

# 颜色可调假彩色化新方法

周 英 陈祯培  
(四川大学物理系)

## 提 要

本文提出一种颜色可调的密度假彩色编码的新光学方法。该方法是在光学相位调制密度假彩色编码方法的基础上,利用白光系统中双光栅的衍射效应和狭缝滤波技术,实现颜色可调的密度假彩色编码。给出了详细的理论分析,实验验证和实验结果。实践证明这是一种实用价值很高的方法。  
关键词: 图像处理,假彩色化,双光栅衍射。

## 一、引 言

黑白图片假彩色化是图像处理中一个重要技术。在众多的光学假彩色化方法<sup>[1,2]</sup>中,四川大学、南开大学、北师大三校发明的“光栅编码相位型图像假彩色化技术”<sup>[3,4]</sup>,具有很高的实用价值,已在遥感、生物医学、气象等图像处理中得到应用。但用这种方法在制作一块好的、每级输出颜色是固定的光栅调制相位片时,却不能实时调试。

为提高这种方法信息处理的灵活性,我们提出一种颜色实时可调的新假彩色化方法。新方法基于原方法之上,将光栅调制相位片与一周期相同的光栅重叠,利用它们的白光系统中的衍射效应<sup>[5,6,7]</sup>与空间滤波技术,对某一衍射级次输出的假彩色图像进行处理。当光栅与光栅调制相位片在垂直光栅线纹方向进行相对移动时,能实时改变假彩色图像的颜色分布,得到多幅假彩色图像。

## 二、理 论 分 析

图1是新方法实验系统装置图。 $L_1$ 、 $L_2$ 是两块傅氏变换透镜,平行白光入射在标准黑白光栅  $G_1$  上, $G_2$ 是光栅调制相位片,位于该系统的输入面。 $G_1$ 、 $G_2$ 相距一定值  $Z$ ,在  $x$  方

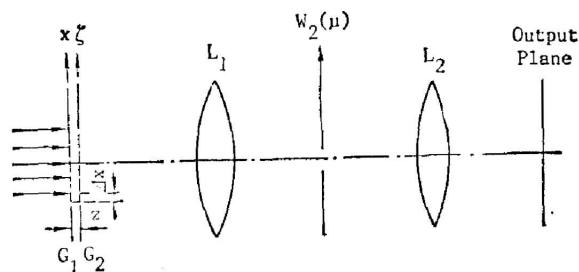


Fig. 1 System diagram for adjustable pseudo-coloring

向的相对横向位移为  $\Delta x$ ，且两光栅的光栅条纹平行。并在傅氏平面  $W$  上放一可调滤波狭缝。

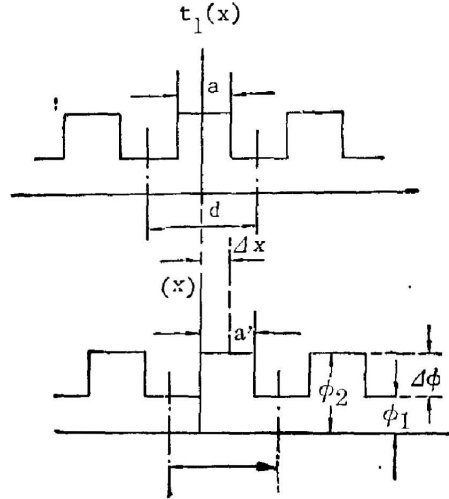


Fig. 2 Profiles of gratings

图 2 是  $G_1, G_2$  两光栅的截面示意图。 $d$  是光栅周期， $a, a'$  分别是  $G_1, G_2$  的光栅条纹宽度。写出它们的光栅方程如下：

黑白光栅  $G_1$  的振幅透过率

$$t_1(x) = \frac{1}{d} \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) * \text{comb}\left(\frac{x}{d}\right) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \exp\left(j2\pi \frac{kx}{d}\right), \quad (1)$$

其中

$$c_k = \frac{1}{d} \int_{-a/2}^{a/2} t_1(x) \exp(-j2\pi kx/d) dx = \frac{a}{d} \text{sinc}\left(\frac{ak}{d}\right). \quad (2)$$

光栅调制相位片  $G_2$  的振幅透过率为

$$t_2(x) = \exp(j\phi_2) \left\{ \text{rect}\left(\frac{x}{d}\right) - \text{rect}\left(\frac{x}{a'}\right) (1 - \exp(j\Delta\phi)) \right\} * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - nd - \Delta x), \quad (3)$$

式中  $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta_i$ ， $\Delta_i$  是光栅调制相位片  $G_2$  的每一个光栅周期内两部分之光程差。

适当控制相位片的制作过程， $\Delta_i$  与原图片密度函数的关系式为<sup>[4]</sup>

$$\Delta_i = c \cdot [D_1 - \nu D_i(x, y) - D_0]. \quad (4)$$

其中  $D_0$  是底片的灰雾密度； $D_1$  是与曝光量和底片反差系数有关的常数； $D_i(x, y)$  是输入图像的密度分布； $\nu$  是底片反差系数； $c$  是与漂白工艺有关的系数。可见，图像密度与  $\Delta_i$  一一对应。

我们认为光从  $G_1$  到  $G_2$  进行了菲涅尔衍射， $G_1$  在  $G_2$  光栅平面的复振幅分布由菲涅尔-基尔霍夫公式给出

$$W_1(\xi) = \frac{j}{\lambda Z_1} \exp(j2\pi Z/\lambda) \cdot \int t_1(x) \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x-\xi}{2Z}\right)^2\right] dx, \quad (5)$$

于是在滤波平面上得到的傅氏谱为

$$\begin{aligned} W_2(u) &= \int t_2(\xi) W_1(\xi) \exp(-j2\pi\xi u) d\xi \\ &= \frac{1}{\lambda Z} \iint t_1(x) t_2(\xi) \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left(\frac{x-\xi}{2Z}\right)^2\right] \exp(-j2\pi\xi u) d\xi du. \end{aligned} \quad (6)$$

利用积分公式

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(j\pi x^2/2) dx = 1 + j, \quad (7)$$

并将(2)式代入(6)式,对  $x$  积分,略去一些无关紧要的常数得

$$W_2(u) = \left| \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \exp\left(-j\pi\lambda Z \frac{k^2}{d^2}\right) \int_{-\infty}^{\infty} t_2(\xi) \exp\left[-j2\pi\left(du - k\right) \frac{\xi}{d}\right] d\xi \right|, \quad (8)$$

将  $t_2(x)$  代入(8)式得

$$\begin{aligned} W_2(u) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{a}{d} \operatorname{sinc}\left(\frac{a}{d}k\right) \left\{ \operatorname{sinc}(n) - \frac{a'}{d} \operatorname{sinc}\left(\frac{a'n}{d}\right) (1 - \exp[j\Delta\phi]) \right\} \\ &\quad \cdot \exp\left(-j\pi\lambda Z \frac{k^2}{d^2}\right) \exp\left(-j2\pi\Delta x \cdot \frac{n}{d}\right) \delta\left(u - \frac{n}{d} - \frac{k}{n}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

从(9)式看出,滤波平面上是一串频谱岛,每一级频谱由  $(n, k)$  组合而成。组合零级的  $(n, k)$  值取

$$\begin{cases} n=0 \\ k=0; \end{cases} \begin{cases} n=1 \\ k=-1; \end{cases} \begin{cases} n=-1 \\ k=1; \end{cases} \begin{cases} n=2 \\ k=-2; \end{cases} \begin{cases} n=-2 \\ k=2; \end{cases} \dots$$

组合 +1 级的  $(n, k)$  值取

$$\begin{cases} n=1 \\ k=0; \end{cases} \begin{cases} n=0 \\ k=1; \end{cases} \begin{cases} n=2 \\ k=-1; \end{cases} \begin{cases} n=-1 \\ k=2; \end{cases} \dots$$

等等。每级是一无穷级数之和。要求得出每级输出强度的公式,需作近似计算。下面我们重点考察零级。

零级  $(n, k)$  组合中,不等于零的  $(|n|, |k|)$  组合项之值至少比  $(0, 0)$  项小  $\frac{n^2\pi^2}{4}$  倍,如  $(1, -1)$ ,  $(-1, 1)$  项小  $\frac{\pi^2}{4}$  倍;  $(2, -2)$ ,  $(-2, 2)$  小  $\pi^2$  倍,作合理近似,我们舍去  $(n, k)$  中  $n$  或  $k$  绝对值大于 1 的项。于是从狭缝出射傅氏平面的零级频谱

$$\begin{aligned} W_2^0(u) &\doteq \frac{a}{d} \left[ 1 - \frac{a'}{d} (1 - \exp j\Delta\phi) \right] \delta(u) - \frac{2}{\pi^2} \sin\left(\frac{a\pi}{d}\right) \sin\left(\frac{a'n}{d}\right) \\ &\quad \cdot (1 - \exp[j\Delta\phi]) \exp\left(-j\frac{\pi\lambda Z}{d^2}\right) \cos\left(2\pi\frac{\Delta x}{d}\right) \delta(u). \end{aligned} \quad (10)$$

从而,输出平面获得的复振幅分布

$$\begin{aligned} g^0 &\doteq \frac{a}{d} \left[ 1 - \frac{a'}{d} (1 - \exp j\Delta\phi) \right] - \frac{2}{\pi^2} \sin\left(\frac{a\pi}{d}\right) \sin\left(\frac{a'\pi}{d}\right) (1 - \exp j\Delta\phi) \\ &\quad \cdot \exp\left(-j\pi\frac{\lambda Z}{d^2}\right) \cos\left(2\pi\frac{\Delta x}{d}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

其强度

$$I^0 = |g^0|^2 = \frac{a^2}{d} \left[ 1 - \frac{2a'}{d} \left(1 - \frac{a'}{d}\right) (1 - \cos\Delta\phi) \right]$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{8}{\pi^4} \sin^2\left(\frac{a\pi}{d}\right) \sin^2\left(\frac{a'\pi}{d}\right) (1 - \cos \Delta\phi) \cos^2 2\pi \frac{\Delta x}{d} \\
& - \frac{4a}{\pi^2 d} \sin\left(\frac{a\pi}{d}\right) \sin\left(\frac{a'\pi}{d}\right) \cos\left(\frac{2\pi \Delta x}{d}\right) \left[ \cos \frac{\pi \lambda Z}{d^2} \right. \\
& - \frac{2a}{d} (1 - \cos \Delta\phi) \cos \frac{\pi \lambda Z}{d^2} \\
& \left. - \cos\left(\Delta\phi - \frac{\pi \lambda Z}{d^2}\right) \right]. \quad (12)
\end{aligned}$$

所以,  $I^0$  是  $\Delta\phi$ 、 $\lambda$ 、 $\Delta x$  的函数 ( $a$ 、 $a'$ 、 $d$ 、 $Z$  是固定常数), 改变  $\Delta x$ , 从而实现了颜色实时可调的密度假彩色编码。

同样, 对 +1 级也可作类似推导。但因为 +1 级频谱保留项较多, 运算复杂, 我们只讨论  $a = a' = \frac{d}{2}$  的特殊情况。

当  $a = a' = \frac{d}{2}$  时,

$$\begin{aligned}
W_2(u) = & \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1}{k\pi} \sin \frac{k\pi}{2} \left[ \sin \alpha(n) - \frac{1}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) (1 - \exp j \Delta\phi) \right] \\
& \cdot \exp\left(-j\pi\lambda Z \frac{k^2}{d^2}\right) \exp\left(-j2\pi \Delta x \cdot \frac{n}{d}\right) \delta\left(u - \frac{n}{d} - \frac{k}{d}\right), \quad (13)
\end{aligned}$$

上式中如果  $n$  或  $k$  为不等于零的偶数, 该  $(n, k)$  组合项为零, 由此 +1 级频谱为

$$\begin{aligned}
W_{2(u)}^{+1} = & \frac{1}{2\pi} (1 + \exp j \Delta\phi) \exp\left(-j \frac{\pi \lambda Z}{d^2}\right) \delta\left(u - \frac{1}{d}\right) - \frac{1}{2\pi} (1 - \exp j \Delta\phi) \\
& \cdot \exp\left(-\frac{j^2 \pi \Delta x}{d}\right) \delta\left(u - \frac{1}{d}\right), \quad (14)
\end{aligned}$$

最后算出

$$I^{+1} = \frac{1}{\pi^2} \left[ 1 - \sin \Delta\phi \sin\left(\frac{\pi \lambda Z}{d^2} - \frac{2\pi \Delta x}{d}\right) \right], \quad (15)$$

$I^{+1}$  也是  $\Delta\phi$ 、 $\lambda$ 、 $\Delta x$  的函数, +1 级也能对密度假彩色化的颜色进行实时调试。这一结论可类推到其它级次。

证光程差  $\Delta_i$  为某一常数值, 用计算机根据 (12)、(15) 式给出当  $\lambda$  分别取  $6100 \text{ \AA}$ 、 $5240 \text{ \AA}$ 、 $4200 \text{ \AA}$  (与实验中使用滤色片的红、绿、蓝三波长对应) 时, 输出强度  $I^0$ 、 $I^{+1}$  随相对位移

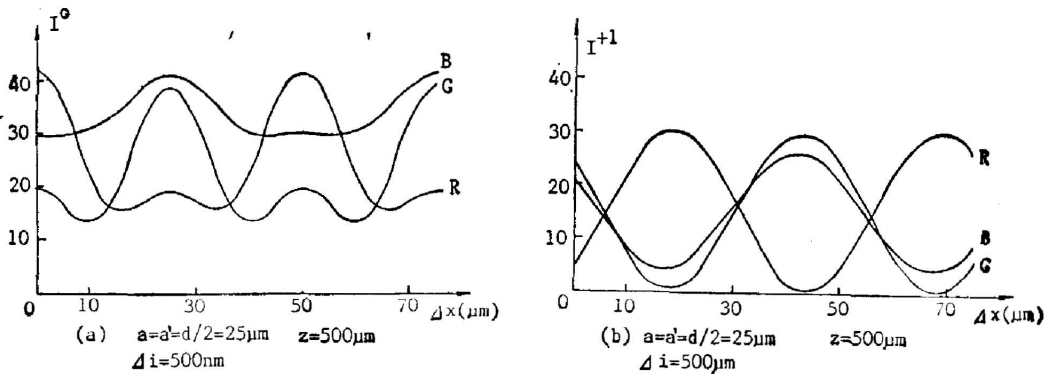


Fig. 3 Theory plot of  $I^0$ ,  $I^{+1}$  versus  $\Delta x$ , here  $a = a' = \frac{d}{2} = 25 \mu\text{m}$ ,  $Z = 500 \mu\text{m}$

$\Delta x$  变化的曲线,如图 3(a, b)所示。常数  $a'$ ,  $\alpha$ ,  $d$ ,  $Z$  取实验中常出现之值。从图 3 看出,对一个不变的密度值,输出强度以  $\lambda$  为参数随  $\Delta x$  而变化。在任意一个  $\Delta x$  位置,各单色光的强度输出不同,它们按不等权进行非相干叠加后,形成某种颜色。根据色度学三原色理论,可以从图 3 看出颜色随  $\Delta x$  变化的大致情况。

上面分析中  $G_1$  是一块黑白光栅,  $G_1$  还可以是一块光程差  $\Delta_i$  为某一常数的光栅调制相位片。这种双相位型光栅实现颜色可调假彩色化方法的缺点在于制作一块相位差均匀的大面积相位片较困难,但它的总能量损失较黑白光栅小一倍,而且由于相位片特殊的衍射作用,强度随  $\Delta x$  的变化很大,调色效果好,是很有价值的方法。有关它的讨论我们将在另文详细叙述。

实验中  $Z$  一般在 0.5 mm 左右,当  $Z \rightarrow 0$  时,可以用两透过率相乘的方法求出强度分布公式。

### 三、理论的验证

公式(12)、(15)利用了菲涅尔-基尔霍夫衍射理论,而且(12)式是在近似计算的情况下推导出的。为了证明输出强度公式的正确性,我们在图 1 输出平面上,用一硒光电池光强度计探测强度随横向位移  $\Delta x$  的变化值。

制一块  $\Delta_i$  为某一常数的均匀光栅调制相位片  $G_2$ ,  $G_1$  是一块黑白光栅,两光栅周期均为  $50 \mu\text{m}$ ,  $Z$  约为 0.5 mm,在每一个  $\Delta x$  位置,用三块中心波长分别是  $\lambda_R = 6100 \text{ \AA}$ ,  $\lambda_G = 5240 \text{ \AA}$ ,  $\lambda_B = 4200 \text{ \AA}$  的干涉滤色片,依次放在图 1 滤波狭缝处,分别测出对应的三个强度值,  $\Delta x$  每隔  $5 \mu\text{m}$  测量强度一次,得到图 4 的三原色  $I^0 - \Delta x$ ,  $I^{+1} - \Delta x$  曲线。我们对几块  $\Delta_i$  不同的均匀相位片进行了测量,得到的都是与图 4 形状相同的曲线。注意,我们没考虑光源、滤色片、硒光电池光谱分布的影响。

比较图 3 理论曲线与图 4 实验曲线。可直观地看出实验结果与理论计算值非常吻合。每条单色  $I - \Delta x$  曲线都是类正弦的周期曲线,周期都为  $50 \mu\text{m}$ 。  $I^0 - \Delta x$  有两个峰值,不同波长曲线出现主、次峰位置有交叉,这样可调色的范围很大。  $I^{+1} - \Delta x$  曲线都是正弦曲线,不同波

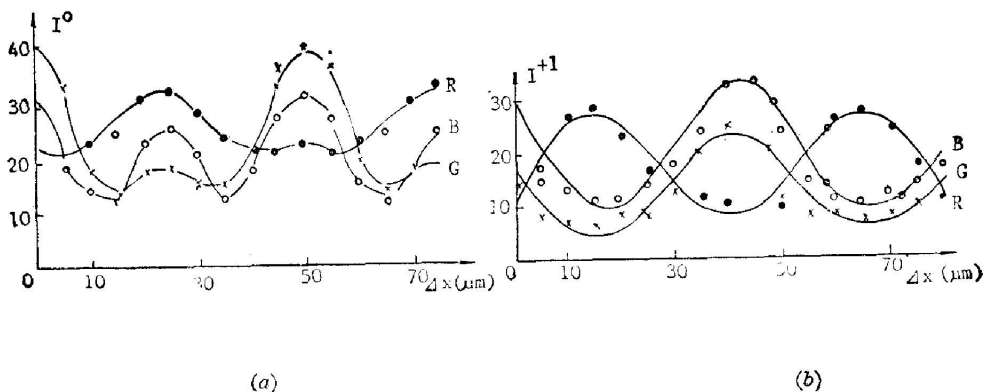


Fig. 4 Experiment plot of  $I^0$ ,  $I^{+1}$  versus  $\Delta x$

长强度的振幅和初相位不同,且极值位置有移动。所有这些说明了本方法在调色这个意义上的优越性。

#### 四、实验及其结果

我们对上海幅 MSS-5 波段陆地卫星黑白图片进行了调色假彩色化。实验采用一维罗奇光栅,频率为  $201/\text{mm}$ ,面积为  $55 \times 55 \text{mm}^2$ ,对某个  $\Delta x$  位置输出的彩色图像用彩色相纸记录。图 5、图 6 分别是零级、一级彩色化输出。图 4(c)、图 6(e)是原不调色方法的假彩色图片。我们从图 5(a)中看出,长江入海口崇明岛地貌信息比照片(c)示出的该地区信息丰富,色调类型较多,且影像轮廓更为清晰。

(a)、(b)、(c) Image by old method

Fig. 5 Zero order pseudo-coloring images of satellite MSS-5 black and white picture for Shanghai areas

(a)~(d)、(e) Image by old method

Fig. 6 First order pseudo-coloring images

[图 5、6 请见本期彩色插页] [Fig. 5 and Fig. 6, Please see colour plate]

#### 五、色度分析

根据公式(12),利用 CIE1931 标准色度学系统,计算出在  $A$  光源照明下某个  $\Delta_i$  值,当  $\Delta x$  改变时的色度曲线,如图 7 所示。图中曲线 1、2 分别对应两个  $\Delta_i$  值,当  $\Delta x$  在一个强度周期内变化时得到的色度曲线。我们看出在不调色假彩色编码方法中,位于色度图上一点的颜色,经调色后,扩展成一条曲线,增加了编码颜色的范围,所以新方法可以增加饱和度,克服混色现象,对密度进行细分。

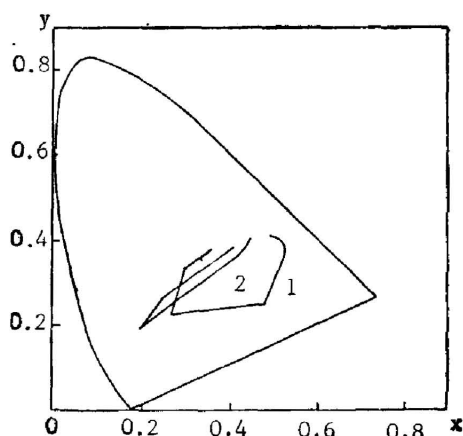


Fig. 7

## 六、结 论

我们提出的新方法,实现了颜色实时可调假彩色编码,它具有噪声低、分辨率高、光强利用率高、装置简单、操作方便的特点。与原方法相比,新方法可以使饱和度增加,编码颜色范围增大,密度层次细分。更重要的是它增加了光学方法的灵活性。

在本文的完成过程中,李继陶、周焜、钟永碧老师给予了很大帮助,在此深表谢意。

### 参 考 文 献

- [1] F. T. S. Yu, A. Tai and H. Chen; *J. Opt.*, 1978, **9**, No. 5 (Sept-Oct), 269~273.
- [2] T. H. Chao, S. L. Thuang, F. T. S. Yu; *Opt. Lett.*, 1980, **5**, No. 6 (Jun), 230~232.
- [3] 郭履蓉、陈祯培等;《光学学报》,1984, **4**, No. 2 (Feb), 145~147.
- [4] 张静江等;《光学学报》,1985, **5**, No. 10 (Oct), 944~947.
- [5] K. Kodate, T. Kamiya and H. Takenaka; *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1975, **14**, No. 9 (Sep), 1323~1334.
- [6] Y. Torii and Y. Mizashima; *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, **68**, No. 12 (Dec), 1716~1731.
- [7] Y. Torii and Y. Mizashima; *Opt. Commu.*, 1977, **23**, No. 1 (Oct), 135~138.

## A new adjustable pseudo-coloring method

ZHOU YIING CHENG ZHENPEI

(Physics Department Sichuan University)

(Received 14 December 1987; revised 21 March 1988)

### Abstract

This paper presents a new optical method for density pseudo-coloring that the color can be adjusted. The method is based on the technique of phase image pseudo-coloring and ealizes adjustable pseudo-coloring by using the diffract effect of dual gratings and filtering technique in whitelight system. The paper proves the principle and verifies the validity of the theory by experiment. Certain images are processed. Both the theory and the experiment show that this method is effective.

**Key words:** image processing; pseudo-coloring; diffraction of dual gratings.