

光栅编码相位型图像的假彩色化

张静江 王书颖 刘大禾 彭芳麟
(北京师范大学物理系)

提 要

本文提出一种黑白图像假彩色化的方法。它仅用一张黑白图片经光栅一次编码处理,将振幅型编码图像转换为相位型编码图像,就可在白光信息处理系统的输出面上获得等密度的假彩色图像。此方法经用于遥感图像、天文照片、电子显微镜照片等的处理均取得了较好的效果。

一、概 述

实现黑白图像假彩色的方法,国内外目前应用的有密度分割仪、彩色合成仪、相关掩模法^[1],以及电子计算机处理等。这些方法有的技术复杂、成本太高,有的手续烦琐、成功率低,有的需用两张以上的黑白图片才能进行彩色合成,所以免不了对准复位等手续。从七十年代后期白光信息处理技术发展起来以后,国内外许多专家学者都在努力寻找一种行之有效的光学处理方法,实现黑白图像的彩色化^[2~11],但效果尚不够理想,与实际应用的要求还有一些差距。本文提出的“光栅编码相位型图像假彩色化”方法,仅用一张黑白图片经一次编码处理,就可在白光信息处理系统的输出面上获得等密度假彩色图像。处理结果图像清晰度高,颜色层次丰富,分辨率及灵敏度也高(南京地区卫星图片,见彩图[3];天文色球片,见彩图[4];电子显微镜片,见彩图[5])。选用频谱的不同级次或让零级以外各级中的不同波段通过,所得图像的颜色各不相同,对图像中某些专题的突出、提取也不同(见彩图[6][7]所示洞庭湖地区卫星图片用不同级次所得彩色图片的比级。[6]为一级图,[7]为二级图,它是一种能应用于科研、生产实际的行之有效的光学处理方法)。

二、处 理 步 骤

1. 编 码

用朗奇(Ronchi)光栅,采用超微粒干板或胶片,对黑白图片进行“成像编码”。

2. 振 幅-位 相 转 换

将振幅型编码负片处理成位相型编码图像。

3. 空 间 滤 波

将编码位相型图片放入图1所示的白光信息处理系统的输入面 P_1 上,在频谱面 P_2 上分频后,单独让某一级谱通过,就可在输出面 P_3 上得到多种颜色的假彩色像。图中 S 为白光点光源, L_1 为准直镜, L_2 同时起傅里叶变换及重新成像两种作用。

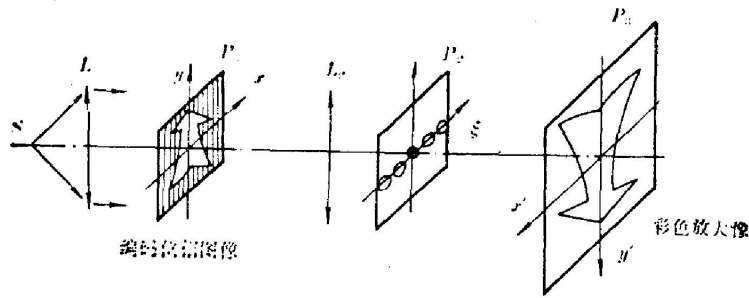


图 1

三、原 理

1. 基本原理

本文在原理上与以往各种光学处理方法均不相同。它是将振幅型的黑白图像变成位相型的图片,即将密度分布转换成位相分布。又因为用光栅进行了编码,位相型图片成了带有物分布函数信息的位相型光栅。由于光程差是编码负片上图像密度的单值函数,在原图像中不同密度的地方,编码时对应光栅条纹“透光”与“不透光”部分在编码负片上形成的密度差不同,对应于位相片上的光程差也不同,这光程差对光源中不同波长的光产生不同的位相差,形成不同的加强和减弱,在输出面上就形成某种混合颜色。这样,通过白光信息处理,就将位相分布再转换成彩色对比度分布的图像输出。

图 2 是用显微光度计对编码灰阶记录下来的光强透过率曲线。所以,每一个灰阶对应于一个密度差值,经转换为位相型图像后,就对应于不同的光程差,从而形成不同的颜色,图 3 是灰阶图[图 3(a)]及其相应的假彩色图像[图 3(b)](见彩色插页)。

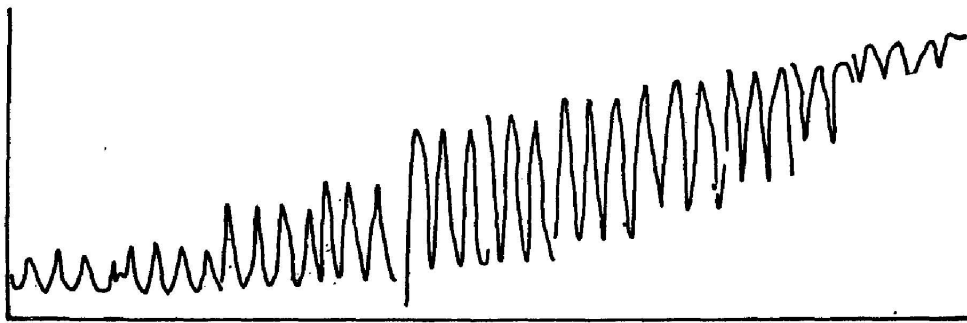


图 2

2. 透过率函数及输出面上的强度分布

通常假设位相型图像为纯浮雕型或纯折射率型,在我们的实验中,曝光量不同的区域,乳胶膜的起伏量与折射率的变化均不可忽略,所以说是一种混合的位相型图像。原图像中不同密度处,在编码时对应光栅条纹“透光”与“不透光”部分,膜的起伏量之差与折射率之差均不同,造成总的光程差不同。对应原图像中某种密度的局部,可用如图 4 所示的简单的物

理模型来表示: Δh 为起伏量之差, $(n_0 - n_1)$ 为折射率之差。设光程差用 Δ 表示, 则

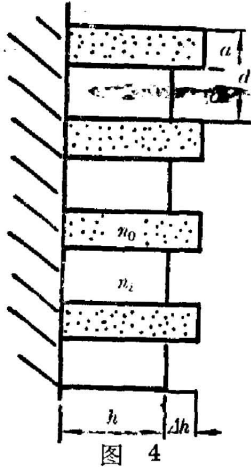


图 4

$$\Delta = (n_0 - 1)\Delta h + (n_0 - n_1)h, \tag{1}$$

与之对应的位相差为 $\varphi = (2\pi/\lambda)\Delta$ 。编码位相型图片的振幅透过率函数可表作^[1,2]

$$\begin{aligned} U(x) &= \{t_1(x) + t_2(x)\exp[i\varphi(x)]\}\text{rect}(x/c), \\ t_1(x) &= \text{rect}(x/a) \otimes (1/d)\text{comb}(x/d), \\ t_2(x) &= \text{rect}(x/b) \otimes (1/d)\text{comb}\{[x + (d/2)]/d\}, \end{aligned} \tag{2}$$

式中 $a + b = d$ 为光栅常数, $\varphi(x) = (2\pi/\lambda)\Delta(x)$ 为位相分布函数, $\text{rect}(x/c)$ 为边框函数, 符号 \otimes 代表卷积运算。对同一种密度, 若忽略色散, 光程差 Δ 为常数, 其振幅透过率 $T(x)$ 为

$$t(x) = \{t_1(x) + t_2(x)\exp(i2\pi\Delta/\lambda)\}\text{rect}(x/c).$$

当用准直白光垂直照射输入平面时, 在 P_2 面上的频谱分布为

$$\begin{aligned} T(\xi) = \mathcal{F}[t(x)] &= \int \sqrt{I(\lambda)} \left\{ \frac{ac}{d} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sin O\left(\frac{na}{d}\right) \sin O\left[c\left(\xi - \frac{n}{d}\right)\right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{bc}{d} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sin O\left(\frac{nb}{d}\right) \sin O\left[c\left(\xi - \frac{n}{d}\right)\exp(in\pi)\exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}\Delta\right)\right] \right\} d\lambda, \end{aligned} \tag{4}$$

式中 $I(\lambda)$ 为白光中波长为 λ 的单色光强度, 这里略去了公共位相因子及变换带来的比例系数。

在频谱面上只让某一级谱斑通过, 在输出面上的复振幅分布与下式成正比,

$$\begin{aligned} t_n(x') &= \int \sqrt{I(\lambda)} \left\{ \frac{a}{d} \sin O\left(\frac{na}{d}\right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{b}{d} \sin O\left(\frac{nb}{d}\right) \exp(in\pi) \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}\Delta\right) \right\} \text{rect}\left(\frac{x'}{c}\right) d\lambda, \end{aligned} \tag{5}$$

其零级 ($n=0$) 和 1 级 ($n=1$) 分别为

$$\left. \begin{aligned} t_0(x') &= \int \sqrt{I(\lambda)} \left\{ \frac{a}{d} + \frac{b}{d} \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}\Delta\right) \right\} \text{rect}\left(\frac{x'}{c}\right) d\lambda, \\ t_1(x') &= \int \sqrt{I(\lambda)} \left\{ \frac{a}{d} \sin O\left(\frac{a}{d}\right) - \frac{b}{d} \sin O\left(\frac{b}{d}\right) \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}\Delta\right) \right\} \text{rect}\left(\frac{x'}{c}\right) d\lambda. \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

输出面上的强度分布为

零级:

$$I_0(x') = \int I(\lambda) [A + B \cos(2\pi\Delta/\lambda)] d\lambda, \tag{7}$$

式中 $A = (a^2/d^2) + (b^2/d^2)$, $B = 2ab/d^2$, 并略去了边框函数。对某一单色光强度分布为

$$I_0(x', \lambda) = I(A + B \cos \Delta\Phi), \tag{8}$$

式中 $\Delta\Phi = (2\pi\Delta/\lambda)$ 为某种波长的光与光程差 Δ 对应的位相差。

1 级:

$$I_1(x') = \int I(\lambda) [A' - B' \cos(2\pi\Delta/\lambda)] d\lambda, \tag{9}$$

式中

$$\begin{aligned} A' &= (a^2/d^2) \sin^2 O(a/d) + (b^2/d^2) \sin^2 O(b/d), \\ B' &= (2ab/d^2) \sin O(a/d) \sin O(b/d). \end{aligned}$$

对某一单色光强度分布为

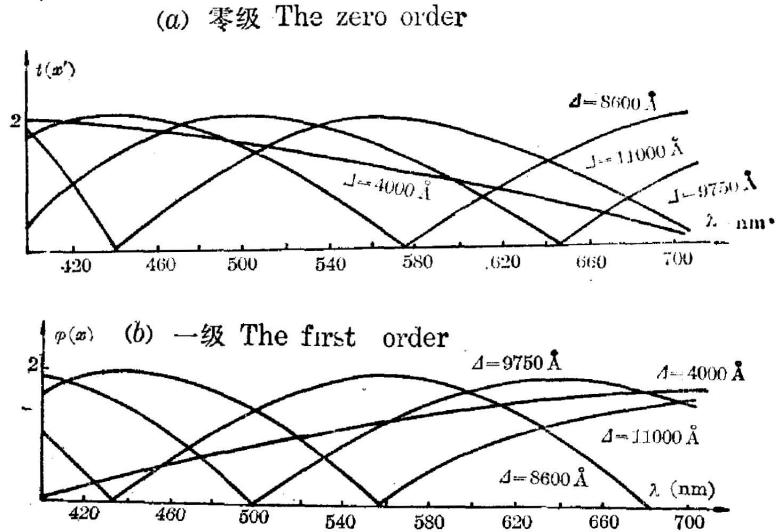


图 5

$$I_0(x', \lambda) = I(A' - B' \cos \Delta\Phi). \quad (10)$$

图 5(a)、(b) 示出了取零级与 1 级谱时对某些特定的 Δ 值所画的 $t(x') \sim \lambda$ 曲线, 图 6(a)、(b) 示出了零级与 1 级像中三种波长光的 $I \sim \Delta$ 曲线。

从以上所述可见, 输出面上的强度分布, 对于编码位相位型图像上任一光程差 Δ 相同的区域, 无论 n 为何值 (只取整数) 都将是各个单色光按不同的位相差形成不同程度的加强或减弱后, 再进行不等权的非相干迭加, 从而形成某种颜色; 而对于不同的光程差 Δ 处, 由于各种波长的光满足加强减弱的情况发生变化, 形成的颜色也不一样。这就是说在输出面上形成了随编码位相位型图像上的光程差 Δ , 即随被编码图像的密度 D (对应强度透过率) 而改变颜色的彩色图像。

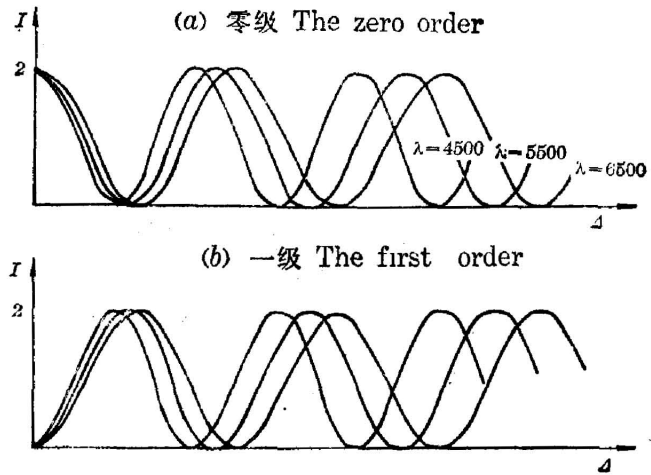


图 6

四、几点说明

1. 颜色的“互补性”

由于(5)式中中括号内的两项对零级是同号, 对 ± 1 级则是异号的。这表明像面上对同一光程差的区域, 其光谱成分中各种波长光加强减弱的情况, 零级与 ± 1 级刚好相反, 即两级像的颜色具有“互补性”。这一点由灰阶的彩图 (见彩图插页) 及图 5、图 6 均可见到。

2. 颜色重复问题

为画图方便,图5中将各种波长的光振幅、图6中将各种波长光的最大强度均画为相等的

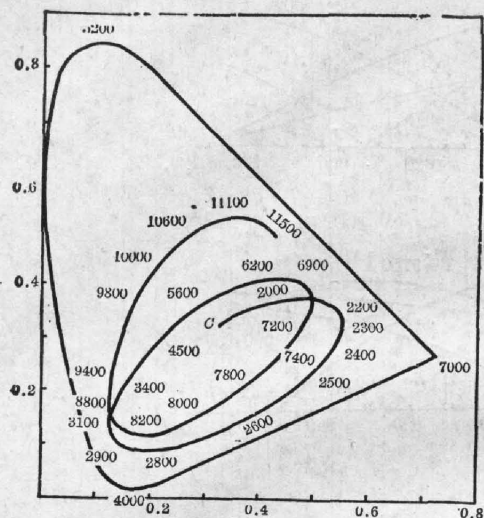


图 7

在实际的装置中,因为采用白光光源有它一定分布形式的功率谱。详细地计算可按色度学原理找出各种光程差对应的色度坐标,在色度图上画出合成颜色随光程差变化的曲线。图7为这样得到的零级图,图中的曲线有交点表明在光程差大到一定程度时可能出现不同密度呈现同一种颜色,但对于一般黑白图片(密度由0.2~3)曲线顶多只有一个交点。如果选择乳胶膜厚度及编码光栅的空间频率合适,在处理过程中加以控制,即可不出现颜色的重复。况且,由于曝光时的扩展作用,在曝光量较大时黑条纹变得较宽,光栅形状偏离矩形较远。图8为用干涉显微镜拍下来的干涉条纹的照片(它的形状可以反映位相光栅的条纹形状),(a)为与低密度区相应的条纹形状,(b)为与高密度区相应的条纹形状,由此可见,颜色的出现并不完全按理论曲线运行,故完全重复同一种颜色的现象是可以避免的。

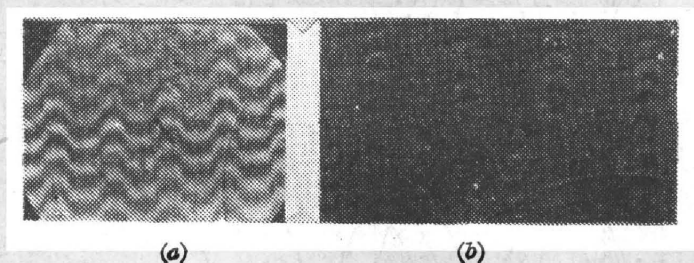


图 8

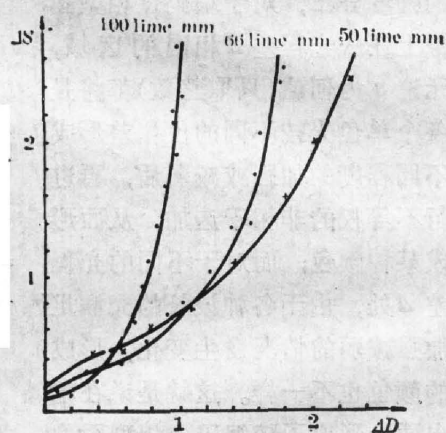


图 9

3. 折射率“补偿”问题

由实验测得在进行位相转换前后起伏量之差 ΔS 与对应的密度差 ΔD 之间的变化曲线并非线性关系。图9所示三条曲线分别为 50 line/mm、66 line/mm 和 100 line/mm 的光栅编码时所得的结果。但对总光程差与密度差的实验结果却说明两者近似有线性关系^[13]。这是由于(1)式中由起伏量之差和折射率之差所造成的两部分光程差符号相反。即折射率之差($n_0 - n_i$)是负值,也就是说高密度处(对应大的起伏量)的折射率小于低密度处的折射率,所以由折射率之差产生的光程差对由起伏量之差产生的光程差起了一个“补偿”的作用。总光程差 Δ 应是这两部分之差。密度差与光程差之间的关系受很多因素的影响,严格控制

曝光量及处理过程的各种条件是可以作到基本成线性关系的。不过对于假彩色的效果来说,因为颜色和光程差之间没有简单的函数关系(见图7),即使光程差与密度差之间偏离线性关系也并无影响。

4. 空间频率的影响^[14,15]

曝光后乳胶膜的起伏量和折射率的变化还与编码光栅的空间频率有关,且厚度起伏与折射率变化随空间频率的变化规律又不相同。但从总光程差来说随空间频率的变化关系是先随空间频率的增加而增加,到达某个峰值后又随空间频率的增加而减小,与峰值对应的空间频率又和乳胶膜本来的厚度有关。在我们的实验中采用 50 line/mm 的光栅编码效果较好,但为突出黑白图像中某些灰度差的细节,采用 33 line/mm 的光栅编码效果反而较好。

四、讨 论

1. 对于朗奇光栅本应有 $a=b$,但在编码图像上实际的光栅 $a \neq b$,这可由图8中条纹的形状见到。所以频谱面上不会出现偶数级的缺级。

2. 除零级外,由于(5)式中大括号内两项符号总是相反(n 为奇数时负号由 $\exp(in\pi)$ 提供, n 为偶数时负号由 $\sin C$ 函数提供),从而可推知1级以后各级的颜色分布应与1级类似。但由于朗奇光栅的密度分布有时并不是严格的矩形,加上编码处理时造成的失真,使位相型图像上的光栅形状也不是严格的矩形。若是正弦形位相光栅,其振幅透过率可展开为贝塞尔函数,对某一给定波长,其振幅对光程差的变化曲线如图10所示,图中对应某一 Δ 处,2级的幅

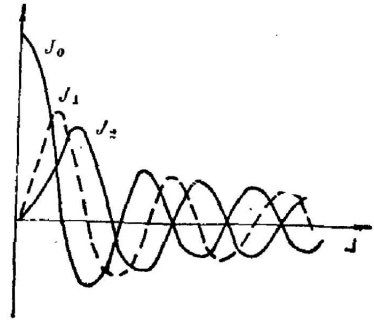


图 10

值与1级相差较大而与零级相近,即可知2级的颜色与零级相近,对于光栅形状介于正弦与矩形之间的情况,可推知2级、3级的颜色各不相同,且不同于1级。实际结果正是如此。

3. 可在频谱面上放置各种不同形状的滤波器对频谱进行处理,使图像根据不同的目的得到改造。但本方法的特点是在不采用其它滤波手段的情况下,仅由选用频谱的不同级次或一级内不同波段,就可以收到某些专题提取的效果。

4. 在改进记录介质上下功夫,还可使此方法达到实时处理的效果。我们目前正在进行这方面的研究。

北京师范大学郑华焯教授,北京工业学院于美文教授为我们仔细审阅了原稿,给予我们很大的关怀和支持,在此表示衷心地感谢。

北师大地理系赵济同志,科学院综考会钱灿圭同志,湖南省地质局、湖南医学院电镜室、科学院乌鲁木齐天文站、北师大天文系物理系等单位许多同志对我们的工作给予大力支持。在此一并致谢。

参 考 文 献

- 【1】 阎守邕,张圣凯等;《实用遥感图像光学处理方法——相关掩模技术及其应用》, (科学出版社,1981)。

- [2] A. Tai, F. T. S. Yu *et al.*; *Opt. Lett.*, 1978, **3**, No. 5 (May), 190.
[3] T. H. Chao, S. L. Zhuang *et al.*; *Opt. Lett.* 1980, **5**, No. 6 (Jun), 230.
[4] G. Indebetouw; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 7 (Jul), 1951.
[5] H. K. Liu, J. W. Goodman *et al.*; *Appl. Opt.*, 1976, **15**, No. 10 (Oct), 2394.
[6] F. T. S. Yu; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 14 (15, Jul), 2457.
[7] 杨振寰等;《光学学报》, 1981, **1**, No. 1 (Jan), 13.
[8] 刘华光;《光学学报》, 1981, **1**, No. 2 (Mar), 97.
[9] 张洪钧等;《激光》, 1978, **5**, No. 5~6 (May-Jun), 44
[10] 张静方等;《光学学报》, 1982, **2**, No. 2 (Mar), 144.
[11] 陈岩松等;《物理学报》, 1978, **27**, No. 6 (Nov), 723.
[12] R. J. 科利尔等;《光全息学》, (机械工业出版社, 1983), 216.
[13] L. Joly, Van Horebeek; *Photogr. Sci. & Engng*, 1980, **24**, No. 2 (Mar-Apr), 111.
[14] R. L. Lamberts; *J. O. S. A.*, 1970, **60**, No. 10 (Oct), 1389.
[15] R. L. Lamberts; *Appl. Opt.*, 1970, **9**, No. 6 (Jun), 1345.

The pseudocoloring of an encoded phase-picture

ZHANG JINGJIANG WANG SHUYING LIN DOHE AND PENG FANGLIN

(Department of Physics, Beijing Normal University)

(Received 26 July 1983; revised 28 April 1984)

Abstract

This paper presents a new method for the pseudocoloring of an encoded phase-picture. It can be performed only with one white-black film and one step of encoding process. The encoded film is transformed into a phaseencoded transparency, then it is put on the input-plane of a white-light processor, and the density pseudocolor image is obtained on the output-plane by spatial filtering of the Fourier spectrum. The theoretical explanation of this method has been made and it is in conformity with the experiments. This method has been used in the processing of the films of astronomy, remote-sensing, biology, and medicine, and good results have been obtained.