

计算全息术制备特种空间滤波器*

王肇圻 邵昕欣 母国光 傅汝廉

(南开大学现代光学研究所国家教委光学信息技术科学开放研究实验室 天津 300071)

提要 研究了用计算全息制作二进制振幅调制纯位相空间滤波器的方法,以及它与其它几种滤波器性能的比较。实验结果表明,计算全息制的振幅调制纯位相空间滤波器在相关峰的锐度、Horner 效率和抗噪能力上俱佳。

关键词 计算全息, 振幅调制, 纯位相滤波器

1 引言

1982 年 J. Horner 在研究空间滤波器的光效率中,提出了纯位相滤波器^[1]。在此之前, Oppenheim 和 Lim^[2]的研究已经证明在光学图像形成中,位相信息比振幅信息具有更大的重要性。Horner 通过实验证实了纯位相滤波器不仅有最高的光效率(Horner 效率),而且具有更锐的相关峰及更好的鉴别率。鉴于纯位相滤波器只反映位相的信息,没能包括振幅的信息,我们提出了振幅调制滤波器^[3~6]。与纯位相滤波器相比,它具有更锐的峰,更高的鉴别率,但是无论是纯位相滤波器还是振幅调制滤波器,都是由一个位相滤波函数及一个振幅滤波函数组合而成,它的光学实现很困难。而计算全息术通过编码能同时对位相和振幅处理,并可以制备成一个二值化的复空间滤波器。另一方面,目前空间滤波器的发展方向是使用空间光调制器进行实时的模式识别。而多数的空间光调制器只能调制位相或振幅,而且对灰阶有一定的限制,这就对复空间滤波器提出了设计上的要求,这也要求用计算全息术来实现。本文研究了用计算全息术制备纯位相滤波器和振幅调制滤波器的技术,讨论了二值化的影响,并对计算全息的不同空间滤波器的性能进行了比较。

2 几种不同的空间滤波器

对于匹配滤波器,纯位相滤波器和振幅调制滤波器的滤波函数分别为

$$H_m(p, q) = |F(p, q)| \exp[-i\Phi(p, q)] \quad (1)$$

$$H_p(p, q) = \exp[-i\Phi(p, q)] \quad (2)$$

$$H_{am}(p, q) = \exp[-i\Phi(p, q)]/[1 + k|F(p, q)|] \quad (3)$$

其中 $|F(D, a)|$ 为傅里叶频谱的振幅谱, $\Phi(D, a)$ 为位相谱, $F(D, a) = |F(D, a)| \exp[i\Phi(D, a)]$

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 69677019)。

是 $f(x, y)$ 的傅里叶变换, 用这些滤波器进行光学滤波时, 其复光场分别为

$$E_m(p, q) = |F(p, q)| \exp[i\Phi(p, q)] H_m(p, q) = |F(p, q)|^2 \quad (4)$$

$$E_p(p, q) = |F(p, q)| \exp[i\Phi(p, q)] H_p(p, q) = |F(p, q)| \quad (5)$$

$$E_{am}(p, q) = \exp[-i\Phi(p, q)] / [1 + k|F(p, q)|] = |F(p, q)| / [1 + k|F(p, q)|] \quad (6)$$

对于匹配滤波器其复光场为由 $|F(p, q)|^2$ 调制的平面波。纯位相滤波器为由 $|F(p, q)|$ 调制的平面波, 而振幅调制滤波器为 $|F(p, q)| / [1 + k|F(p, q)|]$ 调制的平面波, 由于在频谱平面的光场的均匀性不同, 在光学系统输出平面形成的相关峰锐度也不同。其中振幅调制滤波器形成的相关峰最锐, 纯位相滤波器次之, 匹配滤波器最次。匹配滤波器可以用光学全息的方法制备。而纯位相滤波器和振幅调制滤波器很难用光学的方法制备, 因此要用计算全息的方法。

3 计算全息术中的振幅调制滤波器

3.1 匹配滤波器

对于一个复空间的全息记录可以表示为^[7]

$$|F(p, q) + R(p, q)|^2 = |F(p, q)|^2 + |R(p, q)|^2 + 2|R||F(p, q)| \cos[\Phi(p, q) - a] \quad (7)$$

其中 $F(p, q)$ 为物的傅里叶谱, $R(p, q)$ 为空间载波, a 为常量偏置因子。选取合适的 a 值可以使相关衍射、卷积衍射与零级衍射分开。应用计算全息编码可以令 $|F(p, q)|^2 + |R|^2$ 为一常数, 再归一化则可得频谱空间的滤波函数

$$h_m(p, q) = |F(p, q)| \{1 + \cos[\Phi(p, q) - a]\} \quad (8)$$

再通过硬限幅得到计算全息术制的匹配滤波器。

3.2 纯位相滤波器

只考虑(8)式的位相谱则可得

$$h_p(p, q) = 1 + \cos[\Phi(p, q) - a] \quad (9)$$

这就是一个纯位相滤波函数, 对其进行限幅, 当 $\cos[\Phi(p, q) + a] > 0$ 时, 令其值为 1, 反之为 0, 这样就可以用计算全息术实现纯位相滤波器。

3.3 振幅调制滤波器

由于纯位相滤波器忽略振幅谱影响了相关峰的锐度, 用 $1/[1 + k|F(p, q)|]$ 对其进行补偿, 得滤波函数

$$h_{am}(p, q) = \frac{1}{1 + k|F(p, q)|} \{1 + \cos[\Phi(p, q) - a]\} \quad (10)$$

再对其进行硬限幅, 得到只有 0, 1 两值的二值化滤波函数, 得到计算全息的振幅调制滤波器。

将以上函数用密度计记录在胶片上, 即可得到计算全息制的滤波器。在实验中, 为了降低全息图的动态范围可以对输入物加随机位相因子。

4 实验结果

在实验中我们用计算全息的方法分别制作了上述几种滤波器, 并用计算机模拟来检验它们做光学相关的性能。

首先引入了评价实验的一些准则: 反映相关峰锐度的标准 $SNR^{[8]}$, 即

$$SNR = \text{相关峰的最大值} / \text{相关峰中小于 50\% 的点的均方根值}$$

SNR 值的大小直接反映了相关峰的锐度, 而相关峰的锐度是空间滤波器的重要的参数, 锐度增高鉴别率也随之增高。

第二个准则是 Horner 效率 η_H , 我们选用 Caulfield^[9] 定义, 即

$$\eta_H = \text{相关峰的峰高} / \text{输入能量}$$

第三个准则为抗噪能力^[4]

$$\sigma_i = \text{输入噪声强度} / \text{信号强度} (\text{输出噪声} / \text{相关峰峰高} = 75\%)$$

实验中采用配有 Pentium 133 的 PC 机用 IDL 软件进行处理。输入图像选用 256×256 像素的二阶英文字母 G。首先考查二值化对滤波器性能的影响, 以连续灰阶变化的计算全息纯位相滤波器同二值化的计算全息纯位相滤波器为例, 选取不同的阈值对其进行编码, 其结果示于表 1。

表 1 取不同阈值的二值化纯位相滤波器与连续灰阶的纯位相滤波器的比较

Table 1 The comparison of the binary phase-only matched filters of different thresholds with the continuous gray level phase-only filter

Filter	SNR
Phase-only filter with continuous gray level	10.149
Binary phase-only filter with threshold 0.3	10.034
Binary phase-only filter with threshold 0.5	9.99515
Binary phase-only matched filter with threshold 0.7	10.003

从表 1 可以看出二值化处理只对 SNR 产生很小的影响, 而二值化图像无论是对计算全息图, 还是空间光调制器的显示均十分有利。

然后比较三种不同滤波器的计算全息结果, 见表 2。

表 2 不同类型的计算机制滤波器的性能比较

Table 2 The comparison of the performance of different types of filters by CGH

Filter	Threshold	SNR	$\eta_H/\%$	σ
Binary matched filter	0.25	5.11803	0.035	1.2
Binary phase-only matched filter	0.5	9.99515	2.3	2.3
Binary amplitude-compensated matched filter	0.1	27.5838	1	2.4

由表 2 可以看出计算机制振幅调制滤波器的 SNR 值较计算机制纯位相滤波器和计算机制匹配滤波器都有很大的提高。这是因为振幅调制纯位相滤波器的振幅补偿因子 $1/[1+k|F(p,q)|]$ 对频谱中的低频成份起压制作用, 相对增加了其高频成份, 在光学相关处理时, 高频成份对相关峰起主要作用, 这就造成其峰较锐。相比之下纯位相滤波器没有此因子, 而匹配滤波器的振幅因子使其成为一个低通高阻滤波器。在模式识别中, SNR 值是首位重要的参数。因为它决定了误判和漏判的几率。计算机制振幅调制滤波器的最主要的特色就是在 SNR 值上的重大改善。在 Horner 效率方面, 计算机制的振幅调制滤波器是计算机制的匹配滤波器的 28.6 倍。这种改善可以大大地降低对探测器灵敏度的要求。同计算机制的纯位相滤波器相比, 计算机制振幅调制滤波器的 Horner 效率为前者的 43%, 但考虑到 SNR 值上的改善, Horner 效率 43% 的损失是完全可以接受的。在抗噪能力方面可以看出纯位相滤波器与振幅调制纯位相滤波器相差不多, 而匹配滤波器较低, 这是因为匹配滤波器的零级衍射占有了很大的能量。

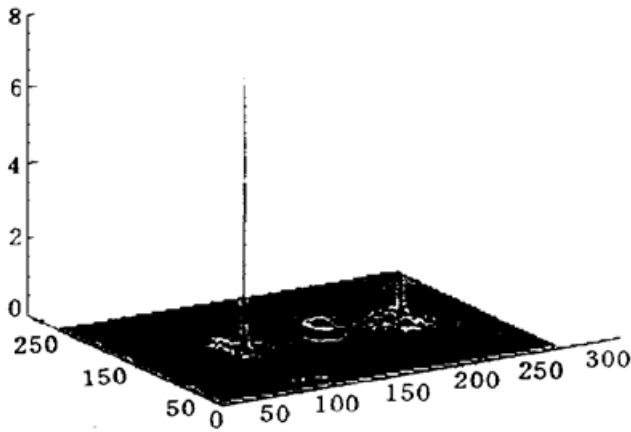
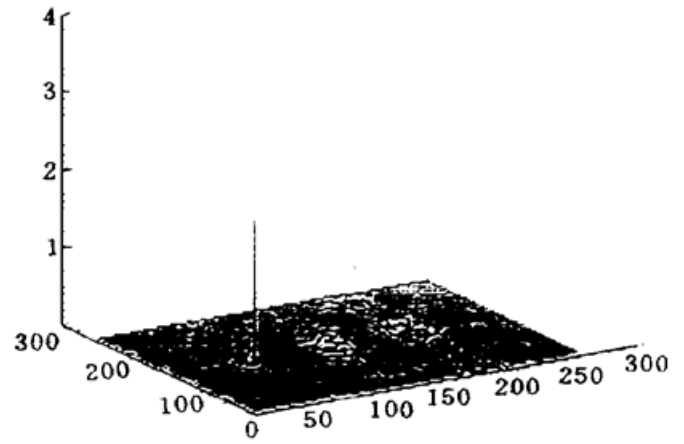


图 1 计算机制纯位相滤波器在输出平面的三维图
Fig. 1 The 3D image phase-only filter by CGH on the output plane



2 计算机制振幅调制滤波器在输出平面的三维图
Fig. 2 The 3D image amplitude modulated filter by CGH on the output plane

图 1~ 3 分别给出了计算机制振幅调制滤波器、纯位相滤波器和匹配滤波器计算机模拟的相关结果。图中左边区域是相关区, 右边区域是卷积区, 中间是零级区。从图中可以看出纯位相滤波器与振幅调制纯位相滤波器具有相对锐的相关峰和相对低的零级衍射和低的卷积衍射。

5 结 论

我们用计算全息术的方法实现了振幅调制滤波器。为了检验其性能, 同计算全息的纯位相滤波器及匹配滤波器作了比较, 它具有最大的 SNR 值及较好的抗噪声能力。由于振幅调制滤波器本身的吸收性质, 它的 Horner 效率比纯位相滤波器略有下降, 但比匹配滤波器高出近 30 倍。Horner 效率可以用增加输入能量及提高探测器灵敏度来补偿。同时我们还比较了连续灰阶和二值化的计算全息空间滤波器, 实验结果表明其性能基本相同, 计算全息术所制的滤波器所具有的二值性又使其制作及在空间调制器上的实现更为容易。

虽然我们得到了振幅调制滤波器计算全息的数据, 并用计算机模拟对其进行了研究, 但用一个实际的计算全息图在光学系统中进行相关运算尚未实现。在实际系统中可能存在如下的一些问题, 在将计算全息滤波器放在 4F 系统的频谱面上时, 受环境影响会失配; 受计算机内存容量的限制, 所取抽样点不能太大, 造成空间带宽积不够, 而影响相关质量。

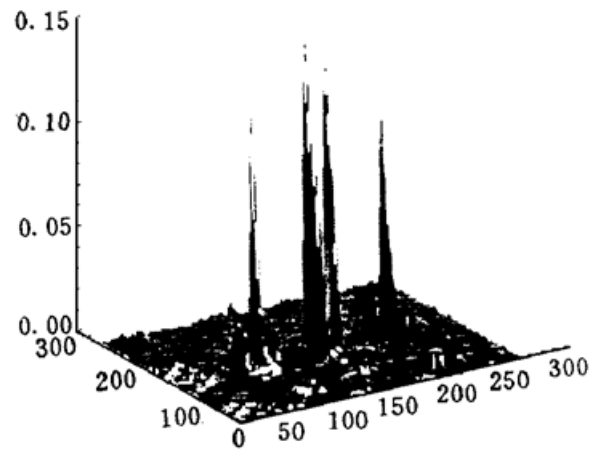


图 3 计算机制匹配滤波器在输出平面的三维图

Fig. 3 The 3D image matched filter by CGH on the output plane

参 考 文 献

- 1 J. L. Horner, P. D. Gianino. Phase-only matched filtering. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(16): 812~ 816
- 2 A. V. Oppenheim, J. S. Lim. The importance of phase in signals. *Proc. IEEE*, 1981, **69**(5): 529~ 541
- 3 Guo-Guang Mu, Xu-Ming Wang, Zhao-Qi Wang. Amplitude-compensated matched filtering. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(16): 3461~ 3463

- 4 Z. Q. Wang, C. M. Cartwright, W. A. Gillespie *et al.*. Evaluation of the performance of the amplitude-compensated matched filter with different threshold values. *Optik*, 1992, **90**(3): 139~ 143
- 5 Z. Q. Wang, C. M. Cartwright, W. A. Gillespie *et al.*. An optical matched filter using a quantized amplitude compensation technique. *Optik*, 1993, **94**(2): 78~ 82
- 6 Ying Sun, Zhao-Qi Wang, Guo-Guang Mu. Amplitude compensated matched filters using circular harmonic expansion and a Mellin transform. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(32): 4779~ 4783
- 7 Yu Zuliang, Jin Guofan. Computer-generated Hologram. Beijing: The Press of Qinghua University, 1984. 48~ 50 (in Chinese)
- 8 J. L. Horner, H. O. Bartelt. Two-bit correlation. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(18): 2889~ 2893
- 9 H. J. Caulfield. Role of the Horner efficiency in the optimization of spatial filters for optical pattern recognition. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(24): 4391~ 4392

Spatial Filters Using Computer-generated Hologram (CGH)

Wang Zhaoqi Shao Xinxin Mu Guoguang Fu Rulian

(*Institute of Modern Optics of Nankai University, Optical Information Science Laboratory,
Nankai University, SEC, China, Tianjin 300071*)

Abstract The binary amplitude-modulated phase-only spatial filter (BAMPOF) is studied and different filters are compared to access the BAMPOF's performance. The study shows that the BAMPOF has good features regarding the sharpness of the correlation peak, Horner efficiency and noise tolerance. So, the applications of it in the optical pattern recognition is promising.

Key words computer-generated holography, amplitude-modulated, phase-only filter