

## 光学相关多目标识别技术

杜 双,张 宁,陶 宇,赵 帅,王文生

(长春理工大学 现代光学测试技术研究室,吉林 长春 130022)

**摘 要:** 光电混合实时联合变换相关器能够实现目标的自动识别和定位(方位角和俯仰角),在复杂背景中,多目标动态测量一直是待解决的关键技术之一,由于背景复杂、目标多、噪声大,因而目标识别效果不佳。针对这一问题,提出了在光电混合联合变换相关器中应用高斯滤波和拉普拉斯算子相结合的新方法,并把其应用在目标图像的频谱面。即基于高斯滤波先对目标图像的频谱进行平滑、积分以滤掉噪声,再利用拉普拉斯算子进行边缘检测,使目标图像轮廓清晰,降低了噪声的影响,消除了双边缘现象,最大限度地保留了频谱图像的细节信息。该方法解决了多目标的识别问题,提高了光电联合变换相关器的目标识别率。给出了飞机多目标识别的实验结果。

**关键词:** 光电混合联合变换相关器; 多目标识别; 高斯滤波; 拉普拉斯算子

**中图分类号:** TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2740-06

## Multiple target recognition technology based on optical correlation

Du Shuang, Zhang Ning, Tao Yu, Zhao Shuai, Wang Wensheng

(Laboratory of Contemporary Optical Measure Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Hybrid optoelectronic joint transform correlator (HOJTC) can realize real-time recognition and localization of objects (azimuth angle and altitude angle). Multiple target dynamic measurement has been one of key technologies to be resolved in cluttered background. Sometimes even no correlation peaks appear because of cluttered scene, multiple target and large noise. Aimed at this problem, the combination of Gaussian filter and Laplace operator was used in the HOJTC for image enhancement of joint power spectrum. First, in order to reduce the noise, Gaussian filter was used to smooth and integrate the joint power spectrum, and then Laplace operator was used for edge detection. So that the target image contour could be clearer, the influence of noise could be reduced, and the phenomenon of double edge could be eliminated, which retained the details of spectrum image. This method solved the problem of multiple target recognition, and increased the rate of target recognition of HOJTC. The experiment results of two plane targets are shown.

**Key words:** hybrid optoelectronic joint transform correlator; multiple target recognition; Gaussian filter; Laplace operator

收稿日期:2013-12-25; 修订日期:2014-01-10

基金项目:总装备部预研基金

作者简介:杜双(1989-),女,硕士生,主要从事现代光学测试技术方面的研究。Email:sunny618xs@163.com

导师简介:王文生(1943-),男,教授,博士生导师,主要从事现代光学测试技术方面的研究。Email:wwsciom@163.com

## 0 引 言

在光学相关目标识别<sup>[1-2]</sup>过程中,由于背景复杂、目标多、噪声大,直接抑制了目标的探测和识别,体现为相关峰强度弱,甚至得不到相关点,无法正确辨别目标,故多目标动态测量<sup>[3]</sup>一直是待解决的关键技术之一。研究表明,为提高目标的识别率,在处理物面的同时,也必须将谱面的图像进行增强处理<sup>[4]</sup>,以实现多目标的探测和识别。

多目标探测和识别有许多方法,Alam 和 Karim 最早引入了基于条纹调节滤波的联合变换相关器<sup>[5-6]</sup>,它是用条纹调节滤波乘以修正的联合功率谱(联合功率谱减去纯景物的功率谱)。这种方法虽然可以产生很好的相关输出,但是对输入景物的噪声敏感,而且在输出面的中心仍然存在很强的零级项。为了使基于条纹调节滤波的联合变换相关器能适应复杂背景的目标识别,Huang 等人提出一种功率谱相减的实时联合变换相关器<sup>[7-8]</sup>作多目标检测,使用这种方法,输入面有两套联合图像,在第二套联合图像中,参考图像是对比度反转的。使用衍射光栅对这两套联合功率谱作相减处理,这种方法虽然能产生较好的相关输出和适应输入景物噪声的能力,但相关峰的强度和中央零级项同时被削弱。一些相关参考文献<sup>[9]</sup>中仍有大量滤波函数的提出,其基本思想是对原有算子的改进,这些算子均能有效抑制噪声。

文中提出在光电混合联合变换相关器中,应用高斯算子与拉普拉斯算子结合,对联合变换功率谱进行滤波和边缘检测处理,以实现多目标探测和识别。光电混合联合变换相关器比基于条纹调节滤波的联合变换相关器和功率谱相减的联合变换相关器输出的相关信号更好,具有光学信息处理的并行、大容量、高速度等优点,其只需要一个正透镜组便可以光速实现图像的二维傅里叶变换,避免了功率谱相减的联合变换相关器系统不稳定等问题。

利用高斯算子可改善拉普拉斯算子在边缘检测方面出现的噪声和伪边缘,并减少边缘模糊和弱化现象,对噪声有很好的抑制作用,通过把高斯算子和拉普拉斯算子相结合,先平滑噪声,再进行边缘检测,会在一定程度上减轻噪声点,增强相关峰的强度,提高抗噪声干扰的能力,从而提高对多目标识别的准确度。

## 1 光电联合变换相关器探测原理

联合变换相关器主要是根据衍射原理和透镜傅里叶变换的功能来实现输入图像的联合傅里叶变换。对于同时运动的两个飞机目标,应用普通的计算机方法是很难实时探测处理的,应用联合变换相关器却可以实现以光速并行运算的二维傅里叶变换,满足多目标实时处理的要求,在提取的目标图像与参考图像相同时,则其相关输出为最大值,相关峰强度最大,目标与模板的相关峰有利于笔者对目标的实时探测。

### 1.1 联合变换相关器相关识别原理

光学相关处理是光学信息处理的重要应用之一,它是用光学的方法通过探测两个函数(物体函数)的相似程度以取得希望得到的信息。利用光学相关的方法,可以从混乱的图像中找出所需要的目标,达到图像识别的目的。联合变换相关的主要特征是参考图像与目标图像同时输入光学运算系统,在第 1 次傅里叶变换平面上记录联合变换功率谱,经过第 2 次傅里叶变换后,获得一对相关输出。

设准直的相干单位振幅光入射到物体  $o(x, y)$  上,物体被写入电寻址液晶(EALCD),参考图像  $r(x-x_r, y-y_r)$  也写入 EALCD。如果忽略噪声,光学傅里叶变换系统的输入函数可以写作:

$$a(x, y) = o(x, y) + r(x - x_r, y - y_r) \quad (1)$$

输入函数在傅氏变换透镜的后焦平面上的联合傅里叶变换为:

$$A(f_x, f_y) = O(f_x, f_y) + R(f_x, f_y) \exp(-j2\pi f_x x_r) \exp(-j2\pi f_y y_r) \quad (2)$$

式中:  $O(f_x, f_y)$  和  $R(f_x, f_y)$  分别为  $o(x, y)$  和  $r(x, y)$  的傅里叶变换;  $A(f_x, f_y)$  为  $o(x, y)$  和  $r(x, y)$  的联合傅里叶谱,  $A(f_x, f_y)$  的平方称作联合变换功率谱(JTPS),用公式表示为:

$$I(f_x, f_y) = |A(f_x, f_y)|^2 = O(f_x, f_y)O^*(f_x, f_y) + R(f_x, f_y)R^*(f_x, f_y) + O^*(f_x, f_y)R(f_x, f_y)\exp(-j2\pi f_x x_r)\exp(-j2\pi f_y y_r) + O(f_x, f_y)R^*(f_x, f_y)\exp(-j2\pi f_x x_r)\exp(-j2\pi f_y y_r) \quad (3)$$

联合变换功率谱由平方律探测器 CCD 接收并输入到计算机再反馈到 EALCD,则可实现第二次傅里叶变换,进行相关探测:

$$O(x_1, y_1) = O(x_1, y_1) \otimes O^*(x_1, y_1) + r(x_1, y_1) \otimes r^*(x_1, y_1) + O^*(x_1, y_1) \otimes r(x_1, y_1) \times \delta(x_1 + x_r) \delta(y_1 + y_r) + O(x_1, y_1) \otimes r^*(x_1, y_1) \times \delta(x_1 - x_r) \delta(y_1 - y_r) \quad (4)$$

式中:  $\otimes$  表示相关运算;  $*$  表示共轭。公式中的前两项是自相关,两输出信号重叠在输出平面中心附近,

可称之为零级项,它们不是所要探测的信号。而是输出信号中最大的噪声信号。第三、第四项是互相关,为一级衍射项,正是笔者要寻求的相关输出信号。当物体与参考图像相同时,两互相关获得最大的相关峰,这时联合变换功率谱可以认为是两函数上对应的无数点对形成的杨氏条纹的相干叠加。杨氏条纹经过傅里叶变换后的衍射图包含 2 个亮斑,即: +1 级和 -1 级衍射及 0 级(直流)衍射光斑,这 2 个对称分布的亮斑即是相关峰。

### 1.2 联合变换相关器的实验装置

图 1 中给出光电混合实时联合变换相关器的示意图,在该装置中以半导体泵浦 YAG 倍频激光器作为光源,波长  $0.514 \mu\text{m}$ ,经衰减片 2,由显微物镜 3、针孔 4 和准直物镜 6 组成准直扩束系统,得到一束准直平行光,该平行光经半反半透镜 7 后,分别照射电寻址液晶 EALCD1 和 EALCD2。偏振片 5 的作用是使照明的激光光束的偏振方向与电寻址液晶的偏振方向一致。CCD1 实时接收待测的目标图像,CCD2 接收经 FTL1 变换后的功率谱,CCD3 接收经 FTL2 变换后的相关峰。联合变换相关的主要特征是将参考图像与目标图像同时输入光学运算系统。图 2 给出了小型化后的光电混合联合变换相关器实验装置。

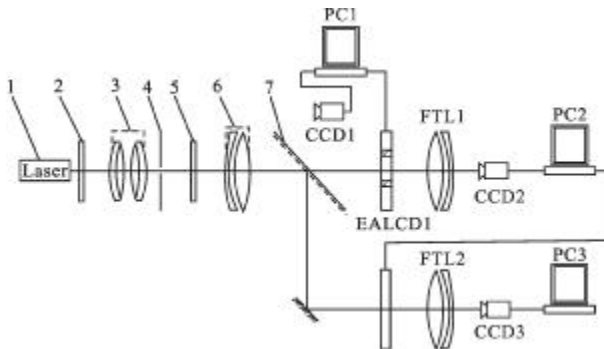


图 1 光电混合联合变换相关器的实验装置原理图

Fig.1 Experimental schematic diagram of HOJTC

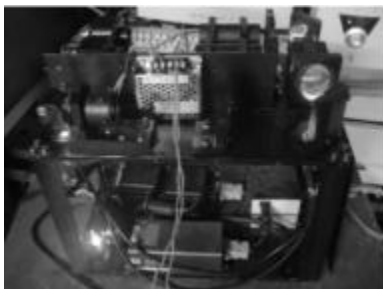


图 2 光电混合联合变换相关器小型化装置图

Fig.2 Miniaturized setup of HOJTC

## 2 高斯-拉普拉斯算子

目标和模板的联合变换功率谱图像的质量是决定联合变换相关器性能的重要因素,因此功率谱面信息的增强是联合变换相关器的关键技术。功率谱面的信息是参考模板与目标图像的干涉条纹(杨氏干涉条纹),但背景图像以及噪声频谱的影响降低了干涉条纹的对比度,因此消除和抑制干扰频谱的信息,增强模板与目标的干涉条纹对比度是功率谱处理的关键。

图像的边缘结构常常是模式识别中最重要的信息,可定义为图像中亮度的峰变点。图像边缘有很大的灰度变化,所以图像的一阶偏导数在边缘处有局部最大值或最小值,则二阶偏导数在边缘处会通过零点(由正到负或由负到正)。应用拉普拉斯算子在边缘处会产生一个陡峭的零交叉,其方向信息丢失,常产生双像素,对噪声有双倍加强作用,因此拉普拉斯算子很少直接用于边缘检测。如果把基于高斯算子的高斯平滑滤波器和基于拉普拉斯算子的拉普拉斯锐化滤波器结合了起来,因为图像中包含噪声,平滑和积分可以滤掉图像的噪声,消除噪声后再进行边缘检测,就会得到较好的效果。

高斯函数在连续空间可表示为:

$$G(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

在数字图像处理中,公式(5)的连续函数需要离散化,当高斯滤波器的窗口尺寸为  $n$  时,上式的离散形式可表示为:

$$G(x, y) = \sum_{x=x-m}^{x=x+m} \sum_{y=y-m}^{y=y+m} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

式中:  $m=(n-1)/2$ 。利用上述高斯函数和图像  $f(x, y)$  的卷积运算可实现目标图像的去噪,得到平滑图像  $I(x, y)$ :

$$I(x, y) = G(r) * f(x, y) \quad (7)$$

这一步实际上是一个低通滤波过程,抑制了部分噪声。

拉普拉斯算子是一个二阶微分算子( $\nabla^2$ ),用拉普拉斯算子来获取平滑图像  $I(x, y)$  的二阶方向导数图像  $M(x, y)$ :

$$M(x, y) = \nabla^2[I(x, y)] = \nabla^2[G(r) * f(x, y)] = [\nabla^2 G(x, y)] * f(x, y) \quad (8)$$

求取  $M(x,y)$  的零交叉点轨迹即可得到图像  $f(x,y)$  的边缘。公式(8)中的  $\nabla^2 G(x,y)$  即为高斯拉普拉斯算子,具有如下形式:

$$\nabla^2 G(x,y) = \frac{1}{4\sigma^4} \left( \frac{x^2+y^2}{2\sigma^2} - 1 \right) \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

拉普拉斯算子边缘检测就是估算拉普拉斯的输出,找出它的零交叉点即是边缘点。拉普拉斯算子有时找到的边缘是伪边缘,特别是图像灰度变化不大的区域。实际图像边缘往往出现在局部有较大波动的区域,鉴于这种情况,局部数据波动程度本身也作为边缘检测依据。由于噪声点对边缘检测有一定的影响,所以把高斯平滑滤波器和拉普拉斯锐化器结合起来,在进行边缘检测的同时平滑掉噪声,效果更好。

对于离散数字图像,高斯拉普拉斯算子通常可以用一个离散的高斯拉普拉斯模板近似,常用的一个高斯拉普拉斯算子模板为:

$$\begin{bmatrix} -2 & -4 & -4 & -4 & -2 \\ -4 & 0 & 8 & 0 & -4 \\ -4 & 8 & 24 & 8 & -4 \\ -4 & 0 & 8 & 0 & -4 \\ -2 & -4 & -4 & -4 & -2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

### 3 实验结果

为了验证高斯-拉普拉斯算子对图像功率谱处理的可行性,进行了大量的计算机模拟实验和光学实验,文中给出了两个飞机目标图像识别的实验结果。

图 3 是实际拍摄的两个飞机的图像,分别标注为目标 1 和目标 2,目标 1 和 2 相同,仅目标 2 相对目标 1 旋转  $3^\circ$ 。对于运动目标,采用动态模板,即把待识别的目标图像作为模板,与下一时刻的目标相关。在该系统中,采样速率为 30 帧/s,实验和理论计算表明,对于相对运动速度不超过 70 km (例如坦克),第一帧可与后续的第 2 帧至第 20 帧相关,这是因为在该时间内由运动产生的目标畸变不大。图 4 是目标与模板的联合图像。由于多目标探测的复杂性,在功率谱面处理的同时需要经过一定的物面处理,图 5 和图 6 即为经 Sobel 算子边缘提取的物面处理结果。



图 3 目标图像

Fig.3 Original image



图 4 目标与模板的联合图

Fig.4 Joint input images



图 5 边缘提取后的目标图像

Fig.5 Target image after edge extraction



图 6 边缘提取后的联合图像

Fig.6 Joint images after edge extraction

图 7 是未经高斯-拉普拉斯算子边缘检测的功率谱,图 8 是图 7 对应的边缘检测前的相关峰图像,光学实验中,文中分别计算了相关峰平均强度、相关峰尖锐度、光能效率等,实验结果在表 1 中列出。表中  $I_{AC}$  为相关峰的平均灰度值,FWHM 为自相关峰由最大强度降至半强度的宽度(半径差值),可反映相关峰的尖锐度, $I_{BC}$  为相关峰中心强度,光能效率  $I_{CC}$

定义为相关峰强度与输入平面的总能量之比,反应了系统的光能利用率,光能效率越高,相关峰能量越大。图 9 为经高斯-拉普拉斯算子边缘检测后的功率谱图像,图 10 为对处理后的功率谱进行光学实验得到的相关峰图像。其中 1 为目标 1 与模板的相关点,2 为目标 2 与模板的相关点。

表 1 几种方法光学实验结果比较

Tab.1 Optical experimental results comparison between several methods

	$I_{AC}$	FWHM	$I_{BC}$	$I_{CC}$
Classical	58.00	18.515	67.75	1.150%
LOG	118.76	4.107	247.50	5.258%
Sobel	94.13	6.129	170.78	2.727%
PSS	104.38	4.181	204.11	2.898%

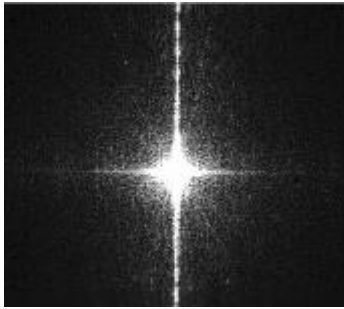


图 7 未处理的功率谱

Fig.7 Power spectrum before processing

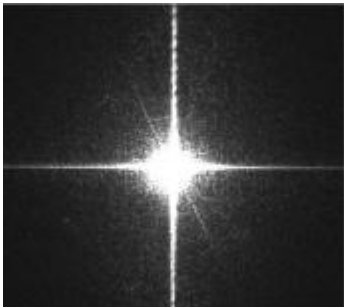


图 8 未处理的相关点

Fig.8 Correlation peaks before processing

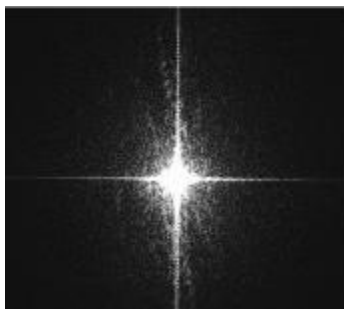


图 9 处理后的功率谱

Fig.9 Power spectrum after processing

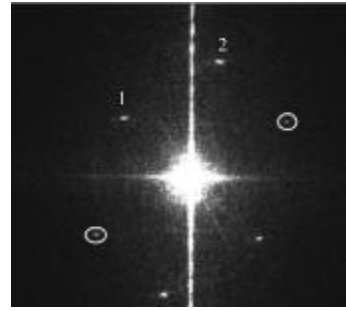


图 10 处理后的相关点

Fig.10 Correlation peaks after processing

表中,Classical 代表功率谱面未经处理得到的相关面实验数据,PSS 代表通过功率谱相减法得到的相关面实验数据。由表 1 可知,文中采用的 LOG 算子与其他处理方法相比,在相关峰强度  $I_{AC}$ 、相关峰尖锐度 FWHM、相关峰中心强度  $I_{BC}$  以及光能效率  $I_{CC}$  方面均有较大优势。未经过高斯-拉普拉斯算子处理过的功率谱图像上的杨氏干涉条纹对比度不高,相关峰的平均灰度值仅为 58.00,几乎无法识别,经过高斯-拉普拉斯算子处理的功率谱,其干涉条纹对比度高,中心区域光强得到抑制,杨氏干涉条纹光强得到增强,相关峰的平均灰度值为 118.76,其尖锐度得到提高,且处理后的相关峰的峰值强度达到 247.50,几乎达到最大灰度值。而由实验数据可以看出,经过 Sobel 算子和功率谱相减法处理得到的相关峰数据均不理想。

如果两个待识别的目标相近,也能产生一对相关点,如图 10 圆圈所示的相关峰即是目标 1 和 2 间的互相关。故在多目标识别中,如何通过相关点的位置区分开互相关也是多目标识别的关键技术之一。文中根据目标图像进入 CCD 视场的时间顺序来判读相对应的相关点。目标位置不同,进入 CCD 视场的时间顺序则不同,相关点则会按照目标出现的时间顺序依次显现,通过此方法即可判断目标的相对位置。

应用文中提出的方法可以实现多目标的识别。但需指出,相关识别算法是基于模板和待测目标图像的相似性,随着目标图像相对模板大小或旋转变化,相关点逐渐变暗。基于文中的方法,表 2 给出相关峰强度随目标图像相对模板的大小和旋转变化情况。表 2 表明,当目标图像相对模板大小变化 10%,角度旋转  $5^\circ$  时,相关峰的强度已降至 23(按 256 灰阶)。如果进一步增大目标图像的畸变,则相关峰的

强度与背景噪音散点的强度相当,故识别困难。

表 2 相关峰强度与模板旋转角度和大小变化的关系

Tab.2 Relationship between peak intensity with angle rotation and scale

Rotation angle/(°)	Scale	Intensity
1	93%	108
3	91%	74
5	90%	23

#### 4 结 论

文中在光电混合联合变换相关器中,提出应用高斯算子与拉普拉斯算子结合的新方法,有效地抑制了联合变换功率谱的背景噪声,实现了多目标探测和识别。通过对功率谱面的处理,增强了相关峰的亮度,提高联合变换相关器的识别率。大量的实验表明,将高斯算子与拉普拉斯算子相结合的方法运用到功率谱面的处理中,是实现光学相关多目标的有效方法之一。

#### 参 考 文 献:

- [1] Mao Jinzi, David Mould, Sriram Subramanian. Background subtraction for realtime tracking of a tennis ball [C]// VISAPP, 2007: 427-434.
- [2] Deng Hai, Braham Himed, Wicks Michael C. Image feature based space-time processing for ground moving target detection[C]//IEEE, 2006: 216-219.
- [3] Chen Fanghan, Wang Wensheng. Target recognition in clutter scene based on wavelet transform[J]. Optical Communications, 2009, 282: 523-526.
- [4] Alpana Bhagatji, Naveen K Nishchal, Arun K Gupta, et al. Extended fractional wavelet joint transform correlator [J]. Optical Communications, 2008, 281: 44-48.
- [5] Alam M S, Karim M A. Fringe-adjusted joint transform correlation[J]. Appl Opt, 1993, 32(23): 4344-4350.
- [6] Alam M S, Karim M A. Multiple target detection using a modified fringe adjusted joint transform correlator [J]. Opt Engng, 1994, 33(5): 522-527.
- [7] Huang Xianlie, Lai Hongkai. Multitarget detection using a real-time joint transform correlator with power spectrum subtraction [J]. Chinese Journal of Lasers, 1997, 24 (8): 745-750. (in Chinese)  
黄献烈, 赖虹凯. 使用功率谱相减的实时联合变换相关器作多目标检测[J]. 中国激光, 1997, 24(8): 745-750.
- [8] Wang Hongxia, Zhao Wei, Li Yuxin, Multi-object recognition using power spectrum optimized joint transform correlator[J]. Optical Technique, 2006, 32(2): 190-195. (in Chinese)  
王红霞, 赵玮, 李育新. 多目标识别的联合变换相关器的研究[J]. 光学技术, 2006, 32(2): 190-195.
- [9] Bao Zhankuo, Yang Yuzhen, Chen Yangzhou. An improved Gauss-Laplace zero-crossing traffic edge detection approach [J]. Microcomputer Information, 2006, 22(10-3): 252-306. (in Chinese)  
鲍占阔, 杨玉珍, 陈阳舟. 一种改善高斯拉普拉斯算子零交叉方法的车辆边缘检测[J]. 微计算机信息, 2006, 32(2): 190-195.