

# 匹配滤波识别相关峰的分析与实验判别

周 亮<sup>1,2</sup> 喻 珺<sup>1,2</sup> 杨 拓<sup>1,2</sup> 朱腾飞<sup>1,2</sup> 李雄超<sup>1,2</sup> 邹 阳<sup>1,2</sup>

唐少拓<sup>1,2</sup> 罗统政<sup>1,2</sup> 程冠晓<sup>1,2</sup> 徐 平<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>深圳大学电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060

<sup>2</sup>深圳大学微纳光电子技术研究所, 广东 深圳 518060

**摘要** 能否输出相关峰是相关器判定目标真伪的主要方式,但其元件调节精准度不高时,容易对相关峰产生误判。基于匹配滤波相关识别器,从理论上分析了相关峰产生误判的 3 种可能,重点对相关信号的强度判别进行了理论和实验研究,针对这 3 种可能产生误判的情况,分别从实验结果的相关峰阈值强度、形态、输入图像旋转方面探讨真伪相关峰的判别,为相关峰的判别提供实验参考。

**关键词** 信号处理; 相关器; 匹配滤波; 相关峰

**中图分类号** TN206 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0907001

## Analysis and Experimental Determination for Matched Filtering Recognition of Correlation Peak

Zhou Liang<sup>1,2</sup> Yu Jun<sup>1,2</sup> Yang Tuo<sup>1,2</sup> Zhu Tengfei<sup>1,2</sup> Li Xiongchao<sup>1,2</sup> Zou Yang<sup>1,2</sup>

Tang Shaotuo<sup>1,2</sup> Luo Tongzheng<sup>1,2</sup> Chen Guanxiao<sup>1,2</sup> Xu Ping<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

<sup>2</sup>Institute of Micro-Nano Photoelectron Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

**Abstract** Whether correlators can output correlation peak is the main way to determine the target authenticity of correlators. However, it is prone to misjudgment when the accuracy of the components adjustment is not high enough. Based on the matched filtering correlators, we make theoretical analysis of three cases about the misjudgment of the correlation peaks. We give special emphasis to the theoretical and experimental study on correlation signal strength discrimination. Considering the three cases about the misjudgment of the correlation peaks, we explore the judgment of correlation peaks from the threshold intensity and the form of the correlation peaks, and the angle of rotation of the input image, which provide reference for experimental determination of the correlation peak.

**Key words** signal processing; correlators; matched filtering; correlation peaks

**OCIS codes** 070.4550; 050.1380; 070.6120

## 1 引 言

光学相关器自诞生至今已经 50 余年,主要有匹配滤波相关器(VLC)和联合变换相关器(JTC)两种结构<sup>[1-4]</sup>,由最初的  $4f$  系统发展到  $2f$  系统<sup>[5-6]</sup>;光学相关器的滤波算法也得到广泛研究,研究者们提出了最小方差综合鉴别函数(MUVDF)、最大平均相关能量(MACE)、最大平均相关高度(MACH)、优化折中综合鉴别函数(OTSDF)<sup>[7-11]</sup>等一系列滤波算法。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

**收稿日期:** 2016-02-24; **收到修改稿日期:** 2016-06-01

**基金项目:** 国家自然科学基金(61275167)、深圳市知识创新计划重点项目(JCYJ20140418095735591, JCYJ20130329103020637, JC200903120023A)

**作者简介:** 周 亮(1990—),男,硕士研究生,主要从事光信息处理方面的研究。E-mail: 631170589@qq.com

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

E-mail: xuping@szu.edu.cn(通信联系人)

都得到了较大的发展<sup>[1-19]</sup>,光学相关器通过能否输出相关峰来判定识别结果,但在相关峰真伪判别方面,至今没有统一的标准或是令人信服的判定依据,文献[12]定义了相关峰的一些指标,但其只是针对真相关峰的目标评价,并没有给出真假相关峰的判别标准。

匹配滤波相关识别器在相关峰的亮度以及识别效果上具有较大优势,但其实验调节需要很高的精准度,对相关峰的判别易产生误判。本文基于匹配滤波相关识别器和 MACH 算法得到的滤波器,分别从相关峰亮度、形态、旋转角度等方面探讨真伪相关峰的判别。

## 2 匹配滤波相关识别器相关峰误判原因

### 2.1 匹配滤波相关识别的误判原因

光学傅里叶变换是光学信息处理的基础,相关器的相关识别也是基于透镜的傅里叶变换性质<sup>[13]</sup>。利用匹配滤波器相关识别器识别输入目标时,在观测面上可以得到相关输出结果,传统光学相关器对相关输出结果真伪的判定方法通常是探测相关峰一点的光强或者周围很小邻域内的平均光强,然后直接比较各个相关峰的数值大小来决定输入目标与参考目标的相似程度,同时设定一个阈值作为拒识的标准。这种判定标准虽然简单,但存在明显的缺陷。

当输入的真目标的光能量很低时,根据能量守恒,观测面上探测到的相关识别结果光能量也会很低,导致相关峰不尖锐,甚至低于设定的阈值,出现误判;在实际操作中,由于背景噪声和实验器材对准精度的影响,会产生噪声,如果降低相关峰的阈值标准,有可能将噪声判定为相关峰。其次,实验中使用电荷耦合器件(CCD)接收相关输出结果,如果 CCD 的阈值较低,容易饱和,导致 CCD 面接收到的相关峰与噪声区别不大,降低识别效果的准确性。此外,在识别真目标时,相关输出结果中伴随大量噪声,如何在含有大量噪声的相关输出面上快速有效地判断出相关峰,这也是需要解决的问题。

### 2.2 相关峰的评价指标

针对相关峰的质量问题,其评价指标函数的设定有助于评价输入输出图像的相关程度。目前,相关峰评价函数的研究主要是相关峰值强度(CPI)评价指标。CPI 定义为相关峰的最高强度值  $I_0$ 。它直接反映了目标图像与参考图像相关程度的高低,是实验上评价相关峰效度最重要的指标。在某些应用里,CPI 直接被用作相关峰效度判断的阈值,但 CPI 易受图像的灰度、尺度变化以及照度的影响,因此,CPI 不能作为相关峰效度判断的唯一指标,还需与其他判断方法结合使用。图 1 为典型的相关峰。

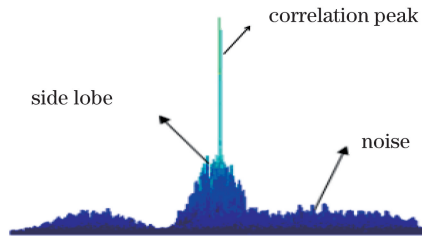


图 1 典型的相关峰 X-Z 平面视图

Fig. 1 X-Z planar view of a typical correlation peak

#### 1) 峰值-相关能量比(PCE)<sup>[15]</sup>

PCE 主要是衡量相关峰在整个相关面上的能量比值,可认为是反映图像的相似程度,定义为

$$R_{\text{PCE}} = \frac{I_{\text{peak}}}{E_c}, \quad (1)$$

式中  $E_c$  为整个相关面上的总能量,  $I_{\text{peak}}$  为相关能量值。  $I_{\text{peak}}$  值越大,  $R_{\text{PCE}}$  越大,反映为相关峰能量越高;反之,  $I_{\text{peak}}$  值越小,  $R_{\text{PCE}}$  越小,反映为相关峰能量越低。

#### 2) 峰值旁瓣比(PSLR)<sup>[16]</sup>

峰值旁瓣比反映相关峰周围能量的分布概率,定义为

$$R_{\text{PSLR}} = \frac{I_{\text{peak}} - I_{\mu}}{I_{\sigma}}, \quad (2)$$

式中  $I_{\text{peak}}$  为相关峰周围一定区域里的能量值,  $I_{\mu}$  为整个相关面上总能量的平均值,  $I_{\sigma}$  为相关面上的均方根值。当  $I_{\text{peak}}$  越大时,  $R_{\text{PSLR}}$  越大, 反之, 则越小。  $R_{\text{PSLR}}$  值大, 反映了相关峰的能量高, 噪声小, 相关峰的质量好。

### 3 相关峰的判别

匹配滤波相关识别器的实验过程中存在着真伪相关峰判定问题, 尤其是在复杂背景光情况下。针对匹配滤波相关识别器, 基于 MACH 算法产生的滤波器, 结合实验结果, 重点探讨相关峰强度判别, 并总结出以下相关峰判定方法。

#### 3.1 实验光路系统结构

实验光路系统结构如图 2 所示, 激光发出的光经过准直扩束系统后, 通过反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  的反射以一定的斜入射角度入射到输入面空间光调制器 SLM1; 携带物图像信息的光通过反射式的透镜 1 傅里叶变换在滤波面空间光调制器 SLM2 处形成物频谱; 物频谱与加载在 SLM2 上的滤波器匹配滤波后, 再经过透镜 2 的傅里叶变换, 在 CCD 输出面接收图像和滤波器图像的相关运算结果即为相关峰。光线在系统中是折反式传播, 空间光调制器正常工作要求输入和输出的光是特定方向的偏振光, 因此在 SLM 输入和输出时要加入偏振片,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  为偏振片。

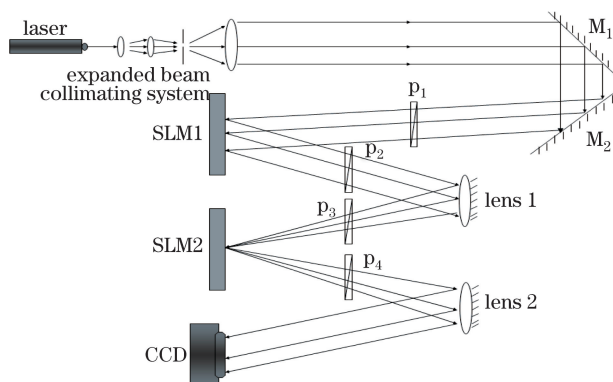


图 2 光路系统结构图

Fig. 2 Structure of optical system

搭建的光学相关器实验光路如图 3 所示, 系统采用 632.8 nm 的氦氖激光光源; 两个空间光调制器均是反射式电寻址 SLM, 输入面 SLM1 为振幅型, 工作液晶面像素矩阵为 1080 pixel × 768 pixel, 像素单元大小为  $p_1 = 12 \mu\text{m}$ , 滤波面 SLM2 为纯相位型, 像素数为 1920 pixel × 1080 pixel, 像素大小为  $p_2 = 8 \mu\text{m}$ ; CCD 像素数为 2454 pixel × 2056 pixel, 像素大小为  $p_3 = 3.45 \mu\text{m}$ ; 两个反射式的傅里叶变换透镜焦距为  $f = 200 \text{ mm}$ 。

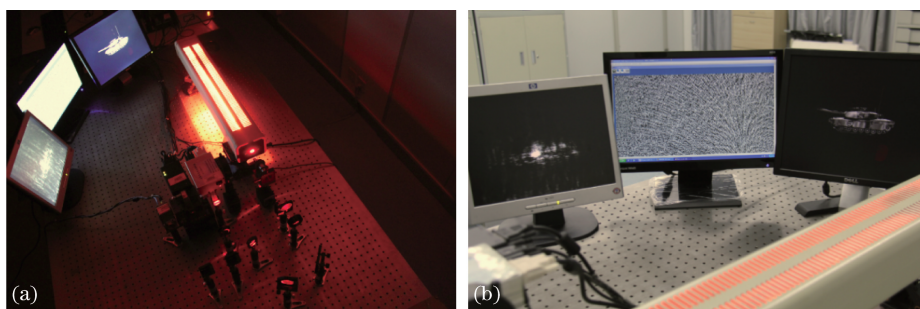


图 3 实验光路装置图。(a) 实验光路图; (b) 两个 SLM 上加载图像及 CCD 接受结果

Fig. 3 Experimental setup. (a) Light path of experimental; (b) image loaded on two SLMs and results of CCD received

#### 3.2 相关峰阈值强度判别

由相关峰原理可知, 输出面上的函数为  $\delta$  函数, 其物理含义为一个高亮度的点。实验操作中, 由于背景噪声和调节失配等因素, 在输出面上可能不只一个亮点, 而是伴随着一片噪声, 如图 4 所示, 得到的输出结果为  $I_0 = 255$ ,  $R_{\text{PCE}} = 0.52987$ ,  $R_{\text{PSLR}} = 0.792135$ 。

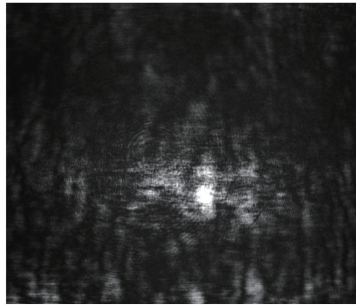


图 4 CCD 探测到的相关峰

Fig. 4 Detected correlation peaks of CCD

相关峰的出现是实现相关的重要标识之一,图 4 中相关峰周围出现不同亮度的光斑,中心圆点的亮度明显比其他光斑都高,直接观察光强则认为这是相关峰,而其他较弱亮点为噪声。在实验结果的后期数据处理过程中,相关峰阈值强度判别法是相关峰的判别最重要的方法,即给 CCD 设定初始阈值强度,屏蔽接收光强低于初始阈值的信号。当 CPI 达到或超过阈值时,则认为是相关峰。图 4 所展示的是 CCD 接收的光信号在不同阈值下的相关峰,设定 CCD 的灰度阈值,可准确判断相关峰,如图 5 所示。



图 5 CCD 不同阈值下探测到的光信号。(a) CCD 灰度阈值为 25 level; (b) CCD 灰度阈值为 75 level; (c) CCD 灰度阈值为 128 level

Fig. 5 Detected optical signals at different thresholds of CCD. (a) Gray threshold is 25 level; (b) gray threshold is 75 level; (c) gray threshold is 128 level

CCD 接收的光信号中相关峰 CPI 为 255 level 灰度色阶,若相关峰 CPI 下降 3 dB 时,即下降到最大值的 50%(等于 128 level)时,便可判定此时无相关输出,将阈值设定为 128 level 时,容易判定有无输出相关峰,从而判定此时的识别目标非真目标。强度判别法与光强密切相关,但输入面上的光强不仅与频谱匹配程度有关,还与输入总光强有关,而且光强在经过不同输入图像、不同灰度图像在输入面后的光强是相同的,因此可结合其他评价指标进行判别,当 CPI 达到阈值,还可通过相关峰形态判别和输入角度旋转判别方法在实验中直观简便地判定相关峰真伪。

### 3.3 相关峰形态判别

当参考图像与输入图像相同时,经过傅里叶变换平面的滤波器后光波函数变为实函数,即经过共轭相位函数后光波变为平行光。由透镜的会聚作用可知,平行光经过透镜会在焦点处会聚成一点,因此实验上真相关峰的形状是一个面积小、亮度高的圆形。分析图 6(a)数据,可发现该亮点是钟形结构,如图 6(b)所示。

图 6(a)中相关峰周围存在噪声,但观察其输出面的形状和亮度可知这是经过识别系统后的相关峰,图 6(b)是图 6(a)的三维数据图,左侧的形状像吊钟形态,右侧虽然亮度较高但其形状并不尖锐,峰值旁瓣较大且能量分散,所以是伪相关。图 6(b)的左侧出现平顶现象,是因为 CCD 产生饱和。增大 CCD 最大灰度等级所对应的能量,并设定阈值,可得到图 6(c)中形态尖锐陡峭峰值较高,能量集中且旁瓣能量较低的真相关峰,而伪相关峰不具有以上特点。

### 3.4 输入角度旋转判别

零旋转角度图像的相关峰是狭小的、高亮度的圆形,如果旋转待识别图像,则相关峰也会随着图像的旋转而旋转,如图 6(a)、(c)所示。

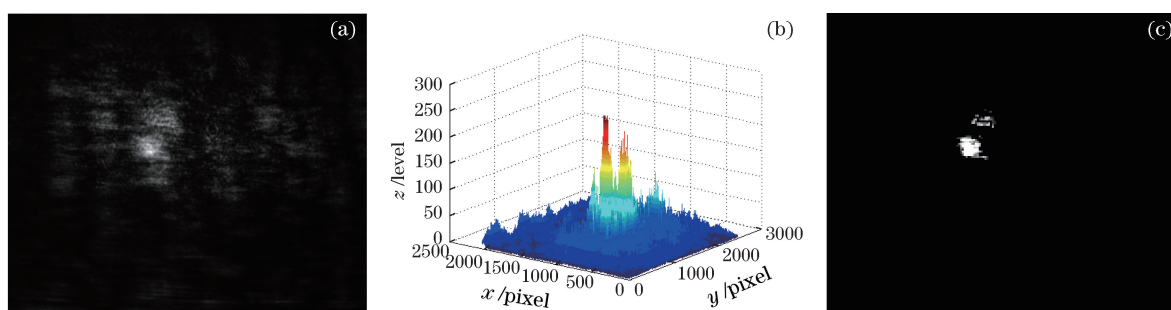


图 6 相关峰的形态判别图。(a)输出面的平面图;(b)三维处理数据图;(c)增大 CCD 饱和度后

Fig. 6 Shape determination of correlation peak. (a) Plan view of the output face;

(b) three-dimensional data figure; (c) after increasing the CCD saturation

如图 7 所示,真相关峰会随着图像的旋转而旋转。随着输入图像的旋转,相关峰的形状出现一定的椭圆形变并且随着角度的旋转而旋转。通过旋转输出图像即可检验输出的相关峰是否为真,若旋转输出图像后相关峰移动、消失或者不变,都说明此信号不是真相关信号。

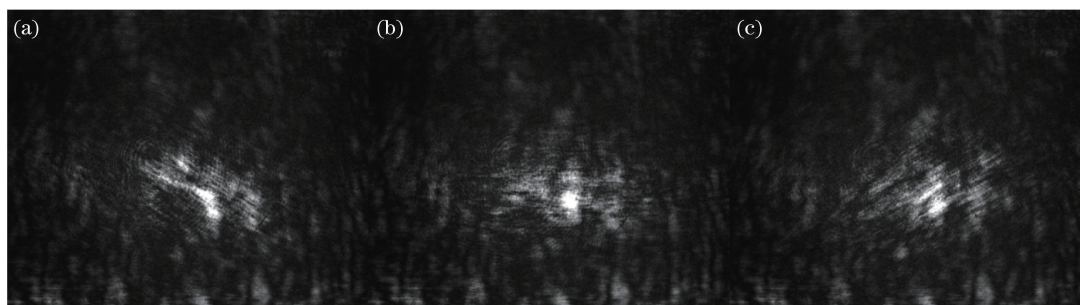


图 7 相关峰的旋转判别图。(a)左旋  $30^\circ$ ;(b) $0^\circ$ 旋转;(c)右旋  $30^\circ$

Fig. 7 Rotation determination of correlation peak. (a) Turn left  $30^\circ$ ; (b) turn  $0^\circ$ ; (c) turn right  $30^\circ$

相关峰的亮度、形态以及输入图像旋转都能在实验上为相关峰的判别提供参考,在相关峰判别时最好综合上述 3 种方法。匹配滤波相关识别器在相关峰的亮度、识别效果上有较大的优势,但实验调节如精准度不高,对相关峰的判别容易产生误判,上面的 3 种判别方法能在一定程度上避免对相关峰的误判。

## 4 结 论

观察相关器能否输出相关峰是使用相关器判定目标真伪的主要方式。基于匹配滤波相关识别器,从理论上分析了相关峰产生误判的 3 种可能,重点对相关信号的强度判别进行了理论和实验研究,针对这 3 种可能产生误判的情况分别从实验结果的相关峰阈值强度、形态、输入图像旋转方面探讨真伪相关峰的判别。设定 CPI 下降 50% 则待识别目标无相关信号输出,判定为假目标;CCD 接收信号出现平顶现象,是因为 CCD 产生饱和,增大 CCD 最大灰度色阶所对应的能量,并设定阈值进行判别,真相关峰的形态尖锐陡峭峰值较高,能量集中,旁瓣能量较低,而伪相关峰不具有以上特点;通过旋转输出图像即可检验输出的相关峰真伪,旋转输出图像后真相关峰会发生一定旋转,若相关峰移动、消失或者不变都说明此信号不是真相关信号。匹配滤波相关识别器的相关峰亮度高、识别容差大,但对实验仪器调节精准度要求较高,容易产生相关峰的误判和漏判问题。通过本文几种判别方法能一定程度上避免误判,为相关峰的判别提供参考。

## 参 考 文 献

- 1 Millán M S. Advanced optical correlation and digital methods for pattern matching-50th anniversary of Vander Lugt matched filter[J]. Journal of Optics, 2012, 14(10): 1-20.
- 2 Vander Lugt A. Signal-detection by complex spatial-filtering[J]. IEEE T Inform Theory, 1964, 10(2): 139-145.
- 3 Vijaya Kumar B V K, Mahalanobis A, Juday R D. Correlation Pattern Recognition [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

- 4 Hu Wengang, Wang Yongzhong, Hua Wenshen. The development and military application of optical correlator[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(s1): 179-181.  
胡文刚, 王永仲, 华文深. 光学相关器的研究进展及军事应用[J]. *光学技术*, 2006, 32(s1): 179-181.
- 5 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.
- 6 Xu Haidong, Xu Ping, Qi Senlin, *et al.* System optimization of 4f-based planar-integrated hybrid-optoelectronic correlator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1002-1008.  
徐海东, 徐 平, 亓森林, 等. 基于4f结构平面集成相关器系统优化[J]. *光学学报*, 2010, 30(4): 1002-1008.
- 7 Mahalanobis A, Vijaya Kumar B V K, Casasent D. Minimum average correlation energy filters[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(17): 3633-3640.
- 8 Vijaya Kumar B, Mahalanobis A. Recent advances in distortion-invariant correlation filter design[C]. *SPIE*, 1995, 2490: 2-13.
- 9 Vijaya Kumar B V K. Minimum-variance synthetic discriminant functions[J]. *Journal of the Optical Society of America A*. 1986, 3(10): 1579-1584.
- 10 Xu P, Hong C Q, Sun Z L, *et al.* Integrated zigzag Vander Lugt correlators incorporating an optimal trade-off synthetic discriminant filter for invariant pattern recognition[J]. *Optics Communications*, 2014, 315(15): 97-102.
- 11 Xu P, Hong C Q, Cheng G X, *et al.* Planar optical correlators integrated with binary optical lens[J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6773-6779.
- 12 Xu P, Huang Y Y, Zhang X L, *et al.* Integrated micro-optical light guide plate[J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 20159-20170.
- 13 Xu P, Huang Y Y, Su Z J, *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.
- 14 Xu P, Huang Y Y, Su Z J, *et al.* Algorithm research on microstructure distribution on the bottom surface of an integrated micro-optical light guide plate[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(7): 1322-1327.
- 15 Vijaya Kumar B V K, Hassebrook L. Performance measures for correlation filters[J]. *Applied Optics*, 1990, 29(20): 2997-3006.
- 16 Curlander J C, McDonough R N. Synthetic aperture radar: systems and signal processing[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2006: 176-181.  
Curlander J C, McDonough R N. 合成孔径雷达: 系统与信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 176-181.
- 17 Zhao Rongsheng, Chen Xiangning, Chen Jianbiao, *et al.* Application of plane mirror group in optical correlator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1023003.  
赵融生, 陈向宁, 陈建彪, 等. 平面反射镜组在光学相关器中的应用[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1023003.
- 18 Yi Yao, Cao Liangcai, Zheng Tianxiang, *et al.* High-speed and high-accuracy volume holographic optical correlator[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209005.  
易 瑶, 曹良才, 郑天祥, 等. 高速高精度体全息光学相关器[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209005.
- 19 Hong Xueting, Qian Yixian. High-accuracy measurement of sub-pixel image motion based on hybrid photoelectirc joint transform correlator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0212001.  
洪雪婷, 钱义先. 高精度光电混合联合变换相关的亚像元像移测量[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0212001.