

高斯光束照明单透镜系统的动态散斑

姚 焜

(中国科技大学物理系, 合肥 230026)

Dynamic speckle of gaussian-beam illumination with a single-lens geometry

YAO Kun

(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract A moving ground glass plate is illuminated by a He-ne laser in a single-lens system and the statistical properties of dynamic speckle are investigated by time correlation function. The experimental result agrees well with the expectation of the theory. A simple data processing method is presented and the advantage of this optical configuration is presented

Key words

1 引 言

对随机位相屏产生的动态散斑可以根据照明方式及光路设计方法进行分类研究^[1]。根据 T. Yoshimura 的文章^[2]所提出的理论公式,我们对高斯光束照明的单透镜成像系统的动态散斑进行了实验测量。实验证明理论公式正确,实验结果与理论预期值符合也说明我们所使用的实验方法可行。在实验过程中,我们提出一种新的拟合方法,从而解决了实验常数的确定问题。

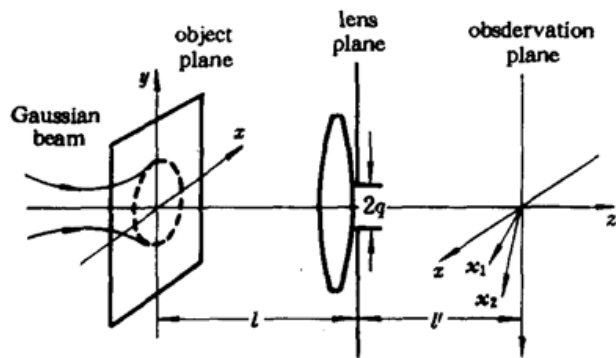


Fig. 1 Gaussian-beam illumination with single-lens geometry

2 理论公式和实验参数

图 1 为高斯光束照明的单透镜系统的光路图,物平面即散射平面。根据文献^[1]所提出的理论公式可知,对该系统归一化的光强的时间空间交叉相关函数为

$$g^{(2)}(\Delta x, \tau) = 1 + \exp\left[-\frac{|\Delta x|^2}{r_s^2} + \frac{\tau_s^2}{\tau_c^2}\right] \times \exp\left[-\frac{1}{\tau_c^2}(\tau - \tau_s)^2\right] \quad (1)$$

其中 $\Delta x = x_1 - x_2$, 为高斯成像面上两点之间的坐标矢量。 $1/\tau_c = |V|(B_1^2/r_s^2 + \mu^2/q^2)^{1/2}$, $\tau_s =$

$(\tau_c^2/r_s^2)B_1V \cdot \Delta x, r_s = 2l/Kq, \mu = 1 + l/\rho, B_1 = \mu(l/F - 1) - l/(\mu - 1), F$ 为透镜焦距, ρ 为高斯光束在被照明的散射面上的曲率半径, $K = 2\pi/\lambda$ 。

由于本实验中使照明区在高斯光束的束腰附近, 所以 $\rho \rightarrow \infty$ 而 $1 + l/\rho + 1 \cong 1, B_1 = l/F - 1, q$ 为透镜的通光孔径, 一般采用几 mm 左右(本实验取 6 mm), 所以 $B_1/r_s \gg \mu/q$ 总能满足。这样 $\tau_c^{-1} \approx |V|(B_1/r_s)$ 即 $\tau_c = r_s/|V|B_1$ 。这时(1)式右边第二项中第一个指数因子的值简化为 1。同时 $\tau_d \approx \Delta x/B_1|V|$, 对我们所测量探测器孔径面积和测量速度来说 $\tau_d \approx 0$, 故对同一点(很小的探测孔径)时间相关函数^[3,4]为

$$g^{(2)}(\tau) = 1 + \exp\left(-\frac{\tau^2}{\tau_c^2}\right) \tag{2}$$

实验公式为
$$g^{(2)}(\tau) = R + S \exp\left(-\frac{\tau^2}{\tau_c^2}\right) \tag{3}$$

令 $r_{d1}(\tau) = \exp(-\tau^2/\tau_c^2)$, 其中 R 和 S 为小于 1 的正常数。

3 实验装置

图 2 为实验用的光路和仪器设备。单模高斯光束 He-Ne 激光经透镜 L_1 扩束, L_2 会聚后照射在粗糙的毛玻璃板 M 上, M 沿自身平面在水平方向均匀移动, 由 M 产生的高斯动态散斑通过一个带有小孔(孔的直径为 $2q = 6$ mm)的透镜 L (透镜焦距为 120 mm), 在 M 的成像面上放置一个开有 0.3 mm 的小孔的光电倍增管 PMT。PMT 接收到散斑信号经前置放大后送入瞬态波形采样板 F901C*, 采样信号在 PC 机上进行数据处理和运算。F901C 的采样周期在本实验中取 12.8 μ s。毛玻璃移动的速度用一个光电门进行测量, 速率范围取 30 mm/s 至 102 mm/s。每次测量采样个数为 8192 个。

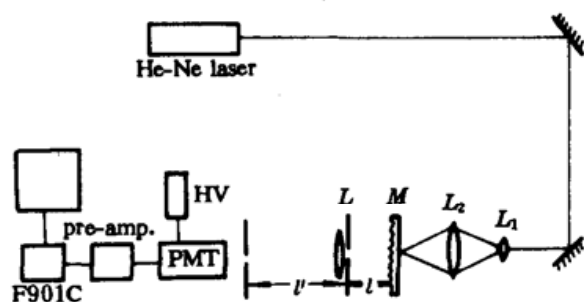


Fig. 2 Experimental set-up

4 数据处理和实验结果

每次测量和采样后得到一系列光强的数值为 $I(j), j = 1, 2, \dots, N_0$, (其中 $N_0 \leq 8192$, 但 N_0 不宜取太小, 否则会大大降低实验的精度。原则上 N_0 越大越好, 但实际上不可能, 而本实验取 8192 是由采样板决定的)。这样我们就可以得到样本相关函数^[5]

$$\hat{G}^{(2)}(l) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I(j)I(j+l), \quad (l = 0, 1, \dots, L) \tag{4}$$

$N = N_0 - l, L$ 由实验条件来确定。确定的依据为 ① $L \ll N_0$; ② 由散射体平移速度 $|V|, |V|$ 大时则 L 取值相对小一点, $|V|$ 小时 L 要取大一点。一般取 $LT (T$ 为采样周期) $\cong 4$ 至 5 倍的 τ_c (τ_c 为根据理论估计的相关时间, 与前面原理中介绍的 τ_c 一致。见前面公式(1), (2), (3))。

引入平均光强

$$\hat{I} = \frac{1}{N_0} \sum_{j=1}^{N_0} I(j) \tag{5}$$

* 该采样板为我校快电子实验室研制, 具有采样速率高, 不失真的特点, 该采样板采样周期可达 0.1 μ s, 最大容量为 8192 个。

就得到了归一化的样本时间相关函数

$$\hat{g}^{(2)}(l) \equiv \hat{G}^{(2)}(l) / \hat{I}^2 \quad (6)$$

对于较大的 N_0 , $\hat{g}^{(2)}(l)$ 很接近归一化的时间相关函数 $g^{(2)}(\tau)$, $\tau = lT^{[6]}$ 。

$$g^{(2)}(\tau) = \hat{g}^{(2)}(l) \quad (7)$$

在高斯光束照明的单透镜几何成像的条件下,由前面分析已知 $g^{(2)}(\tau)$ 为中心在原点而向上平移的高斯函数。所以实验曲线应当为近似的高斯曲线。在实验中发现当毛玻璃移动速度比较均匀时,采样总数取得越多,曲线越接近高斯型。否则会呈现无规则变形。在本实验中取 8192 个数据点,曲线很接近高斯型。图 3 为取样点为 1000 个(a)和 8192 个(b)时的实验曲线(小圆为实验值,实线为拟合曲线)。由(3)式知 $\hat{g}^{(2)}(l) = R + Sr_{st}(l)$,所以这是一个在 $y[\hat{g}^{(2)}(l)]$ 轴上平移的高斯曲线,这样的曲线在拟合过程中有一个很大的困难在于 R 值的确定,由于测量点的有限性, $g^{(2)}(l)$ 的值也只能是有限的个数,要确定 R 值就比较困难,也就是说 R 值的不确定度较大,而 R 值的不准确就会使计算出的 τ_c 值误差较大。为了克服这一困难我们采用一种观察比较法。这种方法在数学处理上相当简单,并且利用了计算机处理速度快,可以即时地显现出结果的优势,进行多次选择,直观地决定出 τ_c 的理想值。

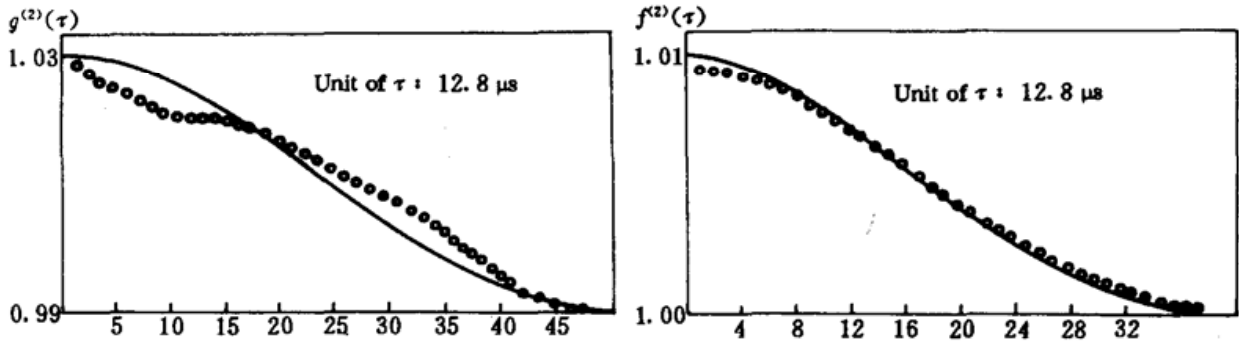


Fig. 3

(a) Experimental curve of normalized time correlation function with 1000 sample data

(b) Experimental curve of normalized time correlation function with 8192 sample data

该方法具体如下,令 $\hat{g}^{(2)}(l) = y, l = x$, 在实验曲线上任取二点 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 。第三点 x_3 为

$$x_3 = \sqrt{(x_1^2 + x_2^2)}/2 \quad (8)$$

然后计算出 C 值为

$$C = \frac{y_1 y_2 - y_3^2}{y_1 + y_2 + 2y_3} \quad (9)$$

此时实验曲线变为

$$y = ae^{bx^2} + C \quad (10)$$

令 $y^* = \ln(y - C), x^* = x$, 则有

$$y^* = \ln a + bx^{*2}, \quad a^* = \ln a \quad (11)$$

该式就可以用最小二乘法进行处理得到 a^*, b , 由公式(3)知

$$b = -\frac{1}{\tau_c^2}, \quad \tau_c = \sqrt{\frac{1}{-b}} \quad (b < 0) \quad (12)$$

如果 x_1, x_2 取值拟合后与实验曲线偏离较大,说明这两点取值不适当造成 τ_c 值误差较大则舍去,重新改变 x_1, x_2 的取值直到所拟合的曲线与实验曲线最符合为止。实践证明当实验曲线变形不大时一般 2 至 3 次拟合便可以获得令人满意的结果。图 4 为三条实验曲线及拟合曲线。表 1 为某次连续测量结果,拟合结果和理论值的对照。

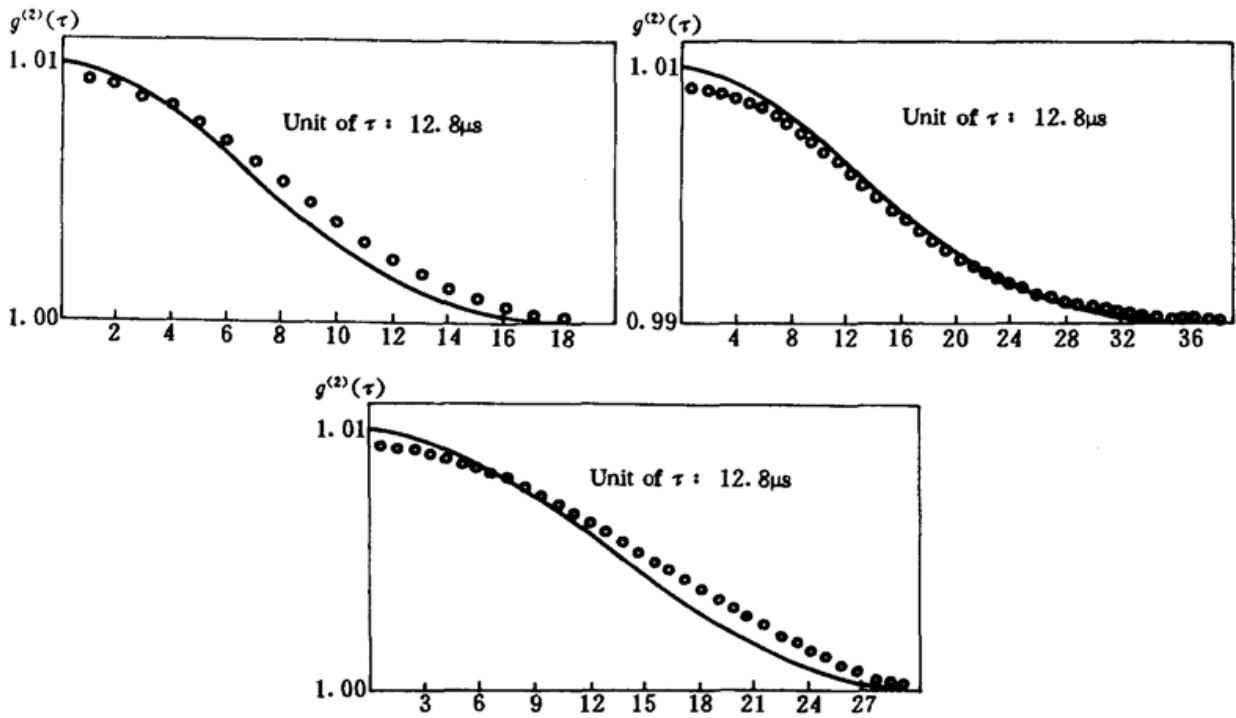


Fig. 4

(a) Correlation function curve of $V = 102$ mm/s; (b) Correlation function curve of $V = 39$ mm/s;
 (c) Correlation function curve of $V = 49$ mm/s

Table 1 Contrast of experimental value and theoretical value (portion of data)

V (mm/s)	30	35	39	47	52	75	94	97	102
$1/\tau_c$ experimental value (1/ms)	2.85	3.26	3.55	3.87	4.34	6.95	7.87	7.78	8.71
$1/\tau_c$ fitting value (1/ms)	2.58	3.01	3.35	4.04	4.47	6.44	8.07	8.33	8.76
$1/\tau_c$ theoretical value (1/ms)	2.50	2.92	3.25	3.92	4.33	6.25	7.84	8.09	8.50

5 结 论

由于动态散斑信号是随机变量,而噪声也是随机变量,而且由于仪器的响应速度限制的结果使噪声也有一定的相差长度。所以在动态散斑的测量中提高信噪比非常重要。通常采用的方法主要有:1) 提高激光功率;2) 在光路上采取措施;3) 加大孔径。但激光功率越大则造价越高,而且体积和重量也越大,给实用带来一定困难。所以后两者是我们常采用的措施。采用成像系统比起自由空间传播的动态散斑^[5]光强大大提高,因此本实验中不采用光子计数技术而使用一般的光电倍增管和简单的放大电路。

实验中由于物体的平移不十分均匀,此外,由于光路参数(例如激光产生的高斯光斑经透镜 L_1 和 L_2 后光强分布不完全服从高斯分布)不完全准确等造成实验值与理论值有一定偏差。

参 考 文 献

- 1 T. Yoshimura, *J. Opt. Soc. Am. A.*, **3**(7), 1033(1986)
- 2 V. V. Anisimov et al., *Opt. Spectrosc. (USSR)* **27**, 258(1969)
- 3 Y. Aizu et al., *Opt. Commun.*, **73**(2), 96(1989)
- 4 姚 焜 et al., *物理学报*, **41**(2), 238(1992)
- 5 姚 焜 et al., *光电工程*, **18**, Total No. 92, 21~27(1991)

6 B. Saleh, Photoelectron Statistics, Spr. , —Verl. B. H. New York, 1978

(收稿日期:1992年5月25日;收到修改稿日期:1992年9月7日)

CHINESE JOURNAL OF LASERS B

Vol. B2, No. 4 (Series No. 10), August 20, 1993

(July/August)

CONTENTS

LASER DEVICES

- LD pumped Nd : YAG microchip lasers Zhenguo Shan, Xiaohua Shen et al. (289)
- Temporal characteristics of Ti : sapphire laser pumped synchronously by bounded pulse train
..... Lihuang Lin, Bing Xu et al. (295)
- The effects of physical parameters on the gain and efficiency of Cherenkov type FEL
..... Donghuan Zhao (299)

EXPERIMENTAL TECHNOLOGY AND ELEMENTS

- Generation of GHz repeat rate hyperbolic secant nearly transform-limited pulses
..... Baoxi Xu, Yizhi Gao, et al. (307)
- Generation, measurement of 1.5ps ultrafast electrical pulse and its propagation on the microstrip
line Gangyao Xiao, Yupu Liu et al. (315)
- The characteristic study of directional-coupled travelling waveguide modulation
..... Youfa Wang, Guopin Xie et al. (319)
- Interferometric measurement for the plasma produced by a Q-switched laser in air near the surface
of an Al target Jian Lu, Xiao-wu Ni et al. (327)

LASER PHYSICS AND LASER CHEMISTRY

- The chaotic behavior analysis near the points $B_3 \sim B_5$ of a nonlinear Fabry-Perot cavity
..... Renhong Liu, Guobin Ma (333)
- HMO model of scalar field in medium and self-focusing
..... Hong Guo, Ximing Deng et al. (339)
- The effect of nitrobenzene on the Raman spectra of ribonuclease in aqueous solution
..... Weizhong Ke, Duowei Yu (345)

HOLOGRAPHY AND INFORMATION PROCESSING

- One-operation image algebra for optical processing Liren Liu (353)
- Optical greyscale morphological transformations Yaming Wu, Liren Liu et al. (361)
- Analysis of simultaneous multiple-exposure hologram Feng Zhao, Yun Zhang et al. (369)

LASER APPLICATION

- Preparation of enamel coating by laser irradiation Jiaqing Yu, Weitao Wu et al. (377)