

用计算全息制作的自聚焦匹配滤波器

封余军* 周 进 黄信凡 高文琦

(南京大学物理系 南京 210093)

提要 介绍了一种自聚焦型计算全息的匹配滤波器。它通过对物体的共轭傅里叶谱加二次位相因子后编码、缩微而成。由于它具有自聚焦的功能,从而可以使光路大为简化,调节方便,适用于不同缩放比的物。给出了与理论一致的实验结果。

关键词 匹配滤波器,二次位相因子,计算全息

1 引 言

作为光信息处理的主要技术——光学相关性技术的应用是光学图像的识别,即通常所说的特征识别或模式识别。其应用范围十分广泛,遍及工农业生产、医疗诊断和军事等领域。所用关键器件即为匹配滤波器。用光学方法制作的滤波器最早由 Vander Lugt 提出^[1]。但由于光学方法只能制备比较简单的滤波器,对各种不同物的匹配常采用计算全息方法制作滤波器。在计算全息的早期发展中, Lohmann 等用傅里叶变换计算全息图制作了几种光学方法难以实现的滤波器^[2]。后来人们还做出了一系列相应的滤波器^[3~7]。

本文介绍一种用计算全息制作的有自聚焦功能的匹配滤波器,使用的光路中,当用会聚的相干光照明时,不需要任何外加傅里叶透镜就可进行匹配实验,且适用于不同大小的匹配物,文中给出了与理论一致的实验结果。

2 原 理

2.1 自聚焦匹配滤波器

一般在进行光信息处理原理性的分析时,往往采用 $4f$ 系统,此种系统因透镜的前后焦面有严格傅里叶变换关系,所以有其独特的简便之处。但 $4f$ 系统光路长,需要两个傅里叶透镜,所以在实验中,进行光信息处理时更多的是采用如图 1 所示的光路。图中 P_1 为输入平面, P_2 为滤波平面, P_3 为输出平面,在 P_1 面前的透镜 L_1 ,其作用是使照明 P_1 的光是会聚的,且其会聚中心在 P_2 平面上,焦距为 f 的透镜 L_2 紧靠 P_2 面后,其作用是使处理结果出现在输出平面 P_3 上。为简便起见,考虑一维情况,设物函数为 $o(x)$,在会聚光照明下,输入平面后的光场为

$$U(x) = o(x) \exp\left[-j \frac{k}{2} x^2\right] \quad (1)$$

* 湛江海洋大学访问学者。

其中假定入射光的振幅为 1, l 代表 P_1 面到 P_2 面的距离。根据菲涅耳衍射理论, 到达滤波平面的光场为

$$U_1(x') = \frac{1}{j\lambda l} \exp(jkl) \int_{-\infty}^{\infty} U(x) \exp\left| j \frac{k}{2l} (x' - x)^2 \right| dx = A' \exp\left| j \frac{k}{2l} x'^2 \right| F[o(x)] \quad (2)$$

其中 $A' = \frac{1}{j\lambda l} \exp(jkl)$, 如滤波器的滤波函数为 $H(f_x)$, 则通过滤波器后的光场为

$$U_2(x') = U_1(x') H(f_x) \quad (3)$$

又根据透镜的作用相当于引进一个二次位相因子^[8], 所以在正透镜后面的光场为

$$U_3(x') = U_2(x') \exp\left| - j \frac{c}{\lambda f} x'^2 \right| \quad (4)$$

其中 f 为透镜的焦距。再经过菲涅耳衍射, 到输出平面的光场为

$$U(x'') = \frac{1}{j\lambda l'} \exp(jkl') \int_{-\infty}^{\infty} U_3(x') \exp\left| j \frac{k}{2l'} (x'' - x')^2 \right| dx' = A'' \exp\left| j \frac{c}{\lambda l'} x''^2 \right| F[|o(f_x)|^2] \quad (5)$$

式中, $A'' = \frac{A'}{j\lambda l'} \exp(jkl')$, l' 代表滤波平面到输出平面的距离; 并应用了关系

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{l'} = \frac{1}{f} \quad (6)$$

和

$$H(f_x) = F^* [o(x)] \quad (7)$$

从 (5) 式结果可见, 因 $|o(f_x)|^2$ 是一个实数, 且可以把它分解成两项: $|o(f_x)|^2 = C + I(x)$, 其中 C 为常数, 所以 $F[C + I(x)] = W(x) + F[I(x)]$, W 函数在 P_3 平面上应是一个亮点, $F[I(x)]$ 的作用是在亮点周围会出现一些杂散光; 而 $\exp\left| j \frac{c}{\lambda l'} x''^2 \right|$ 是位相因子, 对观察光强度无作用。

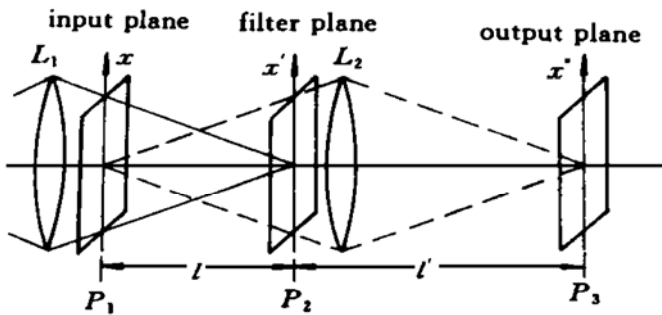


图 1 匹配滤波器的原理光路图

Fig. 1 The optical configuration of matching filter

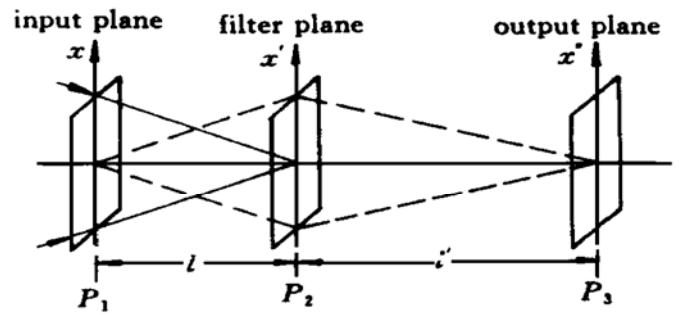


图 2 自聚焦滤波器光路图

Fig. 2 Optical configuration of self-focusing matching filter

在上述推导中, 由 (3) 式到 (4) 式可知, 透镜的作用相当于在滤波函数中加了一个二次位相因子。由此, 我们在制作匹配滤波器时把透镜二次位相因子直接加到滤波函数中^[9], 使透镜与滤波器合二为一, 从而使匹配的实验光路简化成图 2 其中 l, l', f 满足成像关系。

2.2 输入平面与输出平面位置的确定

按抽样定理对物函数作总数为 N^2 的抽样时, 此系统的空间带宽积为

$$SW = N^2 = (\Delta x \Delta x_0)^2 \quad (8)$$

本实验对物进行 64×64 抽样, $\Delta x \Delta x_0 = 64$, 其中 $\Delta x_0 = \frac{\Delta L}{\lambda l}$, 则有

$$\frac{\Delta x \Delta L}{\lambda l} = 64 \tag{9}$$

其中 λ 为入射光波长, Δx 为物的大小, Δx_0 代表频谱在频域中的大小, ΔL 代表频谱的空间尺度。只要知道 $\Delta x, \Delta L$, 由 (9) 式可算出 l 值, 也就定出了输入平面 (物函数) 到滤波平面的距离。对不同大小的物, 只要按照 (9) 式改变 l , 再按 (6) 式改变 l' , 即可进行不同大小物体的匹配实验。

3 实验结果及讨论

我们分别以汉字“海”及一个螺旋线等二维图形作为物, 取样点为 64×64 , 在计算机中先形成相应物的图像文件, 再转化成数据文件, 用 F. F. T 进行二维离散傅里叶变换, 得到此物的频谱, 取其共轭谱再乘以二次位相因子, 然后用计算全息中罗曼型方法^[10]进行编码, 由激光打印机绘图, 经缩小后得到的底片就是所要的匹配滤波器。图 3 是“海”字的匹配滤波器 (部分)。

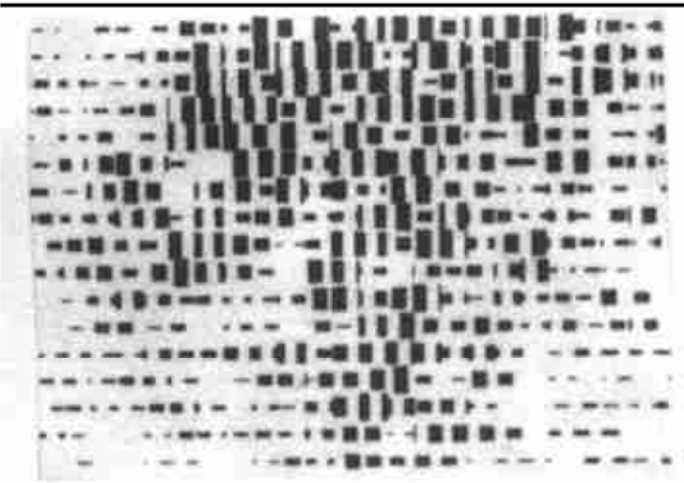


图 3 “海”字自聚焦匹配滤波器的部分
Fig. 3 Part of self-focusing matching filter of Chinese character“海”

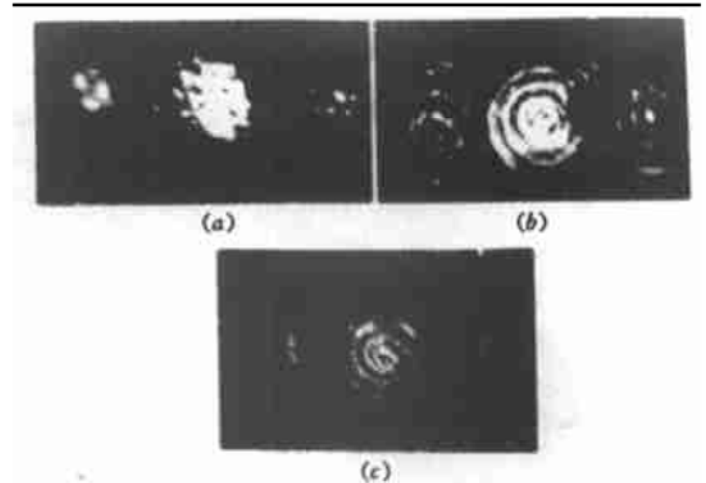


图 4 实验结果
(a) “海”的结果; (b) “螺旋线”的结果;
(c) “海”与“螺旋线”的失匹配结果
Fig. 4 The experimental results
(a) result of“海”; (b) result of“ spiral line”;
(c) the results of fail-matching

利用图 2 所示的光路, 根据 (9) 式和 (6) 式算出物的位置和输出平面位置, 当 P_2 平面放置该物的匹配滤波器时, 适当调节后得到了与理论一致的结果, 如图 4 给出了“海”字和螺旋线二维图形的匹配结果及失匹配结果。由于我们是通过对一级迂回位相编码方法来实现滤波器的位相的, 所以它对零级无透镜作用, 故图 4 中零级处是物的投影像。代表匹配的亮点出现在正一级。对同一滤波器, P_1 面换为另外的物, 则得不到图 4(a), (b) 的结果, 即为失匹配的 (如图 4(c))。

实验中我们发现, 在匹配的情况下, 使物在 P_1 平面作上下左右微移, 像点也会在像平面上移动, 移动方向刚好与物的移动方向相反, 但亮点的形状不变。这也是与理论相符的。

另外, 根据我们的经验, 为得到清楚的匹配效果, 二次位相因子中的 f 值取 $2l/3 < f < l$, 实验中的匹配滤波器大小为 $4.89 \text{ mm} \times 4.89 \text{ mm}$, 匹配物的大小为 $4.20 \text{ mm} \times 4.20 \text{ mm}$; 根据

空间带宽积算得 $l = 49.78 \text{ cm}$, f 取 36.41 cm , 所得实验结果与理论一致, 说明这种方法制作匹配滤波器是完全可行的。该法制作的匹配滤波器与传统匹配滤波器比较具有如下优点:

(1) 该元件具有自聚焦的特性, 应用光路中只需一个透镜产生会聚的照明光, 不仅使光路大大简化, 物的大小可变, 也使得系统的调节更加方便。

(2) 以二次位相因子代替的透镜消除了透镜孔径的影响; 且透镜与滤波器是真正的合二为一, 也减少了由于透镜的存在引起的光能损失。而透镜的焦距值出现在二次位相因子数学式中, 所以很容易改变, 从而使这种方法比常规方法更灵活。

参 考 文 献

- 1 A. B. Vander Lugt. Signal detection by complex matched spatial filtering. *IEEE Trans. Inf. Theory.*, 1964, **IT-10** 139~ 145
- 2 B. R. Brown, A. W. Lohmann. Complex spatial filtering with binary masks. *Appl. Opt.*, 1966, **5** (6): 967~ 970
- 3 G. G. Mu, X. X. Shao, Z. Q. Wang *et al.*. Computer-generated amplitude-compensated matched filter. *Opt. Eng.*, 1998, **37**(1): 99~ 102
- 4 D. Casasent, C. Szczytkowski. Optical mellin transforms using computer generated holograms. *Opt. Commun.*, 1976, **19**(2): 217~ 222
- 5 J. L. Horner, P. D. Gianino. Phase-only matched filtering. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(6): 812~ 816
- 6 J. Ding, M. Itoh, T. Yatagai. Iterative design of distortion-invariant phase-only filters with high Horner efficiency. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(12): 4037~ 4044
- 7 J. Rosen, J. Shamir. Scale invariant pattern recognition with logarithmic radial harmonic filters. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(2): 240~ 244
- 8 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics. Beijing Science Press, 1976. 88~ 94 (in Chinese)
- 9 C. H. Ren, J. Zhou, W. Q. Gao. Four-channel self-focus computer-generated hologram. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(34): 8844~ 8847
- 10 E. Wolf. Progress in Optics. Vol , New York North-holland publishing company, 1978. 126~ 133

Self-focusing Matching Filter Produced By Computer-generated Hologram

Feng Yujun Zhou Jin Huang Xinfan Gao Wenqi

(Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract A new type matching filter by computer-generated hologram is presented in this paper. The filter is obtained by adding quadratic phase factors into conjugate frequency spectrum of object, then encoding and reducing. Because of the filter having function of self-focusing the optical configuration becomes more simple, more compact, and easier to adjust. It is suitable for objects with different scale. The experimental results are consistent with theoretic analysis provided.

Key words matching filter, quadratic phase factors, computer-generated hologram