

文章编号 1004-924X(2017)增-0032-07

## 应用于小阵元跟踪传感器的相关算法优化

杨奇龙, 马晓燮\*, 魏 凯

(中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘要:**为提高复合轴跟踪系统中不规则目标的跟踪精度,将相关算法引入阵列型光子计数器数据处理得到斜率偏差。与相关算法在传统 CCD 上应用一样,在阵列型光子计数器上取一帧的一部分作为模板。模版经对称优化后,将模板在被测帧上滑动匹配,经 SAD 算法后,通过拟合得出模板在被测帧上的位置测得光斑的偏移量。最后通过模板的光斑的质心位置对偏移进行校正实现稳定的跟踪。实验结果表明:修正后的相关算法可实现稳定跟踪,模版对称优化对拟合精度也有一定提升作用。优化后模版进行 SAD 算法的测量系统误差为 0.018 pixel,测量随机误差为 0.046 pixel。将相关算法引入小阵列探测器上,通过选取适当的模版大小并经过修正可实现稳定跟踪。

**关键词:**自适应光学;相关算法;波前探测;抛物线拟合;亚像素

**中图分类号:**TP301.6;P427.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172513.0032

## Optimization of correlation algorithms for small array pixels tracking sensors

YANG Qi-long, MA Xiao-yu\*, WEI Kai

(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

\* Corresponding author, E-mail: maxiaoyu001@126.com

**Abstract:** In order to improve the tracking accuracy of irregular targets in compound axis tracking system, the correlation algorithm was introduced into array photon counters to process the slope error. Similar to the correlation algorithms used in conventional CCD, part of a frame of a array photon counter was used as a template. After the template was symmetrically optimized, the template was matched on the frame. With the SAD algorithm, the position of the template on the measured frame was obtained by fitting, and the offset of light spot was calculated. Furthermore, the offset was corrected by the centroid location of light spots on the template to achieve stable tracking. The experimental results show that the modified correlation algorithm can achieve stable tracking, and the symmetrical optimization of the template can also improve the fitting accuracy. With optimized template, the measurement error of the SAD algorithm is 0.018 pixel, and the random error is 0.046 pixel. Employing the correlation algorithm to small array detectors, the stable tracking can be achieved by choosing appropriate size of the template and correcting the template.

**Key words:** adaptive optics; correlation algorithm; wavefront detection; parabola fitting; sub-pixel

收稿日期:2017-06-11;修订日期:2017-07-10.

基金项目:西部青年学者基金资助项目

## 1 引言

在自适应光学中波前探测是至关重要的一个环节。执行机构的校正由波前探测反馈,所以波前探测的精度直接影响着闭环中心和校正精度<sup>[1-3]</sup>。在复合轴跟踪系统中,波前探测由一个位于光学系统焦平面的多阳极光电倍增管来完成。通过多阳极光电倍增管上光斑的位置变化测出波前倾斜。

目前,我国地基大口径望远镜中对恒星和其他行星、双星的跟踪都采用质心算法<sup>[6]</sup>。由于恒星和其他目标的特性不同,质心算法并不都适用。短时间内恒星的形状、大小、亮度、位置基本不会变化,所以用质心算法来跟踪,闭环中心可以始终锁定在恒星的中心。而其他目标的形状、大小、亮度、位置变化比较快,而且在视场中可能出现其他恒星,同样使用质心算法来跟踪目标,可能导致闭环中心位置不固定,甚至可能跟踪到其他更高亮度的恒星,所以质心算法不适用于恒星外的目标<sup>[1-3,6]</sup>。

为解决质心算法对某些目标不适用的问题,本文将图像处理的相关算法迁移到跟踪算法中,并提出算法优化方案。

## 2 传统图像相关算法

传统图像相关算法主要有:(1)绝对误差和算法和误差平方和算法两种。其中,绝对误差和算法(Sum of Absolute Differences, SAD)是 Leese 在 1971 年提出的一种匹配算法<sup>[4-5]</sup>,是模版识别中的常用方法。该算法思想简单,具有较高的匹配精度。

设  $S(x, y)$  是大小为  $m \times n$  的搜索图像,  $T(x, y)$  是  $M \times N$  的模板图像,分别如图 1(a)和 1(b)所示。为了在图 1(a)中找到与图 1(b)匹配的区域(方框所示),在搜索图  $S$  中,以  $(i, j)$  为左上角,取  $M \times N$  大小的子图,计算它与模板的相似度;遍历整个搜索图,在所有能够取到的子图中,找到与模板图最相似的子图作为最终匹配结果。



图 1 传统图像相关算法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of correlation algorithm for traditional image

SAD 算法的相似性测度公式为:

$$D(i, j) = \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N |S(i+s-1, j+t-1) - T(s, t)|, \quad (1)$$

其中:  $1 \leq i \leq m-M+1, 1 \leq j \leq n-N+1$ 。

显然,绝对误差和  $D(i, j)$  越小,表明图像越相似,故只需找到最小的  $D(i, j)$  即可确定能匹配的子图位置<sup>[7]</sup>。

误差平方和算法(Sum of Squared Differences, SSD)也叫差方和算法。实际上,SSD 算法与 SAD 算法如出一辙,只是其相似度测量公式有一点改动,测量公式如下<sup>[7]</sup>:

$$[D(i, j) = \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [S(i+s-1, j+t-1) - T(s, t)]^2], \quad (2)$$

其中:  $1 \leq i \leq m-M+1, 1 \leq j \leq n-N+1$ 。

## 3 相关算法在高频率小阵列探测器上的应用

波前斜率探测器与传统图像 CCD 的区别有如下两个方面:

(1)阵列大小:传统 CCD 的像素阵列大小为成百上千个,而目前所用的波前斜率探测器的像素阵列为  $16 \times 16$ ;

(2)目标特性:传统图像相关算法一般用于背景复杂目标运动有规律的情况,而波前探测背景比较简单,且目标运动比较快、没有规律性。

如图 2 所示,在波前探测传感器中取探测器

中心的  $4 \times 4$ 、 $6 \times 6$  或  $8 \times 8$  的像素单元作为模板，将之后的几帧与模版进行匹配计算出模板光斑相对于中心的偏移量，以此计算出倾斜偏差。将偏差经过 PID 运算之后传入倾斜镜进行校正，保证目标处于模版上目标的位置。以此方式计算校正一定时间后，再重新采集模版更换现在模版进行计算。取模版时只要目标在取模范围内，相关算法就能计算出正确的倾斜偏差。

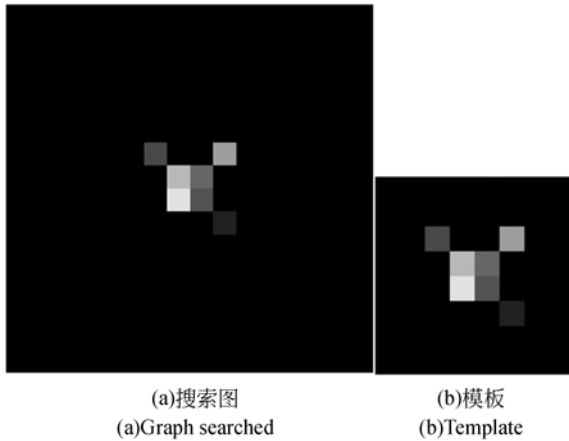


图 2 小阵列相关算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of correlation algorithm for small array pixels

### 3.1 相关算法目标位置修正

由于实时校正残差的存在，每次取模版时目标都不一定在上次模版中目标所在的位置。这就意味着更换模版后经过系统校正后的图像位置也会发生改变，而且改变的方向是随机的。在经过多次误差累积之后，目标可能移出模版范围，之后匹配时产生的偏差将会是无意义的噪声，而且由于噪声信号的频率较高还有损坏倾斜镜的危险。

为解决上述问题，本文将质心算法和相关算法相结合，以改善跟踪的稳定性。只用相关算法的问题在于：模版更换后闭环的最终效果是使得目标位于最近一次模版采集时目标所在探测器上的位置。由于下一次采集模版时目标不一定在上次采集时的位置，误差累加可能使目标偏离中心，并最终移出取模版范围。为了让目标保持在视场中心附近，对相关算法的偏差值进行修正。修正量为模版上目标相对于模版中心的位置偏差，此偏差通过质心算法得到。加入修正后，每次更换模版后目标位置的闭环中心都在探测器的视场中心，计算过程如图 3 所示。

	开始模板算法	第1帧	第2帧	……	第1000帧	第1001帧	第1002帧	……	第2000帧	第2001帧	第2002帧	……	第3000帧	……
模板算法结果 $\Delta$ :		取模	$\Delta 2$		$\Delta 1\ 000$	取模	$\Delta 1002$		$\Delta 2000$	取模	$\Delta 2002$		$\Delta 3000$	
模板偏差 $\Delta m$ :		$\Delta m$ 更新			$\Delta m$ 更新				$\Delta m$ 更新					
最终送入PID偏差 $u = \Delta m + \Delta$ :	0	$\Delta m + 0$	$\Delta m + \Delta 2$		$\Delta m + \Delta 1000$	$\Delta m$	$\Delta m + \Delta 1002$		$\Delta m + \Delta 2000$	$\Delta m$	$\Delta m + \Delta 2002$		$\Delta m + \Delta 3000$	

图 3 相关算法计算过程

Fig. 3 Calculation process of correlation algorithm

### 3.2 改变模版提高亚像素曲线拟合精度

相关算法进行数字图像处理时，模板匹配的定位精度为像素级，即使通过相邻像素拟合可以达到亚像素级，但拟合精度还有待考证。在传统 CCD 图像处理中，由于传感器本身的分辨率高，即使定位精度在像素级，在整个视场中的定位精度也能达到  $1\% \sim 0.1\%$ 。而波前探测器的像素阵列只有  $16 \times 16$ ，若定位精度只达到像素级则测量误差为  $6.25\%$ 。为了提高定位精度，需采用拟合曲线的方式来获取光斑位置。

常用的拟合方式为抛物线拟合，即采用检测

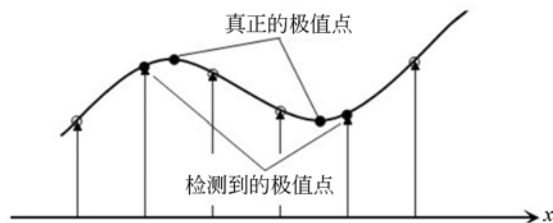


图 4 真正极值点位置

Fig. 4 Real location of extreme points

到的极值点与相邻像素进行抛物线拟合，通过求抛物线的顶点得到估算位置。通过拟合可以使检

测精度达到亚像素级<sup>[7-10]</sup>。但相邻像素参与运算给测量精度带来了不确定性。

通过仿真可知,抛物线的拟合精度与相邻像素的匹配准确性有关,而相邻像素的匹配准确性与模板边缘对称性有关。

在 16×16 的像素阵列中,取出中心位置 8×8 图案,如图 5 所示。以右图 8×8 为模版对 16×16 原图进行扫描。以图像中心为原点,若拟合正确得到的最终位置应该为(0,0)。经过扫描和插值拟合后得到的矩阵分别如图 6(a)和 6(b)所示。经过插值拟合后可以明显看出极值点左移。采用抛物线拟合得到的匹配位置为(-0.28,0)。从图中可以看出,匹配矩阵的右边比左边数值大,

匹配度低。

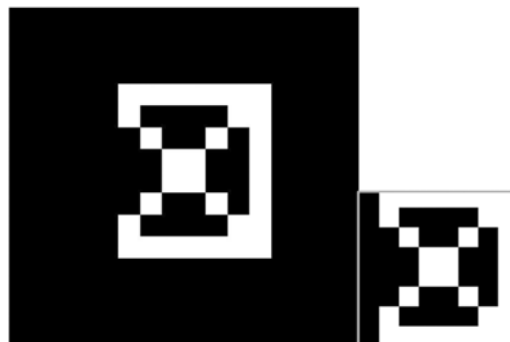
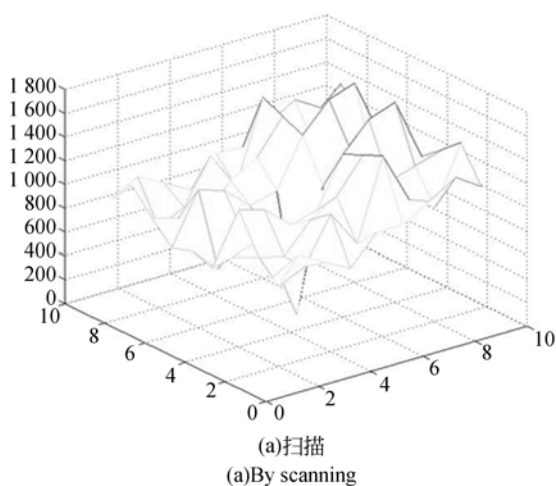
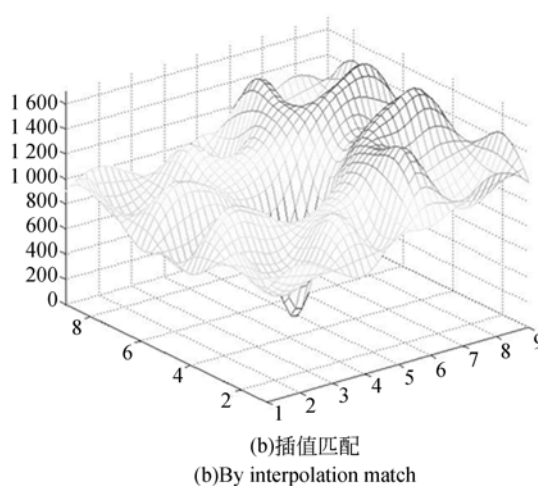


图 5 非对称模版的相关算法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of correlation algorithm using asymmetric template



(a)扫描  
(a)By scanning



(b)插值匹配  
(b)By interpolation match

图 6 匹配矩阵三维图

Fig. 6 3D graph of matched matrix

从匹配过程分析匹配矩阵极值的左边相邻像素和右边相邻像素。原图为绿色,模板为红色。匹配矩阵极值左边相邻像素值为图 7 矩阵平方

和,右边相邻像素值为图 8 矩阵平方和。通过对比发现右边的差值矩阵比左边差值矩阵多的像素差,是由模版左右边界不对称引起的。

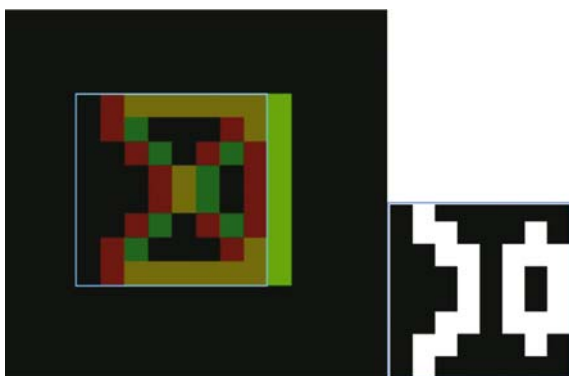


图 7 极值左边像素模版匹配

Fig. 7 Template matching for left pixel of extremum

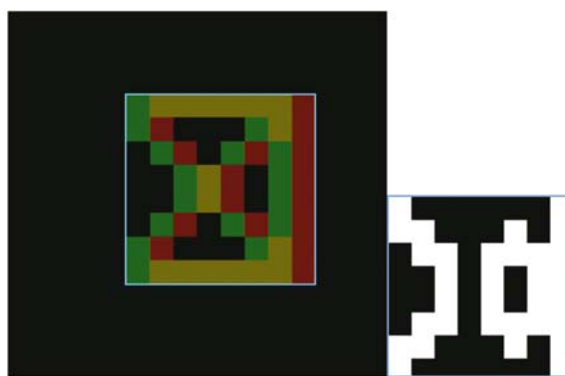


图 8 极值右边像素模版匹配

Fig. 8 Template matching for right pixel of extremum



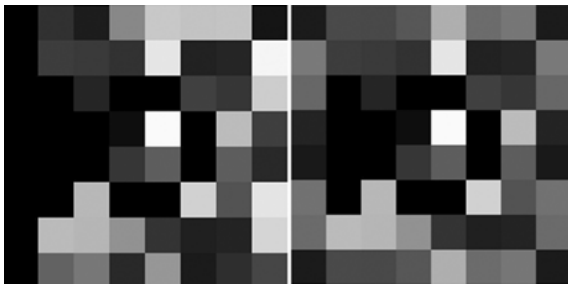


图 12 模版对比

Fig. 12 Template contrast

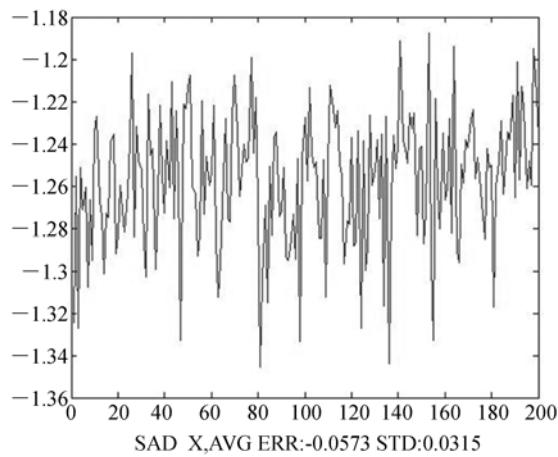


图 13 原始模版 SAD 算法结果

Fig. 13 Results of SAD algorithm using original template

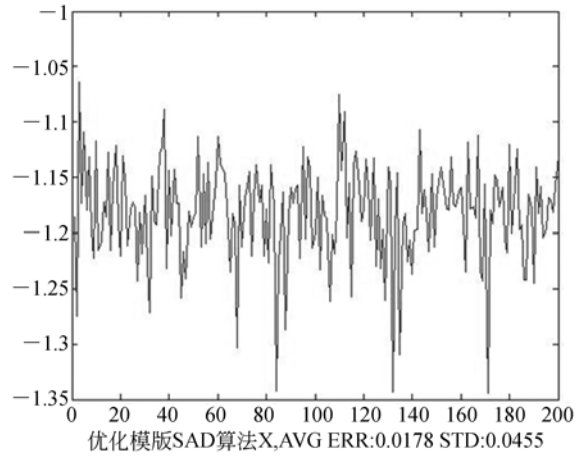


图 15 优化模版 SAD 算法结果

Fig. 15 Results of SAD algorithm using optimized template

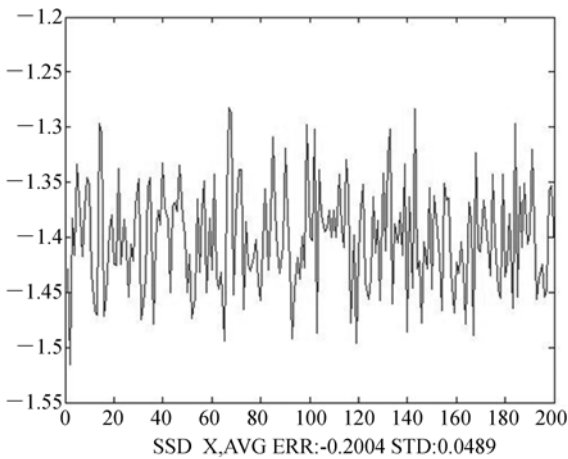


图 14 原始模版 SSD 算法结果

Fig. 14 Results of SSD algorithm using original template

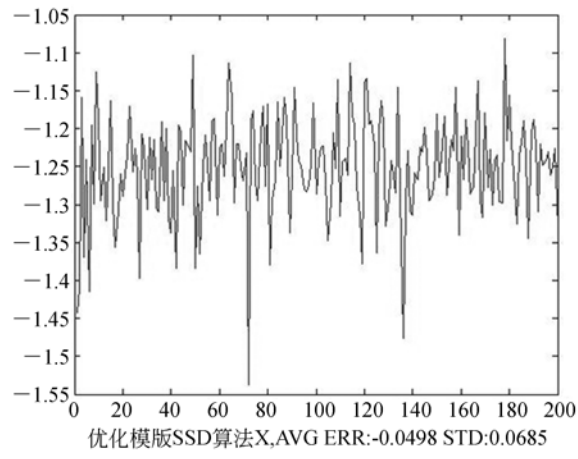


图 16 优化模版 SSD 算法结果

Fig. 16 Results of SSD algorithm using optimized template

得到匹配矩阵后通过抛物线拟合得出最佳匹配位置,并统计作图。

仿真结果如图 13~图 16 所示,对比可以发现采用优化后的模板进行计算得到的位置更接近真实值。通过对比 SAD 和 SSD 算法可知,SAD 的抛物线拟合值更稳定,即 SAD 算法更适合于抛物线拟合,拟合精度受噪声影响小。在小阵列像素的相关算法中采用优化模版进行 SAD 算法并以抛物线拟合可得到更高的精度。

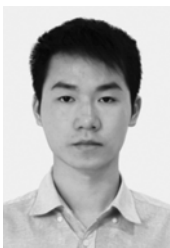
## 5 结 论

本文以自适应系统复合轴跟踪对不规则目标跟踪的需求出发,对相关算法应用于高频率小阵列探测器上的迁移进行研究,并基于跟踪的稳定性和抛物线拟合精度对算法进行修正和优化。实验结

### 参考文献:

- [1] 郭友明, 马晓燠, 饶长辉. 自适应光学系统倾斜校正回路的最优闭环带宽[J]. 物理学报, 2014, 63(6):425-429.  
GUO Y M, MA X Y, RAO CH H. The optimal loop bandwidth of physical tilt correction adaptive optical system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(6): 425-429. (in Chinese)
- [2] 吴碧琳, 饶长辉, 张雨东. 应用闭环残余倾斜数据分析自适应光学系统精跟踪回路性能[J]. 光学学报, 2006, 26(4):487-490.  
WU B L, RAO CH H, ZHANG Y D. Application of closed-loop residual tilt data analysis of adaptive optical system for fine tracking loop performance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26 (4): 487-490. (in Chinese)
- [3] 饶长辉, 姜文汉, 凌宁, 等. 自适应光学系统对实际大气湍流波前的时域校正效果[J]. 光学学报, 2001, 21(8):933-938.  
RAO CH H, JIANG W H, LING N, *et al.*. The time domain correction effect of adaptive optics on the actual atmospheric turbulence front [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21 (8): 933-938. (in Chinese)
- [4] BARNEA D I, SILVERMAN H F. A class of algorithms for fast digital image registration[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2009, C-21(2): 179-186.
- [5] CHA S H. Efficient algorithms for image template and dictionary matching[J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2000, 12(1):81-90.
- [6] 赵金宇, 吴元昊, 贾建禄, 等. 基于实时波前信息的图像复原[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6):1350-1356.  
ZHAO J Y, WU Y H, JIA J L, *et al.*. Image restoration based on real time wavefront information [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20 (6): 1350-1356. (in Chinese)
- [7] 赵启. 图像匹配算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013.  
ZHAO Q. *Research on Image Matching Algorithm* [D]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science University, 2013. (in Chinese)
- [8] 孙林. 快速图像匹配算法研究及分布式图像匹配系统实现[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2006.  
SUN L. *Research on Fast Image Matching Algorithm and Implementation of Distributed Image Matching System* [D]. Changsha: University of defense technology, 2006. (in Chinese)
- [9] 陈皓, 马彩文, 等. 基于灰度统计的快速模板匹配算法[J]. 光子学报, 2009, 38(6):1586-1590.  
CHEN H, MA C W, *et al.*. Fast template matching algorithm based on gray statistics [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6):1586-1590. (in Chinese)
- [10] 杨小冈, 等. 基于相似度比较的图像灰度匹配算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(5):918-921.  
YANG X G, *et al.*. Research on image gray level matching algorithm based on similarity comparison [J]. *System Engineering and Electronic Technology*, 2005, 27(5):918-921. (in Chinese)

### 作者简介:



杨奇龙(1995—),男,四川广安人,工程师,2016年于四川大学获得学士学位,主要从事波前传感技术的研究。E-mail:838300759@qq.com

### 通讯作者:



马晓燠(1983—),男,四川达州人,副研究员,2006年于电子科技大学获得学士学位,2011年于中国科学院光电技术研究所获得博士学位,主要从事哈特曼波前传感器设计与研制、阵列型单光子计数技术以及太阳能综合利用技术的研究。E-mail:maxiaoyu001@126.com