的下次尝试值,依次迭代下去,直至  $S_b$  和  $S'_b$  在给定的精度内相等即为所求的  $S_b$ 。合理地选择线性拟合的数据点数,上述迭代过程会很快地收敛。

由实验采集的 14 组 600 幅光斑图像用上述方法进行了分析,所获得的 CCD 背景信号非常稳定。图 4 为

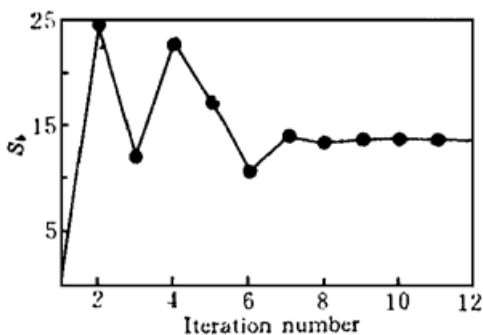


Fig. 4 The convergence of the iteration process for determining the CCD background signal

对实验数据进行处理收敛过程。应该指出的是,在实验中图像的量化值范围为 0~255。此外也用数值模拟检验了上述方法,证明它是可靠的。

#### 4 短曝光光斑的形变特征描述

描述湍流大气中光斑的形变特征一般使用扩展的概念<sup>[1]</sup>,通常用由下列公式定义的有效光斑半径  $w_{\text{eff}}$  来描述强度分布为  $I(x, y)$  的光斑的扩展特性:

$$\langle w_{\text{eff}}^2 \rangle = \iint r^2 I(x, y) dx dy / \iint I(x, y) dx dy \quad (4)$$

这样得到的有效光斑半径对应于接收平面上光强的空间平均。对于一般破碎的光斑,它既不能直接反映光的实际作用效果,又难以准确测量。原因在于要做到这一点,既要有足够大的接收面积,探测器件又必须有足够宽的动态范围。另一方面破碎光斑的随机空间峰数目和每个峰的面积<sup>[2]</sup>在实验上也不易给出判断的标准以进行准确测量。

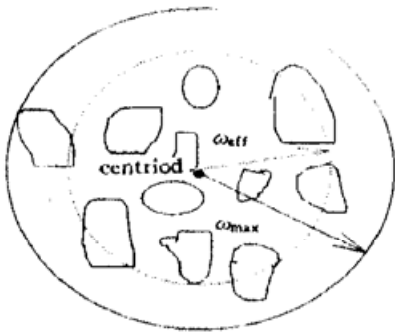


Fig. 5 The equivalent and maximal radii of a image: the former corresponds to the dashed circle and the latter the solid one. The irregular patterns represent the regions in which the laser irradiance is above the threshold

湍流大气中光斑的形变特征的研究实际上基于工程应用的要求。在实际应用中,关心的是接收面上高于某一阈值的光斑所占的最大面积和实际面积。例如在研究激光与材料的相互作用时,关心的只是高于某一阈值的光场作用在材料上的行为。因此用下列两个参量描述这一特性:与高于某一阈值的光场的最大作用面积有关的最大光斑半径  $w_{\text{max}}$  和用实际作用面积与最大作用面积之比表示的占空比  $R_{sf}$ 。前者反映了光场作用的范围,而后者反映了作用的效果。最大光斑半径可以通过下列三种方式获得:1) 光强高于阈值的光场位置到光斑的重心的最远距离;2) 光强高于阈值的光场位置到指定的原点或长曝光光斑的中心的最远距离;和3) 包含最大作用面积的最小圆的半径。实际应用可以根据特定的目的而选择,本文选择第一种方案。显而易见与准确测量有效光斑半径相比,测量最大作用面积和实际作用面积就要容易得多。图5是对应于有效光斑半径和最大光斑半径的示意图。

正如一般预期的,光斑的有效半径和最大半径都随起伏强度的增加而增大。作者用数值计算进行了分析,在这里,选定真空中峰值光强的  $1/e^2$  作为阈值,这样对真空中的高斯光斑,其有效半径和最大半径相等。这两种半径存在着很好的相关性。对很多光斑的统计分析表明,这两种半径有着相似的统计特性,有效半径并不能提供比最大半径更多的信息。这样,由于最大半径对应着工程上给定的阈值并可直接测定的尺度,显然是一个更好的选择。

使用最大光斑半径比使用有效光斑半径的另一个优越之处在于:在实际大气中传播的光束除受到大气湍流的作用外还受到大气成份的吸收与散射作用,因此光场除空间分布的改变外还存在着能量的衰减。因此对于许多连续测量的光斑,即使它们具有相同的有效光斑半径,但由于它们可能具有不同的总能量,也具有不同的作用效果。另外从定义显然可以看出,如果作用阈值不低于真空中峰值光强的  $1/e^2$ ,最大光斑半径总是大于有效光斑半径。但当作用阈值高于此值时,最大光斑半径可能大大小于有效光斑半径,此时有效光斑半径不能给予有价值的信息。

## 5 局域光强的增强现象

光斑扩展与破碎给人们的直观感觉是能量被分散了。但根据湍流作用的随机透镜的等效解释观点,可能存在着局域正透镜的会聚作用。从数值模拟的结果发现:被湍流退化的光斑常常具有比没有被退化的光斑更高的峰值强度。虽然对随机空间峰的研究提出了每个峰的平均强度,但从未提及峰值强度的增加<sup>[2]</sup>。

从数值模拟的结果发现:随着起伏强度的增大,峰值强度的增加也呈上升趋势,峰值强度的起伏方差也扩大了,在一定的起伏强度下达到最大值。随着起伏强度的进一步增大,峰值强度的增加便呈下降趋势,峰值强度的起伏方差也缩小了。也就是说,在弱起伏条件下存在非常明显的光强峰值强度的增强作用,如图 6 所示。

以上结果仅仅是通过数值模拟得到的,实验验证的困难在于确定真空中光斑的峰值。可能的途径有两种;根据光学系统的参数进行计算;在湍流非常小的情况下进行测量。实际上光学系统的参数总是难以精确得到,而对于后者,在实际大气中湍流总是存在的。所以这个问题的实验验证有待于通过别种途径进一步研究。

提出这个现象的意义在于:湍流大气中的各种传播效应以及各种校正湍流大气中光的畸变的技术(如自适应光学技术)的有效性都是对应于真空中光的传播而言的。在实际工程应用中,真空中光的传播特性是难以确定的,通常的做法是,在连续长时间的实验中根据某些传播效应挑选出某一时刻认为是湍流最弱并进而作为真空传播。由此带来的后果是明显的,当湍流很弱时,它对光束质量并不一定总是起着破坏的作用,在某种意义上可能起着建设性的作用,所以在此基础上评价湍流大气中光的各种传播效应以及各种校正湍流大气中光的畸变的技术的有效程度有可能失之偏颇。简言之,存在着很弱的湍流和没有湍流是不同的。

**结 论** 根据由数值方法获得的湍流大气中传播的激光束的长曝光光斑空间分布特征,通过数值迭代方法有效而准确地确定了 CCD 成像技术中的背景信号的大小,从而解决了光斑尺度的测量问题。从数值分析和实验测量两方面分析了被湍流大气退化的光斑的形变特征,引入了对应于工程上最大作用面积和实际作用效果的应用的最大光斑半径和占空比,由于这些参量直接联系到工程应用并且比通常所用的有效光斑半径容易准确测量,作者推荐在进行湍流大气中光传播实验结果的分析处理时使用最大光斑半径和占空比以取代有效光斑半径。最后根据数值计算的结果提出了湍流大气对光场的局域会聚作用及其潜在的意义。

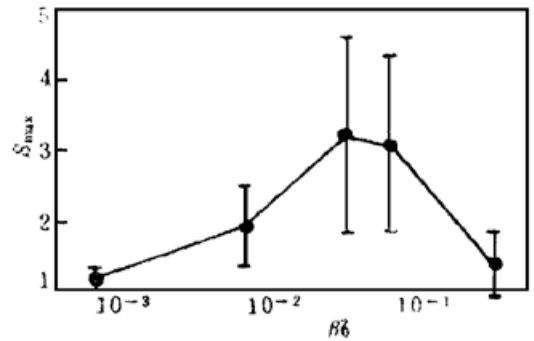


Fig. 6 The ratio between the peak intensities in the turbulence and in vacuum as a function of the scintillation index: numerical results

## 参 考 文 献

- [1] Ishimaru, The beam case, *Laser Beam Propagation in the Turbulent Atmosphere*, edited by Stroherben, Berlin, Spring-Verlag, 1978: 129~ 170
- [2] V. P. Aksenov, K. S. Gochelashvily, V. I. Shishov, Spatial spikes of laser irradiance propagating over

large distance in a turbulent medium. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(5) : 1172~ 1177

- [3] S. M. Flatte, J. M. Martin, Intensity images and statistics from numerical simulation of wave propagation in 3-D random media. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(11) : 2111~ 2126

## Atmospheric-Turbulence-Degraded Light Intensity Images: Size Measurement and Description of Deformation Characteristics

Rao Ruizhong      Wang Shipeng      Liu Xiaochun

(*Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031*)

(Received 27 October 1996)

**Abstract** Basing on the space distribution characteristics of the long-term light image in the turbulent atmosphere the background signal of a CCD imaging system can be determined accurately, and then we can measure the image size accurately with the CCD imaging system. The maximal radius and space filling ratio related to engineering applications are introduced for the description of the deformation characteristics of the light image degraded in the turbulent atmosphere by analyzing both simulation data and experimental data. Finally we mentioned the phenomenon of the enhancement of light intensity in certain regions in the simulated images and its potential importance.

**Key words** light propagation, atmosphere turbulence, light image size and characteristics.