

用全息透镜组成傅里叶变换系统

赵学山 张以谟

(天津大学精密仪器工程系)

提 要

本文将全息透镜作为一般的傅里叶变换元件,组成傅里叶变换系统,进行了相关运算以及模糊图象处理等实验。结果表明,对全息透镜傅里叶变换系统进行某些光学信息处理工作是可行的。

一、全息透镜傅里叶变换系统

和常规的傅里叶变换系统^[1]相类似,用两个反向放置的全息透镜也可以组成傅里叶变换系统,如图1所示。图中, P_1 、 P 、 P_2 分别为输入面、频谱面、输出面, HL_1 、 HL_2 为全息透镜。由于全息透镜的离轴特性,整个系统是离轴的。除了由 θ 角引起的一个位相因子外,该系统和常规傅里叶变换系统有同样的运算功能^[2]。因此也可以用来对光学图象进行傅里叶变换,频谱分析,相关运算,空间滤波等。

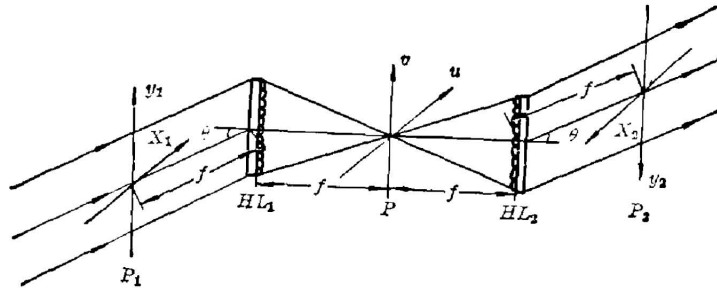


图1 全息透镜傅里叶变换系统

Fig. 1 Fourier transform system using holographic lenses

图2是用全息透镜所获得的鉴别率板的频谱(在 P 平面);图2(b)、图2(c)分别是用全息透镜及常规透镜获得的同一光栅的频谱。可见全息透镜和常规透镜的傅里叶变换本领很相似。

实际应用时傅里叶变换物镜须对两对物象共轭位置控制象差:第一对,以输入面处衍射出的不同角度的平行光作为物,对应的象即频谱面,即傅里叶变换物镜须使无穷远来的平行光完善地成象到焦面上;第二对,以输入面作为物体,物面上各点所发出的充满系统入瞳的光束,对应的象在无穷远,即物面上的每一点须完善地成象在象方无穷远。若对这两对共轭面控制波象差 $\leq \lambda/4$,则该傅里叶变换物镜应认为是可用的。

由于离轴全息透镜具有较大的象差(主要是轴外象差,如慧差、象散)^[3,4],因此必须对其



图2 (a) 用全息透镜获得的鉴别率板频谱;
(b), (c) 用全息透镜和常规透镜获得的同一光栅频谱

Fig. 2 (a) Spectrum of identifying plate by holographic lens
(b), (c) Spectrum of same grating by holographic lens and ordinary lens

象差进行控制。由全息图的再现特性知道,当其在原制作条件下再现时,可以获得无象差的再现。所以我们使用全息透镜时,应尽量使其接近原制作条件,并对视场和孔径加以限制,以达到控制象差的目的。下面就图1所示全息透镜傅里叶变换系统,以我们所制作的全息透镜(制作时两光束位置如图3所示, $\theta=24^\circ$; 全息透镜的 $f=272\text{ mm}$, 相对孔径 1:4.5)为例,对象差问题作一简单讨论。

从输入面处衍射出的不同角度(亦即不同空间频率)的平行光相对于 HL_1 而言,使 HL_1 处于接近原制作条件的状态。在各平行光束中,以 θ 角入射的一束光正好是制作全息透镜时参考光 R 的共轭光(HL_1 是反转放置的),它被 HL_1 无象差地成象在后焦面 P 的中心。以其它角度入射的光束,当其空间频率 $\leq 45\text{ line pair/mm}$ 时,其角度与 θ 角差别很小,不大于 1.63° ; 如再控制视场,限制光束在 HL_1 上的入射高度,则它们都能近似完善地成象到后焦面上,即 HL_1 能使输入面处衍射出的各平行光较完善地聚焦在频谱面上。

再以该频谱面作为 HL_2 的物,物面上各点所发出的圆锥光束,相对于 HL_2 而言,使 HL_2 也处于接近原制作条件的状态。频谱面中心点正如同制作全息透镜时的物光点源 O ,它所发出的圆锥光束被 HL_2 无象差地成象于象方无穷远,且出射方向正好沿原参考光方向;谱面上其它各点虽然不是无象差成象,但若在谱面上加适当大小的光阑(即选取合适的成象孔径),则各点的成象情况与中心点差别不大,也能近似完善地成象于象方无穷远。

利用全息透镜的象差公式^[5],以我们自制的全息透镜为例进行象差估算。结果表明:当被处理面和频谱面的直径限制在 15 mm 以内时(此时该系统的截止频率约为 45 line pair/mm),初级波象差 $W^{(3)} \leq \lambda/4$ 。而实验结果表明,当处理面直径为 20 mm 时,仍能获得满意的效果。可见,全息透镜傅里叶变换系统通过两个取向不同的全息透镜,并选取适当的视场和孔径,可以实现对两对共轭面的象差控制。

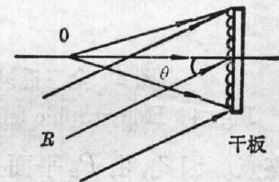


图3 制作全息透镜时
两光束位置

Fig. 3 Position of two
beams when holographic
lens being made

二、实验及结果

由于全息透镜傅里叶变换系统中相关运算及模糊图象处理的基本原理及数学表达与在常规傅里叶变换系统中是完全类似的,因此本文只简单地介绍我们的实验及结果。

1. 相关运算,文字检索

实验所用的光学系统如图4所示,其中 S 为快门, M_1, M_2, M_3 为反射镜, BS 为分束器,

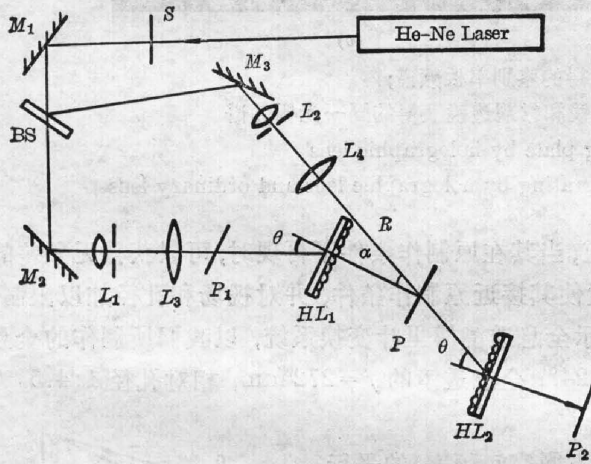


图4 全息透镜光学空间滤波系统

Fig. 4 Holographic lens optical spatial filter system

器, L_1, L_2 为扩束镜及滤波针孔, L_3, L_4 为准直镜。在 P 平面前以 α 角引入平面参考波 R ;在 P_1 平面放置参考函数 t ,则在 P 平面得到其频谱 T ; T 和 R 在 P 平面上相干;用全息干板记录此干涉光强,全息干板经冲洗后,其振幅透过率与此光强成正比,这就是所需要的空间匹配滤波器。将此滤波器准确复位,挡掉参考光;在 P_1 平面换上输入函数 g ,则在 P 平面得到其频谱 G , G 被滤波器所调制;再经 HL_2 ,在 P_2 平面上得到 g 和 t 的互相关函数 $t * g$ 。当 $g = t$ 时,互相关 $t * g$ 变为自相关 $g * g$,出现自相关峰值,即一

亮点。因此,由 P_2 平面上相关输出的强度分布可以判断输入函数中是否包含参考函数。

实验中,我们用图5(a)所示透明片的中间一个A制成滤波器,当仅用一个A输入时,在 P_2 上得到一个相关峰值,如图5(b)所示;用五个A同时输入,得到五个相关峰值,如图5(c)所示(放大到3倍)。这表明该系统在一定范围内满足空间不变性。

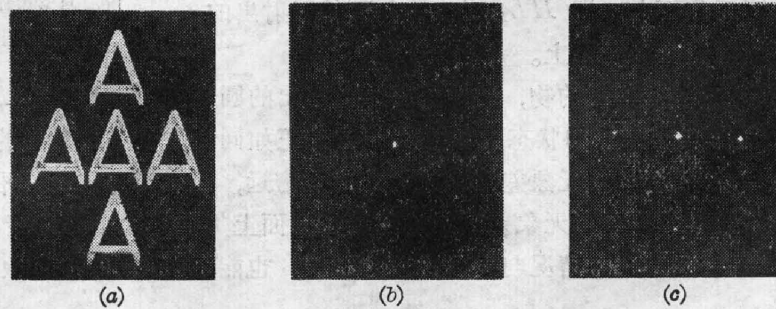


图5 相关实验

Fig. 5 Correlation experiment

利用上述空间匹配滤波技术可以进行图象识别和文字检索。用图6(a)所示透明片的一个E作成滤波器,并用整个图象输入时,在 P_2 上得到如图6(b)(放大到3倍)所示的相关输出,表明输入图象中有三个字母E,且由峰值的位置可判断E的位置。

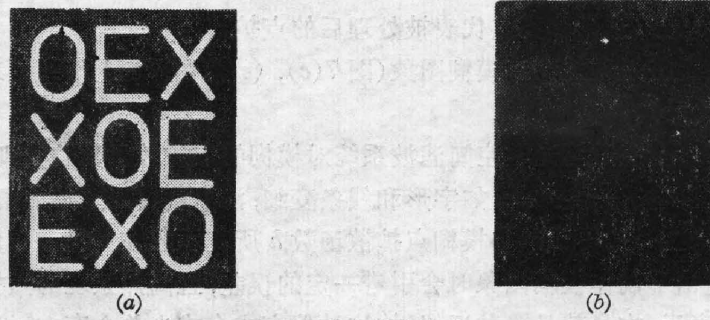


图 6 文字检索实验

Fig. 6 Character-detecting experiment

上述实验结果表明,对全息透镜傅里叶变换系统进行相关运算,文字检索等,可获得较为满意的效果。

2. 模糊图象处理

在线性空间不变条件下,一光学系统的成像过程可用二维卷积积分表示:

$$g_i(x_i, y_i) = g_o(x_o, y_o) \otimes h(x_o, y_o), \quad (1)$$

其中, \otimes 为卷积符号, g_o , g_i 分别是物面和象面光强分布函数, h 是光学系统的点扩散函数。由卷积定理,在谱面上有

$$G_i(u, v) = G_o(u, v)H(u, v), \quad (2)$$

其中, G_o , G_i , H 分别是 g_o , g_i , h 的傅里叶变换, H 通常称为系统的光学传递函数。由于 H 的作用,使得 G_i 不同于 G_o ,因而在输出面上得到的 g_i 也就不同于 g_o ,即图象变得模糊。

采用相干光学空间滤波的方法,可对此图象进行消模糊处理。其方法是在谱面上放一空间滤波器,使其振幅透过率为

$$T(u, v) = 1/H(u, v) = H^*(u, v)/|H|^2, \quad (3)$$

说明滤波器可由两步作成: H^* 由全息方法作成(与前述相关实验中相似),而 $1/|H|^2$ 则可用普通照相方法获得,然后将二者精确地选合。

实验仍用图 4 的光学系统,处理的是离焦模糊图象。我们所用的离焦系统的模糊点扩散函数 h 是直径为 1mm 的圆孔,处理后,变成一个直径约为 0.2mm 的亮点,如图 7(a),

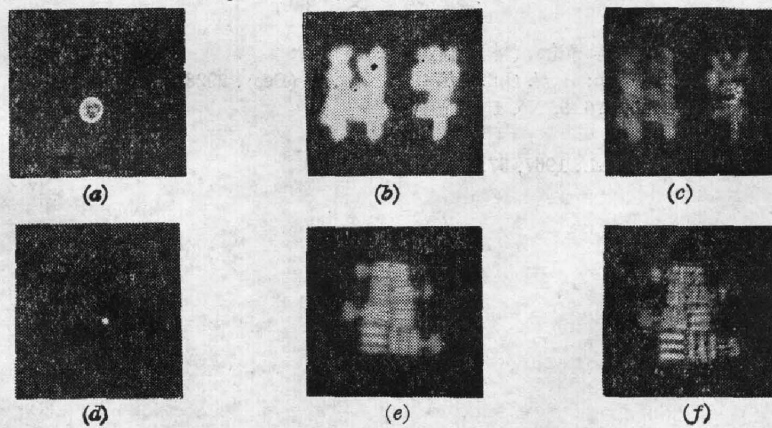


图 7 图象处理照片

Fig. 7 Photos of image processing

(b)所示(放大到3倍),这个小亮点代表被处理后的点扩散函数。

将 h 取下,换上待处理的离焦模糊图象(图7(c), (e)),在 P_2 上得到处理过的较为清晰的图象(图7(d), (f))。

由图片可看出,全息透镜光学空间滤波系统对模糊的点扩散函数的处理效果是较好的;对模糊图象的处理,也有一定效果,如字形和线条变细,清晰度转好。如能解决以下问题,可以取得更好的效果:第一,尽量减小模糊点扩散函数 h 所表示的模糊量和图象本身的实际模糊量之间的偏离。由于制作模糊图象时会引进一定的误差,且离焦系统的点扩散函数用一个均匀透光的圆孔表示,本身就是一种近似,故这种偏离或多或少总会存在;第二,减小相干光成象的斑点噪声及模糊图象本身的噪声影响,如采用折射率匹配液等;第三,提高滤波器的频带宽度。全息滤波器的质量与参考物体光束比 k 是否合适有很大关系。由于制作滤波器时,在 P 平面上参考光 R 是均匀的,而物光 H 是圆孔的夫琅和费衍射图样,分布极不均匀,因此,合适的 k 值仅对应一定的物空间频率。实验中,曾连续改变参考物体光强,当物光较强时,滤波器在较大范围内有较好对比度的干涉条纹,但中心部分往往曝光过度,条纹消失;当物光较弱时,有较好对比度条纹的范围(1),即截止频率低,限制了图象处理的分辨率。因此,在被处理物空间频率分布中,选择适当的空间频率确定合适的 k 值,可以获得好的处理效果。

三、结 束 语

本文的讨论和实验结果表明,用全息透镜组成傅里叶变换系统进行光学信息处理工作是可行的。由于全息透镜较之常规傅里叶变换物镜小,轻便,加工简单,成本低廉,因而作为一类光学元件有很大的应用潜力。随着全息术和全息记录介质的发展,全息透镜的性能和质量也会进一步提高,其应用也会日趋广泛。当然,它也有一定的局限性,作为傅里叶变换元件,全息透镜和常规傅里叶变换物镜可以取长补短,互相促进;在一些系统中,也可以混合使用。

参 考 文 献

- [1] J. W. Goodman; 《傅里叶光学导论》, (科学出版社, 1976), 190.
- [2] A. K. Richter, F. P. Carlson; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 12 (Dec), 2923.
- [3] D. H. Close; *Holography*, 1976, **5**, No. 1 (Jan), 1.
- [4] 私人通讯
- [5] E. B. Champagne; *J. O. S. A.*, 1967, **57**, No. 1 (Jan), 53.

Fourier transform system using holographic lenses

ZHAO XUESHAN AND ZHANG YIMO

(Department of Precision Instrument Engineering, Tianjin University)

(Received 20 June 1982, revised 27 September 1982)

Abstract

In some specific cases, since holographic lens is miniature and light, it has many advantages in optical processing. In this paper the Fourier transform system constructed by using the holographic lens, and some experiments are discussed. The experimental results show the fact that it can be used in some optical data processing.