

文章编号: 0258-7025(2005)01-0053-06

湍流大气中准直激光束的 Strehl 比与锐度

饶瑞中

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学研究室, 安徽 合肥 230031)

摘要 利用数值方法研究了各种起伏条件下湍流大气中准直激光束的短曝光光斑特征, 分析了 Strehl 比、能量 Strehl 比、峰值 Strehl 比和锐度 (Sharpness) 的统计特征, 探讨了它们描述光斑质量的适用性。结果表明, 能量 Strehl 比适于描述光斑的整体集中质量, 而锐度能很好地反映局域内能量集中程度, 可作为描述短曝光光斑质量的评价参量。不同光传播起伏条件下湍流大气中准直激光束的短曝光光斑的统计特征表明, 湍流有助于提高准直光束的局域能量集中程度。

关键词 大气光学; 光传播; 光斑质量; 数值模拟

中图分类号 TN 012 **文献标识码** A

Strehl Ratios and Sharpness of Collimated Laser Beam in a Turbulent Atmosphere

RAO Rui-zhong

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

Abstract Some parameters for describing optical qualities of a short-term beam pattern of a collimated laser beam propagating through a turbulent atmosphere are evaluated for a series of numerically-generated patterns. These parameters include the on-axis, peak, and energy Strehl ratios and the sharpness. Their statistical characteristics are analyzed and the validity of these parameters for describing optical qualities of the beam pattern is discussed. Main results could be summarized as follows. The energy Strehl ratio could reflect the energy concentration of the whole beam; the sharpness well reflects the energy concentration in a local area, and could be used for describing the optical quality of laser beam in the turbulence. Generally the turbulence is benefit for promoting the pattern sharpness.

Key words atmospheric optics; light propagation; optical quality; numerical simulation

1 引言

激光在湍流大气中传播时光强空间分布即光斑形状发生畸变^[1~3], 光学质量发生改变。描述光学质量一般使用所谓的 Strehl 比的参量, 即在传播光轴上湍流大气中的光强与真空中光强的比值。由于湍流大气中光斑的随机分布, 使得该参数具有较大的随意性, 故在实际应用中, 往往采用一种能量 Strehl 比, 即一定面积内湍流大气中的能量与真空中该面积内的能量的比值^[4,5]。后一种方法虽在一

定程度上比前一种减少了随机性, 但能否反映真正的光学质量, 需要经过验证。

本文利用数值方法研究不同光传播起伏条件下湍流大气中准直激光束的短曝光光斑特征, 分析光斑的 Strehl 比、能量 Strehl 比以及峰值 Strehl 比和锐度的统计特征, 根据它们之间的相互关系探讨它们描述光斑质量的合适性, 进而研究光斑质量与光传播起伏条件的关系。

收稿日期: 2003-08-18; **收到修改稿日期**: 2003-11-10

基金项目: 国家 863 计划资助项目。

作者简介: 饶瑞中(1963—), 男, 中国科学院安徽光学精密机械研究所研究员, 博士, 主要从事激光大气传输研究工作。

E-mail: rao@aiofm. ac. cn.

2 湍流大气中准直激光束传播的数值模拟

将准直激光束在湍流大气中产生的短曝光光斑作为对象,用数值模拟方法对其进行研究^[3]。发射光束的波长 λ ,束腰 w_0 ,传输距离 L ,湍流路径上的随机相位屏数目,垂直于传播方向的计算网格数目,网格宽度,湍流谱,内外尺度,折射率结构常数 C_n^2 以及表征综合传播起伏条件的闪烁指数 $\beta^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ 的值(分别对应于微弱起伏条件、弱起伏条件和近饱和起伏条件)等详细的模拟参数见表1。以上有关计算参数的选取依据参考文献[6]。

表1 光传播数值计算的参数

Table 1 Parameters used for numerical simulation of light propagation in turbulence

Wave type	Gaussian beam
Wavelength / μm	0.6328
Beam waist /mm	30
Propagation path /m	1000
Grid point number	256 \times 256
Phase screen number	20
Grid interval /mm	0.5
Turbulence spectrum	von Karman
Inner scale /mm	1
Outer scale /m	10
C_n^2	$10^{-15}, 10^{-14}, 10^{-13}$
Scintillation index	0.056, 0.56, 5.62

对每种起伏条件实现了1024次随机传播,计算了光斑的特征参量,包括Strehl比、能量Strehl比以及峰值Strehl比和锐度。通常所说的Strehl比和峰值Strehl比分别是在传播光轴上湍流大气中

的光强、峰值光强与真空中光强的比值

$$\text{Strehl } 0 = I(0,0)/I_{\text{vacuum}}(0,0), \quad (1)$$

$$\text{Strehl } M = I_{\text{max}}/I_{\text{vacuum}}(0,0). \quad (2)$$

通常使用的一种能量Strehl比是在衍射极限范围内实际能量与真空中理论能量的比值。对于高斯光束,将此范围选定为真空中光束半径 w 内的面积,则

$$\text{Strehl } E = \iint_{x^2+y^2 \leq w^2} I(x,y) dx dy / \iint_{x^2+y^2 \leq w^2} I_{\text{vacuum}}(x,y) dx dy. \quad (3)$$

另一种描述光斑质量的参量为光斑锐度(sharpness),其定义为^[7]

$$\text{Shp} = \iint I^2(x,y) dx dy / \iint I_{\text{vacuum}}^2(x,y) dx dy. \quad (4)$$

从(3)和(4)式可以看出,空间各位置的光强对能量Strehl比的贡献与光强本身成正比,而对锐度的贡献与光强的平方成正比,所以光强大的区域对锐度的贡献比对能量Strehl比的贡献更大,从而使锐度值更多地反映了大光强的局域特性。

3 光斑Strehl比和锐度的统计特征

图1绘出了闪烁指数分别为0.056, 0.56, 5.62三种起伏条件下Strehl比、能量Strehl比、峰值Strehl比以及锐度的频数分布。表2列出了它们的均值与起伏均方根。在 $\beta^2 = 0.056$ 的微弱起伏下,各参量都在单位值附近很小的范围内变化。可以推断,在极弱的起伏条件下,该分布关于单位值对称,但其均方根也将趋于零。随着起伏条件的增强,频数分布偏离单位值,而且均方根也越来越大。

表2 不同起伏条件下光斑轴上、峰值、能量Strehl比及锐度的平均值和均方根

Table 2 Mean and standard deviation of the on-axis, peak, and energy Strehl ratio and the sharpness under different fluctuation conditions

β^2	Strehl 0		Strehl M		Strehl E		Sharpness	
	Mean	Deviation	Mean	Deviation	Mean	Deviation	Mean	Deviation
0.056	0.9740	0.1585	1.1262	0.1418	0.9954	0.0140	1.0199	0.0696
0.560	0.9118	0.4589	1.7434	0.5235	0.9638	0.0457	1.1951	0.2738
5.620	0.4904	0.6254	3.4825	1.6070	0.7096	0.1368	1.4828	0.6478

Strehl比的平均值随着起伏条件的增强从单位值迅速下降,在 $\beta^2 = 5.62$ 时,出现频率最大的值约为0.1。能量Strehl比的平均值随着起伏条件的增强也从单位值下降,但下降速度很慢,在 $\beta^2 = 5.62$ 时,出现频率最大的值才0.8左右,其均值也才降到

0.71。峰值Strehl比随着起伏条件的增强从单位值迅速上升,在 $\beta^2 = 5.62$ 时,出现频率最大的值达2.2左右,其均值达到3.5,可能出现的最大值已达到10。锐度随起伏条件的变化与峰值Strehl比随起伏条件的变化十分相似,只不过变化的幅度要小。

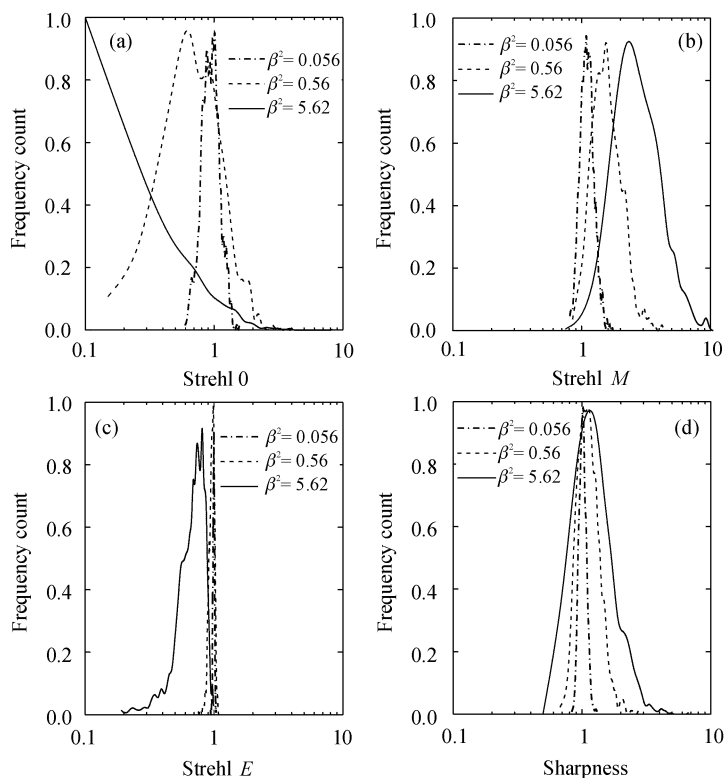
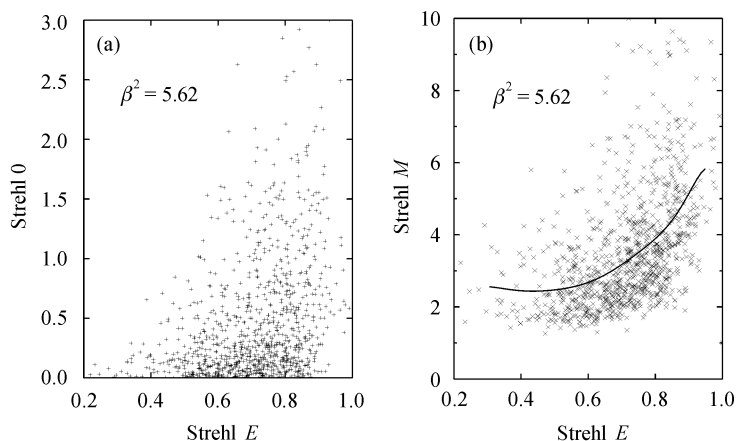


图 1 不同起伏条件下轴上、峰值和积分 Strehl 比值及锐度的频数分布

Fig. 1 Normalized distribution of frequency counts for the on-axis, peak, and energy Strehl ratio and sharpness of laser beam patterns in a turbulent atmosphere

图 2 在 $\beta_0^2 = 5.62$ 条件下光斑 Strehl 比、峰值 Strehl 比与能量 Strehl 比的关系Fig. 2 Relationships between the on-axis, the peak Strehl ratio and the energy Strehl ratio of laser beam patterns under $\beta_0^2 = 5.62$

在 $\beta_0^2 = 5.62$ 时,其均值达到 1.5,可能出现的最大值达到 4。

从各参量的统计特征可见,湍流中的光斑特征变化十分剧烈,随着起伏条件的增强,其发散性很大。假如以上各参量可以衡量光斑质量,则以 Strehl 比而言,光斑随起伏条件的增强迅速恶化;以能量 Strehl 比而言,光斑随起伏条件的增强略有恶

化;而若以峰值 Strehl 比而言,光斑随起伏条件的增强而迅速优化;若以锐度而言,光斑随起伏条件的增强而有一定程度的优化。结论各不相同,因此,哪一个参量能恰当地描述湍流在短时间内的影响需要经过认真的分析。下面首先探讨各参量之间的相互关系。

图 2 绘出了在 $\beta_0^2 = 5.62$ 条件下随机实现的

1024 幅光斑的 Strehl 比、峰值 Strehl 比与能量 Strehl 比的关系。Strehl 比与能量 Strehl 比之间的关系十分模糊,数据离散性很大,基本上不存在相互联系。而峰值 Strehl 比与能量 Strehl 比之间存在一种虽然比较模糊但可分辨的关系:随能量 Strehl 比的增大峰值 Strehl 比迅速增大。基本上所有的峰值 Strehl 比都大于单位值。

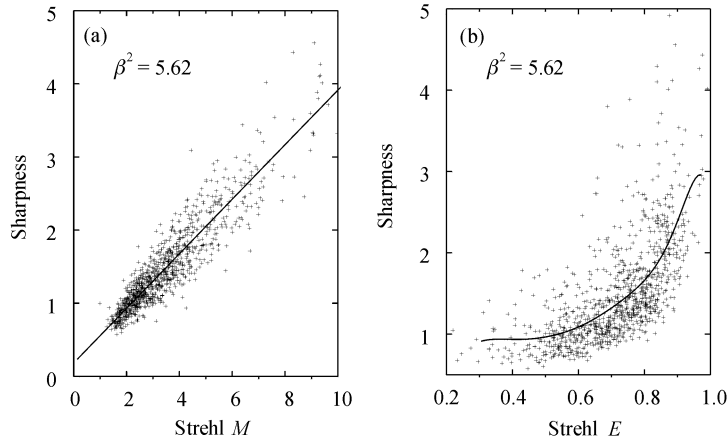


图 3 $\beta^2 = 5.62$ 条件下光斑锐度与能量 Strehl 比、峰值 Strehl 比的关系

Fig. 3 Relationship between the sharpness and the peak, the energy Strehl ratios of laser beam patterns under $\beta^2 = 5.62$

4 用光斑锐度和 Strehl 比评价光斑质量的分析

从上一节各参量的统计特征及其相互关系可以看出,Strehl 比和其他参量间没有必然的联系,其随机性大,不适合描述光斑质量。能量 Strehl 比、峰值 Strehl 比和锐度三者间有内在的联系。能量 Strehl 比较为稳定,随起伏条件的增加而稳步减小,符合通常“湍流退化光斑质量”的认识。峰值 Strehl 比和锐度随起伏条件的增加而增大,违背了通常“湍流退化光斑质量”的认识。二者之间很好的线性关系说明它们反映了相同的实质问题,而峰值 Strehl 比的变化幅度太大,夸大了它所反映的问题。因此二者比较而言,锐度是合适的选择。因此,应在能量 Strehl 比与锐度之间分析光斑质量问题。

以光斑的实际分布说明问题,在 $\beta^2 = 5.62$ 条件下光斑畸变现象严重,随机实现的 1024 幅图像丰富多彩,体现了各种光强空间分布情况。其中连续随机实现的 20 幅湍流中的光斑(序号 1~20)和真空中的光斑(序号 0)的轴上、峰值和能量 Strehl 比及锐度列于表 3。作为参考,表中同时列出了真空中光束半径对应的面积内的能量占总能量的百分比。图 4 绘出了真空光斑和 3 幅湍流光斑的三维立

图 3 绘出了在 $\beta^2 = 5.62$ 条件下随机实现的 1024 幅光斑的锐度与峰值 Strehl 比、能量 Strehl 比的关系。锐度与峰值 Strehl 比之间存在明显的线性关系。锐度与能量 Strehl 比之间也存在一种比较明显的非线性关系:随能量 Strehl 比的增大锐度迅速增大。有一定数量的锐度值比小于单位值。

体图像,分别对应于表 3 中序号 0,1,5,12,各光斑的光强以真空光斑的峰值光强进行归一化。

光斑 1 破碎严重,它的能量 Strehl 比(0.46)及锐度(0.73)都小于单位值,直观上看,它的光学质量比真空光斑差得多。光斑 5 出现一个大的峰值,它的能量 Strehl 比(0.62)小于单位值,说明真空光束半径范围内的能量集中度比真空光斑差;而它的锐度(1.40)大于单位值,直观上看,光强峰值周围一定范围内的功率密度远大于真空光斑的功率密度。而光斑 12 出现多个较大的峰值,它的能量 Strehl 比(0.81)小于单位值,但比光斑 5 的值大,说明真空光束半径范围内的能量集中度比光斑 5 好,这可以从图中直接看出;而它的锐度(2.00)大于单位值,同时大于光斑 5 的值。从能量集中的整体角度来看,光斑 12 的质量要优于光斑 5。

通过对大量光斑的直观检查,发现图 4 的几幅光斑具有很好的代表性。峰值光强出现的位置附近一定范围内的光强也比较大,能量相对集中,所以峰值 Strehl 比以及锐度能很好地反映局域内能量集中程度:锐度(峰值 Strehl 比)越大,局域光斑能量集中度越高。锐度优于峰值 Strehl 比的原因在于:峰值 Strehl 比只考虑了一个最大光强的贡献,具有一定的发散性;而锐度则考虑了多个光强极值的贡

献,具有一定的整体意义。因为能量守恒,能量的局域集中必然使整体光束的能量集中程度受到影响,

所以较强的湍流一般使得整体光束的能量集中度下降,能量 Strehl 比也恰当地反映了这一光学质量。

表 3 $\beta_0^2=5.62$ 时的光斑特征参量:轴上、峰值和积分 Strehl 比值及锐度

Table 3 Characteristic parameters of laser beam patterns in the turbulence under $\beta_0^2=5.62$: on-axis, peak, and energy Strehl ratios and the sharpness. Percent means the percentage of the energy contained in the laser beam radius

No.	Strehl 0	Strehl M	Percent /%	Strehl E	Sharpness
0	1	1	86.0089	1	1
1	0.1427	1.8520	39.5778	0.4602	0.7348
2	0.0637	2.4262	61.0684	0.7100	1.1298
3	0.3136	2.5817	62.8533	0.7308	1.2071
4	1.3457	2.6510	49.9469	0.5807	1.2721
5	1.5952	4.1493	53.1629	0.6181	1.3979
6	0.0501	2.8968	68.6984	0.7987	1.3475
7	2.4900	2.8415	68.9955	0.8022	1.5114
8	0.9427	2.7522	66.6344	0.7747	1.4219
9	0.0036	2.4903	51.9058	0.6035	0.9981
10	1.1133	3.2697	61.9858	0.7207	1.3471
11	1.2380	2.1968	63.4448	0.7377	1.1670
12	0.9637	3.7043	69.7334	0.8108	2.0011

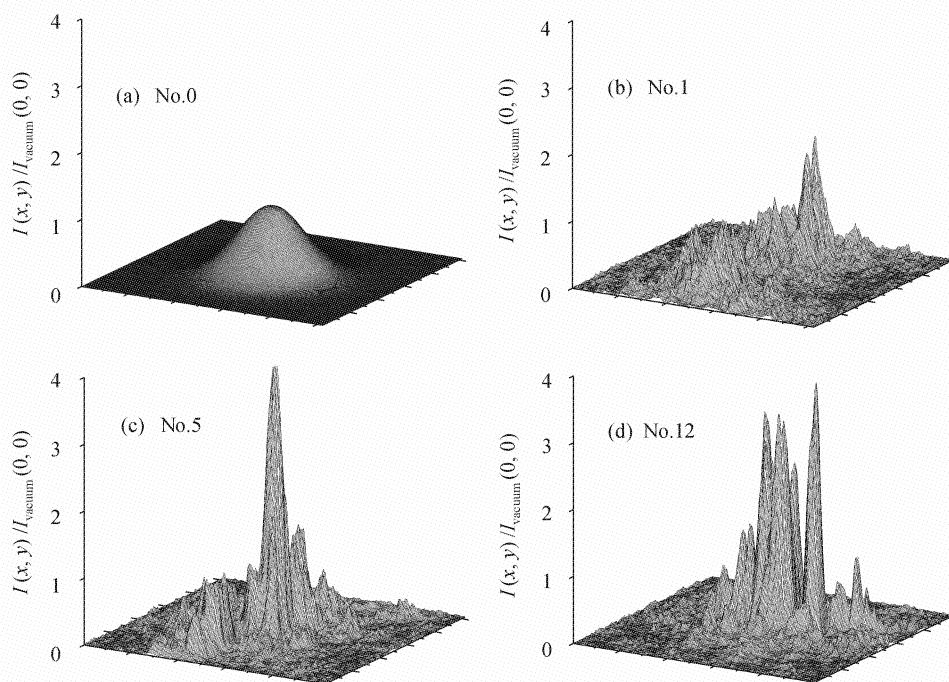


图 4 真空中的光斑(序号 0)和 $\beta_0^2=5.62$ 时湍流中的光斑(序号 1,5,12)

Fig. 4 Laser beam patterns in the vacuum, No. 0, and in a turbulent atmosphere under $\beta_0^2=5.62$: No. 1, 5, and 12

如果激光大气传输的实际应用仅着眼于光强的直接作用,当实际光强接近有关光强阈值时,提高以能量 Strehl 比描述的整体能量集中程度可能需要艰苦的努力,而较强的湍流却能助一臂之力,在局域内以较大的几率将功率密度大大提高,从而突破阈

值,实现应用目的。以光斑锐度作为参考,当 $\beta_0^2=0.056$ 时,有 59%(606/1024)的光斑的局域能量集中度得到微弱提高;当 $\beta_0^2=0.56$ 时,有 76%(774/1024)的光斑的局域能量集中度得到明显提高;而当 $\beta_0^2=5.62$ 时,有 79%(808/1024)的光斑的局域能

量集中度得到显著提高。所以从统计的角度来看,随着起伏条件的增加,湍流明显有助于准直光束局域能量集中度的改善。

5 结 论

利用数值方法研究了不同光传播起伏条件下湍流大气中准直激光束的短曝光光斑特征,分析了 Strehl 比、能量 Strehl 比、峰值 Strehl 比和锐度的统计特征,探讨了它们描述光斑质量的适用性。得到以下初步结果:

1) Strehl 比的随机性大,不适合描述光斑质量;峰值 Strehl 比虽能描述光斑的局域能量集中度,但其发散性大,也不适合描述光斑质量;而能量 Strehl 比适于描述光斑的整体能量集中度。

2) 锐度能很好地反映局域内能量集中程度,可作为描述湍流光斑质量的评价参量。

3) 湍流有助于改善局域内能量集中程度,在激光大气传输的实际应用中可考虑加以利用。

参 考 文 献

- 1 J. W. Strohbehn. *Laser Beam Propagation in the Atmosphere* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978. 129~168
- 2 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
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
- 3 Rao Ruizhong. Pattern characteristics of collimated lasers beam in a turbulent atmosphere. I. Characteristics Radii [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):889~894
饶瑞中. 湍流大气中准直激光束的光斑特征 I. 特征半径[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10):889~894
- 4 R. K. Tyson. *Principle of Adaptive Optics* [M]. 2nd ed.. Boston: Academic Press, 1997. 7~8
- 5 Du Xiangwan. Factors for evaluating beam quality of a real high power laser on target surface in far field [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(4):327~332
杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(4):327~332
- 6 S. M. Martin, M. Flatté. Intensity images and statistics from numerical simulation of wave propagation in 3-D random media [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(11):2111~2126
- 7 R. A. Muller, A. Buffington. Real-time correction of atmospherically degraded telescope images through image sharpening [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**(9):1200~1210