

纯相位二值化匹配滤波器的优化设计*

李豫华 回 红 刘锡久 刘文耀 张以谟 董世洪

(天津大学精仪学院 天津 300072)

提要 通过采用神经网络中的 Clipping 方法和 Monte Carlo 修改学习算法,对用于光学模式识别的纯相位二值化匹配滤波器进行了优化设计。计算机模拟结果表明,和传统的纯相位匹配滤波器的相关输出结果相比,其识别输出的信噪比和信号相关峰值得到了明显的提高,从而为今后的光学实现奠定了良好的基础。

关键词 模式识别,纯相位二值化匹配滤波器,优化设计,信噪比

1 引 言

光学相关识别技术是近年来光学图像识别中比较活跃的一个研究领域,这主要是因为相关识别方法可以将光学理论和计算机科学技术结合起来,形成新的交叉学科,代表了一种发展趋势。光学相关识别可以大致分为两个大类,即匹配滤波相关与联合变换相关。匹配滤波相关^[1,2]的主要特征是在第一级傅里叶频谱面上放置一个匹配滤波器,输入目标图像的傅里叶频谱经匹配滤波器滤波后,再进行第二次傅里叶变换(事实上是反傅里叶变换),从而得到其相关的输出结果。但它在具体的光学实现时却遇到了许多困难,如光学 4f 系统中的光强衍射效率、匹配模板对准的重复性和实时图像处理等问题。为解决这些问题,同时针对在设计光学匹配滤波函数中起决定性作用是它的相位部分这一特点,提出了纯相位匹配滤波的理论等。进一步考虑到实时光学器件本身的限制(液晶光阀 LCLV 或液晶显示器 LCD),又提出二值化纯相位匹配滤波的方法。而最初设计二值化匹配滤波函数时只是简单地利用截断法来得到的,即在已得到纯相位滤波函数的基础上,选择一适当的相位截断阈值,使之成为二值化纯相位匹配滤波函数^[3]。但从信息论的观点来看,这种方法所得的函数因为保留了原函数的部分特征,因此在处理过程中会得到一个比较相似的输出结果,但由于它使原函数的其他一些重要信息被丢失,因此,它作为系统滤波函数,输出结果将削弱许多有用的结果。我们采用四类飞行目标作为输入图像如图 1,而选用其中一类目标设计滤波函数如图 2。而图 3 和图 4 则分别表示滤波器函数作为纯相位滤波函数和取阈法所得二值化纯相位滤波函数的系统的输出结果。不难看出,这种简单的取阈处理方法使得系统输出的相关峰值大大下降,而其信噪比也有所降低。因此,这对于整个系统的识别能力和容错性将有较大的影响。因此,二值化纯相位匹配滤波函数的优化设计成为我们解决问题的关键。过去有人利用神经网络中的模拟退火算法设计二值化匹配滤波

* 国家 863 高技术研究项目和天津市自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1998-04-13; 收到修改稿日期: 1998-06-08

函数,但设计过程比较复杂,并有时在温度趋于零时出现振荡不收敛的情况,从而使问题复杂化^[4,5]。

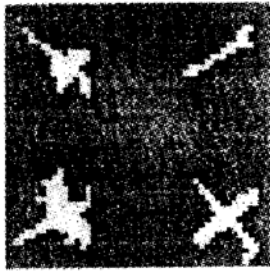


图1 输入的四类飞行目标

Fig. 1 The input four kinds of aircrafts

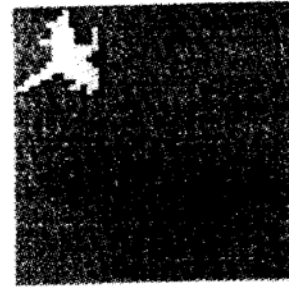


图2 输入检验目标

Fig. 2 The input test aircraft

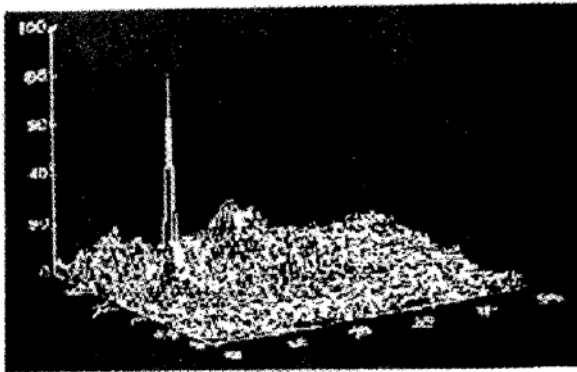


图3 纯相位滤波函数作为滤波器函数时系统输出结果

Fig. 3 The system output results with the phase-only filter as the system filtering function

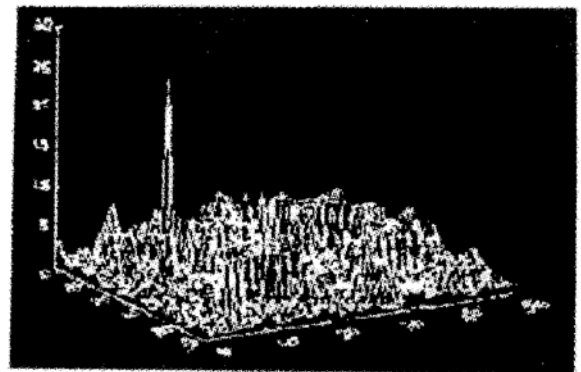


图4 取阈法所得的二值化纯相位滤波函数作为滤波器函数时系统输出结果

Fig. 4 The system output results with the thresholding binary phase-only filter as the system filtering function

本文则在截断法得到的二值化纯相位匹配滤波函数的基础上,利用神经网络中的 Monto Carlo 优化学习算法,并采用将输出结果中的相关峰值和信噪比作为判断参数,对图1和图2作为输入图像和检验图像得到的二值化纯相位匹配滤波函数进行了优化计算,得到了较满意的结果。并且算法简单,易于收敛,也可应用于其他二值化滤波函数的优化设计中,从而降低了系统对实时器件性能要求的标准,为以后光学系统的实现奠定了良好的基础。

2 优化学习算法和优化过程

2.1 截断法二值化纯相位匹配滤波函数的设计

用于光学模式识别的光学 $4f$ 系统如图5所示。由信息光学理论可以得到,当由输入面 P_1 输入图像为 $f(x, y)$ 的傅里叶变换为 $F(u, v)$,而滤波器平面 P_2 的分布为 $G(u, v)$,其中,当

$$G(u, v) = F^*(u, v) \quad (1)$$

时,则在系统的输出面 P_3 上将形成一个自相关亮点(相关峰)。从这里不难看出,和振幅部分相比,其滤波函数中相位的调制起主要作用。同时,为提高系统光强的衍射效率,可由公式(1)得

到纯相位匹配滤波函数

$$G'(u, v) = F^*(u, v) / |F^*(u, v)| \quad (2)$$

考虑到光学器件的限制, 可以采用阈值截断 (Clipping) 运算得到二值化纯相位匹配滤波函数

$$\text{Img}[G'(u, v)] = \begin{cases} 1 & \text{当 } \text{Img}[G'(u, v)] \geq 0 \\ 0 & \text{当 } \text{Img}[G'(u, v)] < 0 \end{cases} \quad (3)$$

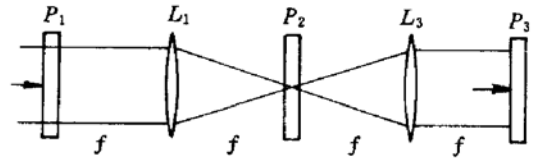


图 5 光学 4f 系统结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the 4f system

另外, 因为此滤波函数是二值化相位分布, 所以可以将其转换输入为 0 或 1 的振幅分布图像。可以得到

$$H(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{当 } \text{Img}[G''(u, v)] = 1 \\ 0 & \text{当 } \text{Img}[G''(u, v)] = 0 \end{cases} \quad (4)$$

将以此为基础进行优化设计, 从而得到二值化匹配滤波函数。

2.2 二值化纯相位匹配滤波函数的优化学习算法

利用公式(4)得到的最初二值化匹配滤波函数会使系统的相关输出峰值及信噪比变坏。为保证系统的识别精度, 采用修改的 Monte Carlo 算法^[6]对所得到的二值化滤波函数作进一步的调整, 即随机改变滤波函数在其各点的值, 由于其分布为二值化(0, 1), 只可以控制其值由 0 变为 1 或由 1 变为 0, 通过系统的判断参数决定其匹配函数在各点的具体取值。因此优化方法如下:

(a) 采用由公式(4)得到的二值化匹配滤波函数, 对输入图像进行频谱面的滤波处理, 并相应对其输出的相关峰值和信噪比进行计算, 结果可作为优化前的初值, 并由公式(5)计算出系统优化判断参数 $K(0)$

$$K(0) = \sqrt{P_{\max}^2(0) + \text{SNR}^2(0)} \quad (5)$$

其中, $P_{\max}(0)$ 为优化前系统相关输出的最大峰值, $\text{SNR}(0)$ 为优化前相关信噪比, 它被定义为 $P_{\max}(0)$ 与其输出结果的均方根 σ 之比

$$\text{SNR}(0) = \frac{P_{\max}(0)}{\sigma} \quad (6)$$

显然, 优化的目标是尽可能地增大判断参数 $K(t)$ 的数值。

(b) 首先选择二值化匹配滤波函数中任一点 (u', v') , 使得 $H(u', v')$ 进行 0 与 1 的置换, 即

$$H(u', v') = \begin{cases} 1 & \text{如果 } H(u', v') = 0 \\ 0 & \text{如果 } H(u', v') = 1 \end{cases} \quad (7)$$

并且要求, 每次只能置换一个点。这样将得到一个新的二值化匹配滤波函数。

(c) 重复(a), 将得到系统新的相关峰值和信噪比, 并可计算出其优化判断参数 $K(u', v', t)$ 。计算完成后, 恢复其置换点 (u', v') 原始值。

(d) 重复步骤(a)到(c), 直到遍历二值化匹配滤波函数的所有点后, 将选择使系统 $K(u', v', t)$ 增加的点 (u', v') , 置换其对应的系统二值化匹配滤波函数的值, 并令 $K(t) = \max\{K(u', v', t)\}$, 则完成了一个系统的循环。这样做的目的是为了加快系统的优化收敛速度, 减少计算时间。

(e) 然后重复步骤(a)到(d), 直到 $K(t)$ 不再增加为止。退出循环, 系统的优化结果。这样就

会得到优化的系统二值化匹配滤波函数。在这里应该强调,以前优化循环中被置换值的点,在以后的循环中仍有可能被再次置换。因为这仅取决于系统优化判断参数 $K(t)$ 的变化。

从上述的优化过程可以看出,系统优化不存在振荡不能收敛的可能性。并且,系统的优化过程是简单可靠的。这种优化方法同样可应用于其他二值化函数的优化处理中。

3 计算机模拟结果

采用上述的优化算法,对图 1 所示的四类飞行目标(轰炸机、战斗机、客机与火箭)进行了光学相关识别的计算机模拟计算。其中每个模式具有 25×25 个像元,因此,整个图像的大小为 50×50 像元。每个像元取值为 0 或 +1。选用轰炸机作为检验图像,大小也为 50×50 像元。按照以上所述的优化算法得到的二值化纯相位匹配滤波函数作为滤波器函数时所对应的系统相关输出结果如图 6 所示。和图 3,图 4 结果比较不难看出,优化后的匹配滤波函数所对应的输出相关结果明显得到改善。如表 1 所示。

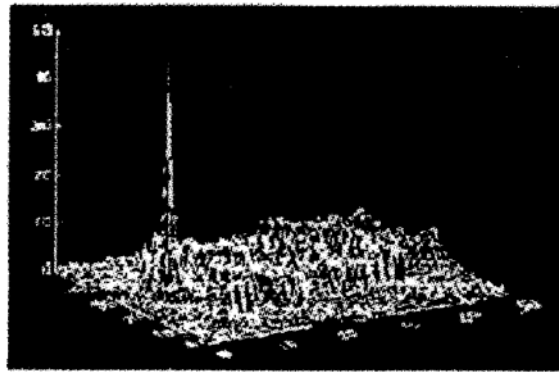


图 6 优化后所得的二值化纯相位滤波函数作为滤波器函数时系统输出结果

Fig. 6 The system output results, with the optimized binary phase-only filter as the system filtering

表 1 计算机模拟结果对比表

Table 1 The results of the computer simulation in different models

	Continuous model	Clipping binary model	Optimal binary model
Correlation peak	84.02	27.15	46.92
Average noise	22.14	8.48	7.85
Signal-to-noise ratio (SNR)	3.795	3.2015	5.9792

4 结 论

在截断法得到的二值化纯相位匹配滤波函数的基础上,利用神经网络中的 Monto Carlo 优化学习算法,并采用将输出结果中的相关峰值和信噪比作为判断参数,对输入图像和检验图像得到的二值化纯相位匹配滤波函数进行了优化计算,得到了较满意的结果。并且算法简单,易于收敛,也可应用于其他二值化滤波函数的优化设计中,从而降低了系统对实时器件性能要求

的标准,为以后光学系统的实现奠定了良好的基础。我们将在设计的超短 $4f$ 光学系统中^[7]予以实现。

参 考 文 献

- 1 The teaching and research group of Tsinghua University. The Fundamentals of Optical Information. Beijing: The Mechanic Industry Press, 1985. 430 (in Chinese)
- 2 B. V. K. Vijaya Kumar. Tutorial survey of composite filter designs for optical correlators. *Appl. Opt.*, 1992, 31(23):4773~4801
- 3 D. L. Flannery, A. M. Biernacki, J. S. Loonois *et al.*. Real-time coherent correlator using binary magneto-optic spatial light modulators at input and Fourier planes. *Appl. Opt.*, 1986, 25(4):466
- 4 Mingzhe Lu, Shizhou Yin, Chulung Chen *et al.*. Optimum synthesis of a bipolar composite reference function with a simulated annealing algorithm. *Opt. Eng.*, 1996, 35(9):2710~2720
- 5 Danny Roberge, Yunlong Sheng. Optical real-time correlator for implementation of phase-only composite filters. *Opt. Eng.*, 1996, 35(9):2541~2547
- 6 Li Yuhua, Sun Ying, Shen Jinyuan *et al.*. Study on binary interconnection weight of a cascaded neural network for pattern recognition system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, 16(10):1497~1500 (in Chinese)
- 7 Li Yuhua, Liu Wenyao, Zhang Yimo. Fourier transform properties of multi-lenses and improvement of the compact optical system. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, A25(10):909~913 (in Chinese)

Optimized Design of Binary Phase-only Matched Filters and Their Optical Implementation

Li Yuhua Hui Hong Liu Xijiu Liu Wenyao Zhang Yimo Dong Shihong

(The Faculty of Precision Instruments and Photoelectrons Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract An optimized design of binary phase-only matched filters used in optical pattern recognition by means of Clipping and Monte Carlo learning arithmetic in the neural network is introduced. The computer simulation result indicates that compared with the correlation output of the traditional phase-only matched filter, their signal-to-noise ratio (SNR) for recognizing output and the signal correlation peak are improved obviously. Thereby it may provide a favorable foundation for the optical implementation in the future.

Key words pattern recognition, phase-only binary matched filter, optimized design, signal-to-noise ratio