

文章编号: 1001-3806(2003)04-0334-03

## 激光空间相干性对照明均匀性影响的实验研究\*

李宾中<sup>1,2</sup> 吕百达<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064) (<sup>2</sup>川北医学院物理教研室, 南充, 637007)

万 敏 李国会 郑 捷 张 卫

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳, 621900)

**摘要:** 对激光束空间相干性对照明均匀性的影响进行了实验研究。实验结果表明, 激光束的空间相干性与照明均匀性具有密切的关系, 当激光束空间相干性降低时, 目标上照明光斑的闪烁率和功率谱密度也下降, 激光照明的均匀性得到提高。所得结果对实际工作中照明激光器的选择是有用的。

**关键词:** 照明均匀性; 照明激光; 空间相干性; 闪烁率; 功率谱密度

中图分类号: TN248 文献标识码: A

## Experimental study of the influence of laser spatial coherence on illumination uniformity

Li Binzhong<sup>1,2</sup>, L Baida<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

(<sup>2</sup> Department of Physics, North Sichuan Medical College, Nanchong, 63700)

Wan Min, Li Guohui, Zheng Jie, Zhang Wei

(Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang, 621900)

**Abstract:** The experimental study of the influence of laser spatial coherence on illumination uniformity is made. It is shown that the coherence property of laser affects the illumination uniformity. The scintillation index and the power spectral density of the illumination spot on the target decrease with decreasing spatial coherence of laser beams. As a result, the illumination uniformity can be improved. The experimental results obtained in this paper are useful for appropriately choosing the laser illuminator in practice.

**Key words:** illumination uniformity; laser illuminator; spatial coherence; scintillation index; power spectral density

### 引 言

激光束在大气传输过程中, 由于大气湍流(大气折射率起伏)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<sup>[1,2]</sup>。大气湍流导致的最常见且明显的光传输效应是光闪烁, 它是由于同一光源发出的通过略有不同路径的光之间随机干涉的结果<sup>[1~3]</sup>。

基于主动照明跟踪的需要, 国际上开展了一系列单束和多束激光照明大气闪烁效应的实验研究和

理论模拟研究工作<sup>[4~7]</sup>。结果表明, 多束激光非相干照明时, 照明光斑的强度分布均匀性较单束照明时显著提高。由此推断, 激光束相干性与照明均匀性之间存在着物理上的联系。在本文中, 通过激光照明实验, 探讨激光束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参考。

### 1 基本理论

光波在大气中传输时, 将经历强度起伏(闪烁), 它是由于大气中小范围和短时间内的温度、湿度和压强的随机变化而导致大气折射率起伏(光学湍流)引起的。大气折射率起伏功率谱密度可采用 von Karman 模型<sup>[1]</sup>:

$$\Phi_h(k) = 0.033 C_n^2 (k_0^2 + k^2)^{-11/6} \exp \frac{k^2}{k_m^2} \quad (1)$$

式中,  $C_n^2$  为大气折射率结构参数, 它表征大气湍流

\* 国家高技术激光技术青年科学基金资助课题及中国工程物理研究院基金资助项目。

作者简介: 李宾中, 男, 1965 年 1 月出生。博士, 副教授。现从事光学与激光的教学和科研工作。

收稿日期: 2002-11-26; 收到修改稿日期: 2003-01-27

的强弱,其典型取值范围是  $10^{-17} \text{ m}^{-2/3} \sim 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ ;  $k$  为湍流空间波数,  $k_m = 5.92/l_0$ ,  $k_0 = 2\pi/L_0$ ,  $k_0 < k < k_m$ ,  $l_0$  和  $L_0$  分别是湍流的内尺度和外尺度。

理论和实验上对强度起伏的研究通常用闪烁率来表征<sup>[3]</sup>:  $\sigma_I^2 = \langle I^2 \rangle / \langle I \rangle^2 - 1$  (2) 式中,  $I$  为光波强度, 角括号表示系综平均, 或等效地, 为长时间平均。

此外, 在实际应用中, 也常采用功率谱密度 (PSD)<sup>[9]</sup> 以表示信号的起伏程度。一个有限能量信号  $u(x)$  的频率含量可以从相应的傅里叶变换得到。如果信号是周期性的, 能量是无穷大的, 那么它的傅里叶变换不存在。一个平稳随机过程是一个无限大能量信号, 它的傅里叶变换也不存在。但可以把它们表示成傅里叶级数, 以确定在不同离散频率成分上的功率分布。也可以用截尾函数  $u_T(x) = \begin{cases} u(x), & |x| \leq T \\ 0, & |x| > T \end{cases}$  来截取  $u(x)$ , 那么对于  $u_T(x)$  而言是可以进行傅里叶变换的:

$$u_T(f_x) = \int_{-\infty}^{\infty} u_T(x) \exp(i2\pi f_x x) dx = \int_{-T}^T u(x) \exp(i2\pi f_x x) dx \quad (3)$$

信号  $u(x)$  的功率谱密度则定义为:

$$P(f_x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|u_T(f_x)|^2}{2T} \quad (4)$$

从上式可看出, 功率谱密度是一个非负实数。

当实验测出照明光在目标上的光强分布后, 便可由(2)式得出目标上照明光斑的闪烁率, 由(4)式可求出照明光在目标平面上的功率谱密度, 从而确定照明均匀性。

照明光斑的均匀性与多种因素相关, 其中照明激光的相干性与照明光斑的均匀性密切相关。在空间-时间域中, 光场的空间相干性可以用复相干度来表征<sup>[8]</sup>:

$$\gamma(r_1, r_2, \tau) = \frac{\Gamma(r_1, r_2, \tau)}{\sqrt{\Gamma(r_1, r_1, 0) \Gamma(r_2, r_2, 0)}} \quad (5)$$

式中,  $\Gamma(r_1, r_2, \tau) = \langle u^*(r_1, t) u(r_2, t + \tau) \rangle =$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T u^*(r_1, t) u(r_2, t + \tau) dt \quad (6)$$

是光波场  $u(r, t)$  的互相关函数。

由文献[8]可以知道, 双光束干涉图样中某一点  $Q$  的光强为:

$$I(Q) = I^{(1)}(Q) + I^{(2)}(Q) + 2\sqrt{I^{(1)}(Q)I^{(2)}(Q)}|\gamma_{12}(\tau)| \quad (7)$$

式中,  $I^{(1)}(Q)$ ,  $I^{(2)}(Q)$  分别是两束光在  $Q$  点的光强。干涉图样的条纹可见度定义为<sup>[8]</sup>:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (8)$$

如果  $I^{(1)}(Q) = I^{(2)}(Q)$  (即两束光的光强相等), 由(7)式、(8)式即可得:  $V = |\gamma_{12}(\tau)|$  (9)

由上式知, 只要测出光束的干涉图样, 就可确定其条纹可见度, 它等于复相干度的模  $|\gamma_{12}(\tau)|$ , 是表征光束空间相干性的一个物理量。

## 2 实验研究

实验示意图如图 1 所示, 主要有: 照明光源、扩束器、大气、接收屏等 4 部分。

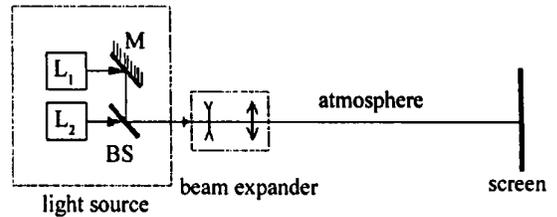


Fig. 1 The experimental set-up for observing the scintillation of laser beam propagation through turbulent atmosphere

在实验室中, 先测量出光源激光束的干涉条纹。光源由两台激光器  $L_1, L_2$  构成, 实验中使用两台 He-Ne 激光器, 并将两束光并合成一束作为光源, He-Ne 激光中心波长 632.8nm, 频宽 3.16MHz, 功率 2mW。实验时, 光源距测量屏约 1m, 可不考虑大气影响, 用 CCD 相机记录下光源在下述 3 种状态下的干涉图样。

$A_1$  状态: 单束激光 ( $L_2$ ) 作为光源 (关  $L_1$ )。

$A_2$  状态: 两束激光 ( $L_1, L_2$ ) 同时开, 在  $L_2$  后加衰减片, 使  $L_1, L_2$  两束光在并合光束中的光功率 2~3 倍, 实验中:  $P_1 = 0.25\text{mW}$ ,  $P_2 = 0.80\text{mW}$ , 以该并合光束作为光源。

$A_3$  状态: 两束激光 ( $L_1, L_2$ ) 同时开, 在  $L_2$  后加衰减片, 使  $L_1, L_2$  两束光在并合光束中的光功率相等; 实验中:  $P_1 = P_2 = 0.25\text{mW}$ , 以该并合光束作为光源。

测出 3 种光源状态下的干涉图样, 算出其条纹可见度  $V$ 。测量结果如表 1 所示。

Table 1 Experimental results of visibility of fringes in three cases of a light source

case of a light source	$A_1$	$A_2$	$A_3$
visibility of fringes ( $V$ )	0.5	0.43	0.37

外场照明实验: 照明光源在 3 种状态下 ( $A_1,$

$A_2, A_3$ ), 通过大气传输到接收屏上, 然后用 CCD 相机记录下屏上的照明光斑。实验中, 光束传输路径下有植被, 光束距地面大约 10m~20m, 传输距离 800m。在光源的 3 种状态下, 分别在照明目标平面上各采集了 20 幅图像。

根据(2)式的定义, 由采集到的照明光斑图即可计算出其光强闪烁率。计算方法如下: 首先读出照明光斑任一点的光强  $I_i(x_i, y_i)$ , 再由(2)式:

$$\sigma_I^2 = \frac{\sum_i I_i^2(x_i, y_i)/N}{(\sum_i I_i(x_i, y_i)/N)^2} - 1 \quad (10)$$

即可算出照明光斑的光强闪烁率, 上式中  $N$  为采样点数。图 2 是光源激光束在 3 种状态下, 光强闪烁

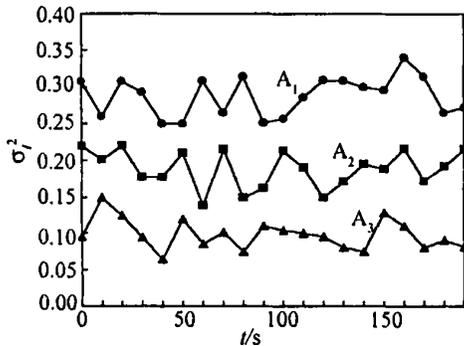


Fig. 2 The scintillation index versus time for three cases  $A_1, A_2$  and  $A_3$  of a light source

率随时间变化的曲线。由图上可看出, 当光源处于  $A_1$  状态( $V=0.5$ )下, 光强闪烁率较大, 并随时间在 0.3 附近起伏; 当光源处于  $A_2$  状态( $V=0.43$ )下, 光强闪烁率降低, 并随时间在 0.2 附近起伏; 而当光源处于  $A_3$  状态( $V=0.37$ )下, 光强闪烁率最小, 并随时间在 0.1 附近起伏。显然, 闪烁率与照明光源光束的空间相干性密切相关。当光源光束的空间相干性较差时, 闪烁率较小, 照明光斑的均匀性较好。

图 3 是光源激光束在 3 种状态下, 照明光斑光强起伏功率谱密度(PSD)分布的曲线。为了减小随机因素对光强起伏功率谱分布的影响, 采用了 Welch<sup>[10]</sup>方法进行平均平滑化处理。由图可知, 照明光强起伏功率谱密度(PSD)与光源光束相干性密切相关。光源光束的空间相干性由好( $V=0.5$ )变差( $V=0.37$ )时, 其 PSD 亦依次减小, 说明照明光斑的均匀性亦随之变好; 这与闪烁率和光源光束相干性变化一致。

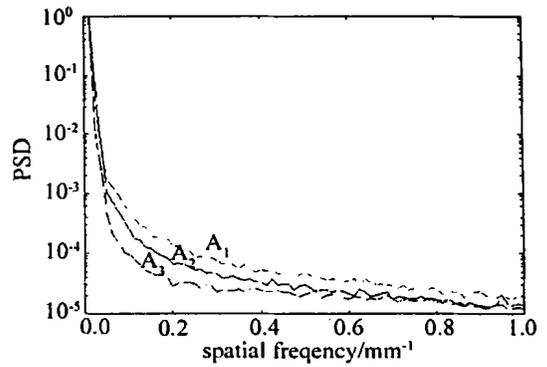


Fig. 3 The power spectral density for three cases  $A_1, A_2$  and  $A_3$  of a light source

### 3 小结

实验结果表明, 照明激光束的空间相干性与照明均匀性具有密切的关系, 当激光束空间相干性下降时, 在目标平面上的照明光斑的光强闪烁率会随之下降, 同时, 照明光强起伏功率谱密度也会随之降低, 这表明照明均匀性提高了。因此, 对于激光照明器而言, 选择空间相干性较差的多束激光对照明均匀性更有利。

在本文中, 仅就照明激光束空间相干性对照明均匀性的影响作了实验上的初步探讨和分析, 在实际工作中, 影响照明均匀性的因素还有很多, 如激光的光束质量、发射系统、以及照明光源是处于聚焦还是发散状态等多种因素, 所涉及的过程较为复杂, 值得做进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media. Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- [2] 张逸新, 迟泽英. 光波在大气中的传输与成像. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [3] Andrews L C, Phillips R L, Hopen C Y *et al.* J O S A, 1999, A16 (1): 1417~1429.
- [4] Higgs C. SPIE, 1998, 3381: 13~21.
- [5] Higgs C, Barclay H, Kansky J. SPIE, 1998, 3381: 244~254.
- [6] Billman K W, Horwitz B A, Shattuck P L. SPIE, 1999, 3706: 196~203.
- [7] Higgs C, Barclay H T. SPIE, 1999, 3706: 206~215.
- [8] Mandel L, Wolf E. Optical coherence and quantum optics. London: Cambridge University Press, 1995.
- [9] Proakis J G 著. 张力军, 张宗橙, 郑宝玉 *et al.* 译. 数字通信. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [10] Welch P D. IEEE Trans Audio Electroacoust, 1967, AU-15: 70~73.