

编码光栅滤波及其应用

康 辉 母国光
(南开大学物理系)

提 要

本文介绍了编码光栅的概念,分析了利用一维正弦形和矩形空间编码光栅滤波对输出图像特性的影响,并列出了它们的某些应用。

利用光栅对图像进行编码,这在光学信息处理中是十分普通的技术。因此,大家对光栅编码的概念非常熟悉,然而,若将编码技术应用于光栅,即对光栅诸参量进行编码,于是得到一种所谓编码光栅,对于编码光栅这一概念,相对地说还比较生疏。本文首先提出编码光栅的概念并对其解释,并以正弦形和矩形两种类型的空间编码光栅为例,讨论用编码光栅作频谱滤波时,对输出图像的性质有什么影响,然后对几种空间编码光栅滤波的应用前景在原理上给予讨论,并以实验结果对其作了验证,最后给出简短结论。

一、编 码 光 栅

所谓编码光栅,就是光栅诸参量经过编码的光栅。例如,一个一维的正弦光栅 $[A+B \cdot \sin(2\pi fx + \theta)]$,我们可以对其振幅、位相、空间频率(或空间周期)和线条取向等参量进行空间编码(即使这些参量是空间坐标的函数)。把振幅经过编码的光栅称为振幅空间编码光栅,相位经过编码的光栅称为相位空间编码光栅等等。对矩形光栅,除上述诸参量可用来编码外,其亮暗条宽度比也可用来编码。我们不仅可以对单一参量进行编码,而且还可以同时对两个和多个参量编码,其结果称为组合编码光栅,以上只是对光栅自身的结构参量进行编码,其实我们还可以用不同颜色对光栅进行编码,可称之为彩色编码光栅。图1示出了一种



Fig. 1 Grating spatially encoded for amplitude



Fig. 2 Grating spatially encoded for phase

简单的振幅空间编码光栅,图2示出的是 π 相位空间编码光栅,图3示出空间频率和方位的混合编码,图中(a)是两个方向和两种空间频率的编码光栅,(b)是方向和空间频率连续变化的编码光栅(即菲涅耳波带片),文献[1]图5示出的可称为三原色空间编码光栅,由此可见,编码方式是多种多样、变化多端的,我们可以根据用途和需要进行编码结构的设计和选择。



Fig. 3 Encoded grating combined by
(a) Two directions and two spatial frequencies;
(b) Both direction and spatial frequency changed continuously

二、正弦形相位空间编码光栅频谱滤波特性分析

编码光栅的用途之一是用作空间滤波器,为了说明它的滤波作用,我们先以一种较简单的一维正弦形相位空间编码光栅为例进行讨论。在直角坐标系下,相位空间编码光栅如图2所示,其数学表示式为

$$H(x_2) = \begin{cases} [1 + \cos(2\pi Bx_2)]/2, & \text{在中心区域,} \\ [1 + \cos(2\pi Bx_2 - \varphi)]/2 & \text{其他区域.} \end{cases}$$

如果将其放入图4所示的光学滤波装置的频谱面 P_2 上作空间滤波,并且规定,有相位移动

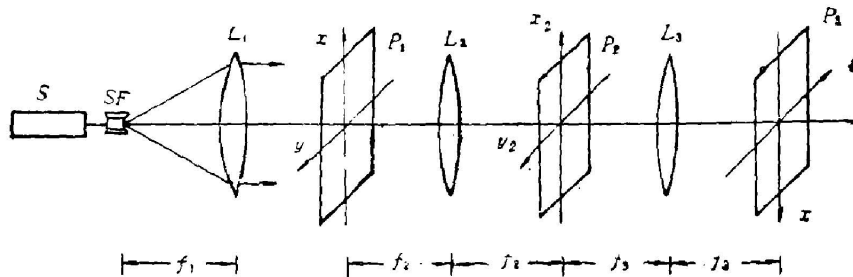


Fig. 4 Configuration of spatial filtering

的两部分编码光栅分别复盖物谱的零频区和非零频区,于是上式可写成

$$H(u) = \begin{cases} (1/2) + [\exp(i2\pi\beta u)/4] + [\exp(-i2\pi\beta u)/4] & \text{零频区,} \\ (1/2) + \{\exp[i(2\pi\beta u - \varphi)]/4\} + \{\exp[-i(2\pi\beta u - \varphi)]/4\} & \text{非零频区,} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $u = (x_2/\lambda f'_2)$, $\beta = B\lambda f'_2$ 。若将物谱 $F(u)$ 也分写成零频分量和非零频分量两部分,即

$F(u) = \begin{cases} F(0)\delta(u) \\ F(u \neq 0) \end{cases}$, 于是, 通过编码光栅后的频谱应为

$$G(u) = \frac{1}{2} F(u) + \frac{1}{4} [2F(0)\delta(u) + F(u)e^{-i\varphi}] e^{i2\pi\beta u} + \frac{1}{4} [2F(0)\delta(u) + F(u)e^{i\varphi}] e^{-i2\pi\beta u}. \quad (2)$$

经傅里叶逆变换, 在像面上的振幅 $g(x)$ 和强度分布 $I'(x)$ 为

$$g(x) = \frac{1}{2} f(x) + \frac{1}{4} [F(0)(1 - e^{-i\varphi}) + e^{-i\varphi} f(x - \beta)] + \frac{1}{4} [F(0)(1 - e^{i\varphi}) + e^{i\varphi} f(x + \beta)], \quad (3)$$

$$I'(x) = \frac{1}{4} f^2(x) + \frac{1}{16} \{F^2(0)(1 - \cos^2\varphi) + [(1 - \cos\varphi)F(0) - f(x - \beta)]^2\} + \frac{1}{16} \{F^2(0)(1 - \cos^2\varphi) + [(1 - \cos\varphi)F(0) - f(x + \beta)]^2\}. \quad (4)$$

(3)、(4)两式是在光栅空间频率 b 与物的空间尺寸 w 相匹配 ($B \geq w/2\lambda f'_2$), 并保证三项输出互相不重叠的条件下, 一维正弦形相位编码光栅空间滤波时输出像的普遍表示式。从而可以分析输出像的性质。下面是几种特殊情况。

1. $\varphi = 0$ 。三个输出像(除强度不同外)与物完全相同, 即三个正像。
2. $\varphi = \pm\pi$, 即 π 相位空间编码光栅滤波。此时 (4) 式变为

$$I'(x) = \frac{1}{4} f^2(x) + \frac{1}{16} [2F(0) - f(x - \beta)]^2 + \frac{1}{16} [2F(0) - f(x + \beta)]^2.$$

显然, 零级输出像与物的极性相同, 正负一级输出像的性质, 根据文献[2]给出的分析方法可知, 它们与物的极性相反(即负像)。

3. $\varphi = \pm(\pi/2)$, 此时 (4) 式变成

$$I'(x) = \frac{1}{4} f^2(x) + \frac{1}{16} \{F^2(0) + [F(0) - f(x - \beta)]^2\} + \frac{1}{16} \{F^2(0) - [F(0) - f(x + \beta)]^2\}, \quad (5)$$

由(5)式可知, 零级输出仍为正像。正负一级输出像的性质, 可用图5说明, 图5(a)、(b)分别表示物的强度和相应的振幅分布。图5(c)表示物的振幅分布减去物的直流分量的情况, 图5(d)表示(5)式中大括号内的量。它与图5(a)相比, 其空间周期缩小了一倍, 作者认为这是图像的对比度部分发生反转的结果, 等效于对图像进行阻挡滤波^[2]。

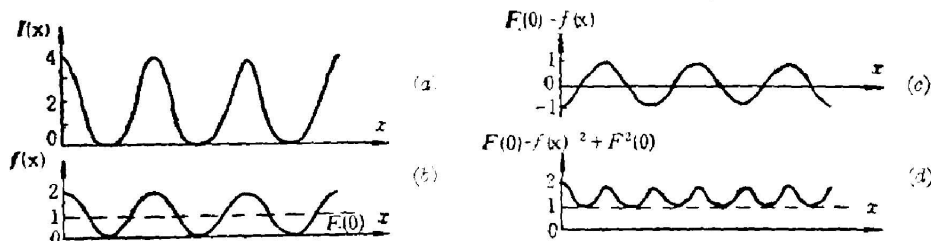


Fig. 5 Phenomenon of partial reversal of contrast

三、矩形空间编码光栅频谱滤波特性分析

与上节规定的条件相同, 只是将正弦形相位空间编码光栅换用矩形空间编码光栅, 此时的输出像的频谱应为

$$G(u) = [(a_1 - a_2)\delta(u)F(0) + a_2F(u)](b/P) + \sum_{n=1}^{\infty} (2b/n\pi) \{F(0)\delta(u) [\sin(n\pi a_1/P) - e^{-i\varphi} \sin(n\pi a_2/P)] + F(u)e^{-i\varphi} \sin(n\pi a_2/P)\} \cos 2n\pi \beta u, \quad (6)$$

(6)式中, a 为矩形光栅亮条宽度, 矩形光栅表示式及各符号的意义与文献[2]相同, 像面上的振幅分布

$$g(x) = [(a_1 - a_2)F(0) + a_2f(x)] \frac{b}{P} + \sum_{n=1}^{\infty} \{F(0) [\sin(n\pi a_1/P) - e^{-i\varphi} \sin(n\pi a_2/P)] + e^{-i\varphi} \sin(n\pi a_2/P) f(x \mp n\beta)\}, \quad (7)$$

由(7)式可分析编码矩形栅空间滤波时输出像的性质。下面讨论几种特殊情况。

1. $\varphi=0$ 。又分两种情况: (i) $a_1=a_2$, 各级输出均为正像。(ii) $a_1 \neq a_2$, 即对栅条宽度编码, 以 $a_1=3a_2=3P/4$ 为例, 其各级输出像列于表 1 中。可见, 能同时获得多重正负像。

Table 1

n	$g_n(x)$	Polarity
1	$(\sqrt{2} b/x)f(x)$	+
2	$(b/x)[f(x) - 2F(0)]$	-
3	$(\sqrt{2} b/3\pi)f(x)$	+
4	0	
5	$(\sqrt{2} b/5\pi)[f(x) - 2F(0)]$	-
6	$(b/3\pi)[2F(0) - f(x)]$	-

2. $\varphi = \pm\pi$, 即两部分的栅条错动半个周期, 讨论两种情况:

(1) $a_1 = a_2 = a$, 由(7)式可得

$$g_n(x) = (2b/n\pi) \sin(n\pi a/P) [2F(0) - f(x \mp n\beta)]. \quad (8)$$

(ii) $a_1 + a_2 = P$, 由(7)式得

$$g_n(x) = (2b/n\pi) \sin(n\pi a_2/P) [2F(0) f(x \mp n\beta)]. \quad (9)$$

由(8)、(9)式可知, 此种情况下, (除零级外的) 各衍射级均输出一个负像。

3. $\varphi = \pm\pi/2$, 由(6)式可知, 它可在零频分量和非零频分量之间引进一个相位因子 $\exp(\mp i\pi/2)$ 。当 a_1 和 a_2 不同时, 可调整零频和非零频的比例, 由(7)式可得

$$g_n(x) = (2b/n\pi) \{F(0) [\sin(n\pi a_1/P) \pm i \sin(n\pi a_2/P)] \mp i \sin(n\pi a_2/P) f(x \mp n\beta)\}. \quad (10)$$

四、编码光栅滤波的某些应用

利用光栅滤波虽然早有人做过某些应用实验^[3,5],但“编码光栅”的概念尚未见报道。这里,通常的光栅可以作为编码光栅的特例(即一维相位编码光栅的 $\phi=0$ 的情况),我们只是根据以上两节对用两种最简单类型的编码光栅作空间滤波时输出像所呈现的性质,预想到它在某些方面的用途。我们只是做了一种应用结果(如图6所示)。现将这些应用举例如下:

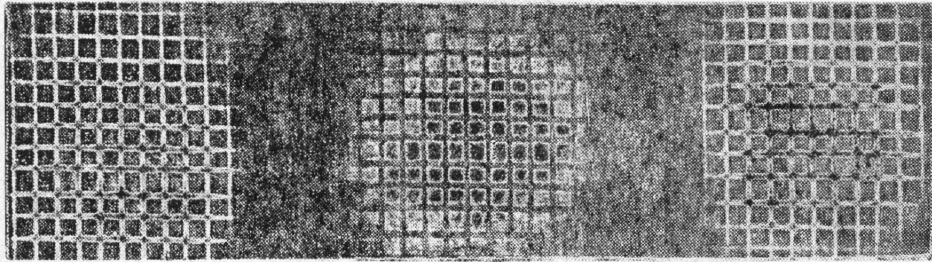


Fig. 6 Positive and negative images obtained by spatial filtering with $\pm\pi/2$ phase encoded grating

1. 可同时获得多个正像,或多个负像,或多个正、负像

这种操作都是实时完成,并且通过对矩形编码光栅 a_1 和 a_2 比例的选择,可以调整输出像的对比度。图6示出的是使用图2所示的编码光栅滤波时,零级和正负一级的输出图像。

2. 实时假彩色密度编码

由于利用编码光栅滤波可实时获得正负像,所以我们利用图7所示的装置便能实现图像的假彩色编码。其中, P_1 处放置待编码的透明片, P_{31} 和 P_{32} 为彩色滤光片,在 P_5 平面的中心处可得假彩色像。

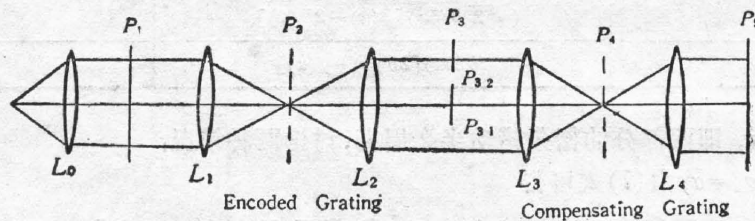


Fig. 7 Configuration of real-time pseudocolor encoding;

3. 观察相位物体

我们知道,相衬显微镜的工作原理是在物体的频谱面上使用一个衰减和相移滤波器,它使物谱零频分量适当衰减,同时又使高频分量产生 $\pi/2$ 的相位移动,从而使输出像面上的光强分布正比于物体的相位分布。由前面的分析已经看到,使用 $\pi/2$ 相位空间编码光栅作频谱滤波,可以在物谱的零频和非零频分量之间引进($\pm\pi/2$)的相位移动,再通过振幅编码或选择 a_1 和 a_2 的比值,便可使零频分量衰减,这样就可以完成对相位物体的观测。所以编码光栅滤波系统可以等效于一台相衬显微镜。

4. 模糊图像恢复

造成图像模糊的原因很多,因而消模糊的方法也不一样,其中一种最基本的方法是根据模糊系统传递函数 $H(u, v)$ 制作逆滤波器 $[1/H(u, v)]$, 已有成功的实验结果^[4,6]。本文所介绍的方法是可以使用一块振幅和相位组合编码光栅进行空间滤波而达到消除诸如抖动和高焦造成的模糊。编码光栅根据模糊系统的传函设计而成,最后起到 $[1/H(u, v)]$ 的作用。

5. 制备一定构槽形状的闪耀光栅

傅里叶综合法是制备闪耀光栅的有效方法^[7],而编码光栅滤波可方便地实现各种需要的傅里叶综合,将一块不等距矩形光栅作为物,然后根据物函数和所希望的闪耀光栅的函数分布,设计一块不同谐波分量具有一定传函值(包括振幅和相位)的组合编码光栅,用其滤波便可得所要求函数形式分布的光栅图形。

以上只是几种明显的用途,其实不止于此,比如,利用它还可方便地为图像相减制备编码片;利用变频组合光栅滤波可实现图像的微分运算^[8]等等。

五、结 束 语

我们提出了编码光栅的概念,分析了一维正弦形和矩形相位编码光栅频谱滤波时输出像的性质。并从中预见到将编码光栅用作空间滤波器时可能的用途,其中某些应用已被实验所证明。同时我们还看到,利用编码光栅的概念对理解现代光学中的某些问题非常有利,可以将一张编码片、一幅全息图片、一个全息光学元件等都看作是编码光栅,而且还可以利用这一概念,根据不同要求,通过互补屏法,缩微照相制版法,计算机绘图以及全息法等各种手段,设计和制备出各种用途的编码光栅。

参 考 文 献

- [1] 母国光等;《仪器仪表学报》,1983, 4, No. 2 (May), 124.
- [2] 康辉等;《光学学报》,1984, 4, No. 9 (Sep), 847.
- [3] S. H. Lee *et al.*; *J. O. S. A.*, 1970, 60, No. 8 (Aug), 1037.
- [4] S. L. Zhuang *et al.*; *Opt. Lett.*, 1981, 6, No. 2 (Feb), 102.
- [5] F. T. S. Yu *et al.*; *Opt. Commun.*, 1980, 34, No. 1 (Jul), 11.
- [6] L. M. Soroko; *Holography and Coherent Optics*, (Plenum Press, 1980).
- [7] 朱伟利;《光学学报》,1983, 3, No. 1 (Jan), 10.
- [8] S. K. Yao *et al.*; *J. O. S. A.*, 1971, 61, No. 1 (Sep), 474.

Coded grating filter and its application

KANG HUI AND MU GUOQUANG

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin)

(Received 24 June 1985; revised 3 October 1985)

Abstract

This paper presents a concept on coded grating. Analyses indicate that properties of output images are effected by the filter of $1-D$ coded grating. We also present some of its application.



第五届国际颜色学术大会和我国颜色光学

第五届国际颜色学术交流大会于 1985 年 6 月 16 日至 22 日在摩纳哥的 Monte Carlo 国际会议大厦召开。会议由国际颜色协会 AIC (Association Internationale de la Couleur) 主办。AIC 每年举行学术年会四年举行一次学术交流大会, 同时进行改选领导机构。这届大会由法国颜色研究中心 CFC (Centre Francais de la Couleur) 负责筹办。来自四十多个国家与地区的近 600 名代表参加了会议, 正式代表 369 名。在学术交流的同时, 展出了颜色仪器设备。我国有 7 名代表出席了会议 (其中包括台湾省三名代表)。

大会交流的文章共 189 篇, 其中特邀报告 5 篇, 大会议厅的发言 33 篇, 分组发言 99 篇, 张贴交流 57 篇。我国束越新副教授的“白昼光模拟器理论”被选为大会厅发言, 董太和教授的“中国的白度研究”与伍少昊教授的“多功能色适应仪”被选为张贴交流论文。代表们对我国的论文给以一致好评, 并纳入论文集。代表们一致通过接纳中国为 AIC 委员国, 束越新副教授代表我国成为 AIC 18 名委员之一。

特邀报告 5 篇叙述了颜色学科目前和未来的动向。论述了色光引起的人类光信息传递与处理, 大脑思维的研究以及光泽和颜色指令系统。关于颜色的测量在过去几年已基本获得解决, 但对光泽的探讨正方兴未艾。那些由几百种或几十种颜色卡片组成的五十年代的色卡或称色谱, 已经发展为今日有科学根据系统排列的颜色指令系统了, 那些曾经流行一时但由于不能成为指令系统的色卡, 正在被指令系统逐步取代。

在大会议厅发言的论文, 分为五个方面: (1) Formulation (7 篇); (2) Measurement and Equipment (6 篇); (3) New Colorimetric Systems (2 篇); (4) Environment and Lighting (9 篇, 其中包括我国一篇); (5) Color differences (9 篇)。专题 (1) 不仅对 Kahlka-Munk 理论公式进行了补充与修改, 而且对此理论的应用, 特别在纺织化纤工业上成功的应用作了介绍。专题 (2) 中叙述了一些新的测量方法和仪器。Two Monochromator 与 One-monochromator 方法的应用以及高速三刺激值色测量的新测量系统。专题 (3) 中, Hont 教授等提出两种新的色测量系统。专题 (4) 中叙述了白昼光 D_{65} 模拟器理论, 室外环境与公共场所照明视觉与色度测量等方面的问题。专题 (5) 的讨论中, K. Mcharen 教授和 R. McDonald 教授, 各自论述对 CIELAB 系统和 CMC 公式的优越性的看法。

分组发言的论文分以下九个方面: (1) Vision; (2) Marketing; (3) Aesthetic aspect; (4) Metamerism; (5) Color order systems; (6) Agro-food; (7) Specific application, gloss and appearance phenomena;

(下转 359 页)