

文章编号 2095-1531(2015)02-0255-08

# 利用激光主动探测技术实现光电窥视设备检测

杨名宇

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所  
航空光学成像与测量中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:**针对激光主动探测时光电设备表现出的猫眼效应,搭建了基于 CCD 的激光主动探测系统,提出了一套有效的光电窥视设备检测算法。该算法在激光脉冲的间隔,同时采集激光主被动图像,根据窥视目标与普通漫反射物体的回波强度差异,利用背景差法检测窥视目标。实验结果表明,在半径为 5 m 的作用范围内,该激光主动探测系统可有效、快速地将光电窥视目标从背景中检测出来,并且不受场景和光照的限制。通过对光学口径为 2 mm 的光电窥视设备在 20 个不同场景环境下进行实验,正确检测率达到 95%,且每帧的检测时间在 0.015 ~ 0.021 s 内,满足了实时性需求,验证了本文系统搭建方案的正确性与软件处理算法的有效性。

**关键词:**激光主动探测;猫眼效应;背景差方法

**中图分类号:**V556.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20150802.0255

## Detecting of photoelectric peeping devices based on active laser detection

YANG Ming-yu

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: ymy1983@163.com

**Abstract:** Based on the cat-eye effect of photoelectric devices, this paper establishes a system of active laser detection with CCD, and puts forward an effective algorithm for detecting peeping devices. The proposed algorithm acquires one image when the laser power is on, and the other image when the laser power is off in the laser pulse interval. According to the echo intensity difference on the peeping devices and usual objects, the target is detected by using the background difference method. The experimental results show that, within a radius of 5 m, the system can effectively and quickly detect peeping devices from background, and is not influenced by the scene and light. Through the experiments on 20 different scenes, the correct detection rate is 95%, and the detection time of each frame is in the range of 0.015 – 0.021 s, meeting the demand of real-time detection, which validate the correctness and effectiveness of this system.

**Key words:** laser active detection; cat-eye effect; background difference method

收稿日期:2014-12-15;修订日期:2015-02-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61308099);吉林省重大科技攻关资助项目(No. 11ZDGG001)

## 1 引言

随着光电与通信技术的发展,针孔摄像头、微型摄像机等光电窥视设备已被越来越多地用于会场、展厅等环境,导致信息泄露。如何保证信息不被“敌方”通过光电窥视设备获取,是当今信息社会的一个重要课题。在此背景下,亟待研发并设计一套可有效探测光电窥视设备的算法与系统,用于重要场所的检测,以便尽早发现可疑目标,排除潜在危险,确保信息安全。

激光主动探测技术是利用光电设备存在的“猫眼效应”对敌方光电设备进行探测的一种新技术<sup>[1]</sup>。当激光照射光电系统时,由于“猫眼效应”的存在,使得猫眼目标反射的回波强度要明显高于普通漫反射物体,因此,可以利用该效应对光电目标进行扫描侦察和识别,以获得目标的位置、速度等信息。

目前,基于猫眼效应的激光主动探测技术已广泛应用在快速目标侦察定位等领域<sup>[2-3]</sup>。国外已将该技术成果广泛应用于光电侦察告警系统中,并已研制出实用的仪器设备<sup>[4]</sup>,如美国的“鲑鱼”激光武器系统等<sup>[5]</sup>;国内则主要在“猫眼”目标识别等算法方面展开研究,如:结合灰度和形状信息的猫眼目标识别方法<sup>[6]</sup>、基于时空双重判据的猫眼目标识别方法<sup>[7]</sup>等。文献[6]所提算法利用单幅激光主动照射图像与固定阈值检测猫眼效应目标,在复杂背景的情况下会将目标“湮没”在噪声中而出现错误,鲁棒性不强;文献[7]提高了复杂背景中猫眼目标识别的正确率,但其处理过程需要大量图像序列的参与,限制了应用场合,加大了时间开销。

本文通过研究基于“猫眼”效应的激光主动成像技术,搭建了由 CCD、激光器、图像采集处理设备组成的激光主动探测系统,提出了一种可适用于复杂背景环境的快速窃视设备检测算法。该算法在脉冲激光主动照明的间隔内,同时采集激光开时对应的主动照射图像和激光关时对应的漫反射图像,根据目标物体与普通漫反射物体的回波强度差异,利用背景差的方法检测出目标物体。实验表明,相较于利用单幅图像进行检测的算法,

本文提出算法的检测正确率更高,且速度较快,易于实时处理。

## 2 “猫眼”目标探测原理

对于激光测距仪、望远镜等大多数光电侦察系统和光学观瞄系统,当入射光线经其会聚并投射在探测器或分划板等反射元件时,会将入射光线进行反射,使得反射光线沿原路返回,在接收端得到的反射光回波强度通常是漫反射目标回波强度的  $10^2 \sim 10^4$  倍,即所谓的“猫眼效应”。通过区分漫反射目标和光电设备的回波强度,即可实现对猫眼目标的识别和定位。猫眼效应的物理模型可以近似等效为一个透镜与一个反射面的组合<sup>[8-9]</sup>,如图1所示。

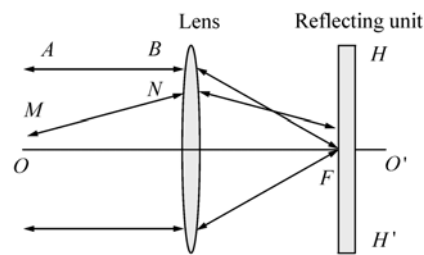


图1 “猫眼”效应原理图

Fig. 1 Principle sketch map of cat-eye effect

$AB$  为一束平行于光轴  $OO'$  的光线,透过透镜会聚在焦点  $F$  处, $HH'$  为反射元件。由光学系统的对称性可知,反射光将沿  $BA$  方向原路返回。同理,倾斜入射的光线  $MN$  经透镜会聚在焦平面上的某点,其反射光同样将沿  $NM$  方向原路返回。

设检测设备的激光发射功率为  $P_1$ ,接收系统光学口径面积为  $A_r$ ,猫眼目标有效面积为  $A_{ct}$ ,猫眼目标的反射率为  $\rho_{ct}$ ,发射光学系统透过率为  $\tau_1$ ,接收系统光学透过率为  $\tau_r$ ,大气透过率为  $\tau_a$ ,猫眼目标透过率为  $\tau_{ct}$ ,探测系统到目标的距离为  $R$ ,激光发射角为  $\theta_1$ ,猫眼目标反射激光发射角为  $\theta_{ct}$ ,漫反射目标截获入射激光时的有效截面积为  $A_{dt}$ ,漫反射目标对入射激光的反射率为  $\rho_{dt}$ 。

猫眼目标对应的回波功率方程为<sup>[2,10]</sup>:

$$P_{r,ct} = \frac{16P_1 A_r A_{ct} \rho_{ct} \tau_1 \tau_r \tau_a^2 \tau_{ct}^2}{\pi^2 R^4 \theta_1^2 \theta_{ct}^2}. \quad (1)$$

漫反射小目标的回波方程为:

$$P_{r,s} = \frac{4P_1 A_r A_{dt} \tau_1 \tau_r \tau_a^2}{\pi^2 R^4 \theta_1^2} \rho_{dt} \quad (2)$$

漫反射大目标的回波方程为:

$$P_{r,b} = \frac{P_1 A_r \tau_1 \tau_r \tau_a^2}{\pi R^2} \rho_{dt} \quad (3)$$

由式(1)、(2)和(3)可以得到同一距离  $R$  上猫眼目标与漫反射目标的回波功率之比。对于漫反射小目标而言,有:

$$\frac{P_{r,ct}}{P_{r,s}} = \frac{4A_{ct} \rho_{ct} \tau_{ct}^2}{\theta_{ct}^2 A_{dt} \rho_{dt}} \quad (4)$$

对于漫反射大目标而言,有:

$$\frac{P_{r,ct}}{P_{r,b}} = \frac{16A_{ct} \rho_{ct} \tau_{ct}^2}{\pi R^2 \theta_{ct}^2 \rho_{dt}} \quad (5)$$

由式(4)和(5)可以看出,对于漫反射小目标而言,猫眼目标与其回波功率之比不受距离的改变而变化,因此可以利用回波的强度差异有效区分猫眼目标与漫反射小目标;但对于漫反射大目标而言,猫眼目标与其回波功率之比随着距离的增加而减少,直至猫眼目标与漫反射大背景的回波功率相当,此时,依靠回波强度差异的方法将无法识别猫眼目标,即对于漫反射大目标背景而言,存在极限探测距离。这里,漫反射大目标通常指地面等大背景<sup>[10]</sup>,由于其面积远大于激光光斑,当激光照射其上时,会将激光全部反射。

本系统在其作用范围内,猫眼目标反射的回波强度始终远大于漫反射目标的回波强度,故无需考虑背景中漫反射小目标和大目标的情况。

### 3 背景差方法

背景差方法(Background Difference Method)是在运动目标检测中使用较多的一类算法,其突出特点是实现简单、运算速度快,便于实时处理,并且在大多数情况下检测效果良好,最适于静态背景下的运动目标检测<sup>[11]</sup>。

背景差方法是利用当前帧和背景帧进行差分比较,从而实现运动目标检测的方法,其检测结果的准确性依赖于所使用的背景模型。背景差方法适用的前提是当前帧和背景帧两幅图像除了目标以外,其它像素点均是一一对应的。

设图像  $B(x, y)$  在  $t$  时刻对应的背景图像为  $B(x, y, t)$ ,  $t+1$  时刻对应的运动图像为  $B(x, y, t+1)$ , 则根据背景差方法得到的差分后图像  $f(x, y)$  有:

$$f(x, y) = |B(x, y, t+1) - B(x, y, t)| \quad (6)$$

通常,差分得到的  $f(x, y)$  会包含大量噪声,因此还需设定合适的阈值将差分图像进行阈值分割,才能适用于后续处理。

### 4 激光主动探测系统

为了更好地适应复杂背景的需求,本文设计的激光主动探测系统可以对半径为 5 m 范围内的“猫眼”目标检测与识别。如图 2 所示,激光主动探测系统主要由激光器、CCD 探测器、图像采集卡和计算机组成。

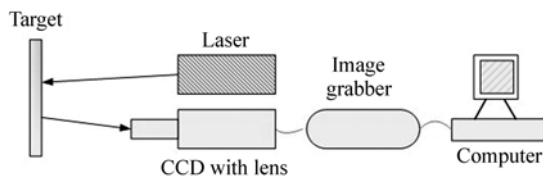


图2 激光主动探测系统原理图

Fig. 2 Principle sketch map of active laser detection system

常用的激光器有半导体激光器和固体激光器。在转换效率方面,固体激光器的电光转换效率为 15%, 半导体激光器的电光转换效率可达 50%。因此,本系统选用半导体激光器作为主动照明方案<sup>[12-13]</sup>。

照明用半导体激光器波长一般选用近红外波段,目前常用的激光器波长主要有 810, 850, 880 和 915 nm。但近红外波段激光会产生红曝现象,而且在相同功率下,波长与红曝现象程度成正比<sup>[14-15]</sup>。同时,激光波长越长,CCD 对激光的响应度越弱。因此,本文选用 810 nm 波长的激光器。最大输出功率为 1 W, 束散角为 10°, 探测器选用 Watec 公司的微光黑白 CCD, 成像分辨率为 768 × 576, 其光谱响应范围在 300 ~ 1 000 nm。

同时,为了保证光学系统在半径为 5 m 的范围内均可清晰成像,并且“猫眼”目标光斑不至于

太小而湮没在噪声中,本系统采用了一枚焦距为5~50 mm的变焦镜头,以实现上述功能。

## 5 光电窥视设备检测

为了提高光电窥视设备检测的正确率,本文提出一种利用激光主被动图像差分的目标检测方法,即在激光探测时采集主动照明图像,在脉冲间隔采集漫反射图像,利用背景差的方法,实现窃视目标检测,流程图如图3所示。

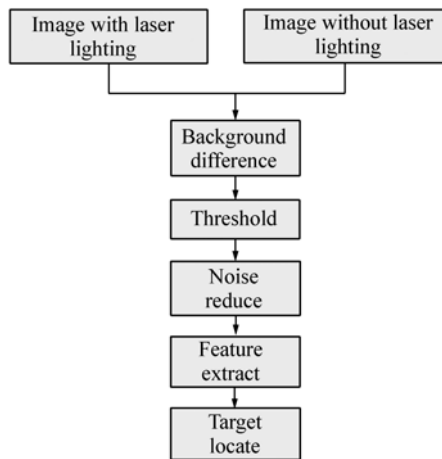


图3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the proposed algorithm

步骤1:分别获得漫反射图像和激光主动照射图像各一张,按照背景差的思想,将其二者进行差分。理论上得到的差分图应该只含有目标物体,但在实际中,由于多数物体会反射激光,导致真实的图像里包含大量的噪声。

步骤2:阈值分割。由步骤1得到的图像包含目标物体和一些噪声,将其二值化,通过阈值分

割将它们分离开来。由于“猫眼”目标亮度较高,灰度分布比较均匀,同时利用“背景差”所得到的图像不受外界环境的光强的影响,因此,该步骤可选用固定阈值法进行分割。

步骤3:噪声抑制。通过步骤2得到的图像依然包含大量噪声,此时为了将目标从大量的噪声提取出来,需要进行噪声抑制处理。各种低通滤波可以有效地去除噪声,但同时也会对目标物体产生影响,因此,模板的选择显得十分重要。本系统使用模板为 $3 \times 3$ 的中值滤波进行处理。

步骤4:特征提取:由于窃视光学设备的镜头大多是圆形的,并且其光斑面积范围大致可知,因此本系统利用光斑的圆形和面积两个特征进行猫眼目标识别。

面积( $S$ ):对于二值图像来说,设 $R$ 表示某区域,其面积即为符合条件的像素点总数,表达式如式(7)所示:

$$S = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i,j), \quad (7)$$

式中, $f(x)$ 表示二值图像:

$$f(i,j) = \begin{cases} 1 & (i,j) \in R \\ 0 & (i,j) \notin R \end{cases}. \quad (8)$$

周长( $L$ ):区域边界像素点的总和,表达式与(7)相同,边界条件如式(9)所示:

$$f(i,j) = \begin{cases} 1 & (i,j) \in \partial R \\ 0 & (i,j) \notin \partial R \end{cases}. \quad (9)$$

对于“猫眼”目标光斑面积的大小,可以通过多次测量获得先验知识,对于本系统,光斑面积的范围在 $[25, 200]$ ,单位为像素。

圆形的判别准则主要有圆形度( $C$ )、偏心率( $E$ )和圆形性( $F$ )等,其表达式和参数说明如表1

表1 圆形特征参数比较

Tab. 1 Comparison of circle feature parameters

Expression	Description	Similarity
$C = \frac{L^2}{S}$	$L$ : Perimeter $S$ : Area	Bigger when closer to $4\pi$
$E = \frac{a}{b}$	$a$ : Long axis of the area $b$ : short axis of the area	Bigger when closer to 1
$F = \frac{\sigma}{\mu}$	$\mu$ : mean distance of the contour to the center $\sigma$ : mean square deviation of distance	Bigger when closer to 0

所示。实验发现,单一的圆形判别参数并不足以将目标与噪声区分开来,本系统中同时采用了圆形度( $C$ )和偏心率( $E$ )进行圆形目标提取,获得了较好的实验结果。

## 6 实验结果与分析

为了验证本算法的有效性,对 20 个不同场景进行了实验,探测目标为一光学镜头直径为

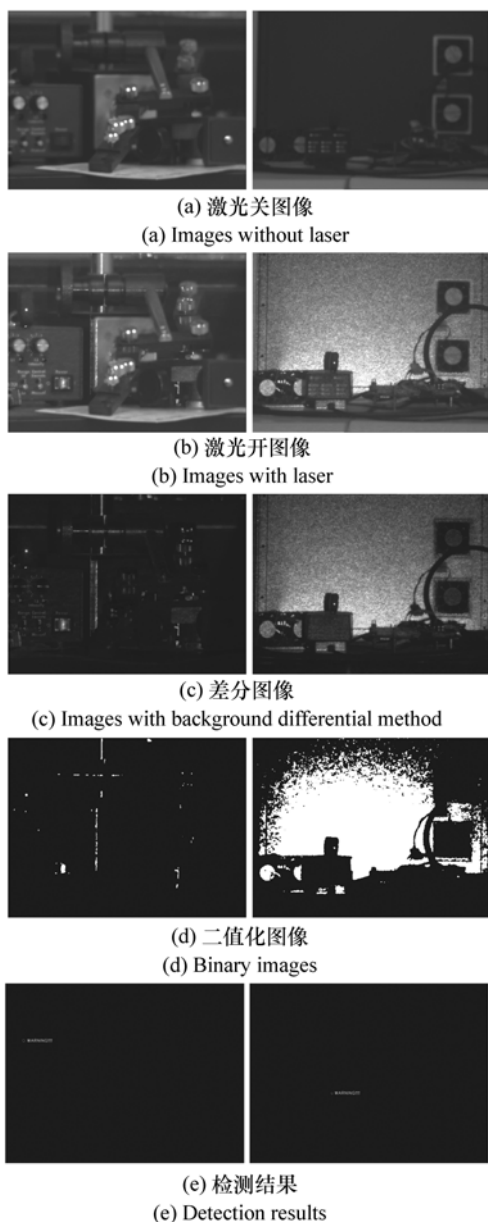


图4 不同场景下的检测实验

Fig.4 Experiments of detection on different scenes

2 mm的针孔摄像机。调试和实验环境为 VC6.0, 程序用 C++ 编写,计算机 CPU 为 Intel Celeron E3400,主频 2.6 GHz,内存 1 G。本文选取了 3 个较复杂的场景,如图 4 所示。其中,第一排为激光关闭时图像,第二排为激光打开时图像,第三排为背景差后的图像,第四排为经过平滑与二值化后的图像,第五排绿色轮廓为检测结果。由图中可以看出,当激光打开时,背景会产生较为严重的干扰噪声,尤其背景中具有金属物体时,会发生强烈的反射现象,具体表现为出现大量脉冲噪声(亮斑)。由第三排的背景差分得到的图像可以看出,此时画面依然非常杂乱,需要经过阈值分割进行处理,本文选用的阈值为 100。经过二值化得到的第四排图像中,依然包含了大量的噪声。中值滤波作为一种非线性信号处理方法,对于脉冲干扰噪声的去除最为有效。因此,本文使用中值滤波进行噪声抑制。第五排图像为经过中值滤波和特征提取得到的最终结果。这里,圆形度阈值设为 0.25,偏心率阈值设为  $[0.8, 1.25]$ 。设通过计算得到的实际圆形度为  $C_r$ ,长轴和短轴为  $a, b$  (这里,  $a$  和  $b$  不分大小)有:

$$|C_r - 4\pi| \leq 0.25, \quad (10)$$

$$\frac{a}{b} \in [0.81, 1.25]. \quad (11)$$

即同时满足式(10)和(11)时,将所求轮廓认为是圆形区域。

由以上 3 个场景可以看出,本文所提方法在复杂背景中依然可以正确地检测到窥视目标,验证了本文方法的鲁棒性。

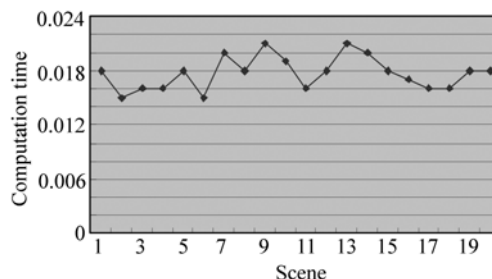


图5 不同场景下的检测时间

Fig.5 Computation time of different scenes

对于 20 个不同场景的每帧检测时间如图 5

所示,在 0.015 ~ 0.021 s 之间,优于文献[7]中所用的 SFDC 方法,其每帧计算时间为 0.025 ~ 0.027 s。

此外,本文所提方法对外界环境的光照强度不敏感。图 6 为针对同一场景不同光照强度的实

验。由图中可以看出,第一排的(a)、(b)图像的灰度要明显高于第二排的(a)和(b),但由于采用背景差法,不同光照情况下的差分图像几乎没有差别。因此,大大提高了本文算法的鲁棒性,其适用范围更广。

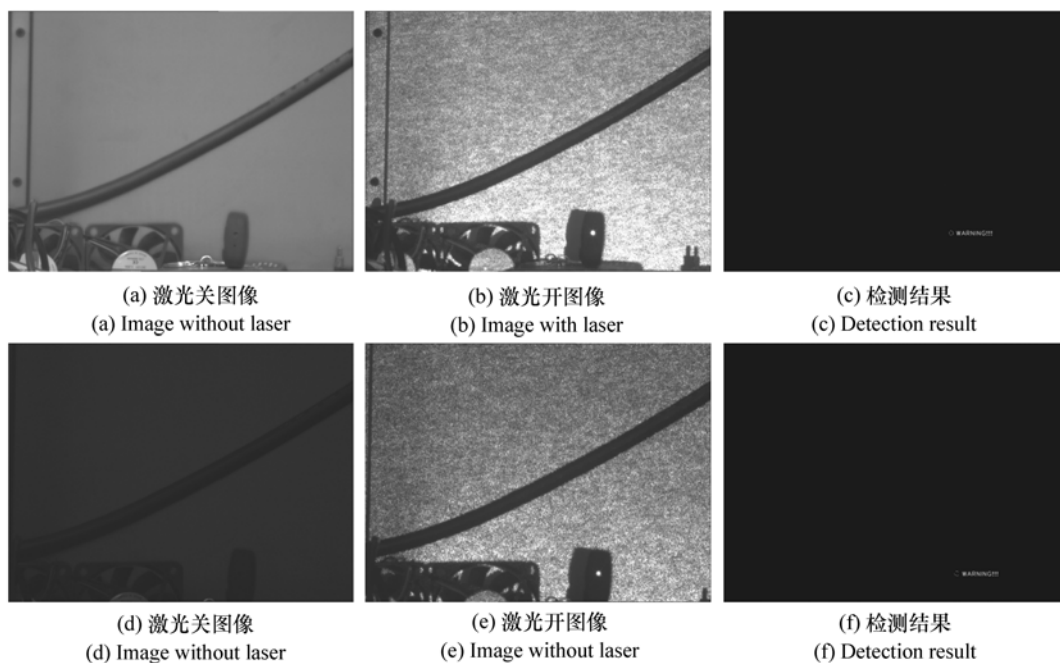


图 6 同一场景下不同光照实验

Fig. 6 Experiments of the same scenes with different lighting

图 7 给出了 20 个不同场景本文方法和文献[6]中所用方法的正确率比较。这里规定,漏检、错检的正确率为 0,多检的正确率为  $1/n$ ,即当同时检测出一个目标物体和一个非目标物体时,此

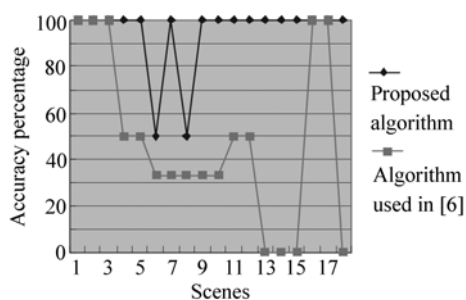


图 7 本文方法与文献[6]方法的正确率比较

Fig. 7 Comparison of accuracy between proposed algorithm and the algorithm used in Ref. [6]

时正确率为 50%。本文方法对于 20 个不同场景的实验中,共有 2 次多检,总的检测正确率 95%,而文献[6]中所用方法在光照强度变化较大及背景较为复杂时,表现不够鲁棒,总的正确率仅为 53.25%。

## 7 结 论

本文利用光电设备所产生的猫眼效应,搭建了基于 CCD 的激光主动探测系统,并设计了自动的光电窥视目标检测算法。实验结果表明,设计的激光主动探测系统和相应的软件算法对于半径为 5 m 以内的窃视目标检测具有良好的效果,对于多个包含复杂背景的目标检测正确率为 95%,每帧的检测时间为 0.015 ~ 0.021 s,这对于未来手持式窃视设备检测仪具有重要意义。但通过实

验也发现,猫眼目标有时仍会被噪声所干扰,出现漏检、虚检现象,考虑到配合特定波长的滤光片可以进一步消除杂散光并降低虚警率,进一步工作将主要集中在滤光片的相关研究上。

#### 参考文献:

- [1] 朱海军,董小刚,李兰秀,等.纳秒激光主动成像侦察系统研究[J].激光与红外,2009,39(12):1301-1304.  
ZHU H J,DONH X G, LI L X, *et al.*. Research on the system of active reconnaissance with nanosecond laser[J]. *Laser & Infrared*,2009,39(12):1301-1304. (in Chinese)
- [2] 赵勋杰,高雅允,张英远,等.基于“猫眼”效应的激光侦查技术及其在军事上的应用[J].光电技术,2003,29(4):415-417.  
ZHAO X J,GAO ZH Y,ZHANG Y Y, *et al.*. Technique of active laser reconnaissance based on the cat-eye effect and the applications in the military[J]. *Optical Technique*,2003,29(4):415-417. (in Chinese)
- [3] LECOCQ C, DESHORS G, LADO-BORDOWSKY O, *et al.*. Sight laser detection modeling[J]. *SPIE*,2003,5086:280-286.
- [4] TRUONG K N,PATEL S N,SUMMET J W, *et al.*. Preventing camera recording by designing a capture-resistant environment[J]. *Lecture Notes in Computer Science*,2005,3660:903-916.
- [5] 周斌,刘秉契,张瑜,等.利用CCD实现“猫眼”目标探测的实验研究[J].光电工程,2011,38(11):35-39.  
ZHOU B,LIU B Q,ZHANG Y, *et al.*. Research of target detection based on the cat-eye effect with CCD[J]. *Infrared Opto-Electronic Engineering*,2011,38(11):35-39. (in Chinese)
- [6] 同兰娟,蒋晓谕,宋小衫,等.基于“猫眼效应”的激光成像的目标探测[J].激光与红外,2009,39(9):982-985.  
TONG L J,JIANG X Y,SONG X SH, *et al.*. Target detection based on laser imaging with cat-eye effect[J]. *Laser & Infrared*,2009,39(9):982-985. (in Chinese)
- [7] REN X M,LI L. Recognizing cat-eye targets with dual criterions of shape and modulation frequency[J]. *Chinese Optical Letters*,2011,9:1-5.
- [8] 张博,牛燕熊,张维,等.“猫眼”目标回波功率的影响因素分析[J].红外与激光工程,2009,38(3):420-423.  
ZHANG B,NIU Y X,ZHANG CH, *et al.*. Analysis of influence factors for reflected wave power of “Cat-eye” target[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2009,38(3):420-423. (in Chinese)
- [9] 和婷,牛燕熊,张鹏,等.光电系统离焦量对其猫眼效应回波功率的影响规律及原因分析[J].红外与激光工程,2012,41(11):2956-2960.  
HE T,NIU Y X,ZHANG P, *et al.*. Original analysis and influence of the focal shift on the retro-reflected power of cat-eye effect[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2012,41(11):2956-2960. (in Chinese)
- [10] 秦楷,韩绍坤,曾春辉.“猫眼”目标的激光主动探测距离分析[J].光学技术,2009,35(4):486-488.  
QIN K,HAN SH K,ZENG CH H. Analysis of active laser detection distance for cat-eye target[J]. *Optical Technique*,2009,35(4):486-488. (in Chinese)
- [11] 闵永智,党建武,张振海.图像式无砟轨道表面沉降在线监测系统[J].光学精密工程,2013,6(21):1621-1627.  
MIN Y ZH,DANG J W,ZHANG ZH H. Online surface settlement monitoring system of image-based ballastless track [J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,6(21):1621-1627(in Chinese).
- [12] 黄继鹏,王延杰,孙宏海.激光光斑位置精确测量系统[J].光学精密工程,2013,4(21):841-848.  
HUANG J P,WANG Y J,SUN H H. Precise position measuring system for laser spots[J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,4(21):841-848. (in Chinese)
- [13] 郝明明,秦莉,朱洪波.基于半导体激光短阵列的976 nm高功率光纤耦合模块[J].光学精密工程,2013,4(21):895-903.  
HAO M M,QIN L,ZHU H B. High power 976 nm fiber coupled module based on diode laser short bars[J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,4(21):895-903. (in Chinese)

- [14] 张震,周孟莲,张检民. CCD中的激光光斑阴影现象及机理[J]. 光学精密工程,2013,5(21):1365-1371.  
ZHANG ZH,ZHOU M L,ZHANG J M. Shadows of laser spots in CCD and their mechanism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,5(21):1365-1371. (in Chinese)
- [15] 王灿进,孙涛,石宁宁. 基于双隐含层BP算法的激光主动成像识别系统[J]. 光学精密工程,2014,6(22):1639-1647.  
WANG CH J,SUN T,SHI N N. Laser active imaging and recognition system based on double hidden layer BP algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*,2014,6(22):1639-1647. (in Chinese)

作者简介:



杨名宇(1983—),男,吉林松原人,博士,助理研究员,2006年于吉林大学获得学士学位,2012年于中国科学院自动化研究所获得博士学位,主要从事可见光和红外图像中目标检测、目标分割方面的研究。E-mail:ymy1983@163.com