

文章编号: 1001-4322(2002)01-0041-04

激光空间相干性对照明均匀性的影响*

万 敏, 张 卫, 向汝建, 杨 锐

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 研究了激光相干性对照明均匀性的影响, 为照明激光器的选择提供了理论参考。其中, 部分相干高斯光束分解为模式间相互独立的厄米-高斯光束的叠加, 采用相位屏的近似处理方法对激光通过大气湍流的传输进行计算模拟。数值模拟的结果表明: 当照明光束的空间相干性降低时, 其照明均匀度逐步提高。因此对于照明激光器而言, 选择空间相干性较差的激光器对其照明均匀度更加有益。

关键词: 空间相干性; 照明均匀性; 大气湍流

中图分类号: TN 248 **文献标识码:** A

激光束在大气传输过程中, 由于大气湍流的影响, 传输光束的波前将随机起伏, 引起光束抖动、强度起伏(闪烁)、光束扩展和像点抖动^[1]。

基于实际主动照明跟踪的需要, 美国有关实验室开展了一系列单、多束激光照明的大气闪烁效应的实验研究和理论模拟研究工作, 这些研究结果都表明, 3 到 4 束非相干激光束照明, 降低了大气闪烁效应的程度, 提高了照明均匀性^[2]。这是由于非相干束的强度叠加, 平滑掉了部分湍流引起的强度起伏。由此我们可以推断, 相干性不同的两束光, 分别用作照明激光, 在相同的湍流强度下, 其目标光强均匀度将会由于相干性的不同而有所不同。为了了解相干性对照明均匀性的影响, 从而为照明激光器的选择提供理论参考, 我们将就光束相干性和照明均匀性之间的关系作理论上的探讨。

1 部分相干光的模分解

激光的相干性包括其空间相干性和时间相干性^[3], 本文将就光束的空间相干性问题进行探讨。光束的空间相干性和它的方向性(用光束发散角描述)紧密联系^[3]。众所周知, 只要可饱和增益介质的存在, 在激光器中就会导致许多横模同时振荡^[4]。不同模式的光波场是非相干的。由于多横模意味着方向性变差(高次模发散角加大), 这表明, 激光的方向性越好, 它的空间相干性程度就越高。

多模光学谐振腔输出的光束可由模式间互不相干的厄米-高斯光束或拉盖尔-高斯光束基底叠加而成。由于作为基底的光束的模式间相互独立, 而导致了所叠加的光束为部分相干光束。因而部分相干光可分解为厄米-高斯光束的叠加。

设部分相干高斯光束的光强分布为

$$I(x, y) = I_0 \exp\left[-2 \frac{x^2 + y^2}{r_0^2}\right] \quad (1)$$

式中: I_0 为常数; r_0 为光束的束腰半径。令部分相干光分解为厄米-高斯光束的叠加, 在笛卡尔坐标系下, $z = 0$ 处的厄米-高斯光束的正交归一化场振幅分布为^[3]

$$\Psi_{mn}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2^m m!}} \frac{1}{\sqrt{2^n n!}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_0} H_m\left(\frac{\sqrt{2}}{w_0} x\right) H_n\left(\frac{\sqrt{2}}{w_0} y\right) e^{-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}} \quad (2)$$

式中: w_0 为厄米-高斯光束的束腰半径。则部分相干光光强分布可表示为

$$I(x, y) = \sum_{m, n=0}^{\infty} |C_{mn}|^2 \Psi_{mn}^2(x, y) \quad (3)$$

* 收稿日期: 2001-06-21; 修订日期: 2001-08-16

基金项目: 中国工程物理研究院基金资助课题(20000444)

作者简介: 万 敏(1970-), 女, 博士, 主要从事光学技术方向的研究; 绵阳 919-1012 信箱。

其中模权重系数 $|C_{mn}|^2$ 由多模激光的 M^2 因子确定^[5]

$$|C_{mn}|^2 = |C_m|^2 |C_n|^2 \quad (4)$$

$$|C_m|^2 = \left\{ \frac{2}{M_x^2 + 1} \right\} \left\{ \frac{M_x^2 - 1}{M_x^2 + 1} \right\}^m \quad (5)$$

$$|C_n|^2 = \left\{ \frac{2}{M_y^2 + 1} \right\} \left\{ \frac{M_y^2 - 1}{M_y^2 + 1} \right\}^n \quad (6)$$

而作为部分相干高斯光束的基底光的厄米-高斯光束, 其束腰半径 w_0 与部分相干高斯光束束腰半径 r_0 的关系为^[6]

$$w_0 = \sqrt{r_0^2 / M^2} \quad (7)$$

部分相干光在一定的近似条件下可用高斯-谢尔模型光束描述, 高斯-谢尔模型光束的 M^2 因子为

$$M^2 = \sqrt{1 + r_0^2 / \sigma_0^2} \quad (8)$$

式中: σ_0 为部分相干光的相干长度, 因此, 由部分相干光的 M^2 因子可得到其相干长度, M^2 因子越大, 相干长度越短, 也即光束的相干性越差。

2 激光的大气湍流模型及模拟计算方法

大气不是均匀的光学介质, 其温度、湿度和压力在小范围和短时间内是快速随机变化的, 因而大气折射率也随机变化, 使得通过大气传输的光束产生闪烁。由于湍流是一种随机起伏, 因此湍流理论本质上是统计性的。对折射率起伏较精确的描述为 Von-Kaman 谱密度函数^[5]

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033 C_n^2 (\kappa_0^2 + \kappa^2)^{-11/6} \exp(\kappa / \kappa_w) \quad (9)$$

式中: C_n^2 是大气湍流折射率结构常数; κ 为湍流空间波数; $\kappa_0 < \kappa < \kappa_w$, $\kappa_0 = 2\pi / L_0$, $\kappa_w = 5.92 / l_0$, l_0 和 L_0 分别为湍流的内尺度与外尺度, 湍流外尺度 L_0 一般为观测点高度量级(后文计算取 $L_0 = 10\text{m}$), 湍流内尺度 l_0 在 $1 \sim 10\text{mm}$ 。因此 $\kappa \ll \kappa_w$, $\exp(\kappa / \kappa_w) \approx 1$ 。

由湍流造成的相位畸变为^[7]

$$\Gamma(x, y) = \sqrt{2\pi z} k \int d\kappa_x \exp(i\kappa_x x) \int d\kappa_y \exp(i\kappa_y y) a(\kappa_x, \kappa_y) \Phi_n^{1/2}(\kappa_x, \kappa_y) \quad (10)$$

式中: z 为传输距离, $k = 2\pi / \lambda$, λ 为波长, $a(\kappa_x, \kappa_y)$ 为二维复随机函数, 由于 $\Gamma(x, y)$ 为实函数, 因此 $a(\kappa_x, \kappa_y)$ 必满足 $a^*(-\kappa_x, -\kappa_y)$ 。

采用相位屏的近似处理方法对激光通过大气湍流的传输进行计算模拟, 方法如下: 将传输路径分为 n 段, 每一段传输距离为 $\Delta z = z/n$; 在每一段中, 近似将本段大气湍流对激光造成的相位畸变作为一相位屏放在本段的中间, 即光束在经过 $\Delta z/2$ 距离的真空传输后, 在其相位上加上本段大气湍流造成的相位畸变, 再对光束作距离为 $\Delta z/2$ 的真空传输, 即可完成本段传输。

3 激光相干性对照明均匀性影响的模拟计算与分析

反映光强度起伏的量是为强度起伏方差, 即闪烁率 $\sigma_I^2 = \frac{I^2 - \bar{I}^2}{\bar{I}^2}$, 这里 \bar{I} 表示取平均值^[8]。我们以 σ_I^2 来表征照明光束的均匀度。

计算条件为: 设激光波长为 $0.53\mu\text{m}$, 发射口径为 50cm , 传输距离 10km (准直传输), 大气湍流折射率结构常数 $C_n^2 = 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$, 大气湍流外尺度 $L_0 = 10\text{m}$, 内尺度 $l_0 = 0$ 。令 $M^2 = M_x^2 = M_y^2$, 当 M^2 因子分别为 $1, \dots, 6$ 时, 计算得照明光束的均匀度 σ_I^2 。由下表可知, 当照明光束的空间相干性降低时, 其照明均匀度逐步提高。

如图 1 中 (a)~(e) 为照明激光 M^2 因子分别为 $1, \dots, 6$ 时在 10km 处的光斑强度分布图。可见, 在同样的大气湍流条件下, 空间相干性差的照明光束在目标处得到的照明光斑更加均匀。

表 1 σ_I^2 随 M^2 因子的变化

Table 1 σ_I^2 vs M^2 factor

M^2	1	2	3	4	5	6
σ_I^2	2.05	1.35	1.00	0.80	0.69	0.65

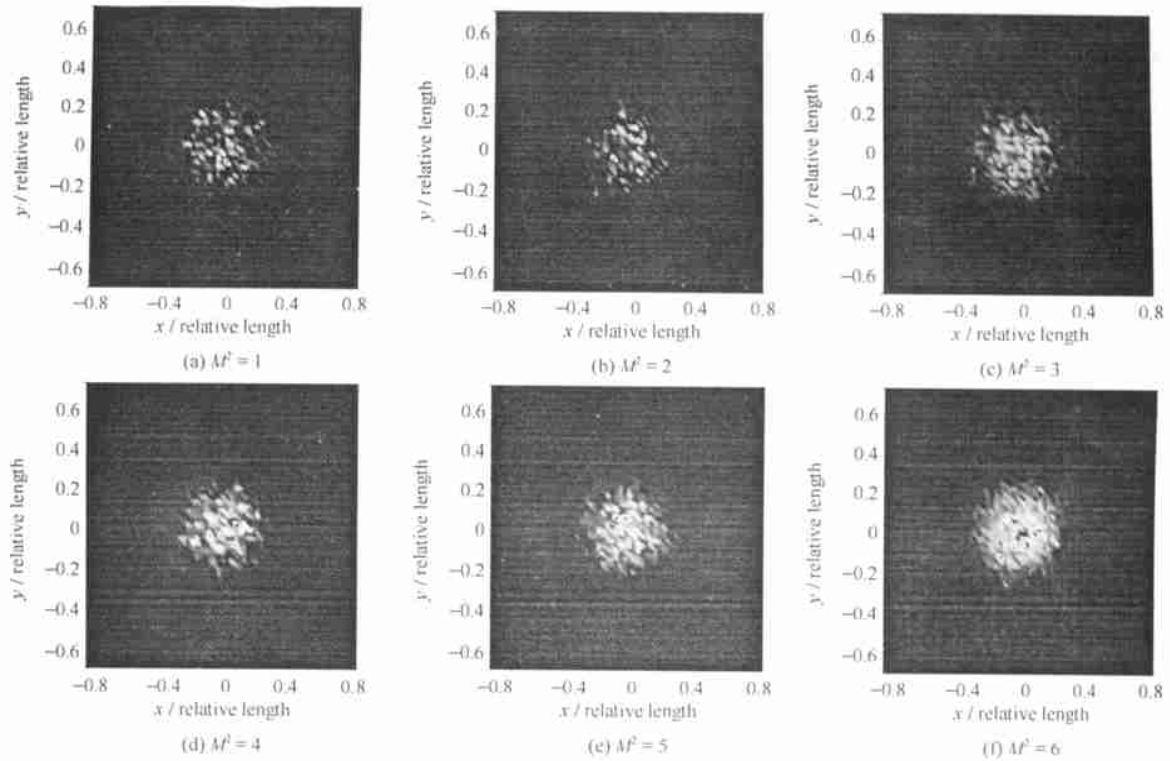


Fig. 1 Intensity distribution of illumination beam

图 1 照明光斑强度分布

4 结 论

数值模拟计算的结果表明, 照明激光在目标上的光强均匀度将会由于其空间相干性的退化而有所提高。在同样的大气湍流条件下, 空间相干性差的照明光束在目标处得到的照明光斑更加均匀。因此对于照明激光器而言, 选择空间相干性较差的激光器对其照明均匀性更加有益。

参考文献:

- [1] 张逸新, 迟泽英 光波在大气中的传输与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997. (Zhang Y X, Chi Z Y. Wave propagation and imaging in the atmosphere Beijing: National Defense Industrial Press, 1997)
- [2] Higgs C, Barclay H, Kinsky J, et al Adaptive optics compensation using active illumination[A]. SPIE[C]. Washington: SPIE Press 1998, 3381: 47—56
- [3] 周炳琨, 高以智, 陈家骅, 等 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984. (Zhou B K, Gao Y Z, Chen J H, et al Laser Theory. Beijing: National Defense Industrial Press, 1984)
- [4] 庄 琦, 桑凤亭, 周大正 短波长化学激光[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997. (Zhuang Q, Sang F T, Zhou D Z Shortwavelength chemical laser Beijing: National Defense Industrial Press, 1997)
- [5] 吕百达 强激光的传输与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. (L ü B D. Propagation and control of high-power laser Beijing: National Defense Industrial Press, 1999)
- [6] 楚晓亮, 张 彬 部分相干高斯光束的 M^2 因子及模系数[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(6): 670—672 (Chu X L, Zhang B. M^2 -factor and mode coefficients of partially coherent gaussian beams High power laser and particle beams, 2000, 12(6): 670—672)
- [7] Fleck J A, Morris J R, Feit M D. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere[J]. Applied Physics, 1976, 10: 129—160

- [8] Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media[M]. Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1998.

Influence of laser spatial coherence on illumination uniformity

WAN Min, ZHANG Wei, XIANG Ru-jian, YANG Rui

(Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1012, Mianyang 621900, China)

Abstract The influence of laser spatial coherence on illumination uniformity is studied in this paper. Partially coherent Gaussian beam is expanded into an independent superposition of Hermite-Gaussian modes. The coherence length of partially coherent Gaussian beam can be derived from its M^2 factor. The larger the M^2 factor, the shorter the coherence length. Propagation of laser beam through atmospheric turbulence is treated with phase screen approximation. The uniformity of illumination beam is expressed by σ_x^2 . σ_x^2 of partially coherent beam with different M^2 factor is computed after propagation through atmospheric turbulence. The results of numerical simulation show that illumination uniformity is improved with the decrease of illumination laser spatial coherence.

Key words spatial coherence; illumination uniformity; atmospheric turbulence