

功率谱处理技术在图像相关识别中的应用

孙红辉, 王红霞, 李爱君

火箭军工程大学, 陕西 西安

Email: redlightshh@163.com, redlightw@163.com

收稿日期: 2020年8月27日; 录用日期: 2020年9月8日; 发布日期: 2020年9月15日

摘 要

经典的联合变换相关(JTC)在相关面上存在较强和较宽的自相关峰, 而用以判断识别的互相关信号本身强度较弱且不够尖锐, 其互相关峰信噪比也相对较低。为了提高JTC相关识别性能, 本文从图像的频域处理入手, 通过对功率谱的放大处理来提高互相关峰的强度, 用高通滤波器来强化图像高频部分, 提高互相关峰的锐度。仿真计算结果表明, 对功率谱放大后再进行高通滤波处理, 两种方法的结合不仅增强了互相关信号的强度, 而且使互相关信号的信噪比得到明显提高, 从而进一步优化了联合变换相关系统的识别性能。

关键词

联合变换相关, 功率谱处理, 高通滤波

The Application of the Power Spectrum Processing Methods on Image Correlation Recognition

Honghui Sun, Hongxia Wang, Aijun Li

The Rocket Force University of Engineering, Xi'an Shaanxi

Email: redlightshh@163.com, redlightw@163.com

Received: Aug. 27th, 2020; accepted: Sep. 8th, 2020; published: Sep. 15th, 2020

Abstract

The auto-correlation peak is stronger and wider than the cross-correlation peak on the correlation plane of the classical joint transform correlation (JTC), and the cross-correlation peak which

is the signs for the judgment of image correlation recognition is weak and not sharp, and that the Signal to Noise Ratio (SNR) of it is lower also. In order to improve the property of the joint transform correlation, starting from the image frequency domain in the paper, the power spectrum amplification is used to enhance the intensity of the cross-correlation peak and the high-pass filter is used to enhance high-frequency signals of images to sharpen the cross-correlation peak. The simulation computer results show that the processing method of the power spectrum that is amplified and then filtered by the high-pass filter is feasible. The method not only enhances the intensity of the cross-correlation peak signals, but also improves the SNR of the cross-correlation signals substantially, so the property of the joint transform correlation are optimized further.

Keywords

Joint Transform Correlation, The Power Spectrum Processing, High-Pass Filter

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

经典的联合变换相关(joint transform correlation, JTC)在相关输出面上存在互相关信号本身强度较弱、不够尖锐且信噪比低的问题,为了提高JTC相关识别性能,对图像进行预处理是一种常用的提高图像识别能力的方法。图像的处理主要分为“空间域”技术和“频率域”技术两大类,“空间域”指图像平面自身,这类方法是对图像像素的直接处理为基础,而“频率域”处理技术是以修改图像的傅立叶变换谱为基础的[1]。比如,对相关识别性能影响明显的图像锐化处理,就是在图像的空间域通过空间微分来实现的,如基于一阶微分的梯度法和基于二阶微分的拉普拉斯算子等都能实现图像的锐化,但这种方法算法相对复杂,运算量较大,对于实时性要求高的识别系统是一个不利因素[2] [3] [4]。在“频率域”对图像也可进行相应的处理,图像傅立叶变换的频率分量与图像的空间特征直接相关,低频对应着图像中灰度级变化缓慢的区域,高频则对应着图像中灰度级变化较快的部分。长春理工大学的陈驰在光学相关图像增强技术研究中用拉普拉斯算子来增强功率谱,提高了条纹的对比度[5],军械研究所的张勇,方兴桥等人基于功率谱相减实现无零级衍射的联合变换相关器,用来去除零级相关峰的干扰[6]。图像中常用的特征信息,如边缘及突变的部分主要与高频分量有关,采用高通滤波处理就可实现图像的锐化处理效果,而且算法相对简单,实时性好[2] [7]。本文主要从“频率域”对联合变换功率谱进行优化处理,采用功率谱放大和高通滤波处理,并将两种方法结合,以达到提高联合变换相关识别性能的目的。

2. 功率谱放大处理

在联合变换相关识别系统中,将目标图像 $f(x, y)$ 与参考图像 $g(x, y)$ 和并排放置,并使二者中心相距 $2a$, 作为输入的光场信号,如公式(1)所示[1] [8]:

$$c(x_1, y_1) = f(x_1 + a, y_1) + g(x_1 - a, y_1) \quad (1)$$

经傅里叶透镜变换后,可得到其联合频谱:

$$C(u, v) = F(u, v) \exp(j2\pi au) + G(u, v) \exp(-j2\pi au) \quad (2)$$

(2)式中 (u, v) 为空间频率坐标, $u = x_2/\lambda f$, $v = y_2/\lambda f$, f 为傅里叶透镜焦距, λ 为光波波长,而 $G(u, v)$ 、

$F(u,v)$ 、 $C(u,v)$ 分别是 $g(x,y)$ 、 $f(x,y)$ 和 $c(x,y)$ 的傅里叶谱。

其联合变换功率谱为:

$$I(u,v) = |C(u,v)|^2 = [F^2(u,v) + G^2(u,v)] + F^*(u,v)G(u,v)\exp(-j4\pi au) + F(u,v)G^*(u,v)\exp(j4\pi au) \quad (3)$$

上式的功率谱再进行一次傅里叶变换, 得到相关输出光场为:

$$c(x_3, y_3) = [f(x_3, y_3) \otimes f(x_3, y_3) + g(x_3, y_3) \otimes g(x_3, y_3)] + f(x_3, y_3) \otimes g(x_3, y_3) * \delta(x_3 + 2a, y_3) + g(x_3, y_3) \otimes f(x_3, y_3) * \delta(x_3 - 2a, y_3) \quad (4)$$

式中: \otimes 表示相关运算, $*$ 表示卷积, 式中第一项是目标图像 $f(x,y)$ 和参考图像 $h(x,y)$ 的自相关, 为零级项。第二、第三项是目标图像和参考图像的互相关, 它们的中心分别位于输出平面的 $(-2a, 0)$ 和 $(2a, 0)$ 处, 与中央零级分离, 为一级衍射项, 这正是需要探测的一对互相关信号, 这对信号的性能是判断目标图像与参考图像是否相似的重要依据。

把式(3)所示的功率谱放大 n 倍, 则功率谱变为:

$$I'(u,v) = |G(u/n, v/n)|^2 = F^2(u/n, v/n) + G^2(u/n, v/n) + F^*(u/n, v/n)G(u/n, v/n)\exp(-j4\pi au/n) + F(u/n, v/n)G^*(u/n, v/n)\exp(j4\pi au/n) \quad (5)$$

对功率谱再进行一次傅里叶变换, 在输出面上得到的光场分布为:

$$c'(x_3, y_3) = n^2 [f(nx_3, ny_3) \otimes f(nx_3, ny_3) + g(nx_3, ny_3) \otimes g(nx_3, ny_3)] + n^2 f(nx_3, ny_3) \otimes g(nx_3, ny_3) * \delta(nx_3 + 2a, ny_3) + n^2 g(nx_3, ny_3) \otimes f(nx_3, ny_3) * \delta(nx_3 - 2a, ny_3) \quad (6)$$

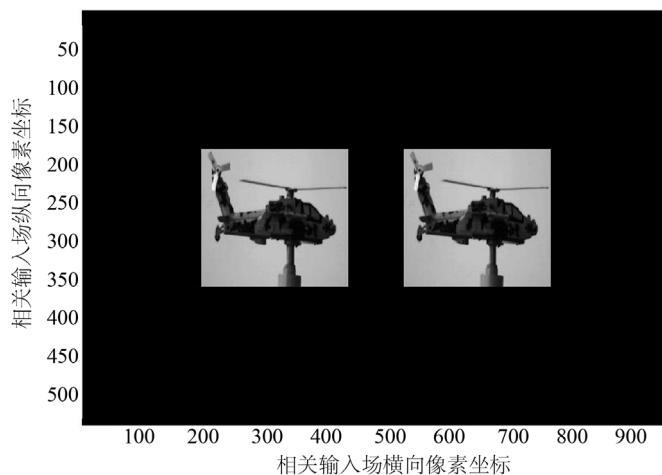
比较式(4)和式(6)的光场分布, 显然后者的分布范围减小了 n 倍, (6)式中第二、第三项这一对互相关中心分别位于输出平面的 $(-2a/n, 0)$ 和 $(2a/n, 0)$ 处, 间距减小了 n 倍。互相关分布范围的减小, 势必增强其强度和锐度, 这样更容易实现互相关信号的探测与识别。

为了定量地比较互相关峰输出的特性, 本文主要采用以下三个参数作评价标准: (1) 相关峰强度(互相关信号的最大强度值); (2) 峰值半宽度(相关峰值由最大值下降至一半时的宽度, 即相关峰像素个数); (3) 信噪比 SNR (互相关峰强度与相关面小于相关峰强度 1/4 的信号平均强度之比) [2]。

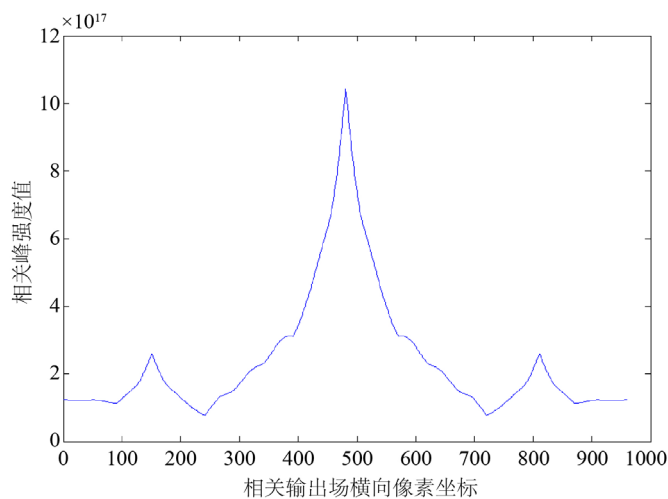
以 CCD 实际拍摄的图像 J1 进行功率谱放大处理, 进而再相关识别计算分析。图像 J1 大小为 360×480 像素, 图像相距 330 像素 ($2a = 330$) 并排输入相关器, 如图 1(a) 所示, 图 1(b) 是功率谱未处理的相关输出剖面图, 图 1(c)~(e) 是 n 分别取 1.2、1.6、2.0 倍功率谱放大处理后的相关输出剖面图, 其相关技术参数如表 1 所示。

以上计算分析表明, 功率谱放大后得到的一对互相关信号变得更为锐亮, 要优于原始功率谱直接输出的互相关信号, 相关峰值由 $2.6074e+017$ 提高到放大 2.0 倍的 $1.6470e+018$ 。但是从图 1(e) 可以看出, 功率谱放大 2 倍时, 虽然互相关信号改善了, 相关峰值与信噪比都有所提高, 但同时相关面上的相关信号都集中加强了, 并且互相关峰距离其中心自相关峰越来越近。图中间自相关峰中心横坐标为 480, 右边互相关峰坐标由原来 810 移近至 645, 互相关峰与中间峰的间距由 330 ($2a$) 减少至 165 (a), 功率谱放大 2 倍, 其间距也变为原来的 1/2, 这与理论公式是相一致的。但是当互相关峰离中间自相关峰越近, 受中

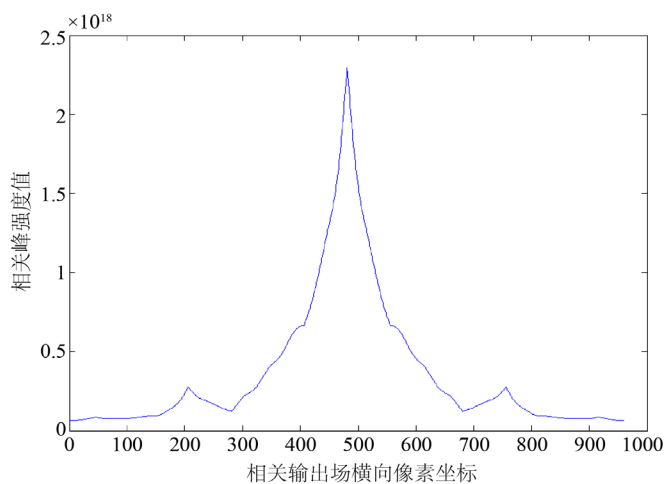
间峰信号影响，有时容易导致误判，所以功率谱放大倍数不能太高。功率谱最佳放大倍数与输入图像尺寸大小，两图像中心间距都有关系，一般 n 取值在 1.2~2.0 之间比较合适。



(a) 输入图像 J1



(b) 直接相关输出图



(c) 1.2 倍放大

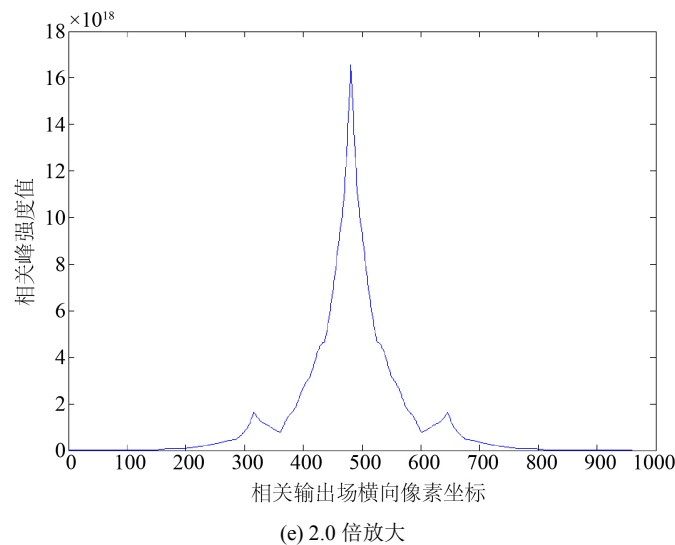
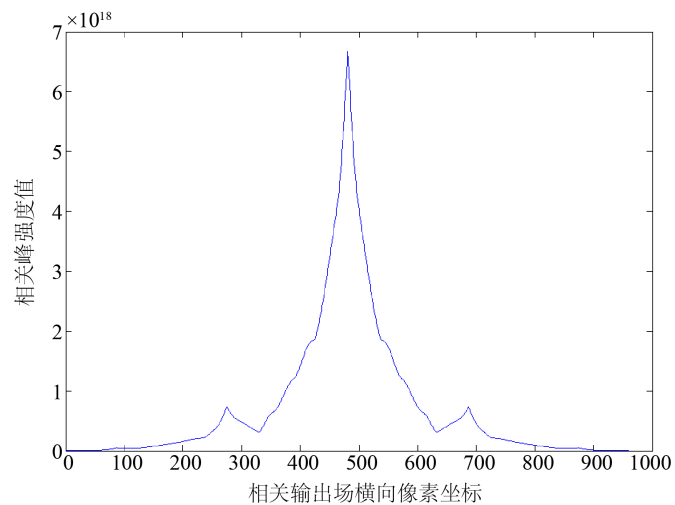


Figure 1. The JTC image of J1 by the power spectrum amplification
图 1. 图像 J1 功率谱放大处理后联合变换相关图

Table 1. The correlation parameters of J1 by the power spectrum amplification
表 1. 图像 J1 功率谱放大处理后联合变换相关参数表

功率谱放大倍数	互相关峰值 I	峰值半宽度	信噪比 SNR	右相关峰横坐标
未放大处理	2.6074e+017	2731	5.0224	810
$n = 1.2$	2.7495e+017	2232	5.9122	755
$n = 1.6$	7.3068e+017	1184	7.7310	686
$n = 2.0$	1.6470e+018	853	8.6965	645

理论分析和实验结果表明,对功率谱放大适当倍数,可以压缩相关输出面上光场分布范围,不仅能降低对接收探测器光敏面尺寸的要求,同时还增强了互相关信号的锐度和亮度,更容易实现对目标的探测识别。但是,由相关输出也可看出,功率谱放大后,互相关信号有所增强,然后,其能量更为集中的中间自相关峰信号增强则更为明显,也就是说互相关信号的相对强度实际是降低的,并且两相关峰间距

变小,这些都对目标相关识别是不利的。为此,在功率谱放大处理的基础上,还需要进行高通滤波处理,以减弱中间自相关峰信号的影响,并进一步提高互相关峰信号的信噪比。

在实验系统中,相关光场接收器 CCD 的光敏面横向尺寸为 L_{CCD} ,把相关面上的信息全部记录下来,根据公式(4),需要 $L_{\text{CCD}} \geq 4a + L_1 + L_2$ (注:用 L_1 、 L_2 分别表示目标图像和参考图像的宽度,二者可相等) [9] [10], CCD 光敏面尺寸不能小于此要求。对功率谱放大适当倍数,可以压缩相关输出面上光场分布范围,当处理较大宽度的图像时,接收器光敏面尺寸略小于相关要求的 CCD 也可以接收到完全的输出光场;功率谱放大还增强了互相关信号的锐度和亮度,更容易实现对目标的探测识别。但是,由相关输出也可看出,功率谱放大后,互相关信号有所增强,其能量更为集中的中间自相关峰信号增强则更为明显,也就是说互相关信号的相对强度实际是降低的,并且两相关峰间距变小,这些都对目标相关识别是不利的。为此,在功率谱放大处理的基础上,还需要进行高通滤波处理,以减弱中间自相关峰的影响,并进一步提高互相关峰信号的信噪比。

3. 功率谱的高通滤波处理

图像傅立叶变换的频率分量中低频对应着图像中灰度级变化缓慢的区域,高频则对应着灰度级变化较快的部分,当减少零频和低频成份时,根据相关的物理意义,这将会使相关亮点的能量更加集中,相关运算产生的相关峰更为尖锐[1] [7]。考虑到相关峰主要由功率谱中的高频信号决定,而指数函数具有抑制低频、增强高频的作用,因此,用指数滤波器 $H(u,v)$ 对功率谱作高通滤波处理,以抑制功率谱中的低频成份,增强高频成份,就可以实现锐化相关峰特性的目的。

根据频域滤波模型 $G(u,v) = F(u,v)H(u,v)$, 其中 $F(u,v)$ 为输入图像的傅里叶频谱, $H(u,v)$ 为滤波器传递函数; $G(u,v)$ 为滤波后输出结果。 m 阶截止频率为 D_0 的指数滤波函数为:

$$H(u,v) = \exp \left[- \left(\frac{D_0}{\sqrt{u^2 + v^2}} \right)^m \right] \quad (7)$$

其中: $D(u,v) = \sqrt{(u-M/2)^2 + (v-N/2)^2}$, 式中 m 控制着传递函数的增长率,通常取 $m=2$ 。由公式(7)可知, $F(u,v)$ 中的低频(小于 D_0)成份,因乘上一个远小于 1 的 $H(u,v)$ 值而被衰减,而高频成分却被乘以一个接近于 1 的 $H(u,v)$ 值而保留。对比计算表明,指数高通滤波器得到的结果比广泛应用的巴特沃斯滤波器更为光滑, $m=2$ 时称为 2 阶指数高通滤波器,2 阶指数高通滤波器也是常用的高通滤波器。

对图像 J1 先进行指数高通滤波处理后,再相关识别,分别选取截止频率 D_0 为 10、15、20 的 2 阶指数滤波器对图像进行处理,其相关输出结果如图 2(a)~(c)所示,其相关技术参数如表 2 所示。

计算分析表明,截止频率的选择与图像的频谱分布有很大的关系,截止频率越大,图像之间更多的比较高频细节的相关情况,可有效提高相关峰值半宽度和信噪比特性,峰值半宽度由原来的 2731 减小为 19,信噪比 SNR 由原来的 5.0224 提升为 89.9783,这使得互相关峰更加细锐,并且互相关峰与中间自相关峰分离明显,从而更易于判断和识别相关目标。但是,由于滤波去除了低频信息,所以互相关峰值强度也下降明显,由原来的 $2.6074e+017$ 降低为 $1.7286e+015$,相关峰值强度的降低,使得后续的探测与识别易受噪声干扰,实际实验中,通常需要调节增大光强输出功率来解决[9]。因此在应用中,截止频率不能取的过高,以免互相关峰强度太弱,进而难以被接收器 CCD 有效识别。

4. 功率谱联合处理相关识别

基于以上的分析可知,对于功率谱的放大处理,可以有效地降低相关峰接收探测器光敏面尺寸的要求,同时还增强了互相关信号的强度,但是峰值半宽度和信噪比的特性提升不明显;而对功率谱的指数

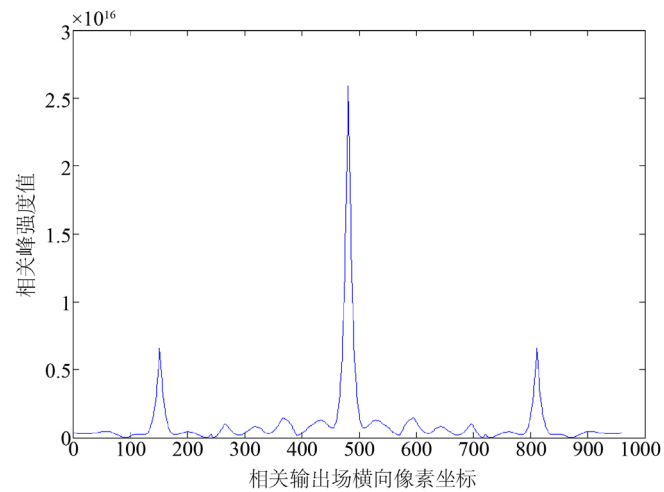
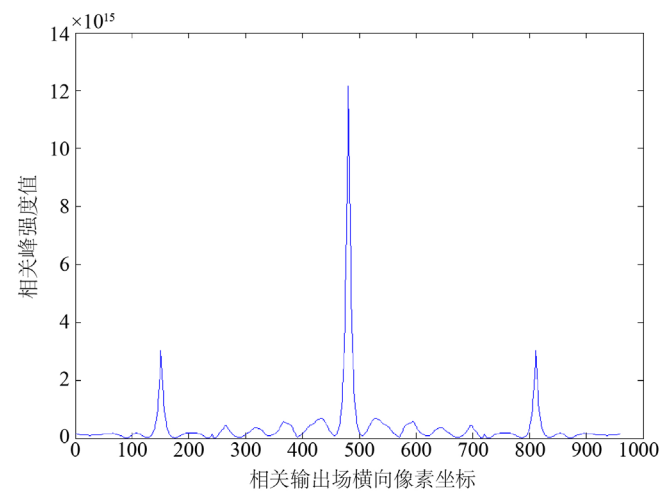
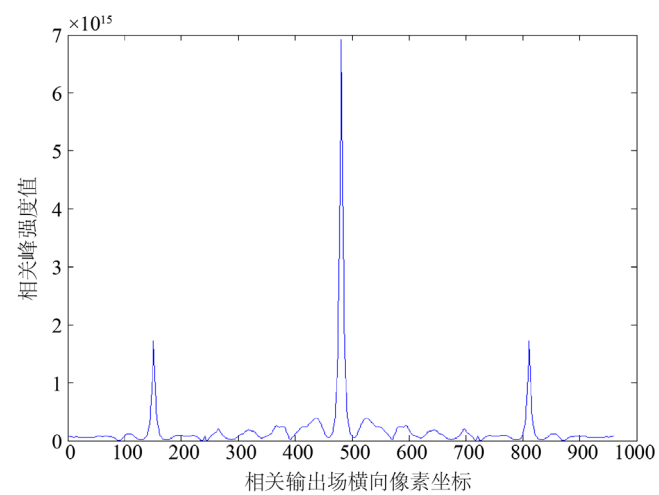
(a) $D_0 = 10$ 相关峰剖面图(b) $D_0 = 15$ 相关峰剖面图(c) $D_0 = 20$ 相关峰剖面图

Figure 2. The JTC image of J1 by exponential high-pass filter
图 2. 图像 J1 功率谱指数高通滤波后的联合变换相关图

Table 2. The correlation parameters of J1 by exponential high-pass filter
表 2. 图像 J1 功率谱指数高通滤波处理后联合变换相关参数表

截止频率	互相关峰值 I	峰值半宽度	信噪比 SNR
未滤波处理	2.6074e+017	2731	5.0224
$D_0 = 10$	6.6210e+015	59	49.5221
$D_0 = 15$	3.0364e+015	27	68.1815
$D_0 = 20$	1.7286e+015	19	89.9783

高通滤波处理，使自相关峰与互相关峰有效区分，对互相关峰信号的峰值半宽度和信噪比的特性提升十分明显，但互相关信号强度的降低是其不利因素。综合以上分析，本文提出将两种方法结合起来，取长补短，先用功率谱放大处理增强互相关信号的强度，再对功率谱进行指数滤波处理提高信号的峰值半宽度和信噪比特性，从而有效提高联变换相关识别性能，也有效降低了相关峰接收探测器光敏面尺寸及响应阈值灵敏度的要求。

应根据具体识别图像的频域特征来分析确定功率谱放大的倍数及高通指数滤波器相关参数的选取，对于图像 J1 来讲，我们期望相关峰值半宽度在 20~50 之间(注意：峰值半宽度也不能太小，如果太小，易受到噪声信号干扰，也不易被检测到)，信噪比 $SNR > 40$ ，同时保证互相关峰值强度在探测器的响应阈值内。在实验系统中，我们采用的接收器 CCD 为德国 AVT 生产的 Prosilica GT1910，传感器尺寸为 2/3 英寸，尺寸较小。经分析计算，功率谱放大倍数取 $n = 1.6$ ，指数高通滤波处理中，选择参数为 $m = 2$ ，截止频率 $D_0 = 15$ ，则实验系统中 CCD 可满足相关要求。相关输出结果如图 3 所示，其相关技术参数对比表如表 3 所示。由表 3 中相关参数对比可以看出，经过功率谱放大及指数滤波处理后，相比于单纯的功率谱放大处理来说，其峰值半宽度由 1184 变为 22，信噪比提高明显，由 7.7310 提高为 95.9568；相对于单纯的指数滤波处理来说，相关峰强度由 $3.0364e+015$ 提高为 $1.3144e+016$ ，在实验中基本不需要再调节增强光强输出功率了，且峰值半宽度和信噪比特性也进一步提高。计算结果及实际实验都表明：功率谱放大及高通滤波处理的结合，即保证了互相关峰的强度又有效提升了峰值半宽度及信噪比性能，对于联合变换相关识别性能的优化是有效的和可行的。

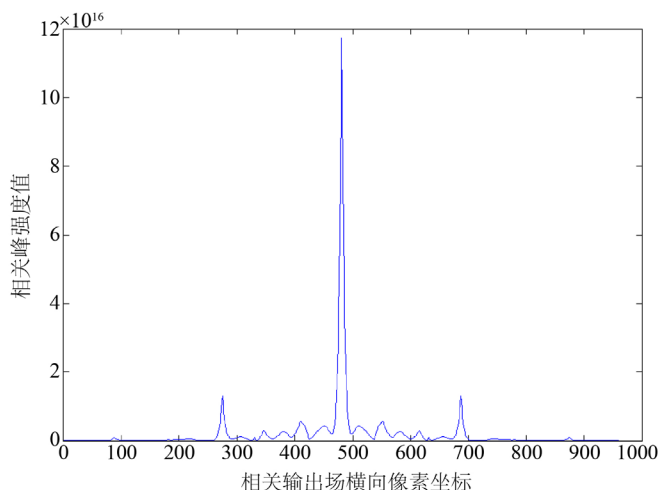


Figure 3. The JTC image of J1 by the power spectrum 1.6 times amplification and exponential high-pass filter ($m = 2; D_0 = 15$)

图 3. 图像 J1 功率谱放大 1.6 倍与指数滤波 ($m = 2; D_0 = 15$) 后的联合变换相关图

Table 3. The correlation parameters of J1 by the power spectrum amplification and exponential high-pass filter
表 3. 图像 J1 功率谱放大及滤波处理后联合变换相关参数表

功率谱处理方法	互相关峰值 I	峰值半宽度	信噪比 SNR
未进行处理	2.6074e+017	2731	5.0224
功率谱放大 1.6 倍处理	7.3068e+017	1184	7.7310
指数滤波处理($m = 2; D_0 = 15$)	3.0364e+015	27	68.1815
功率谱放大 1.6 倍与指数滤波 ($m = 2; D_0 = 15$)结合处理	1.3144e+016	22	85.9568

5. 结论

由于经典的联合变换相关(JTC)在相关输出面上存在互相关信号本身强度较弱、不够尖锐且信噪比低的问题,在实际系统中的识别有一定的困难,为了提高 JTC 相关识别性能,将功率谱进行放大处理及指数高通滤波处理,这两种功率谱处理方法的结合,取长补短,基于实际图像选取合适大小的技术参数,通过软件算法的处理,一方面提高了互相关峰的强度、峰值半宽度及信噪比性能,使得实验中接收器 CCD 更易于探测到互相关信号,避免了由于滤波处理所造成的峰值强度过低的问题;另一方面,当处理宽度相对较大的图像时,功率谱放大后,接收器 CCD 也可以探测到完全的光场输出,有效降低了接收器 CCD 光敏面尺寸要求。计算及实验表明:功率谱处理对于实际实验中的有效探测识别具有重要作用,这对于联合变换相关识别性能的优化及实际应用都具有重要的理论价值和实践意义。

参考文献

- [1] 宋菲君. 近代光学信息处理[M]. 北京: 北京大学出版社, 1998.
- [2] Wang, H.X., Ma, J., Sun, H.H., *et al.* (2016) Experimental Research on Photoelectric Hybrid Image Recognition. *Journal of Applied Optics*, **37**, 1-5.
- [3] Watanabe, E. and Kodate, K. (2005) Implementation of High-Speed Face Recognition System That Uses an Optical Parallel Correlator. *Applied Optics*, **44**, 666-676. <https://doi.org/10.1364/AO.44.000666>
- [4] 徐德芹, 盛朝霞, 等. 自关联算法在光学相关识别中的应用[J]. 天津技术师范大学学报, 2018, 28(1): 44-46.
- [5] 陈驰. 光学相关图像增强技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2012: 30-37.
- [6] 张勇, 方兴桥, 刘克功, 武红, 等. 基于功率谱相减实现无零级衍射的联合变换相关器[J]. 光学技术, 2017, 33(6): 807-809.
- [7] Qian, Y.X., Li, Y., Shao, J. and Miao, H. (2011) Real-Time Image Stabilization for Arbitrary Motion Blurred Image Based on Opto-Electronic Hybrid Joint Transform Correlator. *Optics Express*, **19**, 10762-10769. <https://doi.org/10.1364/OE.19.010762>
- [8] Kumar, D. and Nishchal, N.K. (2015) Three-Dimensional Object Recognition Using Joint Fractional Fourier Transform Correlators with the Help of Digital Fresnel Holography. *Optik*, **126**, 2690-2695. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.06.068>
- [9] 王红霞, 孙红辉, 赵选科, 等. 实时联合变换相关图像识别系统的设计[J]. 应用物理, 2019, 9(7): 348-355.
- [10] 文云. 提高目标联合变换相关识别性能研究[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 集美大学, 2016: 8-10.