

# 激光散斑干涉照相双环孔径法

赵德信 罗庆昌

(东北重型机械学院)

**提要:** 提出用双环孔径记录进行激光散斑照相的方法。结果表明,采用这种方法不仅提高了散斑图衍射晕边缘的光强,同时和环形孔径法<sup>[1]</sup>相比,使腰部的暗区消失了,提高了测量的准确度,图片质量较好。

## Double annular aperture method for laser speckle interference photography

Zhao Dexin, Luo Qingchang

(The Northeast Heavy Machinery Institute)

**Abstract:** A double annular aperture method is put forward with which the authors recorded the processes of laser speckle photography. The distribution of light intensity in the diffracted halo of the picture of laser speckle are calculated and the pictures of Young's fringes with higher quality are given.

### 一、引言

为了提高激光散斑干涉照相的条纹灵敏度和测量的准确度,国内外激光工作者<sup>[1~3]</sup>相继提出了各种光阑来记录散斑。文献[1]

中提出的环形孔径法是一个很大的改进,提高了衍射晕边缘的光强,但腰部的光强太弱,出现了暗区(见图3(b))。

本文提出的用双环孔径光阑(图1)记录照相,克服了上述缺点,保留了优点,得到较好的结果。

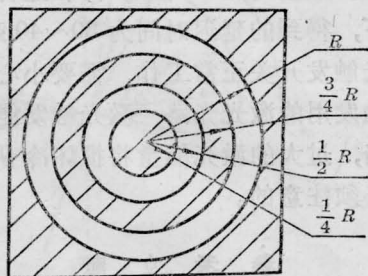


图1 双环孔径光阑  
( $R=22$ 毫米,略小于透镜半径)

### 二、光强分布的计算

众所周知,用激光散斑干涉照相经二次曝光得到的干涉条纹是调制在一次曝光散斑图的衍射晕( $I_s$ )上,所以, $I_s$ 的分布直接影响到条纹图象的质量。按文献[1]:

$$I_s(u_1, u_2) = K |G(u_1, u_2) * G(u_1, u_2)|^2 \quad (1)$$

$K$  为常数,  $G$  为象场复振幅的傅氏变换。由

收稿日期: 1983年2月17日。

于  $G$  为实函数, 所以双环孔径的光学传递函数就是  $G$  的自相关函数 ( $G * G$ )。作为近似, 设系统不存在象差。对于这种理想系统, 光学传递函数等于两个双环错开后, 光瞳的重迭面积 ( $s$ ) 与双环孔径光瞳面积 ( $A$ ) 之比。故归一化的自相关函数 (即光学传递函数) 为:

$$G * G = \iint G(v_1, v_2) \times G(v_1 - u_1, v_2 - u_2) dv_1 dv_2 = \frac{s}{A} \quad (2)$$

这里  $G$  已归一化。由于双环孔径的对称性, 在各方向重迭情况都一样, 故可用  $u/2R$  表示双环孔径的位置变量 ( $u$  为两个孔径圆心距)。经计算归一化自相关函数为:

$$G * G = \begin{cases} 0, & \frac{u}{2R} \geq 1 \\ \frac{8}{5\pi} (2\theta_1 - \sin 2\theta_1), & \frac{7}{8} \leq \frac{u}{2R} \leq 1 \\ \frac{8}{5\pi} (2\theta_1 - 2\theta_2 - \sin 2\theta_1 + \sin 2\theta_2) - \frac{9}{10\pi} (2\theta_3 - \sin 2\theta_3), & \frac{6}{8} \leq \frac{u}{2R} \leq \frac{7}{8} \\ \frac{8}{5\pi} (2\theta_1 - 2\theta_2 + 2\theta_4 - \sin 2\theta_1 + \sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_4) \\ \quad + \frac{2}{5\pi} (2\theta_5 - \sin 2\theta_5) - \frac{9}{10\pi} (2\theta_3 - 2\theta_7 - \sin 2\theta_3 + \sin 2\theta_7), & \frac{5}{8} \leq \frac{u}{2R} \leq \frac{6}{8} \\ \frac{8}{5\pi} (2\theta_1 - 2\theta_2 + 2\theta_4 - 2\theta_6 - \sin 2\theta_1 + \sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_4 + \sin 2\theta_6) \\ \quad - \frac{9}{10\pi} (2\theta_3 - 2\theta_7 + 2\theta_8 - \sin 2\theta_3 + \sin 2\theta_7 - \sin 2\theta_8) \\ \quad + \frac{2}{5\pi} (2\theta_5 - 2\theta_{11} - \sin 2\theta_5 + \sin 2\theta_{11}) - \frac{1}{10\pi} (2\theta_9 - \sin 2\theta_9), & \frac{4}{8} \leq \frac{u}{2R} \leq \frac{5}{8} \\ \frac{8}{5\pi} (2\theta_1 - 2\theta_2 + 2\theta_4 - 2\theta_6 - \sin 2\theta_1 + \sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_4 + \sin 2\theta_6) \\ \quad + \frac{9}{10\pi} (2\theta_7 + 2\theta_{10} - 2\theta_3 - 2\theta_8 - \sin 2\theta_7 - \sin 2\theta_{10} + \sin 2\theta_3 + \sin 2\theta_8) \\ \quad + \frac{2}{5\pi} (2\theta_5 - 2\theta_{11} + 2\theta_{15} - \sin 2\theta_5 + \sin 2\theta_{11} - \sin 2\theta_{15}) \\ \quad + \frac{1}{10\pi} (2\theta_{13} - 2\theta_9 - \sin 2\theta_{13} + \sin 2\theta_9), & \frac{3}{8} \leq \frac{u}{2R} \leq \frac{4}{8} \\ \frac{8}{5\pi} (2\theta_1 - 2\theta_2 + 2\theta_4 - \sin 2\theta_1 + \sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_4) \\ \quad + \frac{9}{10\pi} (2\theta_{10} - 2\theta_8 - 2\theta_3 + 2\theta_7 - \sin 2\theta_{10} + \sin 2\theta_8 + \sin 2\theta_3 - \sin 2\theta_7) \\ \quad + \frac{2}{5\pi} (2\theta_5 + 2\theta_{15} - 2\theta_{11} - 2\theta_{12} - \sin 2\theta_5 - \sin 2\theta_{15} + \sin 2\theta_{11} + \sin 2\theta_{12}) \\ \quad + \frac{1}{10\pi} (2\theta_{13} - 2\theta_{17} - \sin 2\theta_{13} + \sin 2\theta_{17}) - \frac{1}{5}, & \frac{2}{8} \leq \frac{u}{2R} \leq \frac{3}{8} \\ \frac{8}{5\pi} (2\theta_1 - 2\theta_2 - \sin 2\theta_1 + \sin 2\theta_2) - \frac{9}{10\pi} (2\theta_3 - 2\theta_7 + 2\theta_8 - \sin 2\theta_3 + \sin 2\theta_7 - \sin 2\theta_8) \\ \quad + \frac{2}{5\pi} (2\theta_{15} - 2\theta_{12} - 2\theta_{11} - \sin 2\theta_{15} + \sin 2\theta_{12} + \sin 2\theta_{11}) \\ \quad + \frac{1}{10\pi} (2\theta_{19} - 2\theta_{17} - \sin 2\theta_{19} + \sin 2\theta_{17}) + \frac{4}{5}, & \frac{1}{8} \leq \frac{u}{2R} \leq \frac{2}{8} \\ \frac{8}{5\pi} (2\theta_1 - \sin 2\theta_1) - \frac{9}{10\pi} [2(\pi - \theta_7) + \sin 2\theta_7] \\ \quad - \frac{2}{5\pi} (2\theta_{15} - \sin 2\theta_{15}) - \frac{1}{10\pi} [2(\pi - \theta_9) + \sin 2\theta_9], & 0 \leq \frac{u}{2R} \leq \frac{1}{8} \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \cos^{-1} \frac{u}{2R}, \\ \theta_2 &= \cos^{-1} \frac{\left(\frac{u}{R}\right)^2 + \frac{7}{16}}{2\left(\frac{u}{R}\right)}, \\ \theta_3 &= \cos^{-1} \frac{\left(\frac{u}{R}\right)^2 - \frac{7}{16}}{\frac{3}{2}\left(\frac{u}{R}\right)}, \\ \theta_4 &= \cos^{-1} \frac{\left(\frac{u}{R}\right)^2 + \frac{3}{4}}{2\left(\frac{u}{R}\right)}, \\ \theta_5 &= \cos^{-1} \frac{\left(\frac{u}{R}\right)^2 - \frac{3}{4}}{\frac{u}{R}}, \\ \theta_6 &= \cos^{-1} \frac{\left(\frac{u}{R}\right)^2 + \frac{15}{16}}{2\left(\frac{u}{R}\right)}, \\ \theta_7 &= \cos^{-1} \frac{2}{3}\left(\frac{u}{R}\right), \\ \theta_8 &= \cos^{-1} \frac{\left(\frac{u}{R}\right)^2 + \frac{15}{16}}{\frac{3}{2}\left(\frac{u}{R}\right)}, \\ \theta_9 &= \cos^{-1} \frac{\left(\frac{u}{R}\right)^2 - \frac{15}{16}}{\frac{1}{2}\left(\frac{u}{R}\right)}, \\ \theta_{10} &= \cos^{-1} \frac{\left(\frac{u}{R}\right)^2 + \frac{1}{2}}{\frac{3}{2}\left(\frac{u}{R}\right)}, \\ \theta_{11} &= \cos^{-1} \frac{\left(\frac{u}{R}\right)^2 - \frac{5}{16}}{\frac{u}{R}}, \\ \theta_{12} &= \cos^{-1} \frac{\left(\frac{u}{R}\right)^2 + \frac{3}{16}}{\frac{u}{R}}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta_{13} &= \cos^{-1} \frac{\left(\frac{u}{R}\right)^2 - \frac{1}{2}}{\frac{1}{2}\left(\frac{u}{R}\right)}, \\ \theta_{15} &= \cos^{-1} \frac{u}{R}, \\ \theta_{17} &= \cos^{-1} \frac{\left(\frac{u}{R}\right)^2 - \frac{3}{16}}{\frac{1}{2}\left(\frac{u}{R}\right)}, \\ \theta_{19} &= \cos^{-1} \frac{2u}{R}, \quad * \end{aligned}$$

单圆孔径归一化的自相关函数为:

$$G * G = \begin{cases} 0, & \frac{u}{2R} \geq 1 \\ \frac{1}{\pi} (2\theta_1 - \sin 2\theta_1), & 0 \leq \frac{u}{2R} \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中  $\theta_1 = \cos^{-1} \frac{u}{2R}$

根据不同形状孔径的散斑图总衍射光强相等的假定<sup>[1]</sup>, 按公式(3)、(4)分别求出双环孔径和单圆形孔径的自相关函数平方的积分, 再令两者相等, 并取单圆形孔径的

$$K_0 = 1,$$

经计算机求得双环孔径归范化系数

$$K_1 = 2.707,$$

再用公式(1) 求出双环孔径的散斑图衍射晕中光强分布。

图2中的曲线1、2分别为文献[1]提供的单圆孔径和环形孔径(半径比取  $\eta = \frac{5}{6}$ ) 衍射晕光强分布曲线, 曲线3为双环孔径时衍射晕中光强分布曲线。三条曲线相比较看出: 用双环孔径时得到的衍射晕光强分布与单圆形孔径相比, 除提高了边缘的光强外, 中心附近的光强也减弱了; 与环形孔径相比, 除保证边缘有一定光强外, 还提高了腰部的光强, 克服了环形孔径腰部暗区的缺点。

\* 由第一个双环圆心引出的角, 下角标用奇数表示; 由第二个双环圆心引出的角, 下角标用偶数表示; 若由两个圆心引出的角相同, 则也用奇数表示。



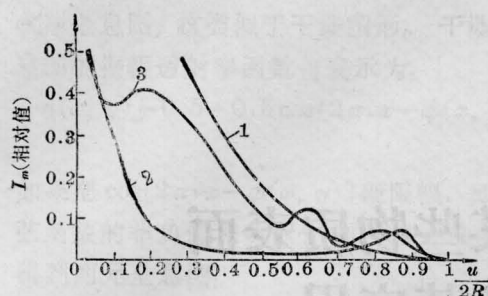


图2 总光强规范化的一次曝光散斑图衍射晕的光强分布局部截面图

$h$  为条纹间隔。理论值与实验值符合较好。

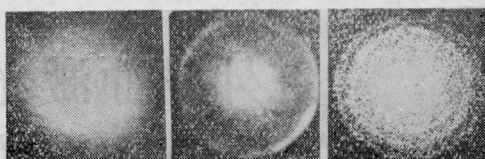


图3 一次曝光散斑图的衍射图形  
(a) 单圆孔径; (b) 环形孔径;  
(c) 双环孔径

### 三、实验结果

用 1.5 毫瓦的 He-Ne 激光照射绕轴可以转动的铝盘, 在由铝盘反射出的激光最强的方向上放置透镜 ( $f=210$  毫米), 双环孔径放在透镜前, 紧靠透镜。底片用国产“天津 I 型”干板, 放在成象位置。分别进行一次曝光和二次曝光(二次曝光时, 在两次曝光间用千分尺推动铝盘转过微小角度), 分别得到了一次曝光的散斑图(由此得到衍射晕)和二次曝光的散斑图(由此得到干涉条纹)。

图 3 是用不同孔径进行一次曝光得到的散斑图的衍射晕照片。可以看出双环孔径的效果较好, 各处对比度均匀。

图 4 是由二次曝光得到的散斑图按逐点分析法得到的杨氏条纹照片。其中, (a)、(b) 是由文献 [1] 提供的; (c) 是本实验的结果。可以看出用双环孔径记录时得到的条纹质量高, 从而提高了测量的准确度。

我们用千分尺推动可绕轴转动的铝盘来获得位移量, 千分尺和铝盘接触点(离转轴 85 毫米)移动了 175 微米, 成象比例 1:1, 每次曝光时间均为 40 秒。逐点分析时, 被窄激光束照射的点离轴 20 毫米, 底片到象平面距离  $L=300$  毫米。理论计算被照射点实际位移  $d=175 \times 20/85=41.18$  微米, 按双环孔径法得到的杨氏条纹计算:

$$d = \frac{\lambda L}{h} = 41.27 \text{ 微米,}$$

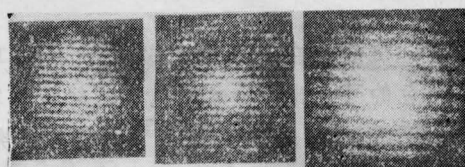


图4 对散斑图逐点分析得到的杨氏条纹图形  
(a) 单圆孔径; (b) 环形孔径;  
(c) 双环孔径

### 四、结 论

用双环孔径法记录散斑干涉照相, 在保证衍射晕边缘有一定光强的前提下, 提高了腰部的光强, 克服了用环形孔径时得到的衍射晕中腰部有暗区的缺点, 也使中心附近光强有所减弱, 从而使各处对比度更均匀些, 提高了计算的准确性和杨氏条纹的质量。

对双环孔径中的内环位置适当地选择, 同时缩小内、外环的面积, 可获得更好的结果。

### 参 考 文 献

- [1] 王策;《光学学报》,1982, 2, No. 6, 523.
- [2] R. P. Khetan, F. P. Chiang; *Appl. Opt.*, 1976, 15, No. 9, 2205.
- [3] F. P. Chiang, R. P. Khetan; *Appl. Opt.*, 1979, 18, No. 13, 2175.