

利用周期白光线源的光学图象相减

李庆熊 沃敏政 王能鹤 王之江
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

一、引 言

光学图象相减是信号综合的一个重要分支,目的在于获得图象之间的差别信息,它可以应用于地球资源探测、医学、气象学、自动监视、图象识别、城市发展研究等领域,也可用于编码孔成象与 OTF 综合等技术。

D. Gabor 等^[1]第一次提出用复振幅对光学象进行综合——加或减。J. F. Ebersole^[2]对这一领域的实验方法作了较全面的评述,在此以后又有若干进展^[3~6]。

在数十种方法中,用激光作相干光源的复振幅综合不可避免地有相干噪声,而且对元件提出了极苛刻的要求,否则能获得相减输出的面积很小,得不到满意的结果。在非相干的光栅编码相减方法中,往往要具有高精度的光栅微小位移装置,或昂贵的小孔径渥拉斯棱镜, S. R. Dashiell 和 A. W. Lohmann 提出一种用点源和廉价偏振薄膜(即偏振片)位移周期载频的方法^[7],但系统能量损失大,偏振薄膜的偏振度和位相的不均匀性使得输出信噪比较低。

我们用周期白光线光源的光学图象相减装置,在灯丝间隔、光栅频率、周期性偏振空间滤波器匹配的情况下,不降低编码象的调制度,大大提高了输出编码象的亮度,而且由于系统的冗余度的提高,使得薄膜偏振滤波器的位相和偏振度不均匀性的影响大为降低,从而得到了高信噪比的相减结果。

本文用部分相干成象理论讨论了编码象的性质和对光源的要求,用矩阵方法计算了光的传输过程和偏振空间滤波器的滤波过程,描述了周期非相干光源照明的条件,讨论了光学和电子学的解码方法。

文中具体绘出了实验装置和实验条件,比较了白光点源和周期白光线源两种照明条件,给出了令人满意的实验结果。

二、理 论

整个过程包括编码和解码两个步骤:

编码是用一光栅调制输入图象,两幅输入图象上的调制光栅要相对位移半个光栅周期,然后把两幅图象重叠在一起形成一幅编码图象,此时差别信息即被一光栅所调制,而相同的部分仍然互补成为一幅无光栅调制或者倍频调制的图象。

解码即从一幅编码图象上得出差别信息,自然可以用各种方法进行。

我们就几个具体方面讨论如下:

1. 编码象的性质

图 1 为编码系统分析用图,系统由三部分构成:(1)多灯丝照明系统;(2)投影系统;(3)编码和空间滤波系统,并得到一编码图象。

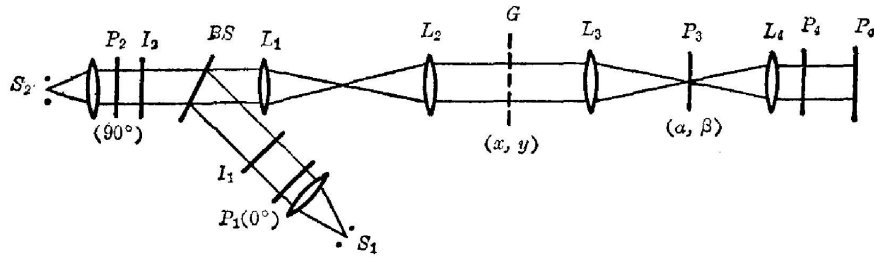


图 1 编码系统分析用图

S_1, S_2 —周期灯丝光源; P_1, P_2, P_4 —偏振片; P_3 —偏振空间滤波器; I_1, I_2 —输入; BS —分光板;
 G —正弦或 Ronchi 光栅; L_3, L_4 —傅里叶变换透镜; P_c —编码象输出平面

Fig. 1 Optical scheme of encoding system

S_1, S_2 —periodic filament sources; P_1, P_2, P_4 —polarizer; P_3 —polarization filter;
 I_1, I_2 —input; BS —beam splitter; G —sinusoidal grating or Ronchi grating;
 L_3, L_4 —Fourier transform lenses; P_c —output plane of coded image.

先讨论图 1 单臂输入时输出编码象的性质。暂不考虑偏振片及偏振空间滤波器的作用,并只考虑单灯丝照明。这个系统本质上是在部分相干照明下工作,所以用部分相干理论中的互强度函数来分析是合适的^[8]。此时系统对互强度函数的作用等价于一个四维线性滤波器。

设有一个一维系统,白光非相干光源的缝宽为 $2b$,则根据 Van Cittert-Zernike 定理,考虑特定波长,由前焦面的光源引起的后焦面的照明互强度函数为:(略去了 Van Cittert-Zernike 定理积分前的位相项)

$$J(x_1 - x_2) = C \sin c \left[\frac{kb(x_1 - x_2)}{f} \right], \quad (1)$$

式中 x 为照明系统的后焦面即输入平面的坐标, f 为透镜焦距, C 为常数。

$J(x_1 - x_2)$ 的中心到第一个零点的距离是入射照明的相干间隔,为 $f\lambda/2b$,可以认为当 $|x_1 - x_2| \leq f\lambda/2b$ 时 $J(x_1 - x_2)$ 有值。

在输入平面处放入透明胶片,其透射信号复振幅分布为 $A(x)$,单色输入信号为:

$$J'(x_1, x_2) = J(x_1 - x_2) A(x_1) A^*(x_2). \quad (2)$$

经过 L_1 和 L_2 两透镜后,输入信号成像于光栅面,为简便起见可直接认为双透镜系统 L_1, L_2 把 $J'(x_1 - x_2)$ 传输到光栅面上,光栅后面的互强度分布为:

$$J''(x_1 - x_2) = J(x_1 - x_2) A(x_1) A^*(x_2) (1 + \cos P_0 x_1) (1 + \cos P_0 x_2), \quad (3)$$

式中 P_0 为光栅角频率, $P_0 = \frac{2\pi}{d_0}$, d_0 为光栅常数。根据互强度函数的传播公式^[9], $J''(x_1 - x_2)$ 经透镜 L_3 和 L_4 之后,等效于作一个二维线性变换,在像面可得像的强度为:

$$I_{im}(x) = C \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} J(\xi_1 - \xi_2) A(\xi_1) A^*(\xi_2) (1 + \cos P_0 \xi_1) (1 + \cos P_0 \xi_2) K(x - \xi_1) K^*(x - \xi_2) d\xi_1 d\xi_2, \quad (4)$$

式中 C 为常数, $J(\xi_1 - \xi_2)$ 为照明互强度函数, $K(x - \xi)$ 是衍射受限光学系统的振幅脉冲响应。

具体的成象情况与脉冲响应(为 $f\lambda/2a$, $2a$ 为系统孔径), 照明相干间隔, 输入 $A(\xi)$ 的象素以及光栅常数有关。在我们的实验中为了保证输入频谱不重叠, 输入的空间频率比光栅频率低二倍以上。在白光照明时, 要求光栅频率要高于输入最高频率三倍以上。

我们分别从 $J(\xi_1 - \xi_2)$ 和 $K(x - \xi)$ 考虑公式(4)的积分有效域:

对 $J(\xi_1 - \xi_2)$: $|\xi_1 - \xi_2| \leq \frac{f\lambda}{2b}$ 时, $J(\xi_1 - \xi_2)$ 有值; $|\xi_1 - \xi_2| > \frac{f\lambda}{2b}$ 时, J 很快趋于零。

对 $K(x - \xi)$: $|x - \xi| \leq \frac{f\lambda}{2a}$ 时, $K(x - \xi)$ 有值; $|x - \xi| > \frac{f\lambda}{2a}$ 时, $K(x - \xi)$ 很快趋于零。

用二维图表示:

显然, 只有在公共域内(斜线部分)积分才有值。由于输入象素大于此域, 所以积分时 $A(\xi)$ 慢变化, 应用积分中值定理可把 $A(\xi)$ 提出积分号外, 所以有:

$$I_{im}(x) = C |A(x)|^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} J(\xi_1 - \xi_2) (1 + \cos P_0 \xi_1) (1 + \cos P_0 \xi_2) K(x - \xi_1) K^*(x - \xi_2) d\xi_1 d\xi_2. \quad (5)$$

关于后面的积分的物理意义显然是正弦振幅物体的部分相干照明象, 对此有人已作了深入的研究^[10], 他们把积分写为:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} J(\xi_1 - \xi_2) (1 + \cos P_0 \xi_1) (1 + \cos P_0 \xi_2) K(x - \xi_1) K^*(x - \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 = A + B \cos P_0 x + C \cos 2P_0 x. \quad (6)$$

这种传递函数显然不同于振幅传递函数, 也不同于强度传递函数。实际上编码象是被部分相干光栅象调制的输入象。

由于在系统的 P_3 处使用了偏振空间滤波器, 所以要求 P_3 处的光源 0 级和 ± 1 级像可分开。在此时的实验条件下, 照明相干间隔大于光栅间隔, 因而严格地说照明对输入和光栅而言是部分相干的, 但对光栅而言是近似相干的。

2. 用矩阵方法计算载频的偏振位移

用矩阵方法来对通过偏振元件的光束进行运算是简便的^[11]。我们把它扩大到传输过程中。光学系统的作用等效于一种变换, 这种变换在相干照明时对振幅成线性。

由上节可知在我们的实验中, 严格讲是部分相干照明的, 由于光栅频率较高, 对特定波长而言, 可近似视为相干照明, 从而在传输中和通过偏振元件时均可用线性变换的方法对振幅进行线性变换。

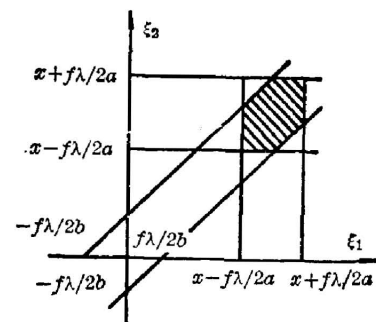


图 2 有效积分域

Fig. 2 The effective domain of integration

在图 1 系统中, 光栅后的分布为:

$$\begin{pmatrix} A_1(x) [1 + \cos P_0 x] \\ A_2(x) [1 + \cos P_0 x] \end{pmatrix} \quad (7)$$

第一行表示沿 x 方向振动的振幅分布, 第二行表示沿 y 方向振动的振幅分布。由于 x 方向振动和 y 方向振动来自两个光源, 所以必定统计独立, (7) 式中省写了一个随机变化的位相因子。

在透镜 L_3 后面的谱面上, 对上式进行傅里叶变换(以 \otimes 表示卷积):

$$\begin{pmatrix} \tilde{A}_1 \otimes [\delta(P) + \frac{1}{2} \delta(P - P_0) + \frac{1}{2} \delta(P + P_0)] \\ \tilde{A}_2 \otimes [\delta(P) + \frac{1}{2} \delta(P - P_0) + \frac{1}{2} \delta(P + P_0)] \end{pmatrix} \quad (8)$$

在单灯丝情况下, 经过偏振空间滤波器后, 零级相应的变换矩阵为 $\begin{pmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 \end{pmatrix}$,

± 1 级相应的变换矩阵为 $\begin{pmatrix} 1/2 & -1/2 \\ -1/2 & 1/2 \end{pmatrix}$ 。

一般情况下, 变换矩阵为 $\begin{pmatrix} \cos^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{pmatrix}$

α 为振动方向与偏振片光轴夹角。

在偏振空间滤波器后面得到的分布为:

$$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \tilde{A}_1 + \tilde{A}_2 \\ \tilde{A}_1 + \tilde{A}_2 \end{pmatrix} + \frac{1}{4} \begin{pmatrix} [\tilde{A}_1 - \tilde{A}_2] \otimes [\delta(P - P_0) + \delta(P + P_0)] \\ [-\tilde{A}_1 + \tilde{A}_2] \otimes [\delta(P - P_0) + \delta(P + P_0)] \end{pmatrix} \quad (9)$$

经透镜 L_4 后, 再作一次傅里叶逆变换:

$$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} A_1 + A_2 \\ A_1 + A_2 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} [A_1 - A_2] \cos P_0 x \\ [-A_1 + A_2] \cos P_0 x \end{pmatrix} \quad (10)$$

再经过一个 0° 偏振空间滤波器 P_3 后, 等效于乘一个变换矩阵 $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$, 得:

$$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} A_1 + A_2 \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} [A_1 - A_2] \cos P_0 x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

也可写为:

$$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} A_1 [1 + \cos P_0 x] + A_2 [1 - \cos P_0 x] \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

从(11)式可见差别信息 $(A_1 - A_2)$ 已被 $\cos P_0 x$ 所调制, 从(12)式可见 A_1 和 A_2 分别被两组条纹调制, 这等效于对 A_2 的编码位移了半个光栅周期。

对于平方律检测器检测的是:

$$A_1^2 (1 + \cos P_0 x)^2 + A_2^2 (1 - \cos P_0 x)^2 \quad (13)$$

上式中不出现 $A_1 A_2$ 的交叉项, 正是因为两个输入是由两个灯独立照明所致, 在 A_1 和 A_2 之间存在一个随时间而无规变化的位相因子之故。

检测出(13)式中的 $\cos P_0 x$ 项的系数 $(A_1^2 - A_2^2)$ 即检测到两个输入的强度相减之值。

容易证明, 偏振空间滤波器角度偏离时不影响光栅编码相对于输入图象的位置而只影响调制度, 这正是用这种方法产生载频位移的优点。

3. 周期非相干线源照明

由于系统要求光源足够小, 且引入了光栅和三组吸收型偏振空间滤波器, 所以光能损失很大, 用白光点源时象面光强很弱。而且更重要的是, 偏振薄膜是一种吸收型二向色性材料, 存在着明显的位相、透过率和偏振度不均匀性, 从而使得输出象的信噪比较低。

用周期白光光源照明时, 不仅使象的亮度大大地提高, 而且由于某种意义上的“扩展”照明使得系统的冗余度大大提高, 从而信噪比也大为提高。

Rogers 曾用多缝“非相干”光源提高杨氏双缝实验的条纹亮度^[12]。我们直接用周期灯丝灯泡作光源照明(三根灯丝, 每根宽 2 mm, 长 16 mm)。像面亮度可提高数十倍。

灯丝的空间间隔必须与系统匹配, 也即与光栅频率, 透镜的焦距和偏振空间滤波器匹配, 以保证在偏振空间滤波器处每一根灯丝的零级象与另一灯丝的 ± 2 级象重合, 且使 ± 1 级象重合。为保证这一点必须有

$$d = 2\bar{\lambda}\nu_G f, \quad (14)$$

其中 d 为灯丝间隔, $\bar{\lambda}$ 为平均波长, ν_G 为光栅空间频率, f 为透镜焦距。

由于各个线光源发出的光完全非相干, 所以最后的象是强度叠加, 而衬度基本上不降低。

一般可选用不同空间频率的光栅来满足上式, 但更为灵活的方法是把光源再成象一次, 调节放大倍率便可方便地获得所需要的灯丝像间隔。我们使用后者。

4. 解码

在获得编码象之后可用光学方法和电子学方法解码, 以便获得差别信息。

光学方法即是用典型的相干处理器做成带通滤波器, 从(13)式中取出 $\cos P_0 x$ 调制项的系数 ($A_1^2 - A_2^2$)。

电子学方法首先要把空域信号变成时域信号, 可用摄像管的电子束扫描来实现, 然后经带通滤波器送入显示器——电视机再把时域信号变为空域信号, 而这后一步靠扫描电路和视放电路及显象管来完成。

光学方法极易获得硬边光阑, 所以十分方便, 由于干板具有很高的信息量, 所以可得到较大的动态范围。但因编码图要首先记录下来才能实现光学解码, 所以不能实时相减。而且如用激光作光源则总是有不可克服的相干噪声。同时, 还必须使用液门来克服输入的位相噪声。这一点如用白光点源可以很好地解决。

相反, 电子学方法不可能获得有明确截止频率的带通滤波器。减少通带波动, 提高矩形系数与提高旁瓣抑制能力和减少通带衰减总是互相矛盾。由于电视系统信息量较低, 在 6.5 MHz 的视频频带中要分出相应的低频, 基频和倍频频带, 因而基频带宽只能占 1 MHz 多一点。所以动态范围较小, 分辨率较低。但是电子学方法可做到实时相减和同时显示输入配准情况, 所以十分有利于调整。

三、实 验

实际的编码装置如图 3, 光源(多灯丝) S_1 和 S_2 经透镜 L_1 和 L_2 再成象一次是为了

可灵活调节灯丝象的灯丝间隔，以满足(14)式的匹配条件。 L_3 、 L_4 、 L_5 透镜的相对孔径为1:6，焦距为300 mm；光栅频率为20线/mm， L_6 相对孔径为1:5.6，焦距为360 mm。 P_1 与 P_4 为 0° 偏振片， P_2 为 90° 偏振片。 BS 为中性介质分光板，反射臂光轴与主光轴夹角越小越好，以避免介质板反射时影响光束的振动方位角。 S_3 处成灯丝象，用各种光栏可方便地获得点源、线源、周期线源照明时的编码象。偏振空间滤波器 P_3 由各个取向不同的小条组成，用光学树脂胶合于平板之中，各小条的偏振取向见图4(a)和图4(b)，它位于傅里叶谱面处，在 I_3 处即可得编码象。

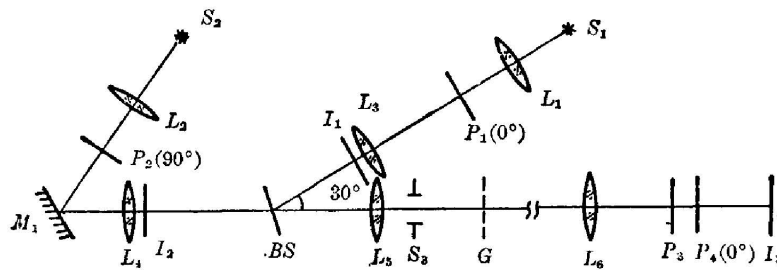


图3 周期灯丝编码装置

S_1, S_2 —标准灯; L_1, L_2 —光源成象透镜; P_1, P_2, P_3, P_4 —偏振滤波器; M_1 —镀铝反光镜;
 L_3, L_4 —照明聚光镜; I_1, I_2 —输入; BS —宽带中性分光板; L_5 —成象透镜;
 S_3 —光栏; G —光栅; L_6 —傅里叶变换透镜; I_3 —输出

Fig. 3 Encoding apparatus with periodic filament.

S_1, S_2 —standard lamp; L_1, L_2 —source imaging lenses; P_1, P_2, P_3, P_4 —polarization filter;
 M_1 —mirror coated aluminium; L_3, L_4 —illumination condenser; I_1, I_2 —input;
 BS —wideband neutral beam splitter; L_5 —imaging lens; S_3 —stop; G —grating;
 L_6 —Fourier transformation lens; I_3 —output

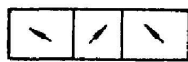


图4(a) 单灯丝照明时偏振空间滤波器 P_3

Fig. 4(a) P_3 for single filament illumination

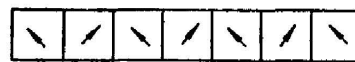


图4(b) 周期灯丝照明时 P_3

Fig. 4(b) P_3 for periodic filament illumination

实际上由于要相减的两个输入相同部分的透过率不一定相同(例如卫星照片可以在不同时间拍摄，拍摄时光照，曝光时间以及底片处理的不同均可引起透过率的差别)， BS 也不严格是50%反射和透射。用两个调压器分别控制灯丝电压 S_1 和 S_2 可方便地控制光强。由于可在输出平面同时看到两个输入象，所以这种装置对配准和调节两输入强度十分方便。

用图5的光学解码装置可得到差别输出:

也可用激光点源照明，此时编码图干板必须放在液门中，用折射率为1.50左右的匹配液匹配以抵消干板的位相不均匀性。

图6为两个镂空字的编码象，可明显地看到差别部分为光栅所调制，而共同部分则为二倍频(线性记录时)或低频(高反差干板记录)。

图7(a)和(b)分别为具有差别信息的两个输入图象;图7(c)为用白光点源照明时得的

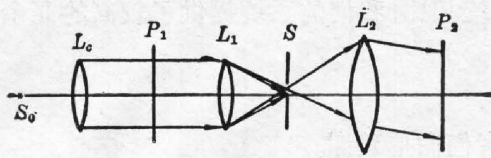


图5 解码装置

S_0 —白光点源; L_C —准直透镜; P_1 —编码像输入;
 L_1 、 L_2 —傅里叶变换透镜; S —带通滤波器;
 P_2 —输出平面

Fig. 5 Decode apparatus

S_0 —white light point source; L_C —collimation lens
 P_1 —input of coded image; L_1 , L_2 —Fourier transformation lenses; S —bandpass filter; P_2 —output plane

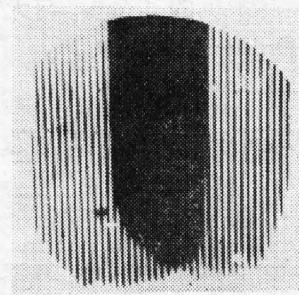
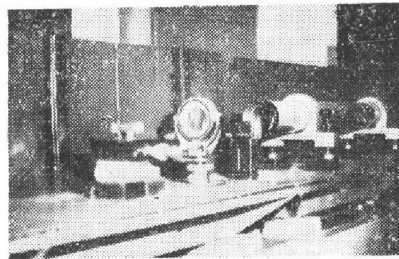


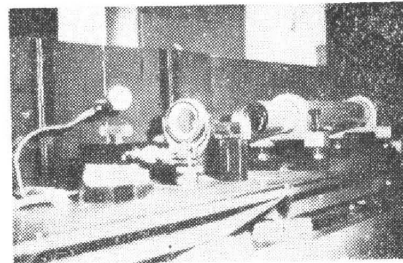
图6 编码象

Fig. 6 Encoding image

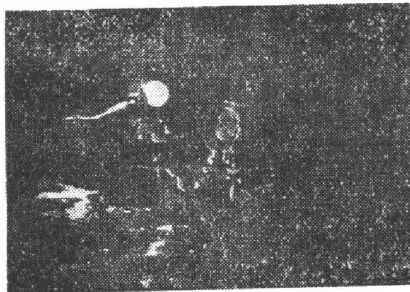
编码象, 再经解码所得差别图象; 图 7(d) 为用周期白光线源照明时的输出。显然质量要高得多, 在编码象记录时前者曝光 30 分钟, 后者曝光 8 秒钟。



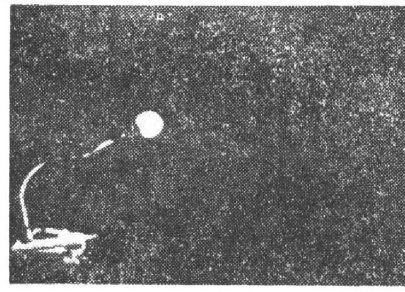
(a)



(b)



(c)



(d)

图7 具有差别信息的两个输入照片

(a) 输入图象; (b) 输入图象; (c) 用白光点光源照明时输出; (d) 用周期白光线光源照明时输出

Fig. 7 Two different images to be subtracted

(a) input; (b) input; (c) output from white-light point source illumination;
 (d) output from periodic white linear source illumination

四、结 论

本实验利用偏振空间滤波方法使载频位移, 其原理在于使一个输入的调制光栅对比度反转, 方法简便可靠, 从而代替了靠高精度机械零件产生平动的方法。

如同光学信息处理中近来的一些进展一样, 我们提出的方法在不降低输出衬度的前提

下, 尽量提高系统的冗余度, 与无冗余的相干系统相比, 我们的系统提供了较高的冗余度, 从而提高了输出亮度和信噪比。

路敦武同志参加了本工作的实验部分, 作者们向他致谢。

参 考 文 献

- [1] D. Gabor *et al.*; *Phys. Lett.*, 1965, **18**, No. 2 (Aug), 116.
- [2] J. F. Ebersole; *Opt. Eng.*, 1975, **14**, No. 5 (Sep-Oct), 436.
- [3] F. T. S. Yu, A. Tai; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 15 (Aug), 2705.
- [4] E. Marom, N. Konfort; *Opt. Commun.*, 1977, **21**, No. 1 (Apr), 63.
- [5] J. Grinberg, E. Marom; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 11 (Jun), A115.
- [6] E. J. Rabal *et al.*; *Opt. Commun.*, 1980, **34**, No. 1 (Jul), 7.
- [7] S. R. Dashiell and A. W. Lohmann.; *Opt. Commun.*, 1973, **8**, No. 2 (Jun), 100.
- [8] M. Born, E. Wolf; *«Principles of Optics»*, 2nd, (Pergaman Press., 1964), 526.
- [9] *ibid*, 518.
- [10] R. J. Becherer, G. B. Parrent; *J. O. S. A.*, 1967, **57**, No. 12 (Dec.), 1479.
- [11] G. L. Rogers; *«Noncoherent Optical Processing»*, (John Wiley and Sons, 1977), 152.
- [12] *ibid*, 166.

Optical image subtraction by using periodic white light linear sources

LI QINGXIONG WO MINGZHEN WANG NENGHE AND WANG ZHIJIANG

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 18 August 1981)

Abstract

A new apparatus used for optical image subtraction with periodic white light linear sources is proposed. Provided that filament interval, grating spatial frequency, periodic polarization spatial filtering are matched each other, the brightness of coded image will be increased greatly. Because of high redundancy of the system, the influence of polarization degree and phase inhomogeneity of sheet polarization filter could be considerably reduced. So, high SNR subtraction output could be obtained. In this paper, property of coded image and requirement for the system are discussed with spatial coherent imaging theory. Procedure of light transmission and filtering, shifting of carrier are calculated with matrix method. Decode method by using optics and electronics is described. Finally, desirable experimental result is presented.