

# 白光图象处理的散斑调制屏法

黄德根 徐大雄 沈树群 余重秀  
(北京邮电学院)

## 提 要

本文提出了白光图象处理的一种新方法——散斑调制屏法。基于漫射相干光的散斑效应,制作一种名叫散斑调制屏的光学编码元件,此屏在光学图象处理中有广泛的应用和明显的优点。文章还给出了彩色图片存储和灰阶图片的等密度假彩色编码两个实验。

## 一、引 言

白光图象处理具有无相干噪声,易于处理彩色图象,设备简单,费用省等优点。理论和实验证明,许多相干光处理的问题,都可以平移到白光处理系统中来。文献[1]对白光处理系统作了详细的介绍。

我们探讨了激光散斑效应在白光图象处理中的应用。从表面上看来杂乱无章的散斑噪声,实际上严格服从某些统计规律,我们可用它来携带信息。空间随机分布的散斑场是统计平稳的,可以用全息干板记录多个相同的彼此相离的散斑场,从而在干板上形成许多随机分布的杨氏双孔。经处理的干板用作光学编码元件,可广泛地用于图象处理,我们称之为散斑调制屏;除此以外,制作调制屏的方法本身,可用来做其他光学实验,如杨氏干涉实验。

## 二、散斑调制屏的制作和分析

相干光经粗糙面透射或反射,在空间形成颗粒状的散斑。利用文献[2]对漫射面的几点假设和文献[3]、[4]、[5]、[6]的数理统计方法,可得到这些颗粒状散斑的统计特性。特别是经散斑强度的自相关函数的讨论,可得到观察面上散斑的平均直径为  $\delta_x = \lambda z / a$ , 散斑功率谱密度的截止频率为  $\nu_x = a / \lambda z$ , 这里  $a$  是漫射面的几何长度,  $z$  是漫射面到观察面的距离。

根据散斑场的物理图象,我们用图1的光路制作光学编码元件——散斑调制屏。

散斑调制屏由全息干板多次曝光记录散斑场而成,多次曝光可以用等量多次曝光和二项式系数律曝光,前者每次曝光量相等,后者曝光量符合二项式系数律。两次曝光记录之间,需横移毛玻璃一小距离  $\xi_0$ 。

设散斑光强分布为  $D(x, y)$ , 曝光单位时间为  $T$ , 位移量为  $\xi_0$ , 则两种方法的总曝光量为(以五次为例):

$$E_1(x, y) = TD(x, y) \otimes [\delta(x, y) + \delta(x - \xi_0, y) + \dots + \delta(x - 4\xi_0, y)], \quad (1a)$$

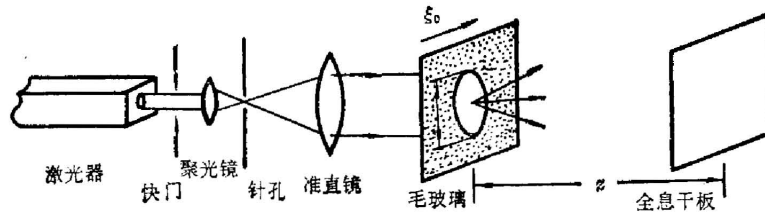


图 1 散斑调制屏记录光路

Fig. 1 Optical layout of the speckle modulation screen recording

$$E_2(x, y) = TD(x, y) \otimes [\delta(x, y) + 4\delta(x - \xi_0, y) + \dots + \delta(x - 4\xi_0, y)]. \quad (1b)$$

对干板作线性处理, 得到散斑屏的振幅透射率为:

$$t_1(x, y) = a_1 - b_1 D(x, y) \otimes [\delta(x, y) + \delta(x - \xi_0, y) + \dots + \delta(x - 4\xi_0, y)], \quad (2a)$$

$$t_2(x, y) = a_2 - b_2 D(x, y) \otimes [\delta(x, y) + 4\delta(x - \xi_0, y) + \dots + \delta(x - 4\xi_0, y)]. \quad (2b)$$

透过屏上杨氏孔的光在空间相干迭加, 它们谱面上的光场分布, 可对(2)式作傅氏变换求得。设谱面的空间坐标为 \$(u, v)\$, 则有:

$$\mathcal{F}_1(u, v) = a_1 \mathcal{D}\left(\frac{u}{\lambda f}, \frac{v}{\lambda f}\right) - b_1 \mathcal{D}\left(\frac{u}{\lambda f}, \frac{v}{\lambda f}\right) \left[ \frac{1 - \exp(j2\pi \cdot 5\xi_0 u / \lambda f)}{1 - \exp(j2\pi \cdot \xi_0 u / \lambda f)} \right], \quad (3a)$$

$$\mathcal{F}_2(u, v) = a_2 \mathcal{D}\left(\frac{u}{\lambda f}, \frac{v}{\lambda f}\right) - b_2 \mathcal{D}\left(\frac{u}{\lambda f}, \frac{v}{\lambda f}\right) \cdot 16 \cos^2 \frac{\pi \xi_0 u}{\lambda f}, \quad (3b)$$

式中  $\mathcal{D}\left(\frac{u}{\lambda f}, \frac{v}{\lambda f}\right) = \mathcal{F}\{D(x, y)\}$ ,  $f$  是变换透镜焦距。在(3)式中, 右边第一项是原点亮斑, 第二项在谱面上的光强分布为  $\left| \mathcal{D}\left(\frac{u}{\lambda f}, \frac{v}{\lambda f}\right) \right|^2 \cdot \left[ \frac{\sin(5\pi \xi_0 u / \lambda f)}{\sin(\pi \xi_0 u / \lambda f)} \right]^2$  和  $\left| D\left(\frac{u}{\lambda f}, \frac{v}{\lambda f}\right) \right|^2 \cdot \cos^4(\pi \xi_0 u / \lambda f)$ 。显然, 前者为光栅型衍射条纹, 后者为余弦干涉条纹。它们的亮纹的位置是  $u = k \cdot \frac{\lambda f}{\xi_0}$ ,  $k$  是衍射条纹级次。可见, 对于确定的  $f$ , 随着  $\lambda$  或  $\xi_0$  之值的变化, 亮纹位置也随之变化; 换句话说, 只要适当选取  $\xi_0$  值, 可将不同波长  $\lambda$  的亮纹重合在一起。在图象处理的多重编码时, 这一点尤其有用, 它给空间滤波带来极大的方便。

散斑调制屏的曝光次数限制, 通过实验, 等量曝光达 11 次, 二项式系数律达 5 次, 这由干板的响应范围决定。位移量的最小值应不小于散斑平均直径, 最大不能超过照明光在输入面上的最大相干距离。散斑屏的色散本领取决于位移量  $\xi_0$ , 位移量小, 色散本领高; 同时, 位移量即为杨氏双孔的距离, 直接影响对图象的抽样频率。我们一般让平均直径尽量小一些(不能超越干板的分辨极限), 而让位移  $\xi_0$  接近平均直径。由(3)式知, 增加曝光次数, 可缩小亮纹宽度。

### 三、实 验

本实验使用的白光处理系统, 如图 2 所示, 它由柯勒照明<sup>[7]</sup>和  $4f$  成象系统两部分组成。若用图中  $a \times b$  均匀的矩形白光照明, 则由 Van Cittert-Zernike 定理, 可得到  $L_1$  透镜前表面入射光的互强度:

$$J(\Delta\xi', \Delta\eta') = \sum_{m=1}^M \frac{\exp(j\phi_m)}{(\lambda_m f)^2} I_m ab \sin c\left(\frac{a\Delta\xi'}{\lambda_m f}\right) \cdot \sin c\left(\frac{b\Delta\eta'}{\lambda_m f}\right), \quad (4)$$

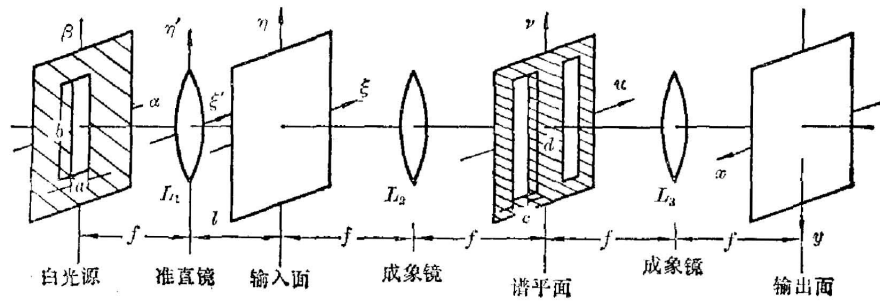


图2 白光处理系统

Fig. 2 White-light processing system

式中  $I_m$  是波长为  $\lambda_m$  的准单色光光强,  $\Delta\xi' = \xi_1' - \xi_2'$ ,  $\Delta\eta = \eta_1 - \eta_2$ ,  $f$  是  $L_1$  的焦距,  $\phi_m = \frac{\pi}{\lambda_m f} (\xi_2' + \eta_2' - \xi_1' - \eta_1')$ 。  $L_1$  透镜作准直用, 相当于位相延迟器, 不影响入射光的相干性, 因而图 2 输入面上照明光的相干性可用 (4) 式求得。当  $a \ll b$  时, 水平方向上的空间相干性要比垂直方向上好得多, 这正好满足散斑调制屏法处理图象时对光的相干性要求。在实验中通常取  $a = 0.5 \text{ mm}$ ,  $b = 10 \text{ cm}$ 。图 2 所示的白光处理系统, 对光的互强度呈线性性, 由菲涅耳公式及互强度的传播可求得输出面上的光强分布:

$$\begin{aligned}
 I(x, y) = & \sum_{m=1}^M \frac{ab I_m}{(\lambda_m f)^6} \cdot \sin c \left( \frac{a \Delta \xi'}{\lambda_m f} \right) \cdot \sin c \left( \frac{b \Delta \eta}{\lambda_m f} \right) \cdot \iiint \iiint \iiint t(\xi_1, \eta_1; \lambda_m) \\
 & \cdot t^*(\xi_2, \eta_2; \lambda_m) \cdot f(u_1, v_1; \lambda_m) f^*(u_2, v_2; \lambda_m) \\
 & \cdot \exp \left[ -j \frac{\pi}{\lambda_m f} (\xi_2^2 + \eta_2^2 - \xi_1^2 - \eta_1^2) \right] \cdot \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda_m f} [(\xi_2 + x)u_2 + (\eta_2 + y)v_2 \right. \\
 & \left. - (\xi_1 + x)u_1 - (\eta_1 + y)v_1] \right\} d\xi_1 d\eta_1 d\xi_2 d\eta_2 du_1 dv_1 du_2 dv_2, \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中  $f$  是滤波函数,  $t$  是物函数。将制得的散斑调制屏放入白光处理系统的输入面, 谱面上则出现彩色条纹, 和理论分析完全一致, 如图 3 所示(见插页彩图(a))。散斑调制屏法可以做许多方面的图象处理。这里介绍彩色图片用黑白底片的存储和灰阶图片的假彩色编码。其他实验如两图象相减, 对图象微分(突出边框), 对比度反转, 多信息存储, 彩色增强等, 不在此赘述。

有几种实现彩色存储和等密度假彩色编码的光学方法<sup>[8~18]</sup>。散斑调制屏法主要包括编码预处理(用图 4 光路)和空间滤波解调信息(用图 2 光路)两个方面。

图 4 的光路实际上是成像光路。用成像法编码可以用较高空间频率的编码元件, 且操作灵活, 对不透明图片用反射光同样可以处理, 这就克服了平行光编码法<sup>[4]</sup>的局限性。在彩色存储编码时, 先将图片和全息干板固定于物平面和像平面, 然后白光经红、绿、蓝三色滤光后依次照明彩图, 使干板曝光, 干板前紧贴相应的散斑调制屏。这样把彩图分解为三个基色图编码于同一块干板上。三基色编码时所用的散斑屏, 其位移量不同, 但方向一致, 分别用  $\xi_r$ 、 $\xi_g$  和  $\xi_b$  表示, 由 (3) 式预先作了计算, 使三基色的谱面亮纹恰好重合于一处, 以利我们用一个狭缝滤波器提取有用信息。在实验中, 我们取三者分别是 0.020、0.015 和 0.013 mm。假彩色编码的预处理与此大致相同, 先复制一拷贝负片, 在白光照明下, 将正、负片(用相应的散斑屏)编码于干板上, 所用散斑屏的位移量分别为 0.020 和 0.015 mm, 它们对应于红色

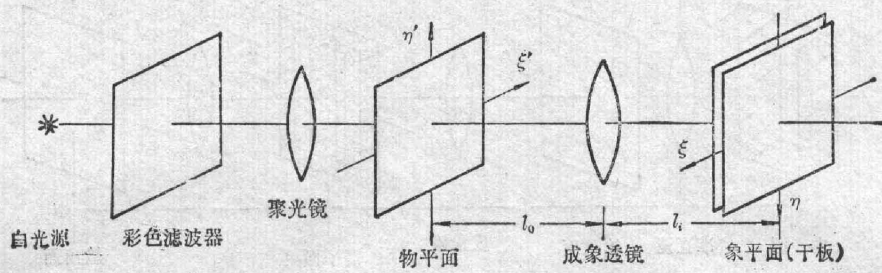


图 4 编码光路

Fig. 4 Encording optical arrangement

和绿色。

曝光和显影等操作控制于干板的线性域内,将制得的编码片置于白光处理系统中,经空间滤波(可用一个单缝或双缝空间滤波器),便得到所需要的输出。现以彩色存储为例进行分析。设彩色透明片的强度透过率为:

$$\tau(\xi, \eta) = K [I_r(\xi, \eta) + I_g(\xi, \eta) + I_b(\xi, \eta)], \quad (6)$$

式中  $K$  为常数。编码片的振幅透过率为:

$$\begin{aligned} t(\xi, \eta) = & A - B \{ I_r(\xi, \eta) [D_r(\xi, \eta) \otimes (\delta(\xi, \eta) + \dots + \delta(\xi - N\xi_g, \eta))] \\ & + I_g(\xi, \eta) [D_g(\xi, \eta) \otimes (\delta(\xi, \eta) + \dots + \delta(\xi - N\xi_g, \eta))] \\ & + I_b(\xi, \eta) [D_b(\xi, \eta) \otimes (\delta(\xi, \eta) + \dots + \delta(\xi - N\xi_b, \eta))] \}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中用等量曝光的散斑屏编码,  $A, B$  为常数。将 (7) 式代入 (5) 式, 并设滤波狭缝函数为

$$f(u, v; \lambda_m) = \text{rect} \frac{u-u_0}{c} \text{rect} \frac{v}{d} + \text{rect} \frac{u+u_0}{c} \text{rect} \frac{v}{d}, \quad c, d$$

是狭缝的宽和长,  $u_0 = \frac{\lambda_r f}{\xi_r} = \frac{\lambda_g f}{\xi_g} = \frac{\lambda_b f}{\xi_b}$  表示滤波狭缝在亮缝处。由此得到输出强度:

$$I_{\text{out}}(x, y) = K_1 I_r^2(x, y) + K_2 I_g^2(x, y) + K_3 I_b^2(x, y), \quad (8)$$

式中  $K_1 = \frac{abB^2}{(\lambda_r f)^2} I_{\lambda_r} D_r^2(x, y) \sin c \left( \frac{a\Delta\xi}{\lambda_r f} \right) \sin c \left( \frac{b\Delta\eta}{\lambda_r f} \right)$ ,  $K_2 = \frac{abB^2}{(\lambda_g f)^2} I_{\lambda_g} D_g^2(x, y) \sin c \left( \frac{a\Delta\xi}{\lambda_g f} \right) \sin c \left( \frac{b\Delta\eta}{\lambda_g f} \right)$ ,  $K_3 = \frac{abB^2}{(\lambda_b f)^2} \times I_{\lambda_b} D_b^2(x, y) \sin c \left( \frac{a\Delta\xi}{\lambda_b f} \right) \sin c \left( \frac{b\Delta\eta}{\lambda_b f} \right)$ 。显然, 只要适当选取有关参数, 易使  $K_1 = K_2 = K_3 = K$ , 于是 (8) 式简化为:

$$I_{\text{out}}(x, y) = K [I_r^2(x, y) + I_g^2(x, y) + I_b^2(x, y)], \quad (9)$$

我们得到了原彩色图的恢复。同理, 我们可以求得假彩色编码的输出

$$I_{\text{out}}(x, y) = K [I_{\lambda_r} \cdot I_+^2(x, y) + I_{\lambda_g} I_-^2(x, y)], \quad (10)$$

式中  $I_{\lambda_r}, I_{\lambda_g}$  是光源中红、绿光的光强,  $I_+, I_-$  分别是正、负片的光强分布。图 5 是彩色图片存储的原图和再现图[见插页彩图(d), (e)], 图 6 是假彩色编码[见插页彩图(b), (c)]。



(c)

图 6 等密度假彩色编码

Fig. 6 Equidensity pseudocolor encoding

(c) The original picture

## 四、结 束 语

我们利用激光散斑效应制取的散斑调制屏,成功地用于白光图象处理。这种处理方法有许多优点,除了一般白光处理所具有的优点外,它还有:(1) 编码元件制作简易,如屏上透光孔径(杨氏孔)的平均直径,空间频率和曝光次数等易于控制。(2) 编码方式灵活,既可作文献[1]中所述的 $\theta$ 编码,也可作一维多重编码。(3) 没有莫尔条纹,滤波方便。(4) 对照明光的空间相干性要求降低,仅要求一个方向上的相干性,因而可以用缝光源照明,大大提高了输出亮度。当然本方法尚有某些不足之处,如图5和图6中或多或少地存在颗粒噪声,这是一个与编码元件和处理系统都有关的问题,限于本文的内容和篇幅,想另文专门来讨论。

总之,白光处理的一个关键问题是编码方法,目前已经有几种方法,各有优缺点。我们的散斑调制屏编码,优越性是明显的,值得在理论上和实验上进一步探索。

## 参 考 文 献

- [1] F. T. S. Yu, 母国光, 庄松林;《光学学报》, 1981, **1**, No. 1 (Jan), 13~24.
- [2] Edited by J. C. Daity; "Laser Speckle and Related Phenomena", (中译本, 科学出版社, 1981), 13~14.
- [3] 王梓坤;《概率论基础及其应用》, (科学出版社, 1976), 157.
- [4] 王梓坤;《概率论基础及其应用》, (科学出版社, 1976), 82~86.
- [5] B. Saleh; "Photoelectron Statics", (Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1978), 23~25.
- [6] J. W. Goodman; "Introduction to Fourier Optics", (McGraw-Hill, New York, 1968), 57~62.
- [7] M. Born, E. Wolf; "Principles of Optics", (Pergamon Press, sixth ed., 1980), 524~526.
- [8] P. F. Nueller; *Appl. Opt.*, 1969, **8**, No. 2 (Feb), 267~273.  
P. F. Mueller; *Appl. Opt.*, 1969, **8**, No. 10 (Oct), 2051~2057.
- [9] C. S. Ih; *Appl. Opt.*, 1975, **14**, No. 2 (Feb), 438~444
- [10] F. T. S. Yu *et al.*, *Opt. Commun.*, 1978, **27**, No. 23 (Dec) 307
- [11] F. T. S. Yu *et al.*, *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 14 (Jul), 2457.
- [12] E. E. Sicre *et al.*, *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 19 (Oct), 3262.
- [13] 母国光, 王肇圻;《物理学报》, 1982, **31**, No. 11 (Nov) 1547~1553.
- [14] J. W. Goodman *et al.*, *Nouv. Rev. Opt.*, 1976, **7**, No. 5 (S e-Oct), 285.
- [15] 王植恒;《光学学报》, 1982, **2**, No. 2 (Feb), 139~144.
- [16] 于美文, 张静芳;《光学学报》, 1982, **2**, No. 2 (Feb), 145~151.
- [17] G. Rodriguez *et al.*, *Opt. Commun.*, 1981, **38**, No. 1 (Jul), 10~15.
- [18] J. Santamaria, M. Gea *et al.*, *J. Opt.*, 1979, **10**, No. 3 (May-Jun), 151.

## Speckle modulation screen for white-light image processing

WANG DEGEN XU DAXIONG SHEN SHUQUN AND YU CHONGXIU

(Beijing Institute of Post and Telecommunications)

(Received 18 April 1983, revised 22 August 1983)

### Abstract

In this paper, a new method for the white-light image processing using speckle modulation screen is presented. On the basis of the speckle effect of the coherent diffuse light, an optical encoding element called speckle modulation screen is fabricated, which can be widely used in the optical image processing with obvious advantages. The paper describes two experiments on the storage of color pictures and the equidensity pseudocolor encoding of the gray-level pictures.

---

### 首届全国光电器件学术交流会在南京召开

由中国光学学会红外光电器件专业委员会和中国电子学会量子电子学和光电子学分会联合主办的首届全国光电器件学术交流会于1983年12月8~11日在南京市召开。全国十三个省、市46个单位123名代表参加会议。中国光学学会副理事长兼红外光电器件专业委员会主任汤定元教授和中国光学学会副理事长、中国电子学会量子电子学和光电子学分会副主任张连华所长出席了会议。大会收到学术论文100多篇,会议期间共宣讲论文80篇,包括11篇邀请报告。

学术交流会以大会报告和分组交流二种形式进行。会议特邀浙江大学沈庆垓教授等九位同志分别就国内外光电器件、元件的理论探索和研制现状、研究动向及今后展望作了综述性的评述;邀请北京工业学院周立伟副教授作“赴英参加第八届国际光电成像会议并考察报告”;邀请电子工业部某所田志仁同志作“赴日参加第三届国际信息显示会议并考察报告”。

会议从九日起分真空摄像器件、光电倍增管及光电阴极、变象管及象增强器、固体摄像和探测器件及真空显示器件等四个专题进行分组交流和讨论。宣讲的论文从广度和深度上说明我国的光电器件的研制和理论探索都有较大进展。国际上发展的各种器件,我国也都在研制,有些产品的主要性能指标达国外同类产品的先进水平;对一些新型光电器件,如特种真空摄像器件(微光增强管等)、特种(耐高温、高压、震耐)光电倍增管、固体探测器件、固体摄像器件、高速摄影变象管和电子倍增器件等已引起广泛的重视,加强了研究探索,并正在取得一些可喜的进展。我国主要的光电器件及其理论的发展与国际上的总趋势是一致的,但存在相当大的差距,需要迎头赶上。

会议于十一日下午闭幕。大会决定在1984年举行一次光电器件发展研究讨论会;在1985年举行第二届全国光电器件学术交流会。

(黎 风)