

# 相同参考光非相关多重匹配空间滤波器的研究

何刚 张以谟  
(天津大学精仪系)

## 提 要

本文分析和验证了在制备匹配空间滤波器过程中采用两个权因子偏置曝光量  $E_b$  和特征频率  $f^*(\eta)$  控制其输出的自相关峰值强度和相对判别能力的方法, 进而将其推广到制备相同参考光非相关叠加多重匹配空间滤波器的过程中, 给出了总曝光时间最佳范围的估算式及总曝光时间对于自相关强度的实验曲线; 在不同的  $f^*(\eta)$  条件下自相关强度和相对判别能力分别关于重叠个数  $N$  的实验曲线。

## 一、引 言

在光学相关模式识别中, 多重匹配空间滤波器(MMSF)有着应用的前景。相同参考光非相关叠加多重匹配空间滤波器(SRNMF)原理及制备方法在一些文章中进行了讨论<sup>[1~2]</sup>。SRNMF 的相关输出方式简单, 输入图像与此滤波器的各个参考图像之间的自相关或互相关峰值强度以代数和的形式出现在输出平面同一位置上<sup>[3]</sup>。为了将 SRNMF 成功地用于综合匹配空间滤波器的制备<sup>[3]</sup>以及多通道相关识别系统<sup>[2,4]</sup>, 需要对 SRNMF 的合成参数的选取及它对自相关峰值强度和相对判别能力的影响进行细致的研究, 以便通过合成参数人为地控制自相关峰值强度及相对判别能力。

Casasent 等人对于在合成匹配空间滤波器过程中通过适当选取某些参数来改善识别能力的问题进行了有意义的讨论<sup>[5~6]</sup>。本文在文献[5]的理论分析基础上, 选取了两个关键的合成参数(权因子), 讨论了它们对此滤波器的自相关峰值强度和相对判别能力的控制作用, 以及在 SRNMF 合成过程中对于其相关输出特性的影响。

## 二、理论分析及权因子的确定

利用匹配空间滤波器进行光学相关检测的频谱面相关器示意图如图1所示。输入面(IP)的坐标为  $(x_0, y_0)$ , 匹配滤波器平面(MFP)的坐标为  $(x_1, y_1)$ , 相关平面(OP)的坐标为  $(x_2, y_2)$ 。参考光束和物光束在匹配滤波器平面上的复振幅分布分别为  $u_R$  和  $u_S$ , 其表示式为

$$u_R(x_1, y_1) = A \exp(2\pi i \alpha x_1), \quad u_S(x_1, y_1) = G(x_1, y_1), \quad (1)$$

式中  $A$  是参考光的常数振幅,  $\alpha = \sin \theta / \lambda$ ,  $G(x_1, y_1) = \mathcal{F}\{g(x_0, y_0)\}$ , 而  $g(x_0, y_0)$  为输入

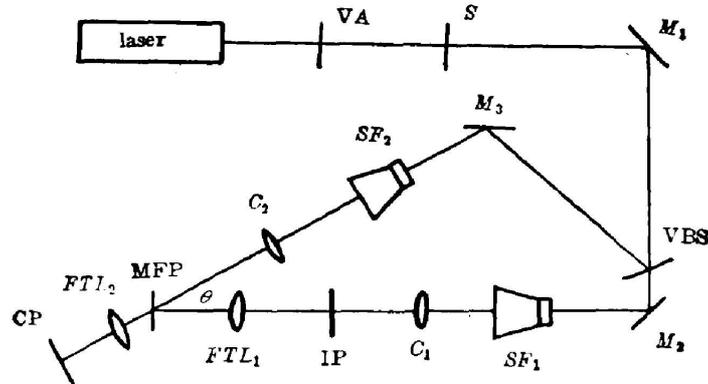


Fig. 1 Schematic of frequency-plane correlator

VA—variable attenuator; VBS—variable beam splitter; S—shutter; M—mirror;  
SF—spacial filter; C—collimating lens; FTL—fourier transform lens;  
MFP—matched filter plane; CP—correlation plane; IP—input plane

函数。当合成匹配空间滤波器(MSF)时,匹配滤波器平面上的曝光量分布函数可表示为

$$E(x_1, y_1) = |u_R + u_S|^2 = E_B [1 + (1/R) + 2/\sqrt{R} \cos \psi], \quad (2)$$

式中  $\psi = 2\pi\alpha x_1 + \arg(G)$ ,  $E_B = A^2 t$  偏置曝光量,  $t$  为曝光时间;  $R = (A^2/|G|^2)$  为参物比。自相关  $g \star g$  的峰值强度  $I_{00}$  为<sup>[5]</sup>

$$I_{00} = \left| \iint G(x_1, y_1) d(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \right|^2, \quad (3)$$

式中  $d(x_1, y_1)$  为匹配空间滤波器的振幅衍射效率,  $d$  的大小直接决定  $I_{00}$  的大小。对于两平面波干涉<sup>[7]</sup>

$$d = \frac{1}{2} \beta E_0 m, \quad m = \frac{2\sqrt{R}}{R+1}, \quad \beta = \frac{dT}{dE} \Big|_{E_0}, \quad (4)$$

式中  $E_0$  为平均曝光量,  $\beta$  为振幅透射率——曝光量曲线在  $E_0$  点的斜率, 也是  $E_0$  的函数,  $m$  为调制深度。当  $m$  为定值时,  $d$  与  $\beta E_0$  成正比; 当  $E_0$  为定值时,  $d$  与  $m$  成正比; 当  $R=1$  时,  $m$  为最大。由于  $G(x_1, y_1)$  是空间频率的函数,  $R$  和  $m$  也应是空间频率的函数。为此定义  $f^*(n)$  为匹配空间滤波器的特征频带, 表示在合成匹配空间滤波器时, 在匹配滤波器平面上对应于  $G(x_1, y_1)$  的  $f^*(n)$  频带位置处使参物比  $R=1$ 。为了便于控制曝光量, 用偏置曝光量  $E_B$  束表征平均曝光量  $E_0$ , 在两平面波干涉且  $R=1$  时, 有  $E_0=2E_B$ 。这样  $E_B$  和  $f^*(n)$  为匹配空间滤波器的两个主要合成参数, 即权因子。  $E_B$  的选取由使用的记录材料的特性曲线来决定,  $f^*(n)$  的选取由参考图像的傅里叶频谱特性来决定。它们的选取决定着匹配空间滤波器的衍射效率及带通特性。在一定的  $E_B$  和  $f^*(n)$  条件下, 合成的匹配空间滤波器为加权匹配空间滤波器。

### 三、单重匹配空间滤波器的实验结果及讨论

如图 1 所示, 使用功率为 9 mW 的 He-Ne 激光器作光源, 傅里叶变换透镜  $FTL_1$  和  $FTL_2$  的焦距分别为 500 mm 和 50 mm, 用连续可调光分束器 VBS 调节参物比  $R$ , 获得所

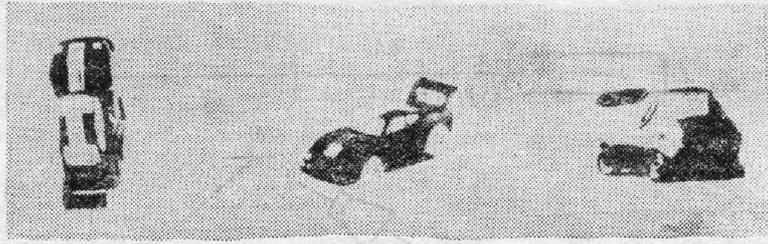
(a) Reference image  $f(x_0, y_0)$ ; (b) Input image  $f_1(x_0, y_0)$ ; (c) Input image  $f_2(x_0, y_0)$ 

Fig. 2 Photographs of reference and input images

要求的特征频带  $f^*(n)$ 。在相关平面(CP)上,用探测口径为  $300 \mu\text{m}$  的光电倍增管探测输出相关峰值强度,并通过光电检流计读出相关峰值强度的大小。用天津 I 型全息干版作为记录材料,选用具有连续灰度变化的小汽车的投影图像作为参考和输入图像,如图 2 所示。其中图像  $f$  [图 2(a)] 是匹配滤波器的参考图像。图像  $f_1$  [图 2(b)] 和  $f_2$  [图 2(c)] 分别是不同  $f$  的两个输入图像,用于讨论匹配空间滤波器的相对判别能力(即判别自相关与互相关的能力)。 $I_{ff}$  表示图像  $f$  本身的自相关峰值强度,  $I_{ff1}$  和  $I_{ff2}$  分别表示图像  $f$  与  $f_1$ 、 $f_2$  的互相关峰值强度。由于参考图像  $f$  的傅里叶频谱峰值集中在谱面(MFP)上过原点的两条互相垂直主轴上,所以  $f^*(n)$  的选取,是用光电探测元件沿其中一个能量更为集中的主轴(如经过调整使此轴与匹配滤波器平面上的  $x_1$  轴重合),从原点开始,分别在第 1、6、10 个频谱峰值位置使参物比  $R=1$ 。得到的三个对应的匹配空间滤波器的特征频带分别表示  $f^*(1)$ ,  $f^*(6)$ ,  $f^*(10)$ 。

对于  $f^*(1)$ 、 $f^*(6)$ 、 $f^*(10)$  三种情况,各取一组偏置曝光量  $E_B$ ,从而得到自相关峰值强度  $I_{ff}$  和互相关峰值强度  $I_{ffm}$  ( $m=1, 2$ , 分别对应于  $f_1$  和  $f_2$ ) 随  $f^*(n)$  和  $E_B$  变化的规律。实验结果见表 1 和表 2。表中  $D_B$  为匹配空间滤波器的偏置光密度,  $D_B$  的数值是由光密度计对匹配空间滤波器只受到参考光曝光的部分进行测量得到的光密度值\*。自相关峰值强度  $I_{ff}$  和互相关峰值强度  $I_{ffm}$  是由检流计读出的电流值(单位为 nA)。实验结果表明:

(a) 对于各个给定的  $f^*(n)$  ( $n=1, 6, 10$ ), 自相关峰值强度  $I_{ff}$  随偏置光密度  $D_B$  的变化规律基本一致,当  $D_B$  处在 0.3 附近,  $I_{ff}$  达到最大。

(b) 设  $I_{ff}[f^*(n)]$  表示对于任意给定的  $D_B$  对应于特征频带  $f^*(n)$  ( $n=1, 6, 10$ ) 的自

Table 1  $I_{ff}$  and  $D_B$  for various  $f^*(n)$ 

| $f^*(n)$ | $f^*(1)$ |      |      |      |      | $f^*(6)$ |      |      |      |      | $f^*(10)$ |      |      |      |      |
|----------|----------|------|------|------|------|----------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|
| $I_{ff}$ | 19       | 80   | 184  | 144  | 28   | 7        | 48   | 67   | 47   | 36   | 5         | 28   | 50   | 30   | 24   |
| $D_B$    | 0.07     | 0.10 | 0.29 | 0.61 | 0.72 | 0.09     | 0.11 | 0.25 | 0.34 | 0.46 | 0.09      | 0.12 | 0.30 | 0.55 | 0.99 |

Table 2  $f^*(n)$  and  $I_{ffm}$  for  $D_B \approx 0.3$ 

| $f^*(n)$  | $f^*(1)$ | $f^*(6)$ | $f^*(10)$ |
|-----------|----------|----------|-----------|
| $I_{ff1}$ | 116      | 24.7     | 4.4       |
| $I_{ff2}$ | 112      | 29.4     | 5.9       |

\*  $D_B$  与  $E_B$  的关系落在 I 型全息干版的 D-H 曲线的趾部和直线部分的下端。

相关峰值强度值,有  $I_{ff}[f^*(1)] > I_{ff}[f^*(6)] > I_{ff}[f^*(10)]$ 。由于参考图像低频部分的频谱峰值强度高于高频部分的频谱峰值强度,所以它表明  $I_{ff}$  随  $f^*(n)$  的变化规律由参考图像本身的频谱特性来决定。

(c) 对于各个给定的  $f^*(n)$ , 都有  $D_B > 0.3$  时  $I_{ff}$  随  $D_B$  的增加反而下降的速度比  $D_B < 0.3$  时  $I_{ff}$  随  $D_B$  的减小反而下降的速度要慢的规律。

(d) 设相对判别能力  $cd$  为自相关强度与互相关强度之比,用  $cd[f^*(n)]$  表示对应于  $f^*(n)$  ( $n=1, 6, 10$ ) 的  $cd$  值,则有  $1 < cd[f^*(1)] < cd[f^*(6)] < cd[f^*(10)]$ , 即高通匹配空间滤波器具有较高的判别能力。

## 四、相同参考光非相关叠加多重匹配空间滤波器

### 1. 合成 SRNMF 的方法及过程

非相关叠加多重匹配空间滤波器,是将一组参考图像按先后顺序依次用同一参考光进行曝光记录得到的,故也可称为多次曝光叠加多重匹配空间滤波器。设  $u_n(x, y)$  ( $n=1, 2, \dots, N$ ) 为  $N$  个不同的参考图像;平面参考光束的振幅为 1;载波频率为  $\nu$ , 则  $N$  次曝光的总强度为<sup>[6]</sup>

$$I_N = \sum_{n=1}^N |U_n|^2 + C_0 + \sum_{n=1}^N U_n \exp(2\pi i \nu x) + \sum_{n=1}^N U_n^* \exp(-2\pi i \nu x), \quad (5)$$

式中  $U_n = \mathcal{F}\{u_n\}$  为  $u_n$  的傅里叶变换,  $C_0$  为一常数,上式最后一项是所希望的滤波器函数。

仍用图 1 所示的光学系统,在 IP 上放置一可进行微调的旋转架作为输入图像支架,以图像  $f$  (如图 2(a) 所示) 在输入面内旋转不同的角度  $\theta$  作为参考输入图像组,其示意图如图 3 所示,在各次曝光中参考光方向保持不变。这样可合成  $f$  在输入面(IP)内不同旋转角度  $\theta$  的 SRNMF。

### 2. 实验结果及讨论

用总的曝光时间  $t$  (各次曝光之和) 来描述偏置曝光量  $E_B$  的选取,即:  $t = t_1 + t_2 + \dots + t_N$ , 并且取:  $t_1 = t_2 = \dots = t_N = C$ 。为了便于与单重匹配空间滤波器进行比较,令相对总曝光时间  $T = (t/t_0)$ ,  $t$  为对应于使单重匹配空间的偏置光密度  $D_B$  约为 0.3 的曝光时间。同样为了数据的简单、直观、便于比较,将自相关峰值强度  $I_{ff}$  进行归一化处理,得到的相对自相关峰值强度用  $I_{Rf}$  表示。在下面各个特定的讨论范围内  $I_{Rf} = (I_{ff}/I_{ff(\max)})$ ,  $I_{ff(\max)}$  为特定范围内最大的自相关峰值强度。

#### (1) 最佳总曝光时间的估计及实验结果。

根据前面单重匹配空间滤波器的讨论,从两个极限的情况对使自相关峰值强度为最大的最佳曝光时间的范围作如下估计。

#### (a) 最佳曝光时间的下限值 $T_a$ 、 $t_a$ 、 $C_a$ 的估计。

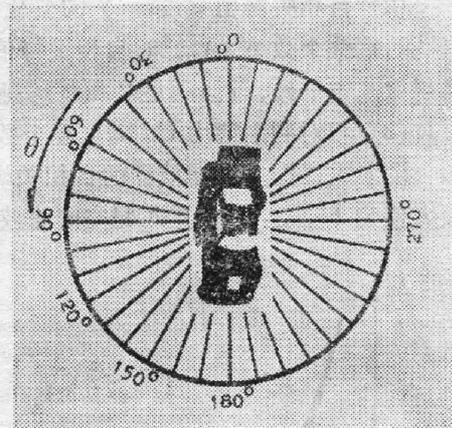


Fig. 3 Schematic of the angular orientation of reference image  $f$  in the input plane

对于各个参考图像的傅里叶频谱在匹配滤波器平面相重合的极限情况,其最佳曝光时间应满足

$$T_0=1, t=t_0, C_0=(t_0/N), \quad (6)$$

式中  $N$  为多重匹配空间滤波器的重叠个数。

(b) 最佳曝光时间的上限值  $T_0$ 、 $t_0$ 、 $C_0$  的估计。

对于各个参考图像的傅里叶频谱在匹配滤波器平面上都不重合(零频除外)的极限情况,其最佳的单元曝光时间  $O$ (即多次曝光中每一次的曝光时间)应满足

$$2A^2t_0=2A^2O+(N+1)A^2O=(N+1)OA^2, \quad (7)$$

$$\therefore T_0=[2N/(N+1)], t_0=[2N/(N+1)]t_0, C_0=[2/(N+1)]t_0. \quad (8)$$

实验证明,对于重叠个数  $N$  为 4, 6, 8, 10 的四种多重匹配空间滤波器,其自相关峰值

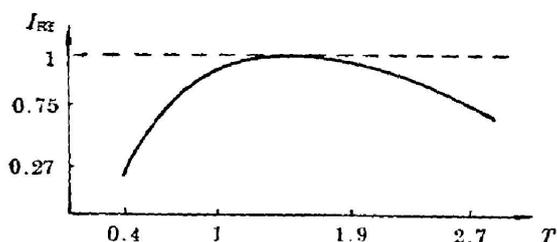


Fig. 4 Experimental curve of auto-correlation intensity vs. exposure time for SRNMF

强度随总曝光时间的变化规律基本一致。最佳曝光时间实验下限值与其估计下限值基本一致,估计上限值落在实验曲线的水平直线部分内(即小于实验上限值),随着  $N$  的增加,估计上限值逐渐逼近实验上限值。当总曝光时间大于其实验上限值时,自相关峰值强度随总曝光时间增加而下降的速度较为缓慢。对应于重叠个数  $N$  为 8 的多重匹配空间滤波器的相对自相关峰值强度 ( $I_{RR}$ )——相对总曝光时间 ( $T$ ) 的实验曲线如图 4 所示。

(2) 自相关峰值强度随  $N$  的变化。

随重叠个数  $N$  的增加,自相关峰值强度逐渐下降,对应于各个  $f^*(n)$  ( $n=1, 6, 10$ ) 其下降规律基本一致,近似满足  $2^{-N/2}$ 。实验曲线如图 5 所示。

(3) 相对判别能力  $Cd$  随重叠个数  $N$  的变化规律。

设多重匹配空间滤波器的自相关峰值强度中的最小值为  $I_{ff(\min)}$ , 互相关峰值强度中的最大值为  $I_{ff(\max)}$ 。多重匹配空间滤波器的最小相对判别能力  $Cd_{\min}=[I_{ff(\min)}/I_{ff(\max)}]$ , 用

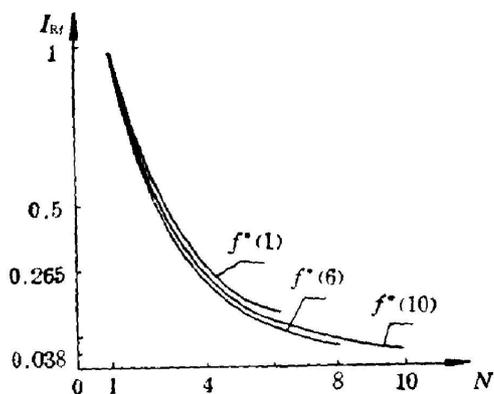


Fig. 5 Experimental curve of autocorrelation intensity vs. overlay number  $N$

强度随总曝光时间的变化规律基本一致。最佳曝光时间实验下限值与其估计下限值基本一致,估计上限值落在实验曲线的水平直线部分内(即小于实验上限值),随着  $N$  的增加,估计上限值逐渐逼近实验上限值。当总曝光时间大于其实验上限值时,自相关峰值强度随总曝光时间增加而下降的速度较为缓慢。对应于重叠个数  $N$  为

8 的多重匹配空间滤波器的相对自相关峰值强度 ( $I_{RR}$ )——相对总曝光时间 ( $T$ ) 的实验曲线如图 4 所示。

强度随总曝光时间的变化规律基本一致。最佳曝光时间实验下限值与其估计下限值基本一致,估计上限值落在实验曲线的水平直线部分内(即小于实验上限值),随着  $N$  的增加,估计上限值逐渐逼近实验上限值。当总曝光时间大于其实验上限值时,自相关峰值强度随总曝光时间增加而下降的速度较为缓慢。对应于重叠个数  $N$  为

8 的多重匹配空间滤波器的相对自相关峰值强度 ( $I_{RR}$ )——相对总曝光时间 ( $T$ ) 的实验曲线如图 4 所示。

强度随总曝光时间的变化规律基本一致。最佳曝光时间实验下限值与其估计下限值基本一致,估计上限值落在实验曲线的水平直线部分内(即小于实验上限值),随着  $N$  的增加,估计上限值逐渐逼近实验上限值。当总曝光时间大于其实验上限值时,自相关峰值强度随总曝光时间增加而下降的速度较为缓慢。对应于重叠个数  $N$  为

8 的多重匹配空间滤波器的相对自相关峰值强度 ( $I_{RR}$ )——相对总曝光时间 ( $T$ ) 的实验曲线如图 4 所示。

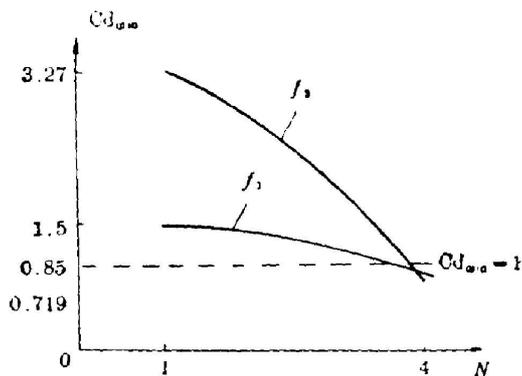


Fig. 6 Experimental curves of related discrimination competence  $Cd_{\min}$  vs. overlay number  $N$  under condition of  $f^*(1)$

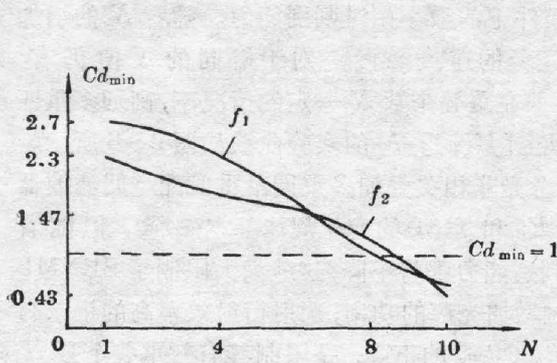


Fig. 7 Experimental curves of related discrimination competence  $Cd_{min}$  vs. overlay number  $N$  under condition of  $f^*(6)$

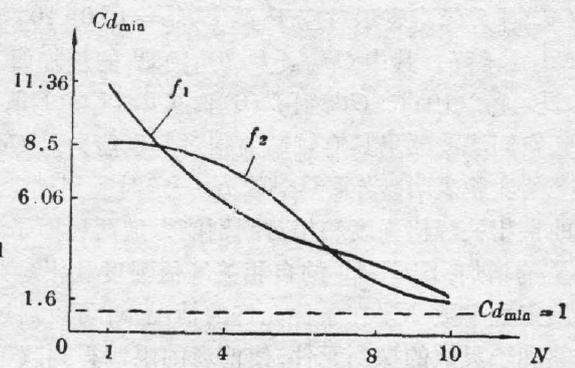
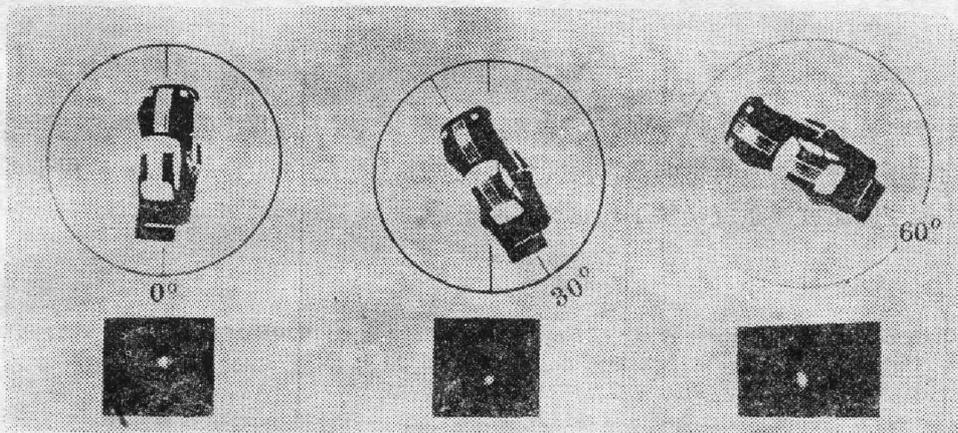


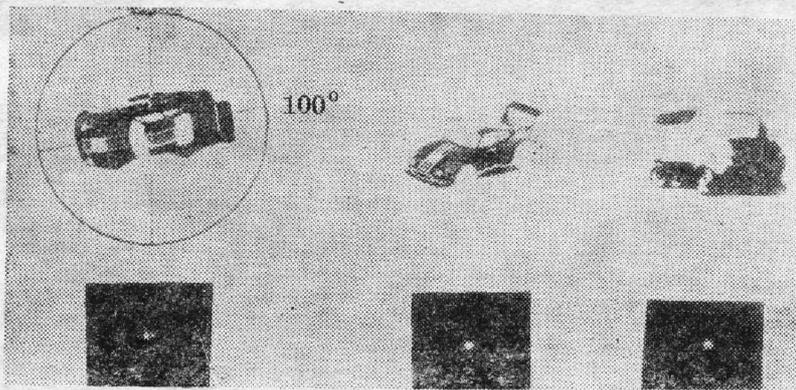
Fig. 8 Experimental curves of related discrimination competence  $Cd_{min}$  vs. overlay number  $N$  under condition of  $f^*(10)$



(a)  $f^{10} \star f(0^\circ)$

(b)  $f^{10} \star f(30^\circ)$

(c)  $f^{10} \star f(60^\circ)$



$f^{10} \star f(100^\circ)$

$f^{10} \star f_1$

$f^{10} \star f_2$

Fig. 9 Photographs of correlation output and corresponding input images for the ten-overlay matched spatial filters having autocorrelation orientations at 0°, 30°, 60°, and 100°

$Cd_{\min}[f^*(n)]$ 表示对应于 $f^*(n)$ ( $n=1, 6, 10$ )条件下的最小相对判别能力。随着 $N$ 的增加 $Cd_{\min}$ 下降,其中 $Cd_{\min}[f^*(6)]$ 随 $N$ 的增加而下降的速度较慢。对于相同的 $N$ 值仍有: $Cd_{\min}[f^*(10)] > Cd_{\min}[f^*(6)] > Cd_{\min}[f^*(1)]$ ,即在重叠个数 $N$ 一定的情况下,高通多重匹配空间滤波器仍具有较高的相对判别能力。 $Cd_{\min}[f^*(n)]-N$ 的实验曲线如图6~8所示。

实验表明,当重叠个数 $N$ 一定时,相同参考光非相关叠加多重同单重匹配空间滤波器的自相关峰值强度和相对判别能力随两权因子 $E_B$ 和 $f^*(n)$ 的变化规律基本一致。但随着 $N$ 的增加,SRNMF的自相关峰值强度和相对判别能力都将下降,这就大大限制了SRNMF的重叠个数 $N$ 。在条件允许的情况下,可以通过增加光源的功率,选用衍射效率高的记录材料和较灵敏的探测元件,使前者的限制得到改善, $Cd_{\min}$ 的下降,是限制其有效重叠个数 $N$ 。(对应于 $Cd_{\min} > 1$ ,  $N$ 的最大值)的关键因素,而 $f^*(n)$ 的选取直接决定着 $Cd_{\min}$ 。由此可知, $f^*(n)$ 的作用在SRNMF中尤为重要。图9为十重匹配空间滤波器的相关输出图像及所对应的输入图像。

## 五、结 束 语

本文重点研究了 $E_B$ 和 $f^*(n)$ 在多重匹配空间滤波器制备过程中的选取对于其自相关峰值强度和相对判别能力的影响及作用,为将此种多重匹配空间滤波器成功地用于多通道及综合匹配空间滤波器系统提供了理论和实验依据。

## 参 考 文 献

- [1] B. C. Guenther, C. R. Christen *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1979, **QE-15**, No. 12 (Dec), 1848.
- [2] K. G. Leib, R. A. Bondurant *et al.*; *Opt. Engng*, 1980, **19**, No. 3 (May/June), 414.
- [3] H. J. Caulfield, R. Haines, *Proc. SPIE*, Vol. 215, 1980, 185.
- [4] A. Grumet; *US Patent*, 1972, Dec, 3779492.
- [5] D. Casasent, A. Furman; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 6 (June), 1662.
- [6] D. Casasent, A. Furman; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 6 (June), 1652.
- [7] R. J. Collieg; *«Optical Holography»*, (Academic Press, 1971, N. Y.).

## Study of same-reference-beam noncoherent multiple matched spacial filters

HE GANG AND ZHANG YIMO

(Department of Precision Instruments Engineering, Tianjing University)

(Received 18 November 1985; revised 7 January 1986)

### Abstract

The method to controll autocorrelation intensity and related discrimination competence for a matched spacial filter by using two weights,  $E_B$  (bias exposure) and  $f^*(n)$  (special frequency band), is discussed. Furthermore, application of this method is proposed for the synthesis of same-reference-beam noncoherent multiple matched spacial filters (SRNMF). Effects of the two weights on the autocorrelation intensity ( $I_{Rf}$ ) and related discrimination competence ( $Od$ ) for the SRNMF are analyzed in detail. A formula is derived for estimating the optimized range of the exposure time ( $T$ ). Experimental results are used to construct a curve of  $I_{Rf}$  vs.  $T$ , as well as curves for various  $f^*(n)$  to show the relationships between  $I_{Rf}$  and  $N$  and between  $Od$  and  $N$ . Where  $N$  is the overlay number of SRNMF.