

基于二元纯位相匹配滤波的光电混合模式识别

王培峰 陈高峰 华铁均 王汝笠

(中国科学院上海技术物理研究所光电工程研究中心, 上海, 200083)

TN 713.6

摘要: 提出一种优化二元纯位相滤波器, 抑制低频噪声, 提高自相关峰信噪比的新方法, 并用于基于电寻址铁电体液晶空间光调制器的匹配滤波可编程光学相关器, 实现光电混合自动目标识别。

关键词: 二元纯位相滤波器, 空间光调制器, 光学相关器。

光电混合模式识别

THE OPTO-ELECTRONIC PATTERN RECOGNITION BASED ON BINARY PHASE-ONLY MATCHED FILTER

WANG Pei-Feng CHEN Gao-Feng HUA Tie-Jun WANG Ru-Li

(Opto-Electronic Engineering Research Center, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract A new method to optimize the BPOFs was proposed which can reduce the low frequency noise in output plane and improve the SNR of self-correlation. By applying it to the programmable matched filtering optical correlator based on electronically addressing-ferroelectric liquid crystal-spatial light modulator, the opto-electronic pattern recognition was realized.

Key words binary phase-only filter, spatial light modulator, optical correlator.

引言

以电子计算机为代表的微电子技术广泛应用于诸多领域并多取得了巨大的成功, 但也存在着明显的不足, 在承担某些并行性、实时性要求较高的任务时往往力不从心. 光学信息处理技术以其并行、大容量、高速度的特性而日益受到人们的关注. 许多处理和运算所用的光学技术更为有效, 例如二维的傅里叶变换、卷积、相关等. 把光学的高效运算功能与电子学的灵活性结合起来, 构成光电混合信息处理系统, 在信息处理领域必将有良好的应用前景. 光学相关器是光学信息处理的一种重要结构. 本文介绍了一种优化设计二元纯位相滤波器方法, 提高了相关输出的信噪比和峰值旁瓣比, 并将其应用在基于电寻址铁电体液晶空间光调制器的可编程匹配滤波器光学相关器上, 取得预期效果, 实现了目标的自动识别。

1 二元纯位相滤波器的优化设计

通常二元纯位相滤波器的生成过程如下: 设已知模式为 $f(x, y)$, 对其作傅里叶变换得频谱函数为

$$F(u, v) = A(u, v) \exp[j\Phi(u, v)], \quad (1)$$

由于位相部分包含的特征信息较振幅部分重要, 故将频谱的振幅信息 $A(u, v)$ 忽略, 只保留位相信息 $\Phi(u, v)$ 得

$$F_p(u, v) = \exp[j\Phi(u, v)], \quad (2)$$

沿复平面 β 方向将位相角 $\Phi(u, v)$ 二值化为 $0, \pi$, 即得二元纯位相滤波器函数

$$BPOF_{\beta}(u, v) = \begin{cases} 1 \cos[\Phi(u, v) - \beta] \geq 0, \\ -1 \cos[\Phi(u, v) - \beta] < 0; \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中 β 一般选择 $0, \pi/4, \pi/2$, 分别对应余弦、Hartley 和正弦三种常见的二元纯位相滤波器^[1]; 亦可根据 $f(x, y)$ 来确定一最佳的角度^[2].

实际应用中经常伴有一定的背景噪音, 它是低频信号, 若在匹配滤波后再通过一高通滤波器对波前进行直流阻塞处理, 可有效地降低背景噪音, 提高信噪比. 但是要将此高通滤波器置于实际的光路中是不太现实的, 因为我们所采用的空间光调制器(SLM)的像素间距仅为 $15\mu\text{m}$, 只能寄希望于将两个滤波器合二为一. 由于 SLM 上的滤波器对光的调制是位相型的, 对应于振幅型的高通滤波器, 我们构造一位相型的低频反相滤波器

$$DC(u, v) = \begin{cases} e^{i\pi} = 1, (u, v) \in \bar{S}, \\ e^{i0} = -1, (u, v) \in S; \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中 S 为低频反相区, 在离散的像素型调制器上体现为中心附近 $n \times n$ 像素的小面元, \bar{S} 为滤波器上除去 S 的部分(如图 1(a)所示, 其中 N 为滤波器边长). 将其与原有的二元纯位相滤波器融合成一个优化的二元纯位相滤波器

$$BPOF_0(u, v) = BPOF_1(u, v)DC(u, v), \quad (5)$$

低频区反相前/后的对比图像如图 1(b)和图 1(c)所示.

2 基于电寻址铁电体液晶空间光调制器的可编程匹配滤波光学相关器

可编程匹配滤波器光学相关器实验装置的结构如图 2 所示. 其中的关键器件是两个电寻址铁电体液晶空间光调制器(EA-FLC-SLM), 分别用于输入待识别图像(SLM_1)和滤波器(SLM_2). 我们采用的是 Displaytech, Inc. SLM-256 二值位相型铁电体液晶空

间光调制器. 工作时每个像素的对应电极产生正负 5V 的电压, 在电场的作用下该处液晶分子的排列方向发生偏转, 电压的正负导致了所在位置液晶分子排列方向指向两个不同的开关状态, 进而使得偏振方向相同的入射光经反射后偏振方向发生相反的偏转, 与适当的起偏和检偏的光学器件组合起来, 实现对光波的二值调制(包括位相型与振幅型)^[3]. 图 2 中的偏振分光棱镜(BS_1, BS_2)与半波片用来完成上述的起偏、检偏功能^[4]. 电场方向的变化由计算机通过驱动电路实时地加以控制, 故而称为电寻址, SLM 为 256×256 像素, 像素间距 $15\mu\text{m}$, 填充率为 87%, 对比度为 100:1, 最高帧频可达 2500Hz. 我们选用的激光波长约为 670nm, 傅里叶变换透镜 L_1, L_2 的焦距约为 86mm. 匹配滤波相关器需要预先制成滤波器集, 将已知模式输入计算机, 按照上述方法制成滤波器备用. 待识别图像输入计算机后, 处理成 SLM 驱动电路所需的格式.

实际识别过程如下所述: 待识别图像经驱动电路送至参考空间光调制器, 与此同时将一滤波器送至滤波器空间光调制器. 光波前进方向与顺序如图 2 中箭头所示, 激光经扩束后得平行光 1, 经过偏振分光棱镜起偏得垂直方向线偏光 2, 经调制后的反射光再经偏振分光棱镜检偏而成为携带有待识图像信息的水平方向线偏光 3, 经傅里叶变换透镜变换后得频谱 4, 与滤波器光调制器上的信息相乘得滤波后频谱 5, 再经傅里叶变换透镜作反变换, 最终在 CCD 照相机的探测器阵列上获得待识图像与已知模式滤波器相关运算的结果. 该结果可在监视器上直接观察, 亦可由计算机分析处理, 对目标进行自动判别.

由于光调制器是电寻址的, 在识别过程中可以实时地改变其中的内容, 所以我们可以针对不同的目标预先制作大量的滤波器存储起来, 在实际运用时动态地切换滤波器, 完成不同的相关运算, 以求获得最佳的

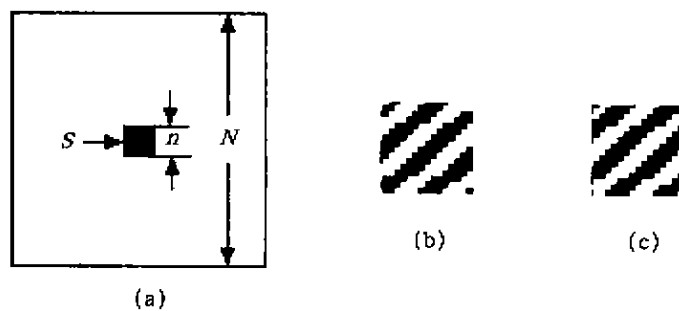


图 1 优化的二元纯位相滤波器
(a) 低频区 S (b) $BPOF_1$ 低频区 S (放大) (c) $BPOF_0$ 低频区 S (放大)

Fig. 1 Optimal BPOF
(a) low frequency area S (b) S of $BPOF_1$ (zoom in) (c) S of $BPOF_0$ (zoom in)

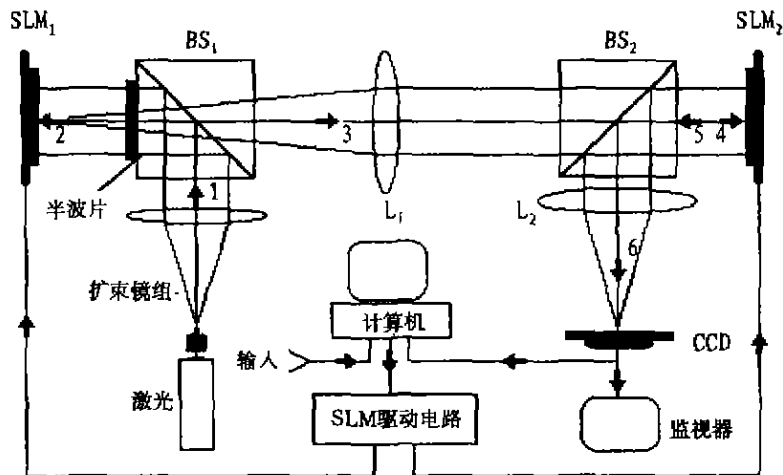


图 2 可编程光学相关器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of programmable optical correlator

匹配结果. 当感兴趣的目标发生变化时, 可随时生成新的滤波器更新存储的滤波器数据库, 因此系统具有很强的灵活性和实用性.

3 计算机模拟和光学实验结果与分析

我们以飞行目标的识别为例, 在上述装置上进行光学实验, 并与计算机模拟的结果相比较. 图 3 为部分有代表性的结果. 图 3(a) 为输入的待识别图像, 图 3(b) 为预先生成的与之匹配的二元纯位相滤波器. 将图 3(a) 和图 3(b) 分别送至图 2 所示的 SLM_1 和 SLM_2 , 获得的相关输出结果为图 3(c), 其三维投影如图 3(d) 所示. 从图 3(d) 中可见, 在左上方有一尖锐的自相关峰, 而在右下方有一相对自相关峰弥散得多的卷积成分. 图 3(e) 为与上述实验结果相应的计算机模拟结果, 二者的自相关峰的位置基本吻合, 卷积噪声的分布特征是一致的; 但实验结果带有因暗电流等导致的直流成分, 且噪声比理想情况下的模拟结果要更复杂一些, 相比之下模拟结果的自相关峰尖锐得多. 自相关峰相对中心的偏离, 反映了目标在待识别图像中所处的位置, 即在目标识别的同时还可以获得一定的目标方位信息.

相关峰非随机信噪比定义为

$$SNR = \frac{|g(x_0, y_0)|}{\left[\frac{1}{S'} \iint |g(x', y')|^2 dx' dy' \right]^{1/2}} \quad (6)$$

式(6)中 $g(x', y')$ 为相关输出函数, $g(x_0, y_0)$ 为相关峰值, S' 是相关面上扣除相关峰的部分. SNR 是相关检测的重要参数, 较高的自相关峰信噪比, 有利于增强光

学相关模式识别时的抗干扰能力, 提高识别率, 减少虚警, 因此有着重要的意义.

为检验低频反相处理的效果, 我们以图 3(f) 所示飞机目标识别为例, 模拟自相关峰信噪比随 n 的变化关系 (n 如图 1(a) 所示), 所得结果如图 3(g) 所示. 图 3(g) 中离散的点为计算机模拟的结果, 相应的曲线为三次拟合曲线, 横坐标为 n , 纵坐标为 $\Delta SNR/SNR_0$. 其中, SNR_0 为采用传统 BPOF 进行匹配滤波的自相关峰信噪比, ΔSNR 为采用低频反相处理后 SNR 相对 SNR_0 的变化量. 图 3(g) 中的曲线表明, 随着 n 的增加, $\Delta SNR/SNR_0$ (%) 先从零增大至某一极大值, 而后逐渐减小, 直至小于等于零 (即 $SNR_n \leq SNR_0$). $\Delta SNR/SNR_0$ (%) 的峰值一般位于 $n \in [6, 10]$ 区间, SNR 的提高可达 30% 以上. 在计算机模拟的基础上, 选择 F5 飞机的图像进行光学实验, 以检验上述结论. 结果如图 3(h) 所示. 对比模拟与实验的结果, 可以看出, 它们的变化趋势基本吻合, 都是先上升至一极大值, 然后逐渐回落, 直至小于零. 但是实验结果的峰值较小, 在 10% 左右, 亦即只相当于计算机模拟结果的 1/3. 考虑到光学实验不可能达到数学模拟的理想状态, 不可避免地要引入额外的噪音, 这一结果是可以接受的. 此外, 实验曲线的峰值结果比模拟曲线稍小, 即实际的最佳反相截止频率略小于模拟值.

4 结语

本文介绍了用融合直流反相滤波器来优化二元纯位相滤波器, 提高信噪比的方法, 并通过计算机模拟和光学实验取得了预期的结果. 该实验系统具有信噪比

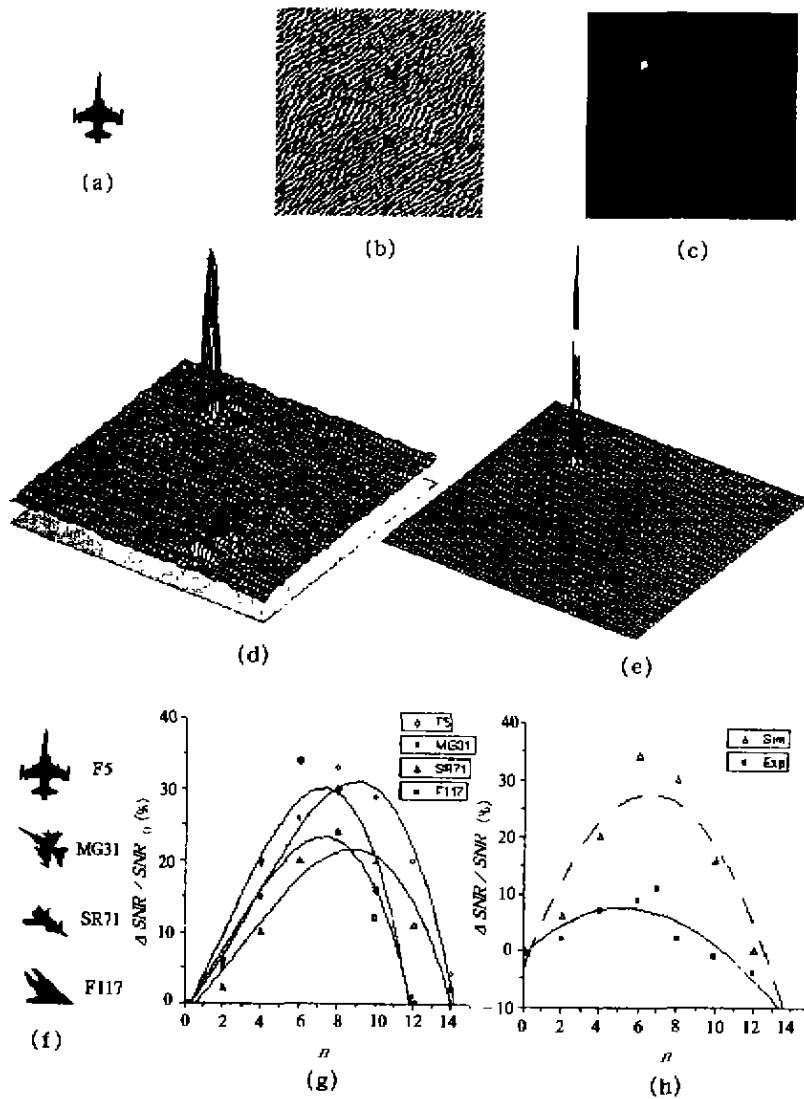


图3 飞行目标识别的实验与模拟结果

(a) 输入图像, (b) 滤波器, (c) 光学相关输出, (d) (c) 的三维图像, (e) (d) 的模拟结果

(f) 待识别目标, (g) SNR 随 n 变化(模拟), (h) 模拟和实验的对比

Fig. 3 The aircraft target recognition results of experiment and simulation

(a) input image, (b) filter, (c) output, (d) 3D plot of (c), (e) computer simulation result of (d)

(f) target to be recognized, (g) SNR performance as a function of n (simulation),

(h) comparison of experiment with simulation

高、可灵活编程的特点,具有良好的适应性,但整个装置的控制中枢—微机在完成其控制与处理任务的同时,也制约了光学运算模块充分发挥其高速的特性,下一步工作的主要任务是采用高速数字处理器(DSP)取代微机完成控制与处理功能,以期更好地发挥光学模块的优势,实现光电混合实时目标自动识别。

REFERENCES

[1] Flannery David L, Loomis John S, Milkovich Mary E. Design elements of binary phase-only correlation filters.

Appl. Opt., 1988, 27(20):4231~4235

[2] Michael W Farn, Joseph W Goodman. Optimal binary phase-only matched filters. *Appl. Opt.*, 1988, 27(21):4431~4437

[3] De Bougrenet de la Tocnaye J L, Dupont L. Complex amplitude modulation by use of liquidcrystal spatial light modulators. *Appl. Opt.*, 1997, 36(8):1730~1741

[4] Serati T K, Ewing R A, Serati K M, Johnson Simon D M. Programmable 128 × 128 ferroelectric liquid crystal spatial light modulator compact correlator. *SPIE*, 1993, 1959:55~68