

基于改进 MACH 算法的畸变目标识别

陈宇¹, 霍富荣¹, 刘洪志¹, 郑丽芹²

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 长春新产业光电技术有限公司, 吉林 长春 130022)

摘要: 由于观察距离和角度的不同, 待识别的目标图像相对模板图像会存在一定程度的角度畸变和比例畸变, 大大限制了光学相关模式识别的发展。将最大平均相关高度(MACH)滤波器用于畸变目标识别, 通过优化该滤波器的控制参数, 并根据多次的计算机仿真实验和光学实验, 使该改进型 MACH 滤波器具有畸变公差高、相关点明亮等特点。用改进后的 MACH 滤波器对角度畸变目标和比例畸变目标实施频域滤波, 能有效增强相关峰强度, 扩大畸变目标识别范围。作为实例, 给出了复杂背景下识别汽车的计算机仿真实验和光学实验, 有效验证了该算法的可行性。

关键词: 模式识别; 畸变目标识别; 最大平均相关高度滤波器; 复杂背景

中图分类号: O438.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)12-4186-06

Target recognition with scale distortion based on improved MACH filter

Chen Yu¹, Huo Furong¹, Liu Hongzhi¹, Zheng Liqin²

(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Changchun New Industries Optoelectronics Tech. Co., Ltd., Changchun 130022, China)

Abstract: When observation distance and angle change, angular distortion and scale distortion of target image relative to the template will appear, which limits the development of pattern recognition with correlation recognition technology. The Maximum Average Correlation Height (MACH) filter was applied to recognize distorted targets in this paper. According to multiple computer simulation experiments and optical experiments, the filter has the characteristics of high distortion tolerance and bright correlation peaks by optimizing the control parameters of the synthesized filter. Distorted targets were filtered in frequency domain by the improved MACH filter, correlation peaks could be sharpened effectively and recognition scope was expanded successfully. As a practical example, computer simulation experiments and optical experiments for warship in cluttered scene were carried out. The experimental results prove the feasibility of the algorithm.

Key words: pattern recognition; recognition of distorted targets;
maximum average correlation height(MACH) filter; cluttered scene

收稿日期: 2014-04-09; 修订日期: 2014-05-11

基金项目: 总装备部预研局资助项目(5131XXXX105)

作者简介: 陈宇(1978-), 男, 讲师, 硕士生导师, 博士, 主要从事光学相关探测、光学设计等方面的研究。Email: 323111501@qq.com

0 引言

进入 21 世纪以来,光学相关识别技术由于其特有的高识别精度、高识别率等特点受到了越来越多的重视。光学相关识别技术可以用于车牌识别、指纹识别和人脸识别等多种模式识别领域,尤其是在军事领域有着不可忽视的重要作用。但在军事中,待识别目标常常处于较为复杂的背景环境中,这给相关识别技术带来了不小的困难。光学信息处理技术的蓬勃发展,为光学相关技术提高目标识别精度和目标识别率奠定了坚实的基础^[1]。

目前,在光学相关识别领域,国内外的相关文献主要集中于研究如何在相关峰平面增强相关峰的强度,以便提高目标识别率和识别精度。在实际应用中,影响相关峰强度的原因有很多种,如待识别目标所在背景的复杂程度、待识别目标本身的轮廓复杂程度、目标相对于模板是否存在比例畸变或者角度畸变等等。通常,可以在空域中对图像进行图像分割、图像边缘提取等单一或复合方法,以提高目标轮廓可识别度。但经大量的实验分析可以知道,对于畸变目标图像(相对于模板),仅在空域内处理往往达不到较为理想的处理效果。即,可识别的畸变目标的畸变容差较小,相关峰强度不高等。

针对畸变目标的识别,近年来国内外已提出了多种解决方法,如圆谐函数展开、梅林变换、极坐标变换等方法。但这些方法或者由于其仅能识别特定类型的畸变目标,如平面内旋转或比例变化的畸变目标,或者由于其应用环境限制,均未能在光学相关目标识别领域得到广泛应用。随着计算机技术的快速发展,可以在图像的频域内,对图像进行综合识别函数滤波、复合函数滤波等多种方法的频域滤波。但噪声对频域滤波的影响较大,在实际编程过程中,必须考虑到噪声的影响。文中,是在对目标图像进行空域处理的基础上,在频域内对畸变目标图像进行进一步处理,以增强畸变目标的相关峰强度,扩大畸变目标识别范围^[2-4]。

利用空域的边缘提取技术与频域的 MACH 滤波器相结合,可有效提高目标相关峰亮度,实现复杂环境下的畸变目标识别。MACH 滤波器是 1994 年由 Kumar 提出,文中将在该 MACH 滤波器的基础上,

根据实验结果进行改进和优化,以有效抑制噪声对频域滤波的影响,扩大畸变容差。

1 光学相关探测原理

用联合变换相关器识别目标时,首先应取得该待测目标的模板图像,存储在计算机中。通过光学相关运算,实现待识别目标图像和存储在计算机中的模板图像的相似度计算,该相似度以相关峰强度的形式体现。系统中采用 CCD 接收联合变换功率谱和相关峰图像,采用电寻址液晶(EALCD)作为空间光调制器(SLM),实现目标图像和联合变换功率谱图像的输入。该系统原理图如图 1 所示。

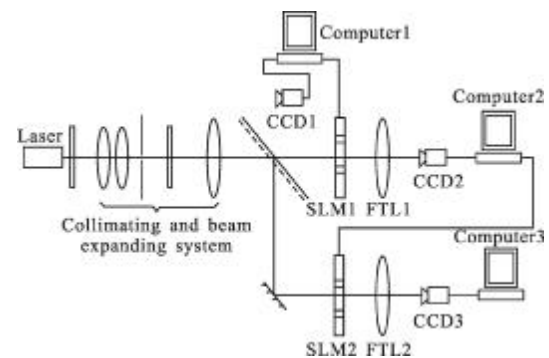


图 1 联合变换相关器原理图

Fig.1 Schematic diagram of joint transform correlator

在图 1 所示的实验装置中,采用氩离子激光器作为光源,其后放置大小为 $10\sim 25\ \mu\text{m}$ 的针孔。针孔越小,经准直扩束系统后的平行光的均匀性越好,但也会影响平行光的能量,反之亦然。针孔后的准直扩束系统发出的准直的平行光经半反透镜后,被分成两束,分别照明 SLM1 和 SLM2。

设输入的参考图像函数为 $r(x, y)$,事先存储在 SLM1 中。设 CCD1 拍摄的目标图像函数为 $w(x, y) = t(x, y) + n(x, y)$,其中, $t(x, y)$ 为目标函数, $n(x, y)$ 为图像背景噪声函数,且 $t(x, y) \neq n(x, y)$ 。由 CCD1 摄取的目标图像及预先存储在 SLM1 中的模板图像同时经过傅立叶变换透镜 1 (FTL1) 进行光学傅里叶变换,由 CCD2 摄取其功率谱图像,并显示在计算机 2 (Computer2) 中。设 $t(x, y)$ 的中心坐标为 $(a, 0)$, $r(x, y)$ 的中心坐标为 $(b, 0)$,在 FTL1 后焦面得到的傅里叶变换函数为:

$$\iint [t(x-a, y) + r(x-b, y)] \exp[-i2\pi(ux+vy)] dx dy =$$

$$\exp(-i2\pi ua)T(u, v) + \exp(-i2\pi ub)R(u, v) \quad (1)$$

则 CCD2 接收的联合变换功率谱为:

$$I(u, v)^2 = |\exp(-i2\pi ua)T(u, v) + \exp(-i2\pi ub)R(u, v)|^2 = \\ T(u, v)T^*(u, v) + R(u, v)R^*(u, v) + \\ \exp[-i2\pi u(a-b)]T(u, v)R^*(u, v) + \\ \exp[-i2\pi u(-a+b)]T^*(u, v)R(u, v) \quad (2)$$

联合变换功率谱经 Computer2 输入到 SLM2 中, 被准直的平行光照明。经傅立叶变换透镜 2 (FTL2) 的傅立叶变换作用后, 实现待识别目标图像和参考图像的相关运算。其相关峰图像由 CCD3 接收, 并由 Computer3 显示。CCD3 接收的相关数为:

$$\iint T(u, v)T^*(u, v)\exp[-i2\pi(ux+vy)]dudv + \\ \iint \exp[-i2\pi u(a-b)]T(u, v)R^*(u, v) \cdot \\ \exp[i2\pi(ux+vy)]dudv + \iint \exp[-i2\pi u(-a+b)] \cdot \\ T^*(u, v)R(u, v)\exp[i2\pi(ux+vy)]dudv + \\ \iint R(u, v)R^*(u, v)\exp[i2\pi(ux+vy)]dudv = \\ C_{tt}(x, y) + C_{rr}(x, y) + C_{tr}(x, y) + C_{rt}(x, y)$$

式中: $C_{tr}(x, y)$ 和 $C_{rt}(x, y)$ 是待识别目标图像和参考图像的互相关函数, 也是需要探测的信号函数, 其坐标中心分别在 $(a-b, 0)$ 和 $(-a+b, 0)$; $C_{tt}(x, y)$ 和 $C_{rr}(x, y)$ 则是待识别目标图像和参考图像的自相关函数, 属于噪声函数。由于其中心在 $(0, 0)$, 所以很容易与互相关函数分离^[5-6]。

2 最大平均相关高度算法原理

MACH 滤波器是一种畸变不变滤波器, 它是由著名的综合识别函数滤波器演化而来的, 它能够同时满足三项主要的性能指标, 即, 易于探测相关峰、具有较高的畸变容差以及能够抑制背景噪声。综合识别函数滤波器有四个相互制约的性能参数有输出噪声方差(ONV)、平均相关高度(ACH)、平均相似性测量(ASM)以及平均相关能量(ACE)。MACH 滤波器的设计目的就是使 ACH 最大, 而保持 ASM 最小。同时, ACE 和 ONV 也需根据不同应用环境, 进行一定程度的折衷。在实际应用中, 目标往往处于复杂的背景环境中。这样, 在输出的相关函数中, 就会存在依

赖于背景噪声的噪声方差。为获取较强的相关峰, 很显然, ONV 应最小化。当然, 对于运动目标, ONV 的大小一直随目标在探测图像中的位置改变而改变。ONV 的表达式如公式(3)所示:

$$ONV = h^*Ph \quad (3)$$

式中: P 是对角矩阵, 其对角元素由噪声图像的功率谱密度获取; h 是综合识别函数(SDF)滤波器, “+”指复向量的共轭转置^[7]。

同时, 为获得较好的相关识别结果, 有必要降低除相关点之外的其余位置的函数值。这样, ACE 需要最小化, 其表达式如公式(4)所示:

$$ACE = h^*D_x h \quad (4)$$

式中: D_x 是以目标图像的平均功率谱密度作为对角元素的对角矩阵。使 ACE 最小化, 通常会在相关输出中产生较低旁瓣效应。

ASM 用于使参考模板图像与目标图像间的相异性最小化。换言之, ASM 可用于增加参考模板图像与目标图像间的相似性。这一点对于目标识别技术十分重要。ASM 的表达式如公式(5)所示:

$$ASM = h^*S_x h \quad (5)$$

式中: S_x 是表征序列图像的平均傅立叶变换的正方形矩阵。

ACH 代表参考模板图像与目标图像的相关能量。为提高目标识别率, 需要将 ACH 表达式的值最大化, 其表达式如公式(6)所示:

$$ACH = |h^T m_x| \quad (6)$$

式中: m_x 是向量平均值。

理想的滤波器应使 ONV, ACE 和 ASM 最小化, 而使 ACH 最大化。Refregier^[8]提出了一种折衷的能量方程, 如公式(7)所示。基于上述理论, 公式(7)的值应最小化。

$$E(f) = \alpha(ONV) + \beta(ACE) + \gamma(ASM) - \delta(ACH) = \\ \alpha h^*Ph + \beta h^*D_x h + \gamma h^*S_x h - \delta |h^T m_x| \quad (7)$$

该方程是包含四个影响滤波器性能的性能参数的加权和。理论上, $\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 + \delta^2 = 1$ 。方程(7)可以改写为:

$$E(h) = h^*D_x h - \delta |h^T m_x| \quad (8)$$

其中,

$$D = \alpha P + \beta D_x + \gamma S_x \quad (9)$$

为取得公式(8)的最小值, 对其进行微分, 并令微分结果为零, 可得:

$$f = \frac{\delta}{2} \frac{p_x^*}{D} = \frac{\delta}{2} \frac{m_x^*}{\alpha P + \beta D_x + \gamma S_x} \quad (10)$$

公式(10)即为 MACH 滤波器的表达式。其中,上角标“*”代表共轭。 $\delta/2$ 为常量,不影响滤波器性能,因此设 $\delta/2=0.1$ 。因此,MACH 滤波器又可改写为:

$$f = \frac{m_x^*}{\alpha P + \beta D_x + \gamma S_x} \quad (11)$$

式中: α 、 β 和 γ 是非负数。 α 、 β 和 γ 取不同值,可以控制 MACH 滤波器的性能,以满足不同的应用需求。

当 $\alpha=\gamma=0$ 时,该滤波器性能更倾向于 MACE 滤波器。MACE 滤波器通常可获得较为尖锐的相关峰,并且能够很好地抑制背景噪声,但其对畸变较为敏感。当 $\alpha=\beta=0$ 时,该滤波器则为 MACH 滤波器,可以获得较大的畸变容差,更适合识别空间畸变目标。根据大量的实验结果,对 α 、 β 和 γ 的值进行优化。当 $\gamma=1$, $\beta=\alpha=0.3$ 时,对于中等复杂程度的目标图像而言,可以获得最大的畸变容差。下面给出一组经 MACH 滤波器滤波的目标识别实验结果。

为将 MACH 滤波器应用于联合变换相关器,需在频域内合成 MACH 滤波器,并经逆傅里叶变换后返回至空域中,形成 MACH 参考模板。对于给定的畸变目标图像,MACH 参考模板含有畸变目标的不同畸变形式,如比例畸变、角度畸变等。将 MACH 参考模板与目标图像同时输入至联合变换相关器中,可以实现一定畸变程度的畸变目标识别。

3 实验结果

在计算机模拟实验时,应用 MATLAB 软件进行目标的傅里叶变换及合成 MACH 数字滤波器,实现比例畸变目标相关识别。

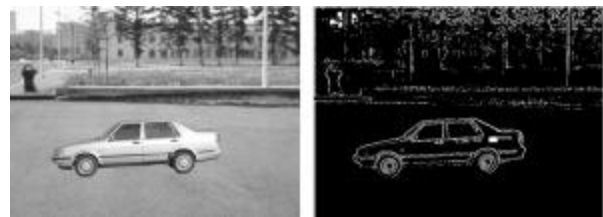
由于联合变换相关器中应用电寻址液晶的分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$,所以待测目标与模板的联合图像不应超过该分辨率。进行计算机模拟实验时,应用 MATLAB 软件尚不能实现对于待测目标的实时处理,但可通过 DSP 硬件提高图像处理速度。

3.1 比例畸变目标识别实验结果

在实验中,选择了 11 幅比例畸变图像合成 MACH 参考模板,每两幅图像间的比例缩放步长为 4%。得到的 11 幅畸变图像,其畸变比例为 76%~

136%。

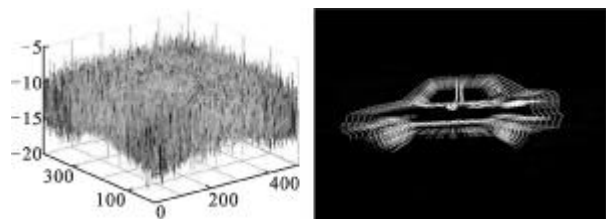
为验证 MACH 参考模板在联合变换相关器上的可行性并确定其识别范围,对路面上的汽车目标进行了一组光学实验。图 2 是原始图像及其边缘提取结果,图 3 是获得的 MACH 滤波器及 MACH 参考模板。



(a) 原始图像 (b) 边缘提取结果
(a) Original image (b) Result of edge extraction

图 2 初始图像及边缘提取结果

Fig.2 Original image and result of edge extraction

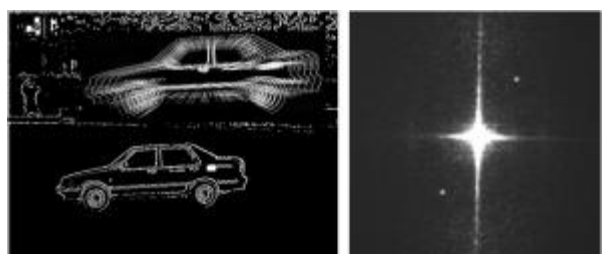


(a) MACH 滤波器三维结构图 (b) 合成的 MACH 参考模板
(a) MACH filter (b) MACH reference image

图 3 MACH 滤波器结构及 MACH 参考模板

Fig.3 MACH filter and MACH reference image

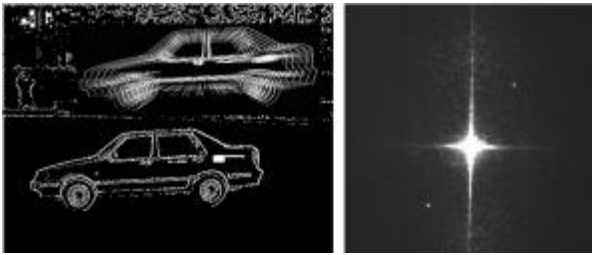
对不同比例的比例畸变汽车目标进行了大量目标识别实验。其中,部分比例畸变汽车目标的实验结果如图 4 和图 5 所示,分别是目标变化为原模板的 95% 和 120%对应的实验结果。



(a) 目标为初始图像的 95% (b) 图(a)的相关峰图像
(a) Scale magnified 95% (b) Correlation peaks of image (a)

图 4 目标比例为 95%的畸变汽车目标识别结果

Fig.4 Recognition result of distorted car with scaling factor 95%



(a) 目标为初始图像的 120% (b) 图(a)的相关峰图像
 (a) Scale magnified 120% (b) Correlation peaks of image (a)

图 5 目标比例为 120% 的畸变汽车目标识别结果

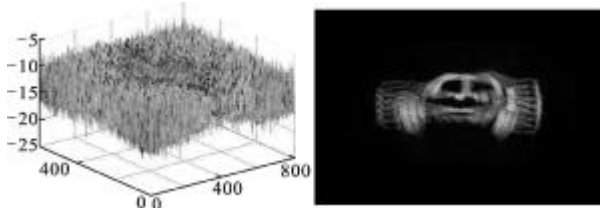
Fig.5 Recognition result of distorted car with scaling factor 120%

图 4 实验对应相关峰的强度值是 165(灰度值), 可据此轻易识别出目标。

在图 5 所示的实验中, 将待测畸变目标从 80% 开始以 1%为步长进行逐渐增大, 进行光学实验, 以确定该实验中的比例畸变容差。实验发现, 如果相关峰的灰度值小于 70, 则目标不能被识别。在上述实验中, 待识别汽车目标的比例容差为 85%~127%。

3.2 角度畸变目标识别实验结果

在角度畸变目标识别实验中, 同样选择 11 幅角度畸变图像合成 MACH 参考模板, 每两幅图像间的角度变化步长为 3°。得到 11 幅角度畸变图像, 其畸变范围从 -15°~+15°, 实验中得到的 MACH 滤波器及 MACH 参考模板如图 6 所示。



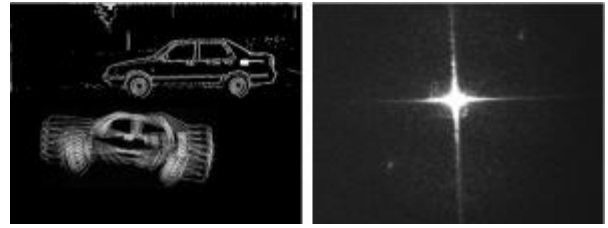
(a) MACH 滤波器三维结构图 (b) 合成的 MACH 参考模板
 (a) MACH filter (b) MACH reference image

图 6 MACH 滤波器结构及 MACH 参考模板

Fig.6 MACH filter and MACH reference image

图 7 实验对应相关峰的强度值是 163, 可据此轻易识别出目标。

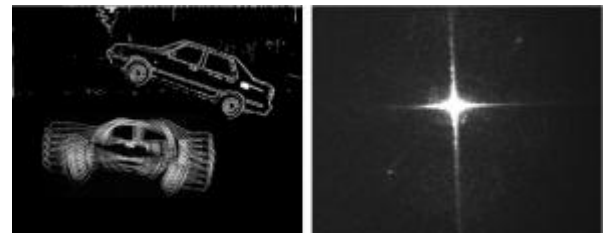
在图 8 所示的实验中, 将待测畸变目标从 -20° 开始以 1°为步长逐渐变化畸变角度, 进行光学实验, 以确定该实验中的角度畸变容差。实验发现, 如果相关峰的灰度值小于 70, 则目标不能被识别。在上述实验中, 待识别汽车目标的角度容差为 -20°~20°。



(a) 目标为旋转 2° (b) 图(a)的相关峰图像
 (a) Target rotation 2° (b) Correlation peaks of image (a)

图 7 旋转 2° 的汽车目标识别光学实验结果

Fig.7 Recognition result of angular distorted car with rotation 2°



(a) 目标为旋转 21° (b) 图(a)的相关峰图像
 (a) Target rotation 21° (b) Correlation peaks of image (a)

图 8 旋转 21° 的汽车目标识别光学实验结果

Fig.8 Recognition result of angular distorted car with rotation 21°

实验发现, 在空域预先对目标图像进行边缘提取处理, 可以在应用 MACH 滤波器时, 获得最大的可识别目标的畸变容差范围, 提高目标识别率和识别精度。因此, 在应用 MACH 滤波器时, 空域的边缘提取处理是必不可少的。

4 结论

文中提出在联合变换相关器的频域应用 MACH 滤波器进行滤波。该滤波器易于探测相关峰, 具有较高的畸变容差以及背景噪声抑制能力, 使其在应用于畸变目标识别时, 具有着其他方法无可比拟的优势。结合空域的边缘提取处理, 可有效扩大畸变目标的可识别范围, 增强相关峰的亮度。

实验结果表明, 当 $\gamma=1, \beta=\alpha=0.3$ 时, 可获得畸变目标的最大可识别畸变容差。对于文中的实验, 汽车目标的比例畸变容差为 85%~127%, 角度畸变容差为 -20°~20°。由于不同背景的比例畸变和角度畸变目标, 其轮廓复杂程度各不相同, 因此其可识别的畸变容差也必然存在差异, 但经文中所述改进型 MACH 滤波器频域处理后, 均可在很大程度上增强相关峰的强度。

鉴于该项技术也可应用于空间畸变目标识别,因此,它在军事领域中有着非常广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Ma Beihe, Chen Li, Lei Liang, et al. The identification of the vehicle licensing alphabet with the real-time joint Fourier transformation correlation recognition [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2009, 26 (3): 68-71. (in Chinese)
马北河, 陈丽, 雷亮, 等. 实时联合变换相关识别在车牌字符识别中的应用[J]. *广州工业大学学报*, 2009, 26(3): 68-71.
- [2] Zhan Xue, Shang Jiyang, Wang Wensheng. Recognition of distorted target in cluttered background based on maximum average correlation height algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(9): 2042-2048. (in Chinese)
战雪, 尚吉扬, 王文生. 最大平均相关高度法实现复杂背景畸变目标识别[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(9): 2042-2048.
- [3] Shang Jiyang, Chen Chi, Zhang Yu, et al. Application of maximum average correlation height filter algorithm in distorted target recognition [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(8): 1231-1236. (in Chinese)
尚吉扬, 陈驰, 张宇, 等. 最大平均相关高度滤波算法在畸变目标识别中的应用[J]. *光子学报*, 2011, 40(8): 1231-1236.
- [4] Shang Jiyang, Zhang Yu, Chen Chi, et al. Distorted target recognition based on wavelet-modified maximum average correlation height (MACH) algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(9): 2057-2065. (in Chinese)
尚吉扬, 张宇, 陈驰, 等. 小波改进最大平均相关高度法实现畸变目标识别[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(9): 2057-2065.
- [5] Zhang Su, Xu Chunyun, Wang Wensheng. Tracking technology of moving target in foggy weather based on multi-wavelet enhancement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 625-632. (in Chinese)
张肃, 徐春云, 王文生. 基于多小波增强的雾天运动目标跟踪技术[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 625-632.
- [6] Miao Hua, Chen Yu, Wang Wensheng. Research on the application of reversing phase technology in joint transform correlator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 190-192. (in Chinese)
苗华, 陈宇, 王文生. 提高复杂背景目标探测与识别能力的研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(S): 190-192.
- [7] Ph. Refregier. Optimal trade-off filters for noise robustness sharpness of the correlation and Horner efficiency [J]. *Opt Lett*, 1991, 16: 829-831.
- [8] Peter Bone, Rupert Young, Chris Chatwin. Position rotation scale and orientation invariant multiple object recognition from cluttered scenes [C]//*SPIE*, 2005, 5816: 66-77.