

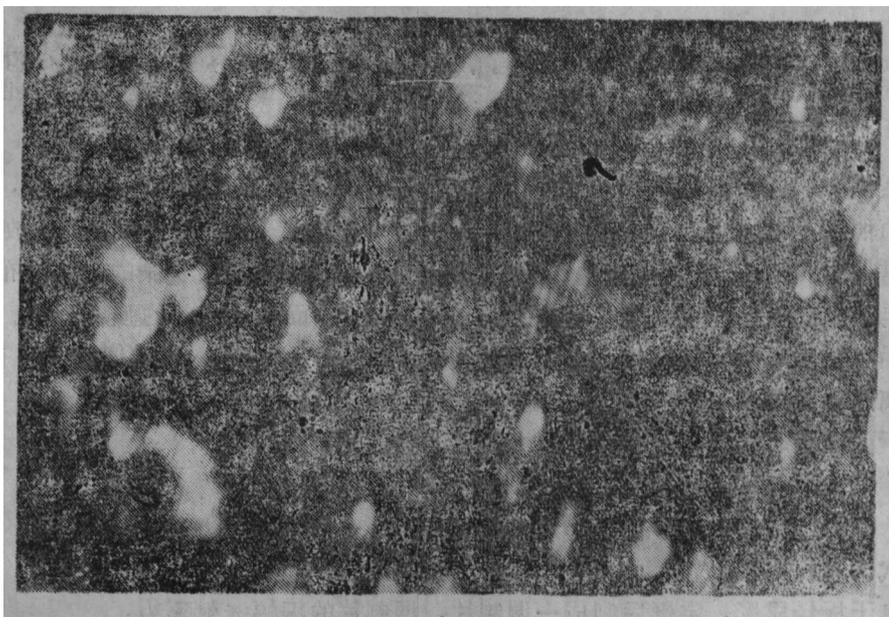
用激光散斑调制技术实现图象的微分

李 良 祐

提 要 本文利用激光散斑调制技术来实现图象的微分,以增强图象的细节和轮廓。它具有视场大,操作简便,效果好的优点。文中从理论上阐述了如何采用多次不等时曝光方法,并给出了一些实验结果。

激光受足够粗糙表面的散射或透射,会因大量子波的干涉而在相干的整个空间内产生无规则的光强分布,即形成大量的、颗粒状结构的、稳定的随机分布,称为斑纹(或称为散斑)。

用激光垂直投射一毛玻璃上,离毛玻璃适当位置处放一全息干板。干板记录的散斑图样如图 1 所示。



散斑的存在将影响图象的清晰度,在早期研究中认为散斑是一种有害的噪声,为得到质量较高的图象,常采用各种手段,以避免或减少散斑。然而,由于散斑尺寸很小,具有相当高的空间频率,可以利用它来调制所需要处理的讯号。散斑作为随机的载波器,在光学信息处理中的应用^[1],越来越被人所重视。

增强图象的细节和轮廓是图象处理中很重要的课题,A. Maréhal^[2]曾采用一高通滤波器对图象进行微分滤波。S. H. Lee^[3]等人曾介绍了一种利用复合光栅作为滤波器,对图象进行微分滤波。本文根据散斑调制离焦相减的技术,用一简单的单缝作为滤波器,实现两维图象的微分。它与S. H. Lee等人所介绍的方法相比较,具有视场较大,操作简便,效果良好等优点。

实验光路如图2所示:

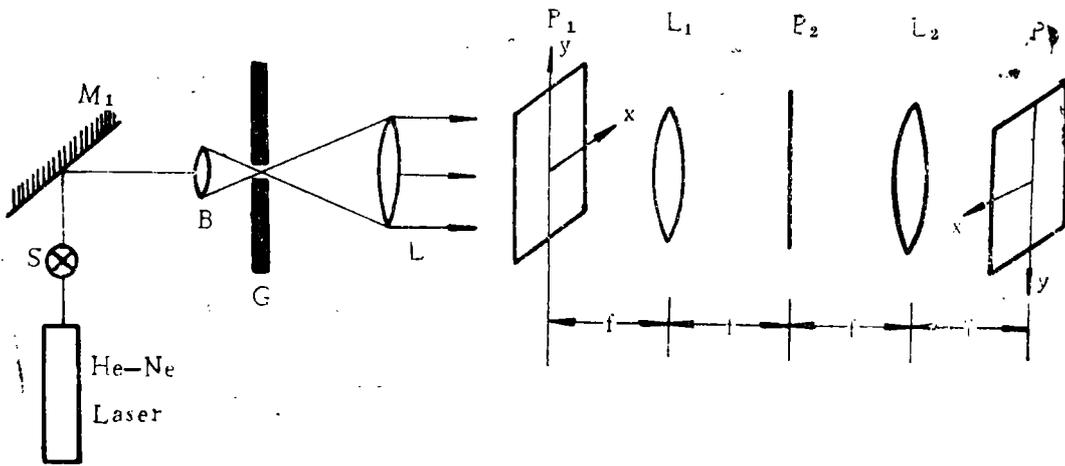


图2. 实验光路简图

氦氖激光器 $\lambda = 6328\text{\AA}$,输出功率8mw, ⊗S快门, M_1 全反射镜, B扩束镜(焦距8.7m.m.), G针孔滤波器, L准直透镜(焦距420m.m.), $L_1 L_2$ 付氏变换透镜(焦距450m.m.), P_1 输入图象面(物平面), P_2 图象频谱面(焦平面), P_3 输出图象面(象平面)。

在透镜 L_1 的前焦平面 P_1 上放物。紧靠物,在物的前方,放置一毛玻璃,相干平行光垂直照在毛玻璃上,形成透射的相干漫射光,在透镜 L_2 后焦平面 P_3 处放一全息干板。若假定 $D(x, y)$ 表示散斑在 P_3 面处的光强分布。全息干板记录的光强分布是 $AD(x, y)$,其中 A 是 P_1 面上的物,经光学系统后,在 P_3 面上所成象的强度分布。

然后,毛玻璃横向移动 x_0 ,同时,物面纵向移动 A ,再进行一次等时曝光,在 P_3 面上物的离焦象的强度(A')也记录在同一块全息干板上。

由于两次等时曝光,记录在干板上的总的强度为:

$$A(x, y) D(x, y) * \delta(x, y) + A'(x, y) D(x, y) *$$

$$\delta(x - x_0, y) = AD * [\delta(x, y) + \delta(x - x_0, y)] + (A' - A) D * \delta(x - x_0, y)$$

其中*代表卷积符号。

全息干板经显影,定影后制成一调制片,调制片的振幅透射率为:

$$t(x, y) = a - b \{ AD * [\delta(x, y) + \delta(x - x_0, y)] + CD * \delta(x - x_0, y) \}$$

其中 $C = A' - A$,是两图象的差, a, b 是常数。

为了检出两图象之间的差别,在图2的 P_2 面上放入一单缝,作为滤波器用。调制片放在透镜 L_1 的前焦平面 P_1 上(毛玻璃已拿开)。用相干平行光垂直投射在调制片上,则在第一透镜的后焦平面上光场分布是:

$$\begin{aligned}\mathcal{F}\{t(x,y)\} &= a\delta(\xi,\eta) - b\bar{A}*\bar{D}(1 + e^{-2\pi i \frac{\xi}{\lambda f} x_0}) - b\bar{C}*\bar{D}e^{-2\pi i \frac{\xi}{\lambda f} x_0} \\ &= a\delta(\xi,\eta) - 2b\bar{A}*\bar{D}\cos\frac{\pi\xi x_0}{\lambda f}e^{-\pi i \frac{\xi x_0}{\lambda f}} - b\bar{C}*\bar{D}e^{-2\pi i \frac{\xi}{\lambda f} x_0}\end{aligned}\quad (1)$$

其中 \mathcal{F} 是付里叶变换符号,设 $\mathcal{F}\{A\}=\bar{A}$, $\bar{D}=\mathcal{F}\{D\}$, $\bar{C}=\mathcal{F}\{C\}$, ξ,η 是 P_2 平面上的坐标变量。

上式第一项对应于焦面中心的亮点,第二项除了 $2b$ 常数以外, $\bar{A}*\bar{D}$ 由因子 $\cos\frac{\pi\xi x_0}{\lambda f}$ 所调制, $\cos\frac{\pi\xi x_0}{\lambda f}$ 表示杨氏条纹,第三项包含 $\bar{C}=\bar{A}'-\bar{A}$ 的信息分布在整个 P_2 平面上。若 P_2 平面上的单缝恰好放在杨氏条纹的暗纹处,则 $\bar{A}*\bar{D}\cos\frac{\pi\xi x_0}{\lambda f}$ 被挡掉,只允许 $\bar{C}*\bar{D}e^{-2\pi i \frac{\xi}{\lambda f} x_0}$ 通过。这样,在 P_2 平面上就可得到图象差 $C=A'-A$ 的信息。

要使图象微分效果好,即物象轮廓明显,突出。从理论上来看,就要使(1)式中的第三项通过狭缝尽可能多,第二项通过狭缝尽可能的少。这要求两亮纹之间的暗区加宽,从 $\cos\frac{\pi\xi x_0}{\lambda f}$ 可以看出:减小毛玻璃的位移量 x_0 可使两峰值之间距离变宽,但 x_0 不能太小, x_0 必须大于散斑的平均直径,本文侧重介绍如何采取多次曝光法使杨氏条纹中亮纹变陡,暗区变宽,获得较好的微分效果。

多次曝光,分为等时多次曝光和不等时多次曝光。

等时多次曝光:

依次地做一系列等时多次曝光,每两次曝光之间,毛玻璃在横方向上做等距离的位移,这样做 N 次后,在做 $N+1$ 次等时间曝光时除毛玻璃在横方向继续做等距离的位移外,还需物在纵方向移动 Δ ,则底片上的光强记录为:

$$\begin{aligned}AD(x,y)*\sum_{n=0}^{N-1}\delta(x-nx_0,y) + A'D(x,y)*\delta(x-Nx_0,y) \\ = AD(x,y)*\sum_{n=0}^N\delta(x-nx_0,y) + CD(x,y)*\delta(x-Nx_0,y)\end{aligned}$$

干板经显影、定影处理之后,制成一调制片,其振幅透射率为:

$$t(x,y) = a - b \left[AD * \sum_{n=0}^N \delta(x-nx_0,y) + CD * \delta(x-Nx_0,y) \right]$$

把调制片放入图2的第一透镜的前焦平面上,用平行光垂直地投射在调制片上,则在第一透镜的后焦平面上光场分布:

$$\mathcal{F}\{t(x,y)\} = a\delta(\xi,\eta) - b\bar{A}*\bar{D}\frac{\sin(N+1)\pi\xi x_0/\lambda f}{\sin\pi\xi x_0/\lambda f}e^{-\pi i \frac{\xi}{\lambda f} Nx_0} - b\bar{C}*\bar{D}e^{-2\pi i \frac{\xi}{\lambda f} Nx_0}$$

上式中第二项所对应的光强分布为:

$$I_2 = b^2 |\bar{A} * \bar{D}|^2 \left[\frac{\sin(N+1)\pi\xi x_0/\lambda f}{\sin\pi\xi x_0/\lambda f} \right]^2$$

因而在频谱面上观察到的频谱是与周期为 x_0 栅数为 $N+1$ 的光栅的衍射图样相类似。

在两个主极大之间有 $N-1$ 个次极大, 此处多次等时曝光的作用使 $\bar{A} * \bar{D}$ 的调制因子由 $\cos\frac{\pi\xi x_0}{\lambda f}$ 变为 $\frac{\sin(N+1)\pi\xi x_0/\lambda f}{\sin\pi\xi x_0/\lambda f}$, 故有可能使干涉亮条纹峰值变陡。

不等时多次曝光

为了清除在多次等时曝光中两个主极大之间的次极大, 可采用不等时多次曝光, 曝光时间 B_1, B_2, B_3, \dots 是正比于二项式的系数 C_N^p , 对于五次曝光所取的时间之比为:

$$B_1 : B_2 : B_3 : B_4 : B_5 = 1 : 4 : 6 : 4 : 1$$

每两次曝光之间毛玻璃在横向上做等距离的位移, 在进行第五次曝光时除毛玻璃在横向上做等距离的位移外, 还需物在纵方向移动 λ 。全息干板经五次不等时曝光, 显影、定影处理后, 制成一调制片, 其振幅透射率为:

$$\begin{aligned} t(x, y) &= a - b \{ AD * [\delta(x, y) + 4\delta(x - x_0, y) + 6\delta(x - 2x_0, y) \\ &\quad + 4\delta(x - 3x_0, y)] + A' D * \delta(x - 4x_0, y) \} \\ &= a - b AD * [\delta(x, y) + 4\delta(x - x_0, y) + 6\delta(x - 2x_0, y) \\ &\quad + 4\delta(x - 3x_0, y) + \delta(x - 4x_0, y)] \\ &\quad - b CD * \delta(x - 4x_0, y) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{t(x, y)\} &= a\delta(\xi, \eta) - b\bar{A} * \bar{D} [1 + 4e^{-2\pi j \frac{\xi}{\lambda f} x_0} + 6e^{-2\pi j \frac{\xi}{\lambda f} 2x_0} \\ &\quad + 4e^{-2\pi j \frac{\xi}{\lambda f} 3x_0} + e^{-2\pi j \frac{\xi}{\lambda f} 4x_0}] - b\bar{C} * \bar{D} e^{-2\pi j \frac{\xi}{\lambda f} 4x_0} \\ &= a\delta(\xi, \eta) - b\bar{A} * \bar{D} e^{-2\pi j \frac{\xi}{\lambda f} 2x_0} \left(2\cos\frac{\pi\xi}{\lambda f} x_0 \right)^4 - b\bar{C} * \bar{D} e^{-2\pi j \frac{\xi}{\lambda f} 4x_0} \end{aligned}$$

上式第二项所对应的光强为:

$$I_2 = |b\bar{A} * \bar{D}|^2 \left(2\cos\frac{\pi\xi}{\lambda f} x_0 \right)^8$$

调制因子是 $\left(2\cos\frac{\pi\xi}{\lambda f} x_0 \right)^8$ 与等时多次曝光相比较, 次极大就消失了。

同理, 对于三次曝光, 曝光时间之比是 $B_1 : B_2 : B_3 = 1 : 2 : 1$, 此时, 光强调制因子是 $\left(2\cos\frac{\pi\xi}{\lambda f} x_0 \right)^4$, 为确保全息干板在乳胶曲线的线性部分工作, 曝光次数选取五次, 甚至七次也就足够了。

采用多次(三次或五次)不等时曝光方法可使亮纹变陡, 二亮纹之间的暗区加宽(清除了次极大影响), 这样, 就便于狭缝在暗区中所寻找出最佳位置, 进行图象微分, 获得好的结果。

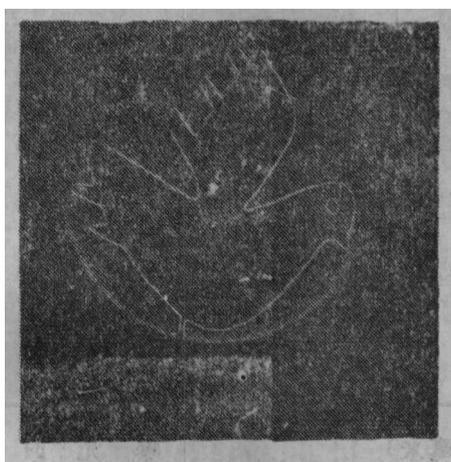
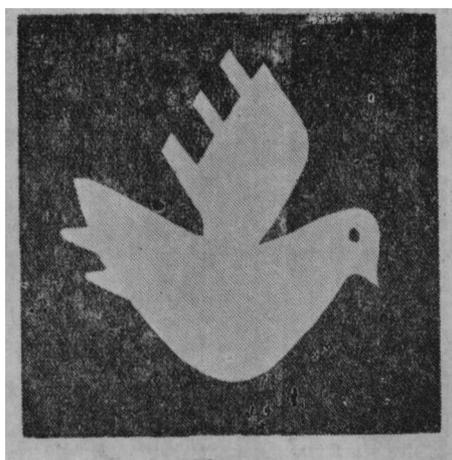


图 3，研究图象微分时所用的物体，图 4 是用相干平行光垂直投射到调制片时得到图象的微分结果（在图 2 的 P_3 平面上），图象的边框明显地增强了。

在做调制片时采用五次曝光，曝光时间之比是 $1:4:6:4:1$ ， $x_0 = \frac{2}{100}$ m.m.， $\angle = 2$ m.m.，图 5 是用白光源（溴钨灯）代替相干光垂直投射调制片时，得到图象微分的结果。图 4 与图 5 相比较，其质量，图 5 比图 4 明显的好，其原因是非相干光噪声小，而相干光噪声大（图 4、图 5，鸽子腹部下方有一轮廓，系实验时支撑鸽体的金属细棒微分的结果）。

在用白光源垂直投射调制片时，在频谱面上，最多能看清 ± 2 级的杨氏条纹，这是因为连续谱的出现，不同波长的衍射光在级次较高时相互重叠所造成，当狭缝置于第一暗纹处进行滤波，像面上就出现了很亮的图象边框（微分的结果），并且散斑噪声也明显的降低，如图 5 所示。当狭缝在第一级暗纹和二级亮纹之间移动时，图象的白色边框亮度不变，而图象的中央部分呈现不同的彩色，从紫变化到红。

为了增强图象的微分效果，我们所做的调制片都进行了漂白处理，漂白处理过的调制片，其衍射效率提高了很多，这样才能取得令人满意的微分效果。

值得指出的是上述多次不等时曝光的方法亦可适用于散斑测量物体横向位移的实验。图6给出了这方面的实验结果。

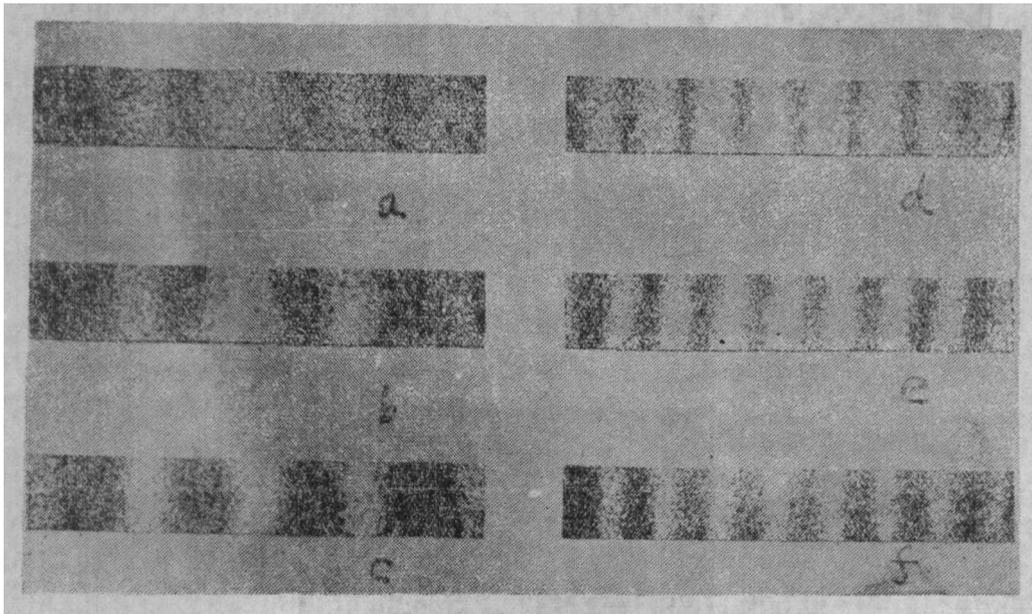


表1 列出每次实验时物体位移量和曝光时间：

表 1

图 6	位移量 (毫米)	曝 光 时 间 (秒)
a	$\frac{2}{100}$	8, 8, 二次等时曝光
b	$\frac{2}{100}$	4, 8, 4, 三次不等时曝光
c	$\frac{2}{100}$	1, 4, 6, 4, 1, 五次不等时曝光
d	$\frac{4}{100}$	8, 8, 二次等时曝光
e	$\frac{4}{100}$	4, 8, 4, 三次不等时曝光
f	$\frac{4}{100}$	1, 4, 6, 4, 1, 五次不等时曝光

从图6可以看出,随着曝光次数的增多,暗区加宽,峰值变陡,这样测量位移,才能更准确。参加实验工作的还有曹学先、王兴国两同志,作者在此特表示感谢。

参 考 文 献

- [1] M.Francon, Laser Speckle and Applications in Optics.
- [2] J.W.Goodman, Introduction to Fourier Optics, Ch. IV.
- [3] S.H.Lee, S.K.Yao and A.G.Milnes, J. Opt. Soc. Am. Vol 60 No.8 1037(1970).

By Using the Modulation Technic of Laser Speckle to Realize the Image Differentiation

Li Liangyou

Abstract

This article makes use of modulation technic of laser speckle to realize differentiation of the image so as to increase the detail and contour of the image.

This kind of technic has many advantages, for example, it has a large field of vision, it is easy to master and by using it, we can get a good result.

In achieving differentiation of the image, the article tells us how to use the methods of exposure with different exposure time interval for many times from theory and by giving some results of the experiment.