

基于小波变换的 OTSDF 滤波器优化设计

喻 珺^{1,2}, 徐 平^{1,2}, 杨 拓^{1,2}, 李雄超^{1,2}, 黄海漩^{1,2*}, 程冠晓^{1,2}

¹深圳大学电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060;

²深圳大学微纳光电子技术研究所, 广东 深圳 518060

摘要 提出基于小波变换的优化折中综合鉴别函数(OTSDF)滤波器(W_OTSDF)算法, 对其进行优化设计, 利用小波变换的多尺度与带通滤波特性, 提高平面集成 $2f$ 光学相关器的相关输出峰值强度和信噪比(SNR)。利用 Matlab 搭建系统的仿真模型, 获取 W_OTSDF 滤波器的优化算法。仿真结果表明, 在平面集成 $2f$ 系统中对旋转、缩放以及旋转缩放同时存在的畸变目标进行识别时, 优化设计的 W_OTSDF 滤波器较 OTSDF 滤波器在峰值相关能量比(PCE)、峰值旁瓣比(PSR)、SNR 等整体性能指标方面均有较大提高。理论分析与仿真结果均表明 W_OTSDF 滤波器较 OTSDF 滤波器具有更好的识别效果。

关键词 光学器件; 匹配滤波器; 小波变换; 光学相关器; 畸变不变识别

中图分类号 TN201 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1123001

Optimization Design of OTSDF Filter Based on Wavelet Transform

Yu Jun^{1,2}, Xu Ping^{1,2}, Yang Tuo^{1,2}, Li Xiongchao^{1,2}, Huang Haixuan^{1,2}, Cheng Guanxiao^{1,2}

¹ College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

² Institute of Micro-Nano Photoelectron Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract In this paper, the algorithm of the optimal trade-off synthetic discrimination function (OTSDF) filter based on wavelet transform(W_OTSDF) is proposed. And the optimization design is carried out. The advantages of multi-scale analysis and the band-pass filtering features of wavelet transform are taken to improve the correlation output peak intensity and signal-to-noise ratio (SNR) in planar integrated $2f$ optical correlator. Using Matlab to build the simulation model of the system and get the optimization algorithm of W_OTSDF filter. The simulation results show that in planar integrated $2f$ system, when the distortion target with rotation, scaling or both of them are recognized, the performance indexes of peak to correlation energy (PCE), peak side-lobe ratio (PSR), and SNR of optimized W_OTSDF filter are all improved greatly, which is compared with OTSDF filter. The theoretical analysis and simulation results all demonstrate that the W_OTSDF filter has better recognition effect than OTSDF filter.

Key words optical devices; matched filter; wavelet transform; optical correlator; distortion invariant recognition

OCIS codes 230.7408; 100.3008; 070.4550; 100.5760

1 引 言

匹配滤波器的设计是光学相关识别系统的关键技术之一。学者们已经提出了多种匹配滤波器的设计算法, 诸如圆谐变换、梅林变换、小波变换、综合鉴别函数(SDF)等, 以实现目标的畸变不变识别。综合鉴别函数滤波器因其算法简单、容易实现、可以实现小范围的畸变不变目标识别的优势而得到较快发展, 并出现了如最小方差综合鉴别函数(MVSDF)滤波器、最小平均相关能量(MACE)滤波器、最大平均相关高度(MACH)

收稿日期: 2017-05-10; **收到修改稿日期:** 2017-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(61275167)、深圳市基础研究计划(JCYJ20140418095735591, JCYJ20130329103020637, JC200903120023A)

作者简介: 喻珺(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事微纳光电子方面的研究。E-mail: 979086735@qq.com

导师简介: 徐平(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事微光学与器件、信息光学方面的研究。

E-mail: xuping@szu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: fishon@163.com

滤波器、优化折中综合鉴别函数(OTSDF)滤波器等诸多改进的滤波算法^[1-8]。其中的 OTSDF^[7-8]滤波器因其相关输出峰尖锐、抗噪能力强、畸变容限大的优点,成为目前主流的滤波器。

然而,OTSDF 滤波器的识别能力与畸变容限仍然存在一定的局限性:扩大滤波器识别的畸变容限需要待识别目标的大量畸变特征组成训练图像系列,但这将导致图像的特征趋向于低频,由此降低匹配滤波器的识别能力。因此,必须对匹配滤波算法进行进一步优化以解决该问题。

为了提高匹配滤波器的识别能力,本文提出基于小波变换的 OTSDF(W_OTSDf)滤波器,对其进行优化设计,利用小波变换的多尺度与带通滤波特性,有效地提高系统的识别能力。

2 W_OTSDf 滤波器优化设计原理与方法

光学相关器及微光学器件在集成化结构和匹配滤波器算法方面都得到了较大的发展^[9-13],由传统的 $4f$ 光学相关器演变成平面集成 $2f$ 结构^[14-16]。平面集成 $2f$ 光学相关器将两个透镜分别与输入面和频谱面紧密贴合,在压缩系统体积的同时,降低系统的识别率。目前,OTSDF 滤波器因具有良好的识别性能被广泛应用于匹配滤波器的设计中,但也存在上述识别能力与畸变容限局限性的问题。因此,本研究结合小波变换对 OTSDF 滤波器提出一种优化设计方案,以提高匹配滤波器的识别效果。

2.1 OTSDF 匹配滤波器最佳权重系数的确定

根据匹配滤波原理,输入信号频谱的复共轭即为匹配滤波器。基于该理论,文献^[17]中提出的 OTSDF 滤波器的表达式为

$$h = \frac{m_x}{2(\alpha P_n + \beta D_x + \gamma S_x)}, \quad (1)$$

式中 α, β, γ 为权重系数,满足 $\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = k^2, k > 0$; h 是滤波器函数; P_n, D_x, S_x 和 m_x 分别为输入噪声平均功率谱矩阵、训练样本平均功率谱矩阵、训练样本协方差矩阵和训练样本矢量平均值。增大 α 可以提高滤波器的抑噪能力;增大 β 可以使输出相关峰变得尖锐,但滤波器的抗畸变能力变差;增大 γ 可以提高滤波器的畸变容限,但会使得输出相关峰的底部变宽。本研究的重点是利用优化后的 OTSDF 滤波器实现光学相关器的畸变不变识别,因此在训练样本时排除噪声干扰,兼顾相关输出特性中的峰值强度、相关峰形状和畸变容限的特点。为了使 OTSDF 滤波器的识别性能最优,在仿真系统中经反复调试后确定 OTSDF 滤波器的权重系数为 $\alpha=0, \beta=0.3, \gamma=1$ 。

2.2 W_OTSDf 滤波器理论基础

二维待识别目标函数 $f(x, y)$ 的连续小波变换定义为

$$w_f(a) = \frac{1}{a} \iint_{-\infty}^{\infty} t^* \left(\frac{x}{a}, \frac{y}{a} \right) f(x, y) dx dy = t_a(x, y) \otimes f(x, y), \quad (2)$$

即为 $t_a(x, y)$ 与 $f(x, y)$ 的相关运算, a 是尺度系数。小波函数 $t_a(x, y)$ 是局部化的函数,输入图像与小波函数进行相关运算,其作用是提取输入图像的局部特征,同时通过调整尺度系数 a 来对输入图像进行多尺度的细致表示^[18-21]。

墨西哥帽小波具有凸显图像细节信息的优势以及快速收敛等特点^[22],因此选择墨西哥帽小波进行优化。其母函数为高斯函数的二阶导数,即:

$$t_a(x, y) = \Delta^2 g_a(x, y) = \frac{1}{a^2} \left(\frac{x^2 + y^2}{a^2} - 2 \right) \exp \left(- \frac{x^2 + y^2}{2a^2} \right), \quad (3)$$

其频谱为

$$T_a(u, v) = 4\pi^2 a^2 (u^2 + v^2) \exp[-2\pi a^2 (u^2 + v^2)]. \quad (4)$$

首先,对待识别目标 $f(x, y)$ 与参考图像 $h(x, y)$ 进行墨西哥帽小波变换预处理,得到 $w_{a,x,y}(f)$ 和 $w_{a,x,y}(h)$, 即:

$$w_{a,x,y}(f) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) t^* \left(\frac{x}{a}, \frac{y}{a} \right) dx dy, \quad (5)$$

$$w_{a,x,y}(h) = \iint_{\infty} h(x,y) t^* \left(\frac{x}{a}, \frac{y}{a} \right) dx dy. \quad (6)$$

在相关器的频谱面上进行 $w_{a,x,y}(f)$ 和 $w_{a,x,y}(h)$ 的相关, 可以通过对它们的频谱积作傅里叶逆变换得到, 表示为

$$w_{a,x,y}(f) \otimes w_{a,x,y}(h) = \iint_{\infty} w_{a,x,y}(f) w_{a,x,y}^*(h) dx dy = a^2 \iint_{\infty} F(u,v) T_a^*(u,v) H^*(u,v) T_a(u,v) \exp[i2\pi(ux + vy)] du dv, \quad (7)$$

式中 $F(u,v)$ 、 $H(u,v)$ 和 $T_a(u,v)$ 分别是 $f(x,y)$ 、 $h(x,y)$ 和 $t\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{a}\right)$ 的频谱, 由(7)式可知, $w_{a,x,y}(f)$ 和 $w_{a,x,y}(h)$ 的相关运算可以通过在频域内 $F(u,v)$ 乘上一个滤波器 $W(u,v)$ 得到。其中, $W(u,v) = H^*(u,v) |T_a(u,v)|^2$, 即为小波变换改进的匹配滤波器(W_OTSDF 滤波器), 该滤波器可表示为 OTSDF 滤波器 $H^*(u,v)$ 和墨西哥帽小波函数频谱的模平方 $|T_a(u,v)|^2$ 的乘积。进一步可通过改变尺度系数 a 以增强图像的特定信息, 提升匹配滤波器的识别能力。

2.3 墨西哥帽小波变换母函数最佳尺度系数的选取原则

由(3)式可知, 对 $f(x,y)$ 进行墨西哥帽小波变换, 实际是 $f(x,y)$ 与高斯函数 $g_a(x,y)$ 相关后再进行二阶求导。 $g_a(x,y)$ 和 $f(x,y)$ 相关的平滑作用导致待识别目标 $f(x,y)$ 中比尺度系数 a 小得多的信息被平滑掉, 而微分作用则是凸显 $f(x,y)$ 中的细节信息。在 $f(x,y)$ 中所携带的信息变化平缓的部分, 小波变换的结果会很小; 在 $f(x,y)$ 的细节部分, 将出现极值。因此, 小波变换的最终结果是相关和微分共同作用的结果。

受计算机的分辨率限制, 细节信息较丰富的图像在经墨西哥帽小波变换后有许多信息无法显示, 下面以矩形斑图像为例, 选取不同的尺度系数, 对矩形斑图像进行墨西哥帽小波变换, 研究尺度系数 a 对输出结果的影响, 结果如图 1 所示。

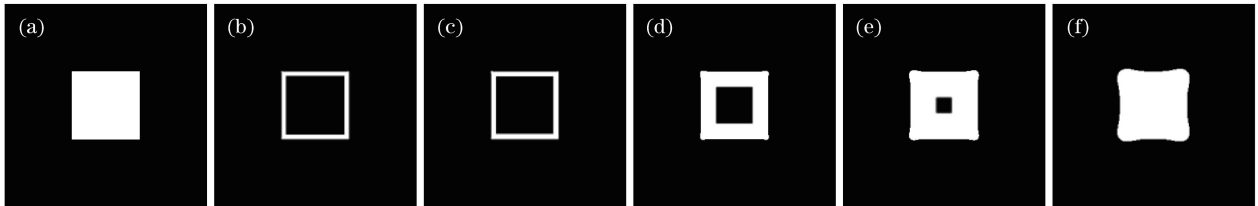


图 1 尺度系数 a 不同时, 矩形斑经墨西哥帽小波变换的结果。(a) 矩形斑; (b) $a=0.009$; (c) $a=0.01$; (d) $a=0.03$; (e) $a=0.05$; (f) $a=0.1$

Fig. 1 Rectangle spot after Mexican-hat wavelet transform with different scale coefficients a . (a) Rectangle spot; (b) $a=0.009$; (c) $a=0.01$; (d) $a=0.03$; (e) $a=0.05$; (f) $a=0.1$

矩形斑图像的细节信息表现为图形的边缘。由图 1 可知, 小波变换可以看作一个带通滤波器, 尺度系数 a 将严重影响矩形斑边缘的识别效果; 当 a 取值较小时, 可以处理更多图像的高频信息, 因此对图像的细节信息有较好的识别能力; 当 a 取值越来越大时, 小波变换只能处理图像的低频信息, 对图像的细节信息识别能力降低, 但是可以容纳更多的时间周期, 可以处理图像的更多信息。因此必须根据情况选取合适的尺度系数 a 。

在控制 OTSDF 滤波器的权重系数不变的前提下, 基于 Matlab 模拟仿真平台, 探索了平面集成 $2f$ 相关器仿真系统中不同尺度系数 a 下系统的相关输出。仿真结果显示当 a 从 0.005 逐渐增大时, 滤波器识别得到的相关峰能量逐渐增强; 但当 $a > 0.016$ 时, 滤波器识别得到的相关输出中噪声和旁瓣逐渐增大, 因此确定 $a=0.016$ 作为优化后的 W_OTSDF 滤波器的最佳尺度系数。

3 W_OTSDF 滤波器应用于平面集成 $2f$ 光学相关器的优化设计结果

将上述优化设计的 W_OTSDF 滤波器与 OTSDF 匹配滤波器分别应用于平面集成 $2f$ 光学相关器, 研究 W_OTSDF 滤波器对系统识别能力的提升作用。

3.1 平面集成 $2f$ 光学相关器的仿真流程

平面集成 $2f$ 光学相关器系统中,两个透镜分别与输入面和频谱面紧密贴合,是平面折叠光束斜入射的系统。其光学识别原理可以根据系统的平面展开图(图 2)来分析。设定入射光波长为 $\lambda = 633 \text{ nm}$,透镜 1 焦距 $f_1 = L = 340 \text{ mm}$,透镜 2 焦距 $f_2 = 170 \text{ mm}$,抽样大小为 $1080 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$,输入图像的抽样间隔(即图像每个像素单元的大小)为 $8 \mu\text{m}$,斜入射角度为 $\theta = 6^\circ$,以 Elaine 头像作为待识别目标。

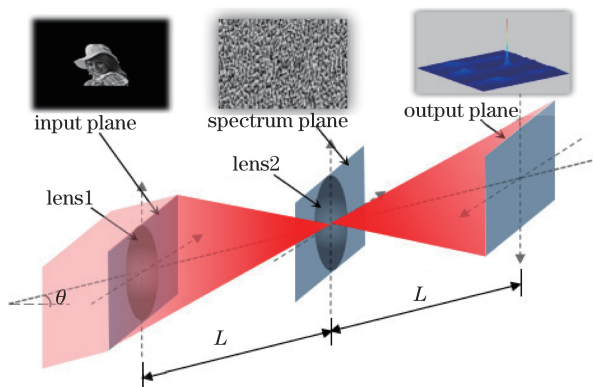


图 2 系统的平面展开图

Fig. 2 Plane expanded view of the system

平行光斜入射到输入面上,携带识别目标信息经透镜 1 的调制作用后,再通过菲涅耳衍射到达频谱面,与频谱面上的匹配滤波器作用后经透镜 2 调制,再通过一次菲涅耳衍射在输出面上得到光场分布。若频谱面上的滤波器是待识别目标的匹配滤波器时,在输出面上可以得到一个尖锐的相关峰。

3.2 W_OTSDF 滤波器与原 OTSDF 滤波器应用于目标畸变不变识别的性能比较分析

采用以下三种特征参量作为输出相关峰的评价指标^[23]:

1) 峰值相关能量比(PCE)^[7],定义为输出相关峰的能量与整个输出面上的总能量的比值。PCE 越大,表明输出相关峰越尖锐。

2) 峰值旁瓣比(PSR)^[24],定义为输出相关峰能量与输出面上总能量的差值,再与输出面上能量的均方根之比。PSR 越大,表明输出相关峰的能量越高,相关峰质量越好。

3) 信噪比(SNR)^[25],定义为输出相关峰的最大值与输出面上强度小于相关峰强度 50%的点的均方根之比。SNR 越大,匹配滤波器对噪声的容忍能力越好。

首先研究两种滤波器对不同角度旋转畸变的待识别目标识别性能。待识别的目标左右各旋转 40° ,间隔为 5° ,分别生成旋转畸变不变识别的 OTSDF 滤波器和 W_OTSDF 滤波器。在 Matlab 平台上构建平面集成 $2f$ 光学相关器的仿真系统,将训练生成的两种滤波器分别应用于模拟仿真识别,将不同角度旋转畸变的待识别目标依次输入到 $2f$ 系统中,分别得到的三种评价指标曲线图如图 3 所示,其中左旋表示为“-”,右旋表示为“+”。

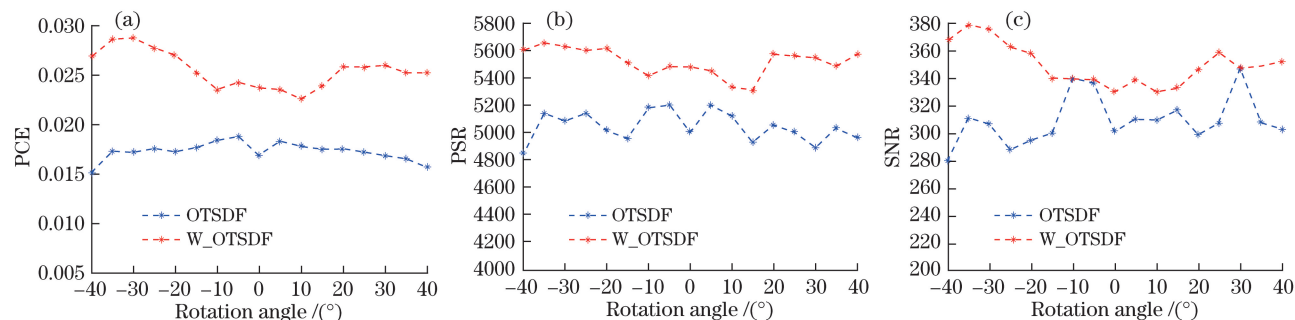


图 3 W_OTSDF 滤波器和 OTSDF 滤波器的旋转畸变不变识别性能曲线图。(a) PCE; (b) PSR; (c) SNR

Fig. 3 Performance chart of rotation distortion invariant recognition of W_OTSDF filter and OTSDF filter.

(a) PCE; (b) PSR; (c) SNR

由图 3 可以直观看出,使用旋转畸变图像训练的 W_OTSDF 滤波器比 OTSDF 滤波器的识别效果好,经计算得到 PCE 平均提高 47.7%,PSR 平均提高 9.4%。在识别少量旋转畸变目标时,W_OTSDF 滤波器识别的 SNR 虽然没有提高,但基本与 OTSDF 滤波器识别效果持平。因此,在对不同角度旋转畸变的待识别目标进行识别时,所设计的 W_OTSDF 滤波器具有比 OTSDF 滤波器更高的识别性能。

然后,研究两种滤波器对不同缩放畸变的待识别目标的识别性能。取训练待识别的目标缩小放大范围为 60%~140%,间隔为 5%,分别生成缩放畸变不变识别的 OTSDF 滤波器和 W_OTSDF 滤波器。将训练生成的两种滤波器分别应用于模拟仿真识别,将不同尺度缩放畸变的待识别目标依次输入到 $2f$ 系统中,分别得到的三种评价指标曲线图如图 4 所示。

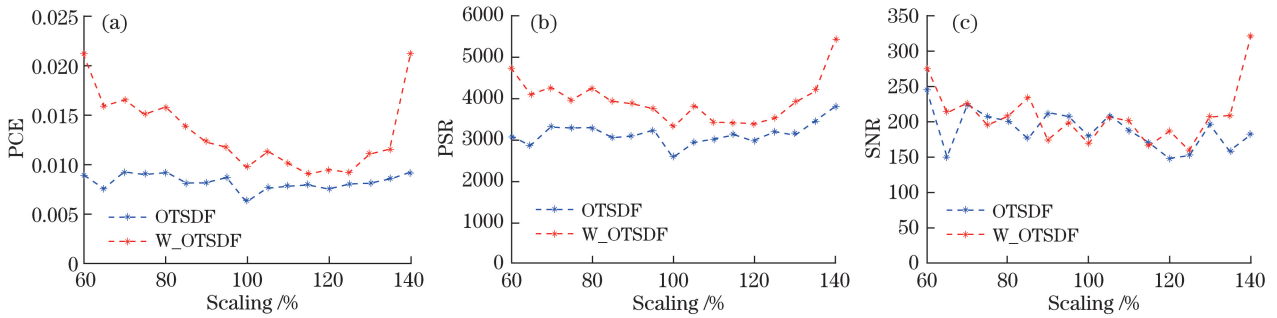


图 4 W_OTSDF 滤波器和 OTSDF 滤波器的缩放畸变不变识别性能曲线图。(a) PCE; (b) PSR; (c) SNR

Fig. 4 Performance chart of scaling distortion invariant recognition of W_OTSDF filter and OTSDF filter.

(a) PCE; (b) PSR; (c) SNR

由图 4 可以直观看出,使用缩放畸变图像训练的 W_OTSDF 滤波器比 OTSDF 滤波器的识别效果好,经计算 PCE 平均提高 60.1%,PSR 平均提高 26.1%,尤其是在识别大尺度畸变的图像时效果更突出。识别缩放畸变图像得到的评价指标曲线波动较大,这是因为图像在缩小或放大后细节信息会有很大变化,导致缩放后的图像的频谱与滤波器匹配时差异变大,从而影响相关输出峰的质量。在识别少量缩放畸变目标时 SNR 虽然有所降低,但平均水平仍然比 OTSDF 滤波器识别得到的 SNR 高。因此,在对不同缩放畸变的待识别目标进行识别时,所设计的 W_OTSDF 滤波器具有比 OTSDF 滤波器更优的识别性能。

研究两种滤波器对不同旋转缩放畸变的待识别目标的识别性能。取训练待识别的目标缩小放大范围为 60%~140%,间隔为 5%,训练待识别的目标左右各旋转 40° ,间隔为 5° ,分别生成旋转缩放畸变不变的 OTSDF 滤波器和 W_OTSDF 滤波器。因分析过程与上述类似且数据庞大,故没有列出,经计算各项指标也均有所提高。各项评价指标的平均增值如表 1 所示。

表 1 W_OTSDF 滤波器的三种识别目标性能平均增值表

Table 1 Average added value table of three recognition target performance of W_OTSDF filter

Item	Rotation / %	Scaling / %	Both rotation and scaling / %
PCE	47.7	60.1	30.3
PSR	9.4	26.1	23.3
SNR	13.1	10.7	2.3

因此,在平面集成 $2f$ 系统中对旋转、缩放、旋转缩放同时存在的畸变目标进行识别时,本研究优化设计的 W_OTSDF 滤波器较 OTSDF 滤波器在 PCE、PSR、SNR 等整体性能指标方面均有较大提高,具有更好的识别效果。

3.3 W_OTSDF 滤波器性能改善的物理机理分析

所提出的利用小波变换对 OTSDF 滤波器进行优化的设计方法,通过对待识别图像和参考图像进行墨西哥帽小波变换预处理,在选择合适的尺度系数后,有效地滤去了图像中的低频部分,凸显了图像中高频的细节变化。为了与匹配滤波器的优化设计思路相结合,对两种图像的预处理最终是在频域内实现的。因此在频域内,W_OTSDF 滤波器可看作在原 OTSDF 滤波器基础上增加一个带通滤波器,基于此前对小波函数

性质的讨论可知该带通滤波器的中心频率反比于尺度系数 a 。通过这种优化设计方法得到的 W_OTSDF 滤波器应用到平面集成 $2f$ 光学相关器中,使系统在识别过程中的相关输出能量更加集中,相关输出平面的 SNR 更高,有效地提高了平面集成 $2f$ 光学相关器的识别性能。

4 结 论

提出将小波变换应用到 OTSDF 滤波器的优化设计中,通过对匹配滤波和小波变换的特性进行详细分析,利用小波变换的多尺度与带通滤波特性重新设计了 W_OTSDF 滤波器。仿真结果表明:平面集成 $2f$ 系统中,W_OTSDF 滤波器与 OTSDF 滤波器相比,在识别旋转畸变目标时,PCE 提高约 47.7%、PSR 提高约 9.4%、SNR 提高约 13.1%;在识别缩放畸变目标时 PCE 提高约 60.1%、PSR 提高约 26.1%、SNR 提高约 10.7%;在识别旋转缩放畸变目标时 PCE 提高约 30.3%、PSR 提高约 23.3%、SNR 提高约 2.3%,在识别少量畸变目标时 SNR 虽然没有提升,但 SNR 平均水平仍然比 OTSDF 滤波器高。所优化设计的 W_OTSDF 滤波器较 OTSDF 滤波器在 PCE、PSR、SNR 等整体性能指标方面均有较大提高,具有更好的识别效果。

参 考 文 献

- [1] Juefei-Xu F, Luu K, Savvides M. Spartans: single-sample periocular-based alignment-robust recognition technique applied to non-frontal scenarios[J]. IEEE Transactions Image Processing, 2015, 24(12): 4780-4795.
- [2] Kypraios I, Young R, Birch P, *et al.* An investigation of the non-linear properties of correlation filter synthesis and neural network design[J]. Asian Journal of Physics, 2002: 11.
- [3] Evtikhiev N N, Shaulskiy D V, Zlokazov E Y, *et al.* Variants of minimum correlation energy filters: comparative study[C]. SPIE, 2012, 8398: 83980G.
- [4] Xue Rui, Wang Yongzhong, Hua Wenshen. Optimal arithmetic of minimum-variance synthetic function[J]. Optical Technique, 2006, 32(5): 793-795.
薛蕊, 王永仲, 华文深. 最小方差综合鉴别函数的优化算法[J]. 光学技术, 2006, 32(5): 793-795.
- [5] Guo Guangming, Cheng Hongshan. Research on optic-electronic hybrid matched filtering correlator in 1: N identification[J]. Optical Technique, 2013, 39(5): 398-401.
郭广明, 程红山. 1: N 识别光电混合匹配滤波相关器研究[J]. 光学技术, 2013, 39(5): 398-401.
- [6] Zalevsky Z, Ouzieli I, Mendlovic D. Wavelet-transform-based composite filters for invariant pattern recognition[J]. Applied Optics, 1996, 35(17): 3141-3147.
- [7] Refregier P. Optimal trade-off filters for noise robustness, sharpness of the correlation peak and Homer efficiency[J]. Optics Letters, 1991, 16(11): 829-831.
- [8] Diaz-Ramirez V H, Cuevas A, Kober V, *et al.* Pattern recognition with composite correlation filters designed with multi-objective combinatorial optimization[J]. Optics Communications, 2015, 338: 77-89.
- [9] Xu P, Yuan X, Huang H, *et al.* Research on design of tri-color shift device[J]. Nanoscale Research Letters, 2016, 11(1): 485.
- [10] Xu P, Huang Y, Su Z, *et al.* Research of micro-prism distribution on the bottom surface of the small-size integrated light guide plate[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 4887-4896.
- [11] Huang H, Ruan S, Yang T, *et al.* Novel even beam splitters based on subwavelength binary simple periodic rectangular structure[J]. Nano-Micro Letters, 2015, 7(2): 177-182.
- [12] Xu P, Huang Y, Zhang X, *et al.* Integrated micro-optical light guide plate[J]. Optics Express, 2013, 21(17): 20159-20170.
- [13] Xu P, Huang H, Wang K, *et al.* Realization of optical perfect shuffle with microoptical array element[J]. Optics Express, 2007, 15(3): 809-816.
- [14] Liu Jiayong, Xu Ping, Xu Haidong, *et al.* Design and analysis of novel planar integrated optical correlator[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(9): 1735-1739.
刘加勇, 徐平, 徐海东, 等. 新型平面集成光学相关器设计与分析[J]. 光学学报, 2008, 28(9): 1735-1739.
- [15] Xu P, Hong C, Sun Z, *et al.* Integrated zigzag Vander Lugt correlators incorporating an optimal trade-off synthetic discriminant filter for invariant pattern recognition[J]. Optics Communications, 2014, 315: 97-102.
- [16] Xu P, Hong C, Zhou L, *et al.* Planar optical correlators integrated with binary optical lens[J]. Optics Express, 2015, 23(5): 6773-6779.

- [17] Wu Wei, Zhou Jinpeng, Wang Xingshu, *et al.* Design of matched filters for image correlation recognition of distortion targets[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(1): 11-15.
吴伟, 周金鹏, 王省书, 等. 用于畸变目标相关识别的匹配滤波器设计[J]. 应用光学, 2009, 30(1): 11-15.
- [18] Li S, Wang X, Su X, *et al.* Two-dimensional wavelet transform for reliability-guided phase unwrapping in optical fringe pattern analysis[J]. Applied Optics, 2012, 51(12): 2026-2034.
- [19] Li M, Yao J. Ultrafast all-optical wavelet transform based on temporal pulse shaping incorporating a 2-D array of cascaded linearly chirped fiber Bragg gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(15): 1319-1321.
- [20] Song J, Fan H. Wavelet-transform spectrum for quantum optical states[J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(2): 024210.
- [21] Kong D, Shen X. Multiple-image encryption based on optical wavelet transform and multichannel fractional Fourier transform[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 57(4): 343-349.
- [22] Goyal S, Nishchal N K, Beri V K, *et al.* Wavelet modified maximum average correlation height filter for rotation invariance that uses chirp encoding in a hybrid digital-optical correlator[J]. Applied Optics, 2006, 45(20): 4850-4857.
- [23] Zhou Liang, Yu Jun, Zhu Tengfei, *et al.* Analysis and experimental determination for matched filtering recognition of correlation peak[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0907001.
周亮, 喻珺, 朱腾飞, 等. 匹配滤波识别相关峰的分析与实验判别[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0907001.
- [24] Kumar B V, Mahalanobis A. Recent advances in distortion-invariant correlation filters design[C]. SPIE, 1995, 2490: 2-13.
- [25] Horner J L, Bartelt H. Two-bit correlation[J]. Applied Optics, 1985, 24(18): 2889-2893.