

# 用衍射级间干涉编码法作 彩色透明片的档案存贮

方志良 王君庆 母国光  
(南开大学近代光学研究室)

## 提 要

本文提出一种在白光信息处理系统中用一块二维的正交黑白 Ronchi 光栅的衍射级间干涉来形成三原色正弦光栅做彩色编码的新技术。它在作彩色透明片的档案存贮时具有操作简单方便、能有效地避免莫尔条纹实现变频编码及一次完成的优点。可得到令人满意的分辨率和色彩。理论分析与实验结果相符。

## 一、引 言

白光信息处理方法对于彩色图象的处理提供了特有的便利条件,而且避免了相干噪声。用黑白底片作彩色透明片的档案存贮是白光信息处理应用的很好实例。它解决了由于彩色透明片的染料褪色而不能长期存贮的问题。1980年 F. T. S. Yu 等人<sup>[1]</sup>提出用不同取向的 Ronchi 光栅分别调制经三原色滤色片分解的三个原色图象的方法。这种方法需要三次转动光栅和更换滤色片及进行三次曝光来编码,操作烦琐困难且容易产生莫尔条纹。另外,由于编码时把彩色透明片置于 Ronchi 光栅和黑白感光底片之间,使光栅与感光底片不能紧密接触,因此不易保证编码质量。

最近,母国光等人<sup>[2]</sup>提出用三色光栅一次编码的方法。这种方法操作简单方便,并且不仅能作彩色片的存贮,也能一次拍摄彩色景物。由于编码记录的彩色图象的质量关键取决于所用三色光栅的质量,而要制做出较高空间频率的优良三色光栅,在工艺上还有困难。亦存在要求三色光栅与感光底片紧密接触的麻烦。

本文的彩色编码方法与上述二种不同,它通过被记录的彩色透明片和一块二维正交的黑白 Ronchi 光栅相贴着放在白光处理系统的输入平面处,用准直白光照明,在频谱面上得到彩色透明片被光栅衍射的频谱。使互为正交的两个衍射方向中的一个方向中的  $\pm 1$  级通过频谱面上的空间滤波器并经绿色滤色片,而另一个方向的  $\pm 1$  级通过空间滤波器并经红原色滤色片,还让与这两个正交方向成  $45^\circ$  角的方向上的两个一级卷积谱也通过空间滤波器并经蓝原色滤色片。由于经同一原色滤波的两个谱项间的干涉,则形成不同取向(即  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ )分别为不同原色的正弦型调制光栅。由于彩色透明片的衍射频谱经上述三原色滤波后被分解成三个原色图象分别为不同取向的正弦型光栅编码,从而在输出平面上得到彩色透明片的象是被空间彩色编码了的。用黑白底片对该编码象一次曝光经冲洗便可得到编码片。将该编码片置于白光信息处理系统的输入平面处,经频谱面上的彩色滤波<sup>[1,2]</sup>,在输

出平面处可再现原彩色图象。

1. 空间彩色编码

把被记录的彩色透明片和一块二维正交的黑白 Ronchi 光栅相贴着置于白光信息处理

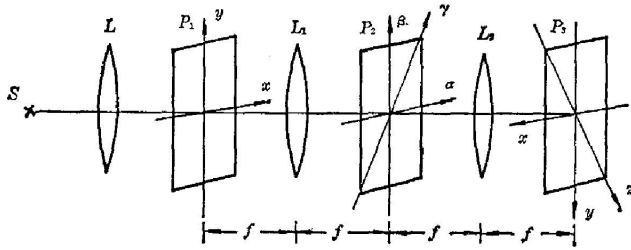


图1 白光光学信息处理系统  
Fig. 1 White light processor

系统(如图1所示)的输入平面  $P_1$  处。假定彩色透明片的透过率分布为  $f(x, y)$ 。正交二维 Ronchi 光栅  $G_R(x, y)$  可写成<sup>[3]</sup>

$$G_R(x, y) = G_R(x)G_R(y) = \left\{ \left[ \frac{1}{\tau} \text{rect}\left(\frac{2x}{\tau}\right) \right] \otimes \left[ \text{comb}\left(\frac{x}{\tau}\right) \right] \right\} \times \left\{ \left[ \frac{1}{\tau} \text{rect}\left(\frac{2y}{\tau}\right) \right] \otimes \left[ \text{comb}\left(\frac{y}{\tau}\right) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中  $\tau$  为光栅常数。用准直白光照明输入面处的  $f(x, y)$  及  $G_R(x, y)$ ，通过透镜  $L_1$  的傅里叶变换，在频谱面  $P_2$  上的光场分布为<sup>[3]</sup>

$$\mathcal{F}[f(x, y) \cdot G_R(x, y)] = F(\alpha, \beta) \otimes \left\{ \left[ \frac{1}{2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{m}{2}\right) \delta\left(\alpha - \frac{m}{\tau}\right) \right] \otimes \left[ \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{n}{2}\right) \delta\left(\beta - \frac{n}{\tau}\right) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中  $F(\alpha, \beta)$  是  $f(x, y)$  的傅里叶变换。取(2)式的大括号中  $m = \pm 1$  和  $n = \pm 1$  的项(即衍射的  $\pm 1$  级)以及  $m = +1$  与  $n = +1$  和  $m = -1$  与  $n = -1$  的二个一级交叉卷积项，删掉其它项，然后作卷积得

$$g_F(\alpha, \beta) = F(\alpha, \beta) \otimes \left\{ \frac{1}{2\pi} \delta\left(\alpha \pm \frac{1}{\tau}, \beta\right) + \frac{1}{2\pi} \delta\left(\alpha, \beta \pm \frac{1}{\tau}\right) + \frac{1}{\pi^2} \delta\left(\alpha + \frac{1}{\tau}, \beta + \frac{1}{\tau}\right) + \frac{1}{\pi^2} \delta\left(\alpha - \frac{1}{\tau}, \beta - \frac{1}{\tau}\right) \right\}, \quad (3)$$

式中后二项是两个一级交叉卷积项，它们位于与  $\alpha, \beta$  成  $45^\circ$  角的方向上，令该方向坐标为  $\gamma$ ，则(3)式可以写成

$$g_F(\alpha, \beta) = F(\alpha, \beta) \otimes \left\{ \frac{1}{2\pi} \delta\left(\alpha \pm \frac{1}{\tau}, \beta\right) + \frac{1}{2\pi} \delta\left(\alpha, \beta \pm \frac{1}{\tau}\right) + \frac{1}{\pi^2} \delta\left(\gamma \pm \frac{\sqrt{2}}{\tau}\right) \right\}. \quad (4)$$

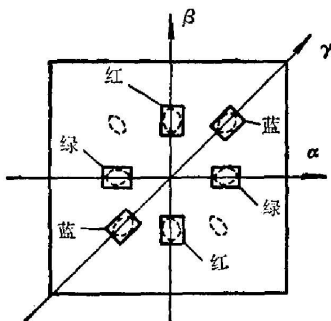


图2 编码时的滤波器  
Fig. 2 Encoding filter

置于频谱面  $P_2$  上的滤波器分别让  $\alpha$  方向的  $\pm 1$  级经绿原色滤色片、 $\beta$  方向的  $\pm 1$  级经红原色滤色片、 $\gamma$  方向的  $\pm 1$  级的两个交叉卷积项经蓝原色滤色片(如图2所示)。注意到经上述彩色滤波后， $f(x, y)$  被分解成红、绿、蓝三个原色象并且分别被经同一原色滤波的  $\pm 1$  级谱之间的干涉形成的三个方向( $0^\circ, 90^\circ, 45^\circ$ )为红、绿、蓝色的正弦型光栅所调制。则由透镜  $L_2$  的傅里叶逆变换在输出面  $P_3$  上得到光场分布为

$$g(x, y) = K \left\{ f_r(x, y) \cos^2 \frac{2\pi x}{\tau} + f_g(x, y) \cos^2 \frac{2\pi y}{\tau} + f_b(x, y) \cos^2 \frac{2\sqrt{2}\pi z}{\tau} \right\}, \quad (5)$$

式中下标 r、g、b 表示红、绿、蓝三原色。K 是由控制三原色滤色片的光强透过率而定的比例常数。在输出面  $P_3$  处用黑白底片对编码象一次曝光经冲洗后得编码负片, 根据(5)式并略去比例系数 K, 其光强透过率分布为

$$T_n(x, y) = \left\{ T_r(x, y) \cos^2 \frac{2\pi x}{\tau} + T_g(x, y) \cos^2 \frac{2\pi y}{\tau} + T_b(x, y) \cos^2 \frac{2\sqrt{2}\pi z}{\tau} \right\}^{-\gamma_1}, \quad (6)$$

式中的  $\gamma_1$  是感光底片的伽玛值。  $T_r(x, y) = |f_r(x, y)|^2$ 、 $T_g(x, y) = |f_g(x, y)|^2$ 、 $T_b(x, y) = |f_b(x, y)|^2$ 。

再用伽玛值为  $\gamma_2$  的黑白底片将编码负片翻拍成编码正片, 并令  $\gamma_1 \cdot \gamma_2 = 2$ , 则得到的编码正片为线性的振幅透过率<sup>[1]</sup>为

$$T_P(x, y) = \left\{ T_r(x, y) \cos^2 \frac{2\pi x}{\tau} + T_g(x, y) \cos^2 \frac{2\pi y}{\tau} + T_b(x, y) \cos^2 \frac{2\sqrt{2}\pi z}{\tau} \right\}. \quad (7)$$

由(7)式可见, 编码片记录的彩色透明片的象是被编码了的彩色象, 即合成该彩色象的三个原色象  $T_r$ 、 $T_g$ 、 $T_b$  分别被光强透过率为  $\cos^2\left(\frac{2\pi x}{\tau}\right)$ 、 $\cos^2\left(\frac{2\pi y}{\tau}\right)$ 、 $\cos^2\left(\frac{2\sqrt{2}\pi z}{\tau}\right)$  的光栅调制。显而易见,  $x$  和  $y$  方向的调制光栅的空间频率为  $\left(\frac{2}{\tau}\right)$ ,  $z$  方向调制光栅的空间频率为  $\left(\frac{2\sqrt{2}}{\tau}\right)$ , 它们分别是原  $P_1$  面上二维正交光栅空间频率  $\left(\frac{1}{\tau}\right)$  的 2 和  $2\sqrt{2}$  倍。

## 2. 再现彩色象

将(7)式所示的编码正片  $T_P$  置于图 1 所示白光处理系统的输入面  $P_1$  处, 经透镜  $L_1$  的傅里叶变换在频谱面  $P_2$  处得到频谱分布

$$E_P(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} [T_r(\alpha, \beta) + T_g(\alpha, \beta) + T_b(\gamma, \varphi)] + \frac{1}{4} \left[ T_r\left(\alpha \pm \frac{\lambda_r f}{\pi \tau}, \beta\right) + T_g\left(\alpha, \beta \pm \frac{\lambda_g f}{\pi \tau}\right) + T_b\left(\gamma \pm \frac{\sqrt{2}\lambda_b f}{\pi \tau}, \varphi\right) \right], \quad (8)$$

式中  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别为对应于光栅三个方向 ( $x$ 、 $y$ 、 $z$ ) 在频谱面上的三个衍射方向坐标。式中的  $T_r(\alpha, \beta)$ 、 $T_g(\alpha, \beta)$ 、 $T_b(\gamma, \varphi)$  分别为 (7) 式中  $T_r(x, y)$ 、 $T_g(x, y)$ 、 $T_b(x, y)$  的傅里叶变换。 $f$  为变换透镜的焦距。

令频谱面上的滤波器挡住零级且仅让如图 3 所示的三个衍射一级谱通过, 并分别经红、绿、蓝三原色滤色片。调节滤色片透过率为同一常数并略去, 则经滤波后的复振幅分布为

$$E_P(\alpha, \beta) = T_r\left(\alpha + \frac{\lambda_r f}{\pi \tau}, \beta\right) + T_g\left(\alpha, \beta + \frac{\lambda_g f}{\pi \tau}\right) + T_b\left(\gamma - \frac{\sqrt{2}\lambda_b f}{\pi \tau}, \varphi\right). \quad (9)$$

因为三原色光互不相干, 则(9)式所示的频谱经透镜  $L_2$  的傅里叶逆变换, 在输出面  $P_3$  上得光强分布<sup>[1]</sup>

$$I(x, y) = T_r^2(x, y) + T_g^2(x, y) + T_b^2(x, y), \quad (10)$$

(10) 式表明, 在输出面  $P_3$  上再现了原彩色图象。

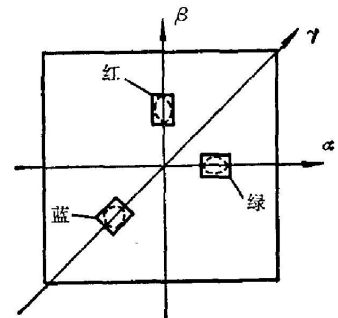


图 3 再现时的滤波器  
Fig. 3 Decoding filter

### 三、实验及结果

#### 1. 二维正交光栅

我们用一块 81/mm 的 Ronchi 光栅与超微粒感光板紧密接触,用白光照射并选择合适曝光量先曝光一次,然后将光栅相对原方向转  $90^\circ$  再一次曝光,经冲洗后得到如(1)式所示的二维正交的 Ronchi 光栅。

#### 2. 编码和记录

实验装置如图 1 所示。白光光源是用 150 W 高压短弧氙灯经聚焦并用直径为 0.5 mm 的小孔滤波造成一点光源  $S$ ,再通过准直透镜  $L$  产生准直光照明输入平面  $P_1$ 。将上述制备的 81/mm 的二维正交 Ronchi 光栅和要存贮的彩色透明片贴着放在输入平面  $P_1$  处,经透镜  $L_1(f=450\text{ mm})$  的傅里叶变换,在频谱面  $P_2$  上得衍射频谱并用图 2 所示的滤波器对该频谱进行彩色滤波。所用的三个原色滤色片是 Kodak 三原色滤色片;即 #29(R)、#61(G)、#47(B)。用透镜  $L_2$ (同  $L_1$ ) 作傅里叶逆变换,在输出平面  $P_3$  上用黑白底片( $\gamma_1=1$ )对得到的编码彩色象一次曝光,经冲洗得到如(6)式所示的编码负片。再用黑白底片( $\gamma_2=2$ )对编码负片翻拍一次则得到如(7)式所示的编码正片。经测量,该编码片的调制光栅的空间频率在互相垂直方向(即  $x$ 、 $y$  方向)约为 161/mm,在斜方向(即与  $x$ 、 $y$  成  $45^\circ$ )约为 221/mm。

#### 3. 再现原彩色图象

将上述得到的编码正片置于图 1 所示装置的输入平面  $P_1$  处,用编码时一样的准直白光照明。在频谱面  $P_2$  处用图 3 所示滤波器对频谱进行彩色滤波,所用滤色片也与编码时相同。在输出面  $P_3$  上得到原彩色透明片的彩色图象(图 4,见彩色插页——5)。可用毛玻璃直接观察该再现象。对该再现的彩色象拍照结果(图 5,见彩色插页——6)。

### 四、讨 论

本文提出一种在白光处理系统中用一块黑白二维正交 Ronchi 光栅方便地产生三原色正弦型光栅以及由该光栅实现彩色编码的方法。这种方法适于用黑白底片存贮彩色透明片,亦可作假彩色编码,彩色图象的恢复和增强等工作。它除了白光信息处理方法的无相干噪声等优点之外,还有如下优点:

(1) 这种用黑白底片存贮彩色透明片的方法避免 F. T. S. Yu<sup>[1]</sup> 的三次编码的麻烦,而只要一次编码记录,操作简单方便。由于本方法形成的编码光栅可达到较高的空间频率及具有与所用三原色滤色片同样优良的三原色,从而确保用黑白底片记录的彩色图象有令人满意的分辨率以及能再现逼真于原图象的彩色。

(2) 与其它三原色彩色编码法<sup>[1]</sup> 相比较,本文的方法能方便且有效地避免莫尔条纹。由(5)式可见  $z$  方向( $45^\circ$  方向)的调制光栅的空间频率是  $x$ 、 $y$  方向调制光栅的  $\sqrt{2}$  倍。再现彩色象时,编码片上  $z$  方向光栅的衍射一级恰好和  $x$ 、 $y$  方向光栅的衍射一级交叉卷积项自然地在频谱面上完全重合,则再现彩色象不产生莫尔条纹。

(3) 因为本方法编码时, 是通过图 2 所示的彩色滤波在输出面上直接得到一编码的彩色象, 用黑白底片直接在输出面处对编码象感光, 故不存在底片与光栅紧密接触的问题。

(4) 由本文的(2)式及原理部分的讨论可见, 在不考虑光能利用率的情况下, 如果在编码时的频谱滤波让更高级次通过, 显然可以得到更高的倍频编码。

#### 参 考 文 献

- [1] F. T. S. Yu; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 14 (16 Jul), 2457.  
[2] 母国光等;《仪器仪表学报》, 1983, **4**, No. 2 (May), 124.  
[3] A. K. Ghatak, K. Thyagarajan; *Contemporary Optics*, (Plenum Press, 1978), 199.

### An encoding technique for archival storage of color film by diffraction orders interference

FANG ZHILIANG WANG JUNQING AND MU GUOGUANG  
(*Moder Optics Research Laboratory, Nankai University, Tianjin*)

(Received 3 October 1983; revised 16 December 1983)

#### Abstract

A new technique for archival storage of color films through a three primary color grating formed by interference between diffraction orders of black-white orthogonal Ronchi ruling in a white-light processor is described. Compared with conventional encoding method, there are some advantages such as no Morie fringe, the encoding frequency can be changed, and the encoding process can be simply completed in one step. The color and resolution of retrieved image are satisfactory and the results of experiment coincide with theoretical analysis.