

激光散斑光强分布的阇化处理及其 对功率谱的影响

周 昕¹ 程新路² 吴国栋³

(¹ 四川联合大学光电科学技术系 成都 610064, ² 四川联合大学高温高压物理与原子分子科学研究所,
³ 四川联合大学应用物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室 成都 610065)

提要 给出了一种阇化处理激光散斑光强多灰度值分布(如 256 级灰度)的方法。采用此种处理方法,激光散斑的功率谱强度随空间频率的分布保持不变,而计算机存贮散斑图样所需的存贮空间可极大地减少。针对具体的圆形和环形散射屏引入的散斑图样,采取使处理前后的功率谱偏差最小的方法,找出了最佳的阇值。

关键词 激光散斑,光强阇化处理,功率谱

激光照射在光学粗糙表面会产生颗粒状散斑图案,这一现象早已为广大激光工作者所熟悉。目前,激光散斑现象已广泛应用在无接触测量领域,如测量物体表面形变、位移速度以及探测系统调制传递函数等。在这些应用中,都需要对大量的散斑图样进行统计处理。

采用电荷耦合器件(CCD)对散斑图样成像,将散斑的光强分布转换成 256 灰度等级的电信号输出。显然,每个像元的光强值可用 8 位二进制代码表示($2^8 = 256$)。若每帧图样有 512×512 个像素,则当需要存储多帧散斑图样时,必须占用大量的计算机存储空间。

对散斑图样进行光强阇化处理方法可以减少所需占用的存储空间。若 $I(x, y)$ 是 CCD 记录的原始散斑光强分布(取值范围 0~255),则光强阇化处理方法为

$$I^b(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{若 } I(x, y) \geq bT \\ 0 & \text{若 } I(x, y) < bT \end{cases} \quad (1)$$

其中 b 为阇值参数, T 为整帧散斑的平均光强。显然,这样处理后,每个像元光强值只需 1 位二进制代码表示($2^1 = 2$),即只有两种灰度等级(0 和 1)。这样,在存储多帧经处理后的散斑图样时,与存储原始多灰度值(256 灰度)情况相比,所占的计算机存储空间可减少约一个数量级。

下面我们来看一下经光强阇化处理前后散斑图样功率谱的差异以及阇值参数 b 的选取。

1 激光散斑及其功率谱

当激光通过表面轮廓无规起伏的透射型散射屏后,波面将无规变形,若其无规相位在区间 $(-\pi, \pi)$ 上均匀分布,这样的散射屏称为强散射屏,此时的散斑分布为具有平稳性的正态散

斑^[1]。显然,实际散斑的光强是连续分布的。不过,由于它起伏变化很快,通常呈一种颗粒状结构。这种表观颗粒的粗细程度,实际上反映了散斑图样内光强分布起伏变化的快慢(对空间而言)。因此,可以用观察面上散斑光强的功率谱密度估计颗粒的粗细程度。可以想象,功率谱密度分布范围越宽,散斑颗粒越细。

考虑如图 1 所示的成像光路。激光经扩束后,照射在散射屏及光阑上,CCD 接收面直接接收衍射所形成的散斑图样。光阑的形状可采用圆形和环形,如图 1 (b) 所示。

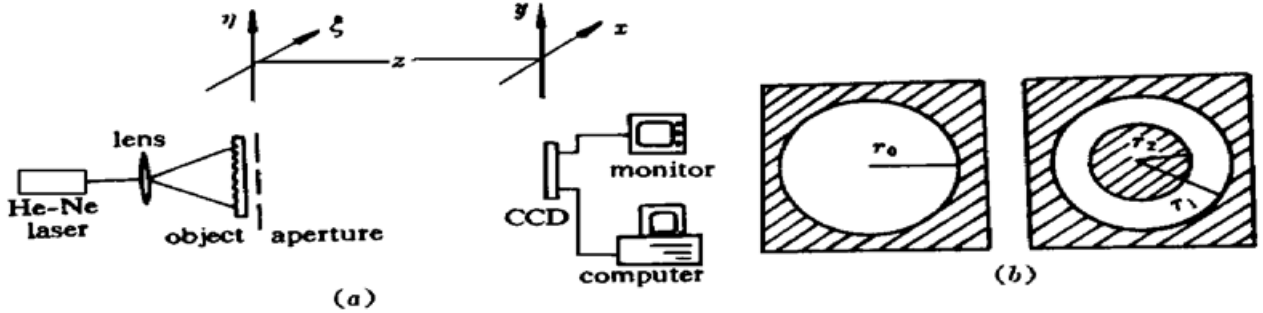


图 1 产生和记录散斑的成像光路 (a) 及圆形和环形光阑(b)

Fig. 1 (a) Setup used to produce speckle patterns; (b) circular and ring apertures

对成像面 (x, y) 上处于 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 的两点,其光强自相关函数为^[1]

$$\Gamma_I(x_1, y_1; x_2, y_2) = \langle I(x_1, y_1) I(x_2, y_2) \rangle \tag{2}$$

$\langle \rangle$ 表示系综平均。由于正态散斑分布是平稳随机过程,因而自相关函数 Γ_I 只与坐标差值 $\Delta x = (x_2 - x_1)$, $\Delta y = (y_2 - y_1)$ 有关,可表示为 $\Gamma_I(\Delta p)$, 其中 $\Delta p = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$ 。

由维纳-辛钦定理,功率谱和自相关函数是傅里叶变换对,即^[2]

$$S(\rho) = \text{FFT}[\Gamma_I(\Delta p)] \tag{3}$$

其中 $\rho = \sqrt{\nu_x^2 + \nu_y^2}$ 为空间频率。因此,如果测量到散斑图样的光强分布,可以通过(1)式得到其阗化处理后的散斑图样,再通过(2)式和(3)式分别得到其经光强阗化处理前后的自相关函数及相应的功率谱。

2 实验结果

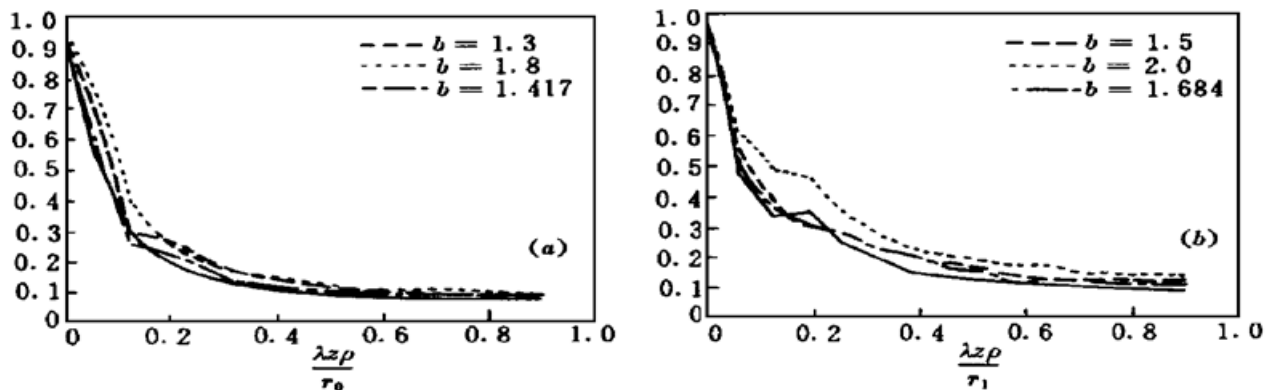


图 2 圆形光阑的散斑功率谱 (a) 和环形光阑的散斑谱(b)

Fig. 2 (a) The power spectrum of laser speckle for a circular aperture;

(b) The power spectrum of laser speckle for a ring aperture

实验中采用 Philips NXA 1010 型 CCD 成像系统, 该系统配有相应的接口和软件。取 $z = 500 \text{ mm}$, 对圆形和环形光阑分别取 $r_0 = 5 \text{ mm}$ 和 $r_1 = 5 \text{ mm}$, $r_2/r_1 = 0.6$ 。通过 CCD 记录圆形和环形光阑情况下的散斑图样, 并计算图样的光强自相关函数, 进而求得散斑图样归一化功率谱, 即图 2 中的实线。然后计算在不同阈值参数 b 的情况下, 经阈化处理后的散斑图样归一化功率谱, 即图 2 中各条虚线。从图 2 可见经不同参数值 b 阈化处理后的散斑图样功率谱与处理前相比变化不大。在实验中由于背景光的叠加可能会改变功率谱分布, 因此在实验和数据处理中必须尽可能消除背景光的影响。

3 最佳阈值参数的选取

显然, 随着阈值参数 b 的取值不同, 经光强阈化处理后的散斑图样的归一化功率谱分布也不同。因此需要寻找一个最合适的 b 值, 使光强阈化处理前后的归一化功率谱相差最小。

我们考虑光强阈化处理前后功率谱分布的均方偏差

$$\overline{E^2(b)} = \int_0^\infty (\text{功率谱强度}|_{\text{处理后}} - \text{功率谱强度}|_{\text{处理前}})^2 d\rho$$

$\overline{E^2(b)}$ 随 b 的变化规律如图 3。可见无论是圆形或环形散射屏, 都有一个合适的 b 值使 $\overline{E^2(b)}$ 最小, 即若选取该 b 值为阈值参数, 则光强阈化处理后的散斑功率谱与原始散斑功率谱最符合。由图 3 可得, 在圆形和环形($r_2/r_1 = 0.6$) 散射屏条件下, 最佳阈值参数 b 分别为 1.417 和 1.684。

从理论上分析, 对自相关函数为 $\Gamma_I(\Delta p)$ 的散斑图样, 经光强阈化处理, 其自相关函数为^[3]

$$\Gamma_I^{(b)}(\Delta p) = \exp(-b) \cdot \left\{ 1 + b^2 \sum_{n=1}^\infty \frac{[\Gamma_I(\Delta p)]^n}{n^2} [L_{n-1}^{(1)}(b)]^2 \right\}$$

其中 $n = 1, 2, 3, \dots$ 。

$L_{n-1}^{(1)}(x) = \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k \frac{(n+1)!}{k!(k+1)!(n-k)!} x^k$ 广义拉盖尔多项式如图 4 所示, 阈化后的自相关函数值与阈化前有一定偏差, 经计算可得偏差最小时的阈值参数为 1.765。事实上, 在实际测量中, 最佳阈值参数 b 的确定与许多因素有关, 如照明光强、CCD 响应特性、实验环境

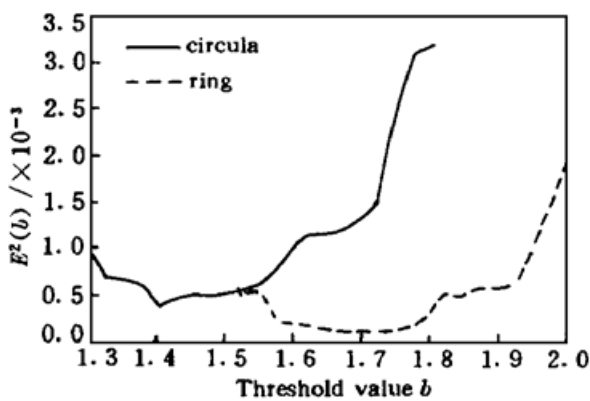


图 3 散斑功率谱均方偏差与 b 的函数关系

Fig. 3 Mean square error found in the power spectral density of circular and ring apertures as a function of threshold value b

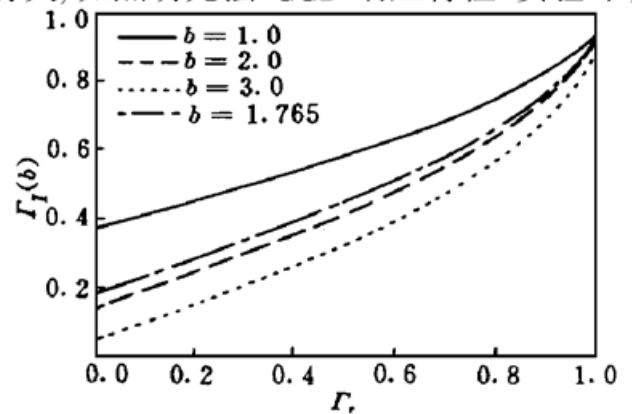


图 4 阈化处理前后散斑自相关函数的关系

Fig. 4 Relationship of speckle autorelation before and after thresholding

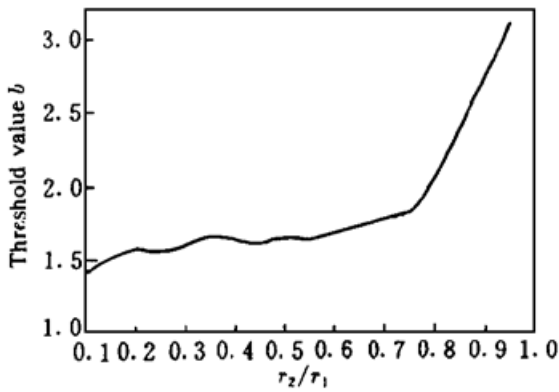


图5 最佳阈值参数 b 与 r_2/r_1 的函数关系

Fig. 5 The optimal threshold value b as a function of r_2/r_1

及装置条件等等。因此测得的最佳阈值参数可能与理论分析值相差较大。但在条件确定后,最佳阈值参数总是存在的。

对于环形散射屏,我们考虑当 $r_2/r_1 \rightarrow 1$ 时,最佳阈值参数 b 的取值情况。制做若干个不同 r_2/r_1 的环形光阑 ($r_2/r_1 = 0.10, 0.15, 0.20, \dots, 0.95$), 如前述方法找出最佳阈值参数。图5给出最佳阈值参数 b 随 r_2/r_1 的变化规律。从图中可见,当 r_2/r_1 值很小时,最佳参数 b 的取值与圆形散射屏情况相近,而当 r_2/r_1 值逐渐增大并趋近于1时,最佳阈值参数 b 的取值也逐渐增大。

4 结 论

在需要大量存储激光散斑图样的场合,可对散斑图样进行光强阈化处理,以节约计算机存储空间。经光强阈化处理后的散斑图样的功率谱虽然与处理前原始图样的功率谱相比有一定偏差,但只要选择合适的阈值参数 b ,可以使功率谱的偏差减至最小。在一些利用散斑功率谱进行测量的领域,如利用散斑功率谱测量 CCD 系统的调制传递函数(MTF)^[4],就可以采用此种处理方法。

参 考 文 献

- 1 J. C. Dainty Ed., Huang Letian Trans.. Laser Speckle and Related Phenomena. Beijing: Science Press, 1981, 1~ 30 (in Chinese)
- 2 Qi Kangnan, Qin Kecheng, Cheng Lu. Introduction to Statistical Optics. Tianjin: Nankai University Publishing House, 1987, 540~ 549 (in Chinese)
- 3 R. Barakat. Clipped correlation functions of aperture integrated laser speckle. *Appl. Opt.*, 1986, **25** (21): 3885~ 3888
- 4 M. Sensiper, G. D. Boreman, A. D. Ducharme *et al.*. Modulation transfer function testing of detector arrays using narrow-band laser speckle. *Opt. Engineering.*, 1993, **32**(2): 395~ 400

Intensity Thresholding of the Laser Speckle Patterns and Effects on the Power Spectrum

Zhou Xin¹ Cheng Xinlu² Wu Guodong³

¹Department of Photoelectronic Science and Technology, Sichuan Union University, Chengdu 610064

²Institute of High Temperature and High Pressure Physics, Sichuan Union University, Chengdu 610065

³Laboratory of Shock Waves and Detonation Physics, Institute of Applied Physics, Sichuan Union University)

Abstract This paper presents a method of intensity thresholding for the laser speckle patterns of multi gray levels (for example 256 levels). After this thresholding operation, the main features of the spacial-frequency power spectral density of laser speckle intensity are maintained and the amount of computer digital storage space can be reduced greatly. An optimum threshold level is found that minimizes distortion of the power spectrum for speckle data of the circular and ring apertures.

Key words laser speckle, thresholding, power spectrum