

文章编号: 0258-7025(2009)06-1397-06

基于振幅调制纯相位滤波器和片状正交非线性 广义相关的畸变不变识别

吴丹 路远 凌永顺 马超杰

(电子工程学院安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要 提出一种基于振幅调制纯相位滤波器(AMPOF)和片状正交非线性广义(SONG)相关的畸变不变光学相关目标识别算法。利用振幅调制纯相位滤波器区分能力强的优点,结合综合鉴别函数(SDF)方法,提出基于振幅调制纯相位滤波器的畸变不变识别算法,达到明显优于传统综合鉴别函数方法相关输出效果的目的。在此基础上引入 SONG 相关技术,利用其突出的区分能力和抗噪性能,结合这两种非线性滤波技术,得到能够很好地兼顾多项性能指标的畸变不变识别算法。仿真实验结果表明,算法既提高了相关峰输出质量和多目标区分能力,又具有很强的抵御噪声能力,在输入图像被噪声严重破坏的情况下,识别度仍然能够达到 97% 以上。和其他结合 SONG 相关的畸变不变识别算法相比,该算法目标识别性能更为优良,且更实用、广义。

关键词 光学相关目标识别; 畸变不变识别; 振幅调制纯相位滤波器; 综合鉴别函数; 片状正交非线性广义相关
中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20093606.1397

Distortion Invariant Pattern Recognition Based on Amplitude-Modulated Phase-Only Filtering and Sliced Orthogonal Nonlinear Generalized Correlation

Wu Dan Lu Yuan Ling Yongshun Ma Chaojie

(Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province,
Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China)

Abstract A new algorithm for distortion invariant optical correlation pattern recognition based on amplitude-modulated phase-only filtering and sliced orthogonal nonlinear generalized (SONG) correlation is proposed. An algorithm for distortion invariant pattern recognition is proposed by utilizing amplitude-modulated phase-only filtering with good discrimination and synthetic discriminant function, and the result of correlation output under the algorithm is much better than that of conventional synthetic discriminant function. The technique of SONG correlation with excellent discrimination and performance of resisting noise is introduced, and the new algorithm with several excellent capabilities for distortion invariant pattern recognition and combining these two techniques of nonlinear filtering is obtained. The results of simulation indicate that the new algorithm not only enhances the quality of correlation peak and multiple target discrimination, but also has a good performance of resisting noise. The discrimination capacity of more than 97% can be obtained under new algorithm even the input image is destroyed by noise badly. Compared with other algorithm for distortion invariant pattern recognition combined with SONG correlation, the new algorithm is more practical and generalized with better discrimination.

Key words optical correlation pattern recognition; distortion invariant pattern recognition; amplitude-modulated phase-only filter; synthetic discriminant function; sliced orthogonal nonlinear generalized correlation

收稿日期: 2008-08-22; 收到修改稿日期: 2008-10-07

基金项目: 安徽省红外与低温等离子体重点实验室基金(2007A010010X)资助项目。

作者简介: 吴丹(1981-),男,博士研究生,主要从事光学模式识别方面的研究。E-mail: ironkite1801@163.com

导师简介: 凌永顺(1937-),男,中国工程院院士,教授,博士生导师,主要从事光电工程方面的研究。

1 引 言

目前应用最广泛的一种非线性滤波器是纯相位滤波器(POF)^[1~5],纯相位滤波器输出相关峰尖锐,光能利用率高。频谱函数的振幅部分不能忽视,将振幅信息和纯相位滤波器结合起来,制成振幅调制纯相位滤波器(AMPOF)^[6],区分能力进一步提高。然而上述滤波方法都不能避免另一主要缺陷,即对识别目标图像的尺寸缩放和方位旋转都极其敏感。针对畸变敏感,目前研究热点是利用综合鉴别函数(SDF)^[7]方法实现畸变不变相关识别,后来产生出许多改进的算法^[8,9]。如:使相关峰锐化的最小平均相关能量 SDF(MACE SDF);降低滤波器对噪声敏感度的最小方差 SDF(MV SDF);提高滤波器区分和抗噪声能力的核函数 SDF(kernel SDF);提高滤波器畸变容限的扩展等相关峰 SDF(EECP SDF)等。光学相关目标识别领域另一非常活跃的非线性滤波方法是二值化法,在实际应用中,常对联合功率谱进行二值化处理(BJTC)^[10],或者与 POF 结合在一起(BPOF),这些方法统称为频域二值化法。近年来兴起了一种空域二值化非线性相关器,即二值化处理过程发生在空域,这类非线性相关器具有比线性相关器更优良的相关峰输出质量、区分能力和抗噪性能。基于片状正交非线性广义分解(SONG 分解)的片状正交非线性广义相关器(SONG 相关器)^[11~14]就是一种性能突出的空域二值化非线性相关器。

本文提出一种新的畸变不变光学相关目标识别算法,其核心是结合 AMPOF 和 SDF,提出兼具两者特点的畸变不变识别算法(AMPOF SDF)。在此基础上引入 SONG 相关技术,提出基于 AMPOF SDF 的 SONG 相关器,该相关器综合性能突出,能够很好地兼顾多目标区分能力和抗噪性能等技术指标。相对于其他结合 SONG 相关的畸变不变识别算法,本文算法综合性能更为优良,且更广义,易于在光电混合系统上实施。

2 基于 AMPOF 的畸变不变识别方法

2.1 AMPOF 基本原理

振幅调制纯相位滤波器的定义为

$$H_{\text{AMPOF}} = \left[\frac{B(u, v)}{A(u, v) + |R(u, v)|} \right] \exp[-j\varphi_r(u, v)], \quad (1)$$

其中, $|R(u, v)|$ 和 $\varphi_r(u, v)$ 分别表示目标图像函数 $r(x, y)$ 傅里叶变换的振幅和相位, u 和 v 表示频域变量, $A(u, v)$ 和 $B(u, v)$ 可以是常数,也可以是 u 和

v 的函数。

AMPOF 可以避免大于 1 的光能增益,消除不定的结果,而且通过振幅和相位的匹配可获得更为优良的输出相关峰。

2.2 AMPOF SDF 实现方法

SDF 方法是把所有需要识别的畸变图像都考虑进去,有效提高对目标图像的识别能力和容错能力。设有训练图像序列 $r_0(x, y), r_1(x, y), \dots, r_N(x, y)$, 代表了期望的畸变图像变化,这些训练图像通过线性组合构成 SDF^[15,16],可表示为

$$r(x, y) = \sum_{n=0}^N a_n r_n(x, y), \quad (2)$$

其中 a_n 表示权重系数,且有

$$R(u, v) = \sum_{n=0}^N a_n R_n(u, v), \quad (3)$$

其中 $R(u, v)$ 和 $R_n(u, v)$ 分别表示 $r(x, y)$ 和第 n 幅训练图像 $r_n(x, y)$ 的傅里叶变换。

这里引入 AMPOF,提出 AMPOF SDF 畸变不变识别算法,滤波器数学定义为

$$H_{\text{AMPOF}}(u, v) = \sum_{n=0}^N \left[\frac{B(u, v)}{A(u, v) + |a_n R_n(u, v)|} \right] \times \{a_n \exp[-j\varphi_n(u, v)]\}, \quad (4)$$

其中 $\varphi_n(u, v)$ 表示第 n 幅训练图像傅里叶变换的相位。定义方法充分利用各幅训练图像傅里叶变换的振幅和相位信息,逐一构建成子滤波器,并将它们加权求和得到优化的合成滤波器。这样可以得到与任一训练图像傅里叶变换完全匹配的振幅调制纯相位函数项,使得振幅和相位匹配充分。

对于任一训练图像 $r_n(x, y), n=0, 1, \dots, N$, 与 AMPOF SDF 相关运算产生相同的相关峰值 c_n , 即

$$\max \{ \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F}[r_n(x, y)] \} \times H_{\text{AMPOF}}(u, v) \} = c_n, \quad (5)$$

其中 \mathcal{F} 和 \mathcal{F}^{-1} 分别表示傅里叶变换及其逆变换。

为求解系数向量 a , 采用 Newton-Raphson 迭代算法^[17]求解,虽然没有严格的理论证明该迭代算法一定收敛,但该算法在实际求解时很有效,收敛速度快。迭代公式为

$$a_n^{i+1} = a_n^i + \beta [c_n - c_0 p_n^i p_0^{-i}], \quad (6)$$

其中 i 为迭代次数, β 为松弛因子, p_n^i 为第 n 幅训练图像 $r_n(x, y)$ 在第 i 次迭代时的相关输出峰值。

3 基于 AMPOF SDF 和 SONG 相关实现畸变不变识别

3.1 SONG 分解和 SONG 相关基本原理

一幅二维灰度图像 $g(x, y)$ 可以被分解为一系列正交的二值图片, 每一幅二值图片代表某一灰度级的图像切片。SONG 分解定义为

$$g(x, y) = \sum_{i=0}^{Q-1} G_i e_i [g(x, y)], \quad (7)$$

其中 $e_i [g(x, y)]$ 表示二值图片, 系数 G_i 为权重, Q 为图像的灰度级数。 $e_i [g(x, y)]$ 定义为

$$e_i [g(x, y)] = \begin{cases} 1 & g(x, y) = i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (8)$$

两幅二维灰度图像 $g(x, y)$ 和 $f(x, y)$ 之间的 SONG 相关表示为

$$\Omega_{gf}(x, y) = \sum_{i=0}^{Q-1} e_i [g(x, y)] \otimes e_i [f(x, y)], \quad (9)$$

其中 \otimes 表示相关运算。SONG 相关只涉及到同一灰度级的两幅图像切片之间的线性相关, 相关结果就是这些线性相关的和。

3.2 基于 AMPOF SDF 和 SONG 相关的畸变不变识别方法

把 SONG 相关应用拓展到畸变不变识别领域具有重要的意义, 文献[18, 19]分别提出基于圆谐变换法 (CHC) 的旋转不变 SONG 相关器 (RISONG) 和基于梅林变换法 (RHF) 的比例不变 SONG 相关器 (SISONG)。但是这些方法在实际应用中存在较大的困难, 比如空间光调制器 (SLM) 的低分辨率不能满足某些坐标变换的要求; 圆谐变换的识别过程强烈依赖于极坐标系原点的选择和圆谐分量级次的选择, 运算较繁琐^[20]。

在前面提出的 AMPOF SDF 和 SONG 相关理论的基础上, 这里提出一种基于 AMPOF SDF 的 SONG 相关器 (简称为 ASSONG), 通过这两种非线性滤波技术的结合, 改进 AMPOF SDF 的识别能力, 将 SONG 相关以更实用、更广义的方式拓展到畸变不变识别领域。

ASSONG 的数学定义为

$$\Omega^{\text{ASSONG}}_{ir}(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \sum_{m=0}^{Q-1} \mathcal{F} \{ e_m [i(x, y)] \} \times \sum_{n=0}^N \left[\frac{B(u, v)}{A(u, v) + |a_n R_n^m(u, v)|} \right] \times \{ a_n \exp[-j\varphi_n^m(u, v)] \} \right\}, \quad (10)$$

其中 $i(x, y)$ 表示输入图像, $R_n^m(u, v)$ 表示第 n 幅训练图像的第 m 灰度级切片的傅里叶变换, $\varphi_n^m(u, v)$ 表示该图像切片傅里叶变换的相位。

这种定义方法按照 SONG 分解的思想重新构造 AMPOF SDF, 并且对 SONG 相关的定义做了变动, 将原定义式中的子线性相关用 AMPOF SDF 取代。该方法的核心在于从直接处理灰度图像转换到处理二值图片, 以及从二值图片之间的线性相关转换到二值图片与合成滤波器的非线性相关上来。同样可以从某一灰度级的二值图片上提取出频谱的振幅和相位信息, 从而得到 AMPOF, 直至通过位于同一灰度级的二值图片序列得到 AMPOF SDF。输入图像也按照 SONG 分解定义将其分解为不同灰度级的一系列二值图片, 若是感兴趣的目标图像, 那么在每个灰度级上均有相应的 AMPOF SDF 与之匹配。根据 SONG 相关和 AMPOF SDF 各自的特点来分析判断, 只要输入图像中存在少量未受到噪声影响的像素点, ASSONG 就可以输出尖锐的相关峰, 并且兼具畸变不变识别的能力。

对于输入图像和若干幅训练图像序列, ASSONG 具体实现步骤如下:

1) 将输入图像和每一幅训练图像按 SONG 分解定义分解成一系列二值图片。实际操作中是将邻近的灰度级合并为一个灰度级以减少相关运算量, 合并的灰度级数量与目标本身有关, 通常取 4 到 8 个;

2) 取每一幅训练图像位于同一灰度级的二值图片, 组成一个训练集, 构造出这一灰度级的 AMPOF SDF;

3) 将各个灰度级的输入图像切片分别与对应的 AMPOF SDF 进行相关运算, 再将这些相关求和得到输出结果。

由于系统处理的是二值图片, 尽管需要相关求和运算, 以及一系列滤波器的叠加, 但无论从系统的运算量还是从空间光调制器的动态范围要求方面来说, 和直接处理灰度图像的畸变不变识别算法相比都具有很大的优势。

4 计算机仿真实验

计算机仿真实验采用的训练图像为旋转角度间隔 5° 的坦克红外波段图像序列。测试中采用三种常用的性能指标, 分别为相关峰强度 (COPI)、相关峰强度与输出平面总能量之比 (PCE) 以及识别度 (DC)。PCE 反映的是相关峰的尖锐程度, 值越高, 相关峰越尖锐, 其定义为

$$\text{PCE} = \text{COPI} / E_{\text{output}}, \quad (11)$$

DC 反映的是相关器的目标区分能力, 其定义为

$$\text{DC} = 1 - \text{COPI}_i / \text{COPI}_t, \quad (12)$$

其中 $COPI_r, COPI_i$ 分别表示参考目标图像与错误目标图像以及正确目标图像的相关峰强度, $COPI_r/COPI_i$ 值越小, DC 值就越大, 相关器识别度就越高。

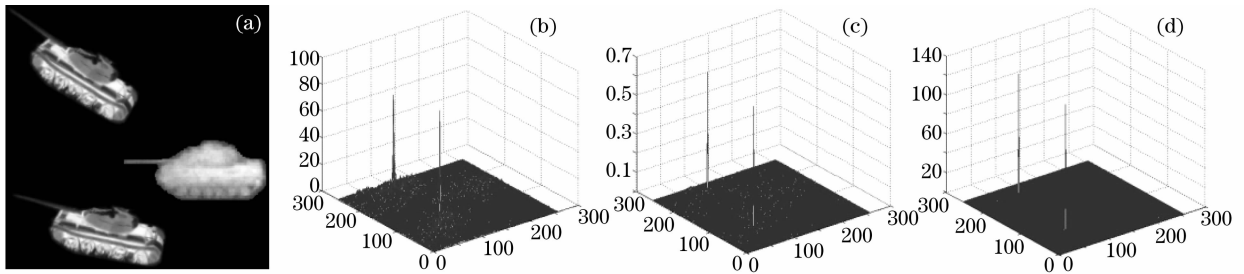


图 1 输入图像无噪声时 RISONG, AMPOF SDF 和 ASSONG 输出结果。(a)无噪声输入图像;(b)RISONG 输出结果;(c)AMPOF SDF 输出结果;(d)ASSONG 输出结果

Fig. 1 Correlation outputs of RISONG, AMPOF SDF and ASSONG for input image without noise. (a) Input image without noise; (b) Correlation output of RISONG; (c) Correlation output of AMPOF SDF; (d) Correlation output of ASSONG

从输出结果可直观看, RISONG, AMPOF SDF 和 ASSONG 均准确地识别出两个目标, 标识目标位置的两个相关峰尖锐, 峰值几乎相同, 并且排斥非目标。表 1 列出了各个滤波器的性能指标参数, 需要指出的是, $COPI$ 和 DC 定义中的 $COPI_i$ 是两个正确相关峰强度的平均值, PCE 定义中的 $COPI$ 则是两个正确相关峰强度之和。

表 1 输入图像无噪声时 RISONG, AMPOF SDF 和 ASSONG 的输出性能比较

Table 1 Performance comparison of RISONG, AMPOF SDF and ASSONG for input image without noise

Correlator	Performance		
	COPI	PCE	DC / %
RISONG	79.9693	0.0055	94.30
AMPOF SDF	0.6245	0.0269	99.06
ASSONG	125.4432	0.0595	99.63

图 1(a)是无噪声污染的输入图像, 其中包括两辆不同旋转角度的目标坦克和一辆非目标坦克, RISONG, AMPOF SDF 和 ASSONG 输出结果分别如图 1(b), (c) 和 (d) 所示。

由表 1 数据可看出 ASSONG 的各项性能指标均为最优, ASSONG 由于有 AMPOF 和 SONG 相关的贡献, PCE 值比 RISONG 高出一个数量级, DC 值也提升到很高的水平, 这意味着 ASSONG 能够更精确地测定目标位置。

为比较相关器在输入图像受到非覆盖性背景噪声影响时的抗噪性能, 图 2 和图 3 分别给出了当输入图像受到均值为 0, 标准差为 2.0 的非覆盖性高斯噪声影响时, RISONG 和 ASSONG 的相关输出结果以及不同标准差高斯噪声影响下的 $COPI$, PCE 和 DC 变化曲线。

RISONG 和 ASSONG 在输入图像受非覆盖性背景噪声影响时, 相关峰输出质量仍然较高。从曲线中可看出, 与无噪声时相比, 两者的 $COPI$, PCE 和 DC 值均有不同程度的下降, 但 ASSONG 的各性

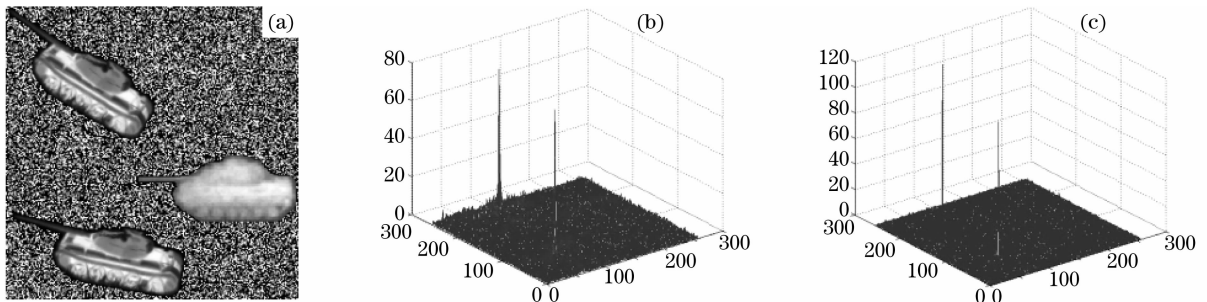


图 2 输入图像受非覆盖性背景噪声影响时 RISONG 和 ASSONG 的输出结果。(a)受非覆盖性背景噪声影响的输入图像;(b)RISONG 输出结果;(c)ASSONG 输出结果

Fig. 2 Correlation outputs of RISONG and ASSONG for input image with nonoverlapping background noise. (a) Input image with nonoverlapping background noise; (b) Correlation output of RISONG; (c) Correlation output of ASSONG

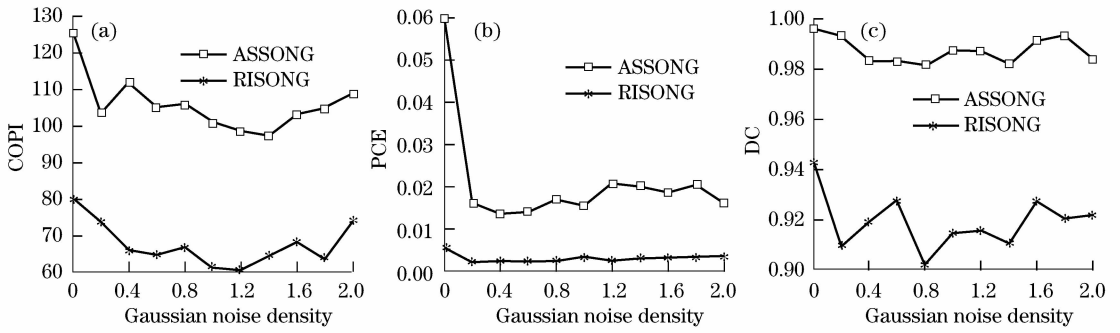


图 3 输入图像受不同标准差非覆盖性背景噪声影响时 RISONG 和 ASSONG 的 COPI (a), PCE (b)和 DC (c)变化比较
 Fig.3 Variation comparison of COPI (a), PCE (b) and DC (c) for the RISONG and ASSONG with varied standard deviation of the nonoverlapping background input noise

能指标值在整个噪声强度区间仍然比 RISONG 高出许多。随着高斯噪声标准差的增大,各性能指标值变化相对比较平缓。可见 RISONG 和 ASSONG 对非覆盖性背景噪声均有较强的抵御能力,这是因为它们吸收了 SONG 相关能够把目标从非覆盖性背景噪声中分离出来进行相关操作的优点。

图 4 和图 5 分别给出了当输入图像受到强度为 0.9 的替换噪声影响时,RISONG 和 ASSONG 的相关输出结果以及不同强度替换噪声影响下的 COPI,PCE 和 DC 变化曲线。图 4(a)中约 90% 的像素点被椒盐噪声破坏,肉眼已经基本上无法辨认出原始图像。

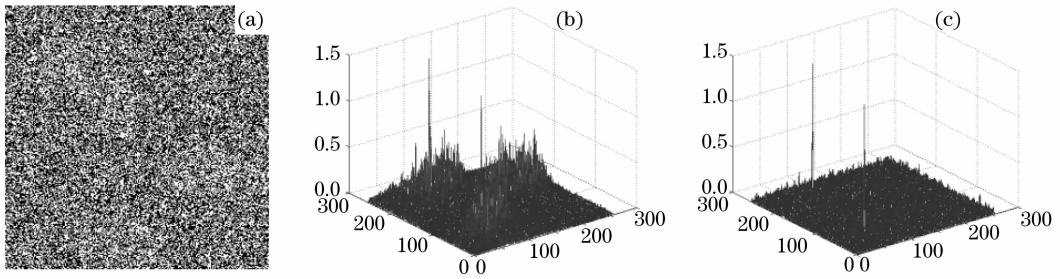


图 4 输入图像受替换噪声影响时 RISONG 和 ASSONG 输出结果。(a)受替换噪声影响的输入图像;(b)RISONG 输出结果;(c)ASSONG 输出结果

Fig.4 Correlation outputs of RISONG and ASSONG for input image with substitutive noise. (a) Input image with substitutive noise; (b) Correlation output of RISONG;(c) Correlation output of ASSONG

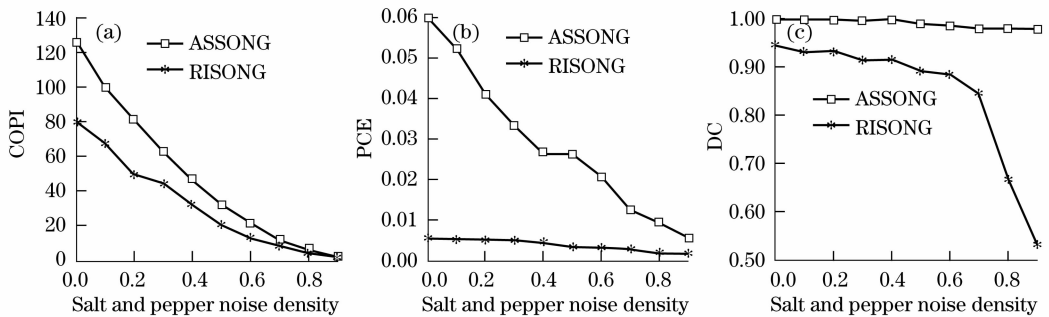


图 5 输入图像受不同强度替换噪声影响时 RISONG 和 ASSONG 的 COPI (a), PCE (b)和 DC (c)变化比较
 Fig.5 Variation comparison of COPI (a), PCE (b) and DC (c) for the RISONG and ASSONG with varied density of the substitutive input noise

在强替换噪声环境下,RISONG 输出的正确相关峰周围存在较强的干扰峰,而且在非目标区域也产生了较强的虚假相关信号。此时 RISONG 的识别能力明显下降,而 ASSONG 依然能够准确输出

尖锐的相关峰。由于替换噪声直接破坏图像的像素点,ASSONG 的 COPI 和 PCE 随着噪声强度的增大下降较快,RISONG 的 COPI 下降趋势和 ASSONG 相似,其 PCE 在整个噪声强度区间维持

在较低的水平,变化比较平缓。ASSONG 的 DC 表现出了很强的稳定性,虽然在后半段略有降低,但始终保持在 97% 以上,而 RISONG 的 DC 在后半段迅速降低,从图 4(b)中较强的虚假相关信号可直观判断出强替换吱声环境下 DC 值很低,容易造成识别误判。

5 结 论

AMPOF SDF 充分表现出振幅调制纯相位滤波器区分能力强的优点,拓展了综合鉴别函数在畸变不变模式识别领域的应用。仿真结果显示在输入图像无噪声污染时,输出相关峰比传统的 SDF 方法尖锐得多。为提高相关器的综合性能,将 SONG 相关技术与 AMPOF SDF 结合,得到更为实用、广义且各项性能兼顾的 ASSONG。在仿真测试中,和 RISONG 相比,ASSONG 的各项相关输出性能指标均占有明显优势,表现出极强的多目标区分能力和抵御噪声能力。除文中的测试图像外,还使用了若干其他目标图像重复验证,均得到相同结论,可见 ASSONG 的性能稳健。

参 考 文 献

- 1 Li Qi, Dong Guofeng, Wang Qi. Object classification simulation for lidar-passive-infrared imaging combination[J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(10):1347~1352
李 琦,董国峰,王 骐.用于激光成像雷达和被动红外成像复合的目标分类仿真[J]. *中国激光*,2007, **34**(10):1347~1352
- 2 Feng Shaotong, Bao Yi, Nie Shouping *et al.*. Three-dimensional object recognition under out-of-plane rotation based on multiple feature space[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7):952~956
冯少彤,鲍 毅,聂守平等.基于多特征空间的三维目标离面旋转识别[J]. *中国激光*,2007, **34**(7):952~956
- 3 Tian Ying, Yuan Weiqi. Ear recognition based on fusion of scale invariant feature transform and geometric feature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8):1485~1491
田 莹,苑玮琦.尺度不变特征与几何特征融合的人耳识别方法[J]. *光学学报*,2008, **28**(8):1485~1491
- 4 Wang Xiangjun, Wang Yan, Li Zhi. Fast target recognition and tracking method based on characteristic corner[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):360~364
王向军,王 研,李 智.基于特征角点的目标跟踪和快速识别算法研究[J]. *光学学报*,2007, **27**(2):360~364

- 5 Horner J. L., Gianino P. D. Phase-only matched filtering[J]. *Appl. Opt.*,1984, **23**(6):812~816
- 6 G. G. Mu, X. M. Wang, Z. Q. Wang. Amplitude-compensated matched filtering[J]. *Appl. Opt.*,1988, **27**(16):3461~3463
- 7 D. Casasent. Unified synthetic discriminant function computational formulation[J]. *Appl. Opt.*,1984, **23**(10):1620~1627
- 8 Kyu-Hwa Jeong, Puskal P. Pokharel, Jian-Wu Xu *et al.*. Kernel based synthetic discriminant function for object recognition[C]. *Proc. ICASSP*,2006, 765~768
- 9 Shen Xueju, Wang Yongzhong, Yao Guangtao *et al.*. Study on extended equal correlation peak synthetic discriminant function algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*,2008, **16**(1):156~160
沈学举,王永仲,姚广涛等.扩展等相关峰综合鉴别函数算法研究[J]. *光学精密工程*,2008, **16**(1):156~160
- 10 Ge Baozhen, Chen Ximing, Zhang Yimo *et al.*. Binary joint transform correlation with real-time adaptive thresholding [J]. *Chinese J. Lasers*,2000, **A27**(12):1107~1110
葛宝臻,陈希明,张以谟等.实时自适应阈值二值化联合变换相关器[J]. *中国激光*,2000, **A27**(12):1107~1110
- 11 P. Garcia-Martinez, H. H. Arsenault. A correlation matrix representation using sliced orthogonal nonlinear generalized decomposition[J]. *Opt. Commun.*,2000, **174**:503~515
- 12 P. Garcia-Martinez, H. H. Arsenault, S. Roy. Optical implementation of the sliced orthogonal nonlinear generalized correlation for images degraded by nonoverlapping background noise[J]. *Opt. Commun.*,2000, **173**:185~193
- 13 J. Otón, P. Garcia-Martinez, I. Moreno *et al.*. Phase joint transform sequential correlator for nonlinear binary correlations [J]. *Opt. Commun.*,2005, **245**:113~124
- 14 Qu Wang, Haifa Zhao, Shutian Liu *et al.*. Sliced orthogonal nonlinear generalized decomposition based fringe-adjusted joint transform correlation[J]. *Optik*,2004, **115**(9):409~419
- 15 A. M. El-Saba, M. S. Alam, W. Sakla. Enhanced rotation and scale invariant target detection using the fringe-adjusted joint transform correlation[C]. *SPIE*,2006, **6245**:62450G
- 16 E. H. Horache, M. S. Alam, C. H. Loo *et al.*. SDF-based nonzero-order fringe-adjusted joint transform correlator using binary random phase mask[C]. *SPIE*,2004, **5559**:358~368
- 17 D. A. Jared, D. J. Ennis. Inclusion of filter modulation in synthetic-discriminant-function construction [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(2):232~239
- 18 P. Garcia-Martinez, H. H. Arsenault, C. Ferreira. Improved rotation invariant pattern recognition using circular harmonics of binary gray level slices[J]. *Opt. Commun.*,2000, **185**:41~48
- 19 P. Garcia-Martinez, H. H. Arsenault. Nonlinear radial-harmonic correlation using binary decomposition for scale-invariant pattern recognition[J]. *Opt. Commun.*,2003, **223**:273~282
- 20 Zhong Qianchuan, Liu Yi, Wang Shifan. Rotating invariance matched filtering correlation recognition based on inverse filter [J]. *Chinese J. Lasers*,2002, **A29**(10):941~944
钟黔川,刘 艺,王仕璠.基于逆滤波器的旋转不变匹配滤波相关识别[J]. *中国激光*,2002, **A29**(10):941~944