

编码位相片的干涉滤色分析

周焜 钟永碧 陈祯培

(四川大学物理系)

提要: 本文将编码位相片看作一种干涉滤色片进行了密度彩色化原理的理论分析和实验证明,并得出了一些有意义的结果。

Interference filter analyses of an encoded phase-picture

Zhou Kun, Zhong Yongbi, Chen Zhenpei

(Physics Department, Sichuan University, Chengdu)

Abstract: Theoretical analyses and experimental verification of the pseudo-coloring principle of density were made by regarding an encoded phase-picture as an interference filter and some meaningful results were obtained.

一、引言

由多位作者^[1~3]分别研制成功的“位相型图像假彩色化新技术”是图像按密度假彩色化的一种新型实用的新技术,近几年得到广泛应用并获得好评。该技术优于彩虹全息编码法^[4]、半色调技术彩色编码法^[5]及光栅载波密度反转图像彩色编码法^[6],具有色饱和度高,光能利用率高及图像清晰等优点。之所以如此,是因为利用了漂白技术,使图像成为位相片,同时仅用零级输出就可得到彩色图像。这里值得强调的是,所利用的零级不仅是白光点光源的零级,而且可以是面光源,例如有单位采用 $2 \times 5 \text{ mm}^2$ 的面光源。众所周知,光源的像平面即图像的谱平面,在进行空

间滤波时,可将整个光源像滤出,而不必将二元滤波器作成一个小孔或一窄的狭缝,这就更大地提高了光能利用率。且大的滤波孔也有利于获得清晰的图像。

在对编码位相片进行彩色化理论分析时,文献[1、2]借用了相干光信息处理理论,虽得出了符合实际的结果,但毕竟使用的是白光光源。也有人试图用部分相干理论进行“互强度”计算,可能由于处理的复杂性,并未见有结果报道。然而即使用“互强度”计算,也只是对很小的白光光源适合,仍不能简单地推广用于白光面光源。本文拟从另一种更基本的概念来分析编码位相片的彩色输出特性,这种方法适用于白光面光源,得出了一些启发性的结论。

收稿日期: 1987年3月24日。

二、编码位相片的干涉滤色分析

考虑编码位相片仍采用由洛奇(Ronchi)光栅(矩形黑白光栅)调制的密度片,此调制后的密度片经漂白处理即得编码位相片。将此编码位相片置于白光信息处理系统的输入面,在频谱面滤出单独一级后,即可在输出面得到彩色图像。

2.1 零级输出

2.1.1 编码位相片是一种带宽较大的干涉滤色片

为方便计,仅考虑编码位相片中原精度为常数的一个小区域,此小区域对应单一的色调。现在我们来分析一个周期里的光学性质,设周期为 a ,宽度为 $\frac{a}{2}$,如图1所示。

所谓零级输出即直透光部份,如图1中的光线1、2。若 P_1 为光线1、2的等位相面,光线经位相片后,将产生位相延迟 δ_1 、 δ_2 ,从而在 P_2 平面,光线1、2将有一个位相差 δ 。

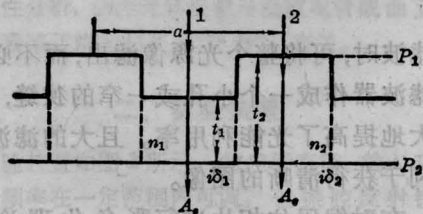


图 1

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_2 - \delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [n_2 t_2 - n_1 t_1 - n_0 (t_2 - t_1)] \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [(n_2 - 1)t_2 - (n_1 - 1)t_1] \end{aligned} \quad (1)$$

式中 Δd 为 δ 对应的光程差,它比例于原片密度差。 t_1 、 t_2 为浮雕的几何厚度, n_1 、 n_2 则为 t_1 、 t_2 区域的平均折射率, $n_0=1$ 为空气折射率。于是光线1、2将产生干涉,当满足于:

$$\begin{aligned} (n_2 - 1)t_2 - (n_1 - 1)t_1 &= m\lambda \\ (m &= \pm 1, \pm 2, \dots) \end{aligned} \quad (2)$$

时,将出现干涉的加强,此时系统的输出面将出现由极大值波长 λ (其值近似于主波长)所决定的干涉色,这就是编码位相片的假彩色化原理。所以编码位相片的一个小区域相当于一块干涉滤色片。但它的干涉机制不同于常用的干涉滤色片,它是多组相邻透射光的两光束干涉。由于是两光束干涉,它的半宽度是很宽的,故色饱和度不可能达到单一光谱色的饱和度。

式(2)中 m 是干涉级次,实际的编码位相片 $|m|$ 值常为2、3、4左右。

2.1.2 零级输出强度

设图1中光线1、2在 P_2 平面直透部份的复振幅分别为 $A_1(\lambda)e^{i\delta_1}$ 、 $A_2(\lambda)e^{i\delta_2}$,由于是位相片,可设 $A_1=A_2=A$,从而相干叠加后的复振幅为 $A(\lambda)(e^{i\delta_1}+e^{i\delta_2})$,故输出强度:

$$\begin{aligned} I_0(\Delta d, \lambda) &= A^2(\lambda)(e^{i\delta_1}+e^{i\delta_2})(e^{-i\delta_1}+e^{-i\delta_2}) \\ &= 2A^2(\lambda)(1+\cos\delta) \\ &= 2A^2(\lambda)\left[1+\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\Delta d\right)\right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\delta=\delta_2-\delta_1=\frac{2\pi}{\lambda}\Delta d$, Δd 为 δ 对应的光程差。

当输出强度为纵坐标,得图2所示的位相片的光谱响应曲线,此时密度彩色化可理解为不同密度对应以不同极大值波长为中心的色带。当可见光区内极大值波长不止一个时,此时位相片的输出主波长由两个极值波长的色带混色而成,形成同色异谱现象。

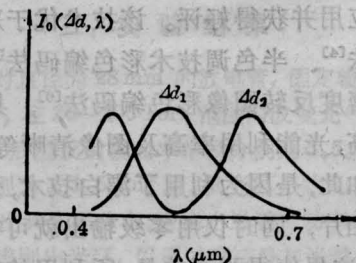


图 2

当输出强度以光程差(或密度)为横坐标,得到图3所示的曲线,它与文献[1]中图

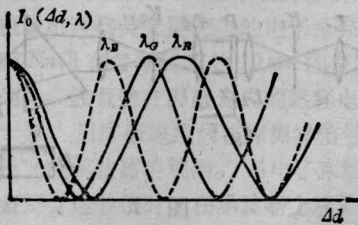


图 3

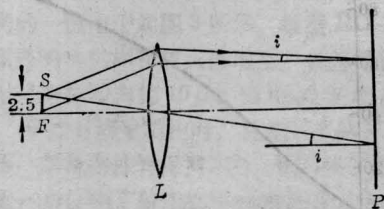


图 4

2(a)完全一致。此时密度彩色化可理解为不同密度的输出色由不同波长按不同比例混色而成。两种理解本质上是一致的。

2.1.3 白光面光源的分析

考虑光源平面上，不在光轴上的一个发光点 S ，如图 4 所示。这意味着照明光束不垂直于位相片 P ，设入射角为 i ，借助图 1，由几何光学关系，可推导出对应于入射角为 i 的零级极大值波长为：

$$\lambda_i = \frac{\left\{ \begin{array}{l} (\sqrt{n_2^2 - \sin^2 i} - \cos i) t_2 \\ -(\sqrt{n_1^2 - \sin^2 i} - \cos i) t_1 \end{array} \right\}}{m} \quad (4)$$

式中 t_1, t_2, n_1, n_2 如图 1 所示， m 为干涉级次， i 为入射角。故相对于正入射而言，极大值波长有所偏离，但仍是彩色输出。

面光源照明意味着，编码位相片由不同入射角的平行光照明，每一入射角对应一极大值波长。当入射角不大时，极大值波长偏离不大。混色结果仍是一彩色输出，但此时色饱和度稍有降低。

实际工作中光源以小为宜，这样在相同光通量的情况下，光源亮度高，从而屏幕照度大。但在谱面滤波时，可滤出整个光源像以

更充分利用光强。此时色饱和度理论上虽有所下降，而此轻微下降完全觉察不出。当然光源像宽度不能大于 $\frac{\lambda f}{a}$ ，其中 a 为编码位相片周期， f 为变换透镜焦距。

2.2 非零级输出

编码位相片可看作两组矩形光栅，如图 5 光线 1, 1'...2, 2'... 所示。考虑正入射，两组光栅由于有相同的光栅常数（即周期 a ），故满足于同一衍射方程。

$$a \sin \theta = k\lambda \quad (k=0, \pm 1, \pm 2\cdots) \quad (5)$$

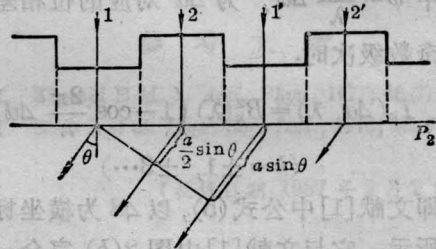


图 5

式中 k 为衍射级次。注意对于编码位相片，相邻光线如 1、2 间还将发生干涉。由图 5 所示此时光线 1、2 间的光程差应为：

$$\Delta d + \frac{a}{2} \sin \theta = \Delta d'$$

Δd 为光线 1、2 至 P_2 平面时的光程差。当满足衍射方程时，由 (5) 式知：

$$\frac{a}{2} \sin \theta = \frac{k}{2} \lambda$$

故光线 1、2 间的干涉方程应为：

$$\Delta d' = \Delta d + \frac{k}{2} \lambda = m\lambda$$

或

$$\Delta d = \left(m - \frac{k}{2}\right) \lambda$$

$$(m = \pm 1, \pm 2, \cdots; k = 0, \pm 1, \pm 2\cdots)$$

(6)

故原片的一个密度对应编码位相片的一个光程差值，对应于一个干涉极大值波长。故非零级亦有彩色图像输出。

考虑非零级的输出强度。现将衍射光栅

各衍射级次在不考虑相邻光线干涉情况下的强度用 $B_k^2(\lambda)$ 表示, 则有:

$$\begin{aligned} I_k(\Delta d, \lambda) &= B_k^2(\lambda) (1 + \cos \varphi) \\ &= B_k^2(\lambda) \left(1 + \cos \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d' \right) \\ &= B_k^2(\lambda) \left[1 + \cos \frac{2\pi}{\lambda} \left(\Delta d + \frac{k}{2} \lambda \right) \right] \\ &= B_k^2(\lambda) \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta d + k\pi \right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d'$, 为 $\Delta d'$ 对应的位相差。当取奇数级次时:

$$\begin{aligned} I_k(\Delta d, \lambda) &= B_k^2(\lambda) \left(1 - \cos \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d \right) \\ &\quad (k = \pm 1, \pm 3 \dots) \end{aligned} \quad (8)$$

此即文献[1]中公式(5), 以 Δd 为横坐标如图6所示。它与文献[1]中图2(b)完全一致。

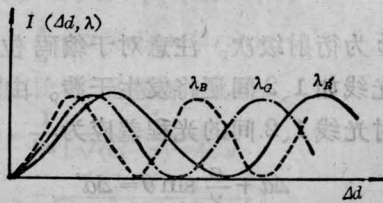


图 6

当 k 为偶数时, $I_k \sim \Delta d$ 曲线形状与零级近似。故对于编码位相片, 零级与偶数级色彩近似, 而奇数级与零级为互补色。这一结论与文献[2]稍有差异, 文献[2]认为: 1级以后各级颜色的分布应与1级类似。当然, 若使其光栅透光部份严格为周期的 $\frac{1}{2}$, 而位相片位相变化又忠实于这种比例, 则偶数级将出现缺级。

三、实 验

为证实编码位相片可看作一种干涉滤色片, 可测出编码位相片的光谱响应曲线。为

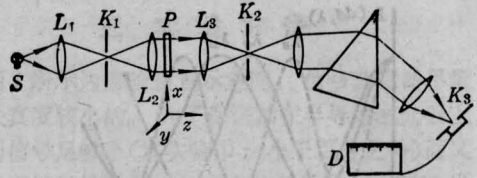


图 7

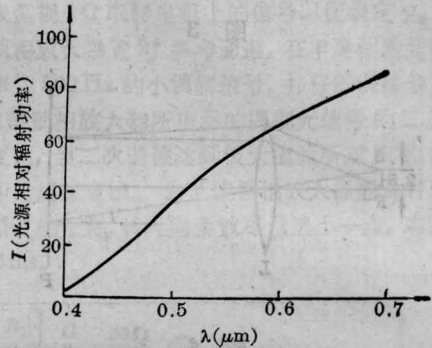


图 8

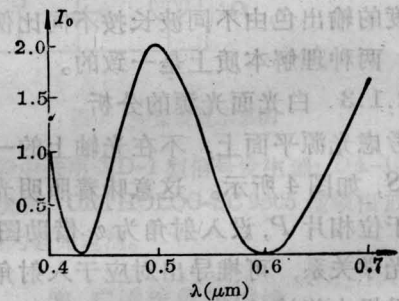


图 9

此, 制作一块原片密度为常数的均匀的编码位相片, 用图7所示的光学装置进行测定。

图7中, 狭缝 K_2 前面为空间滤波系统, K_2 后面为时间滤波系统, 即单色仪。单色仪狭缝 K_2 同时起着空间滤波狭缝的作用。将编码位相片 P 置于图示的平行光束中, 则在 K_2 处形成分离的傅里叶谱。取其中一级进入单色仪, 在单色仪出射狭缝 K_3 处置热偶, 由检流计 D 测光谱相对强度, 即得单独一级的光谱响应曲线。

为与理论值比较, 还需测定所用光源的光谱曲线以计算编码位相片的理论光谱曲线。所得结果为下面几个图形所示。

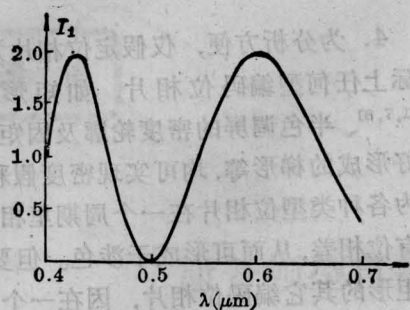


图 10

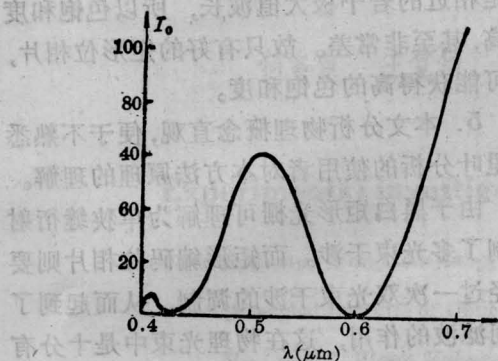


图 11

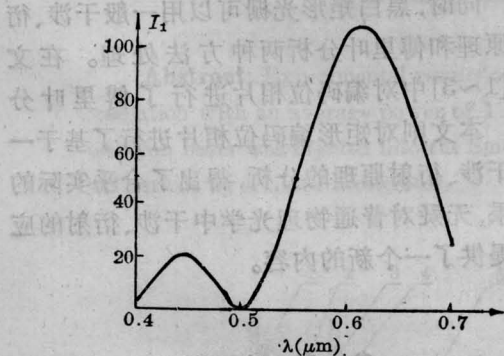


图 12

图 8 为实测所用溴钨灯的光谱相对辐射功率分布,它相似 A 光源。

图 9、10 为按公式 (3) 和公式 (8) 计算的编码位相片零级与 1 级光谱曲线,计算前已分析出所测位相片的 $m=3$ 。

图 11、12 为受光源光谱功率分布调制的编码位相片零级和 1 级的理论光谱响应曲线。

图 13、14 则为实测该编码位相片的零级和 1 级的光谱响应曲线。

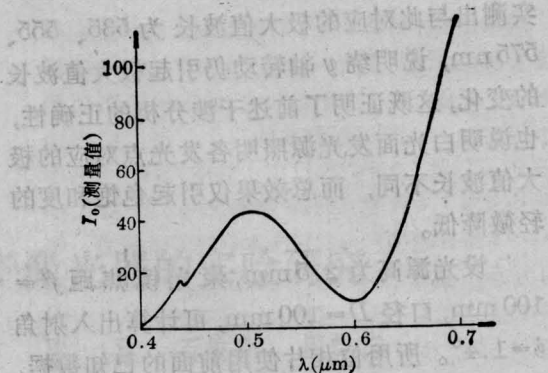


图 13

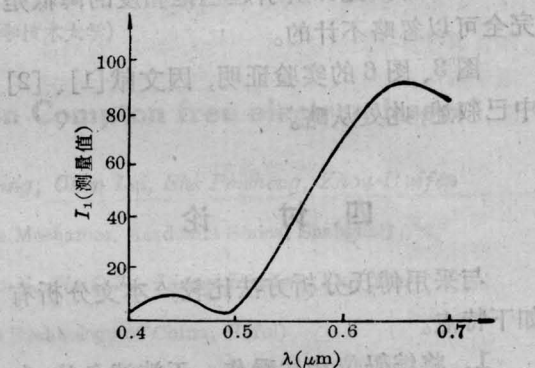


图 14

从图 13、14 看出,它有其特定的光谱分布,故可看作滤色片。且其曲线形状与计算出的图 11、12 极为相似,故证明了第二部份分析的正确性。实测曲线与理论曲线的不完全吻合,主要是因所调制的位相片并非完全矩形、完全等宽之故。

为考查平行光倾斜照明的情况,按图 7 所示将位相片以 x 轴为转轴转动 10° 、 20° 、 30° 。实测出极大值波长由正入射时的 500 nm ,增大为 500 nm (测不出差异), 505 nm 、 515 nm 。再由于干涉显微镜测量出所使用位相片的几何厚度 $t_1=4.64\text{ }\mu\text{m}$, $t_2=5.64\text{ }\mu\text{m}$,并知明胶折射率 $n_1=1.52$,及正入射的极值波长 $\lambda_0=500\text{ nm}$,则由公式 (2) 可计算出 $n_2=1.69^+$,再由公式 (4) 可计算出斜入射时的 $\lambda_{10^\circ}=502\text{ nm}$, $\lambda_{20^\circ}=507\text{ nm}$, $\lambda_{30^\circ}=524\text{ nm}$ 。可见实测值与计算值规律相同,数值相近。当位相片以 y 轴为转轴转动 27° 、 41° 、 48° 时,

实测出与此对应的极大值波长为 535、555、575 nm, 说明绕 y 轴转动仍引起极大值波长的变化, 这既证明了前述干涉分析的正确性, 也说明白光面光源照明各发光点对应的极大值波长不同, 而总效果仅引起色饱和度的轻微降低。

设光源高为 2.5 mm, 聚光镜焦距 $f' = 100$ mm, 口径 $D = 100$ mm, 可计算出入射角 $\phi = 1.4^\circ$ 。所用位相片使用前面的已知数据, 若按公式(4)可计算出 $\lambda_{1,4} = 500.4$ nm。故实际使用的白光光源所引起色饱和度的降低是完全可以忽略不计的。

图 3、图 6 的实验证明, 因文献[1]、[2]中已叙述, 此处从略。

四、讨 论

与采用傅氏分析方法比较, 本文分析有如下特点。

1. 将编码位相片看作一干涉滤色片, 在理论和实验上仍得出密度彩色化的解释。得出了与文献[1]中图 2(a)、(b) 相同的图 3、图 6。理论和实验上亦给出零级和 1 级为互补色的现象。之所以出现互补色, 其物理机理是因 1 级干涉加强的波长, 刚好是零级干涉相消的波长。

2. 它不仅解释了彩色化现象, 且能直接确定某一密度对应颜色的极大值波长。反过来又可从极值波长的角度来理解密度彩色化现象。

3. 排除了白光处理系统白光为面光源带来的理论上的麻烦。面光源仅对色饱和度带来不易觉察的影响(傅氏分析不易得出此结论)。为充分利用光能, 可不考虑这一影响, 而可将滤波狭缝加大为光源像的大小。

4. 为分析方便, 仅假定位相片为矩形。实际上任何型编码位相片, 如矩形、正弦型^[1,7,8]、半色调屏的密度轮廓及因矩形调制不好形成的梯形等, 均可实现密度彩色化。因为各种类型位相片在一个周期里相邻光束均有位相差, 从而可形成干涉色。但要注意, 非矩形的其它编码位相片, 因在一个周期里相邻光线不是一个恒定的位相差, 从而对应的是相近的若干极大值波长, 所以色饱和度不高, 甚至非常差。故只有好的矩形位相片, 才可能获得高的色饱和度。

5. 本文分析物理概念直观, 便于不熟悉傅里叶分析的使用者对本方法原理的理解。

由于黑白矩形光栅可理解为单狭缝衍射调制了多光束干涉。而矩形编码位相片则要再经过一次双光束干涉的调制, 从而起到了时间滤波的作用, 这在物理光束中是十分有趣的现象。

同时, 黑白矩形光栅可以用一般干涉、衍射原理和傅里叶分析两种方法处理。在文献[1~3]中对编码位相片进行了傅里叶分析, 本文则对矩形编码位相片进行了基于一般干涉、衍射原理的分析, 得出了合乎实际的结果, 无疑对普通物理光学中干涉、衍射的应用提供了一个新的内容。

参 考 文 献

- 1 郭履容 *et al.* 光学学报, 1984; 4(2): 145
- 2 张静江 *et al.* 光学学报, 1985; 5(10): 944
- 3 龚谦 *et al.* 光学学报, 1984; 4(8): 687
- 4 Yu F T S *et al.* *J. Opt.*, 1978; 9(5): 269
- 5 Liu H K, Goodman J W. *SPIE*; 1976; 83: 125
- 6 Chao T H *et al.* *Opt. Lett.*, 1980; 5(6): 230
- 7 T W 顾德门. 傅里叶光学导论, 科学出版社, 1976: 77
- 8 田志伟 *et al.* 杭州大学学报, 1985; 12(3): 349