

## 基于离焦方式的光电成像设备激光隐身技术

张玉发, 孙晓泉, 雷 鹏, 余大斌

(脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院), 安徽 合肥 230037)

**摘 要:** 光电成像装备的猫眼效应使其易遭受激光主动侦察装备的探测, 在光电装备成像质量变化允许的范围内, 采用离焦的方式来减小猫眼目标的回波功率, 可实现相应的隐身。在研究离焦对光电成像设备激光回波强度影响的基础上, 利用实验的方法对猫眼目标隐身后的成像质量进行验证和评价, 并对离焦后的图像进行清晰度增强。结果表明, 通过离焦的方式可有效增大猫眼目标回波发散角, 降低回波功率, 并且离焦量越大, 猫眼效应越弱。对离焦光电设备所采集的图像进行分析后发现, 离焦量越大, 图像高频分量越少, 但是适当的离焦量所造成的成像质量下降在可接受范围内, 并且通过采取相应的修复措施, 光电成像设备的图像质量得到有效改善。

**关键词:** 猫眼效应; 回波功率; 离焦量; 目标隐身; 图像恢复

**中图分类号:** TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2268-06

## Stealth technology of optical–electro imaging devices based on focal shift

Zhang Yufa, Sun Xiaoquan, Lei Peng, Yu Dabin

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology(Electronic Engineering Institute), Hefei 230037, China)

**Abstract:** Electro–optical devices can easily be captured by active laser detection weapons according to the Cat–eye effect of optical windows. The focal shift method was proposed to decrease retroreflected wave power for Cat–eye target stealth when the image quality of these devices was under controlled. The principle of focal shift was analyzed and experimental validation was carried out respectively. Furthermore, digital image of focal shift device was evaluated based on gray gradient function, and the blurred images were restored. The results show that the divergent angle of reflected wave is enlarged and retroreflected wave power decreased when the focal shift distance increases. Meanwhile, high–frequency information of images captured by focal shift electro–optical devices decrease accordingly. However, the deteriorative range of image quality is acceptable. After restoration, the visual effects of the images are improved efficiently.

**Key words:** Cat–eye effect; retroreflected power; focal shift; target stealth; image restoration

收稿日期: 2014-12-11; 修订日期: 2015-01-12

基金项目: 光电信息控制和安全技术重点实验室基金(20100713-003)

作者简介: 张玉发(1983-), 男, 讲师, 博士生, 主要从事激光光防御方面的研究。Email: zyf9180@163.com

导师简介: 孙晓泉(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为光学技术。Email: sunxq@ustc.com

## 0 引言

由于具备获取目标图像清晰、精度高、发现和捕获目标能力强等特点,基于光电成像的侦察、跟踪、测量等装备被广泛应用于现代战场。然而,光电成像设备普遍存在猫眼效应使得其对入射激光具有很高的后向反射能力,成为一种猫眼目标。因而容易被激光主动侦察装备探测、跟踪并识别并遭到攻击<sup>[1-3]</sup>。为了减少猫眼目标的回波强度,降低激光主动探测设备的有效探测距离和识别概率,实现其对激光主动侦察的隐身,研究者分别提出了在光电成像设备的前端光学组件中增加条状遮挡栅<sup>[4]</sup>或采用介质膜滤波镜头<sup>[5]</sup>的方法,但该类基于遮挡的方法在有效减小小激光回波的同时,也会明显减小光电成像设备的有效光通量,从而使光电成像设备的探测灵敏度受到明显影响。鉴于猫眼效应对于光电成像设备的离焦量具有突出的敏感性<sup>[6]</sup>,在光电成像设备成像质量变化允许的范围内,将笔者方成像系统固化为具有一定离焦量的系统,并且用算法补偿的方式保持成像质量,也是实现猫眼目标激光隐身的可选途径。文中从离焦对光电成像设备的猫眼效应影响和对成像质量的影响两个角度研究用离焦的方式实现激光隐身的技术。通过仿真分析离焦猫眼效应的回波功率特性,利用实验的方法研究离焦方式用于猫眼目标隐身的可行性。分析离焦对光电设备成像质量的影响,通过实验研究离焦光电设备的成像质量并进行评价;对离焦后的图像进行像质增强,改善图像质量;最后总结了离焦量与成像质量的关系。

## 1 基于离焦方式的猫眼目标隐身原理

### 1.1 猫眼效应

理想的猫眼目标模型可以等效为一个成像透镜和一个放置于焦平面处的反射面的组合,其简化模型如图 1 所示。根据光路传输原理,入射光线经过透镜折射,被反射器件反射后原路返回。

当侦察激光远距离照射猫眼目标时,入射到猫眼目标的激光覆盖住整个镜头。在非离焦的情况下,通过镜头的激光光束均能被反射器件接收并原路反射回去。通过简单的几何分析可知,此时的激光回波功率为<sup>[3]</sup>:

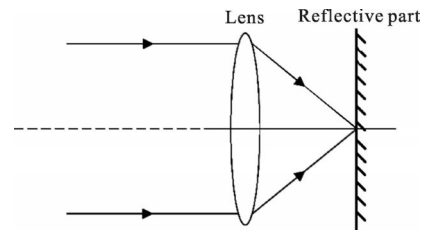


图 1 猫眼效应简易模型

Fig.1 Simple mode of Cat's eye effect

$$P_r = 16PA_r A_{\text{eff}} \rho_s \tau_r \tau_s^2 / (\pi^2 R^4 \theta_i^2 \theta_r^2) \quad (1)$$

式中: $P$ 为发射激光功率; $A_r$ 为接收系统的面积; $A_{\text{eff}}$ 为猫眼目标有效面积; $\rho_s$ 为反射元件的反射率; $\tau_r$ 为发射系统光学透过率; $\tau_s$ 为探测系统的光学透过率; $\tau$ 为激光水平大气透过率; $\tau_s$ 为透镜光学透过率; $R$ 为传输距离; $\theta_i$ 为入射激光发散角; $\theta_r$ 为回波发散角。

### 1.2 离焦对回波功率和发散角的影响

针对实际的情况,由于加工和装配误差、震动、设计缺陷等原因,光电装备的反射面不一定在焦平面上,存在一定的离焦,这使得猫眼目标的回波特性将不同于非离焦的情况。因此建立的离焦光路如图 2、图 3 所示。

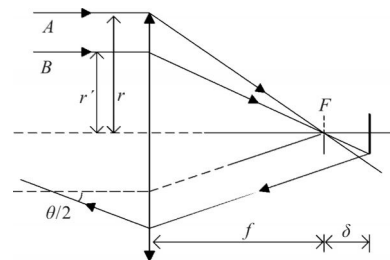


图 2 正离焦光路图

Fig.2 Optical scheme of positive focal shift

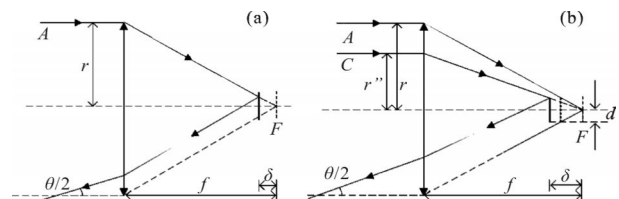


图 3 负离焦猫眼目标光路图

Fig.3 Optical scheme of negative focal shift

设透镜的半径为  $r$ , 焦点为  $F$ , 焦距为  $f$ , 离焦量为  $\delta$ 。当光敏面正离焦时(透镜和焦平面在光敏面同侧), 透镜边缘的入射光线  $A$  经折射后, 无法被光敏面接收而反射, 对反射光能量没有贡献; 只有离轴距离小于或等于半径  $r'$  的光线  $B$  刚好能被光敏面接

收,经光敏面反射后发散角为  $\theta/2$ 。负离焦时(透镜和焦平面在光敏面异侧),设光敏面为正方形结构,其半高度为  $d$ ,若离焦量  $\delta \leq df/r$ ,入射光均能被光敏面接收,如图 3(a)所示;若离焦量  $\delta > df/r$ ,则只有离轴距离小于或等于半径  $r'$  的光线  $C$  能被光敏面接收,如图 3(b)所示。由于加工和装配精度的控制,一般光学设备的光敏面离焦量较小,即  $\delta > df/r$  的情况较少,所以文中暂不考虑该情况。通过几何分析可知,正离焦的情况下的猫眼目标有效口径为:  $r' = rf/(f+2\delta)$ ,由于离焦量相对焦距很小,所以发散角为  $\theta = 4\delta r/f$  ( $f+2\delta$ );负离焦时,有效口径为,发散角为  $\theta = 4\delta r/f^2$ 。

由以上分析可知:离焦条件下猫眼目标的回波功率与多种因素有关。正离焦造成猫眼目标有效口径减小,回波发散角增大;而负离焦时回波功率的衰减仅受回波发散角影响

## 2 仿真及实验分析

### 2.1 仿真分析

设各参数值如下:入射激光功率为  $P=10^6$  W,  $\lambda=1.06$   $\mu\text{m}$ ,  $\theta_i=1$  mrad,  $\tau_r=\tau_i=\tau_s=0.8$ , 猫眼目标口径和接收系统口径均为 40 mm,  $f=100$  mm,  $\rho=0.1$ ,  $R=300$  m。激光大气传输的双向透过率为<sup>[7]</sup>:

$$\tau^2 = \exp[-3.912(\frac{\lambda}{0.55})^{-q} 2R/V] \quad (2)$$

式中:  $V$  为能见度,指数  $q$  与能见度有关的参数。

仿真分析过程中,设能见度为 10 km,则  $q=1.3$ 。仿真结果如下:图 4 为不同的离焦量对回波发散角的影响,图 5 为回波功率随离焦量的变化关系。

从仿真的结果可知,随着光敏面离焦量的增大,激光回波发散角逐渐增大,并且回波功率急剧下降;同时正、负离焦导致的结果不同,在相同离焦

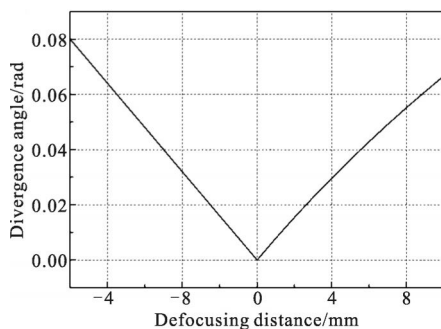


图 4 发散角与离焦量的关系

Fig.4 Divergence angle vs defocusing distance

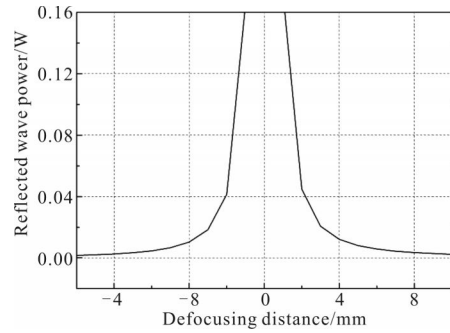


图 5 回波功率与离焦量关系

Fig.5 Reflected wave power vs defocusing distance

量的情况下,负离焦对发散角影响更大,回波功率衰减更快。

### 2.2 实验研究

为验证离焦对激光回波功率的影响,采用连续激光对光敏面为 CCD 的猫眼目标进行离焦回波探测。激光波长为 632.8 nm,猫眼目标为 WAT-525EX2 CCIR黑白摄像机,焦距为 40 mm。实验原理如图 6 所示,离焦量由步进电机控制。

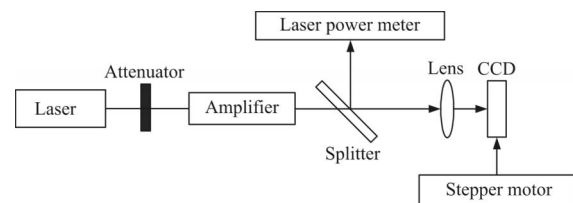


图 6 实验装置原理图

Fig.6 Principle scheme of experiment

实验过程中,控制步进电机以 25  $\mu\text{m}$  的距离移动,记录回波光功率,采集 400 个数据绘制激光回波功率随离焦量变化的曲线如图 7 图所示。表 1 取图 8 中的部分数据进行比较分析,图 8 为在相同的离焦量的情况下,所有实验数据在正离焦和负离焦时的回波功率比较。

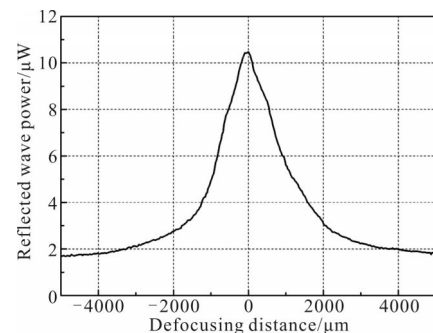


图 7 回波功率随离焦量的变化

Fig.7 Reflected wave power vs defocusing distance

表 1 数据比较(+:正离焦,-:负离焦)

Tab.1 Comparison of parameters(+: positive focal shift, -: negative focal shift)

Defocusing distance/mm	Reflected wave power/ $\mu\text{W}$	Decrease range
-4	1.8	82.7%
-2	2.76	73.5%
0	10.42	0
+2	3.1	70.3%
+4	1.98	81.0%

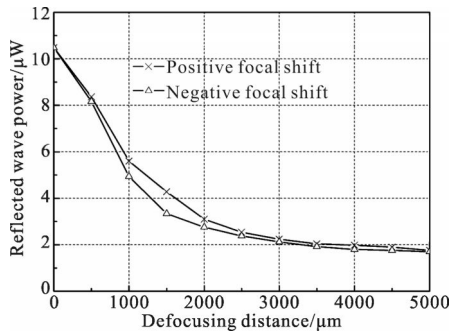


图 8 正负离焦回波功率比较

Fig.8 Reflected wave power comparison of positive focal shift to negative focal shift

从实验结果可以看出,离焦后回波功率快速下降,并且在相同的离焦量时,负离焦的回波功率比正离焦更低,如表 1 所示,下降幅度更大。当离焦量超过一定范围后,正负离焦回波能量接近相等。实验的结论与理论分析和仿真的结果相吻合,证实光敏面离焦后,猫眼特性得到了减弱,即通过离焦的方式可以实现猫眼目标的隐身。

2.3 离焦对像质的影响

通过光敏面离焦的方式可以实现猫眼目标回波功率的降低,但光敏面离焦必然对光电装备成像质量造成一定的影响。

为研究光敏面离焦对成像质量的影响,设计了如图 9 所示的实验装置,成像设备采用上述摄像机,步进电机控制离焦量。物体的像经过离焦的摄像机机构被采集并存储和处理。

图 10 是在不同离焦量的情况下得到的图像,并且相同的离焦量采集两幅数据进行平均以减小误差。由图 10 可知,随着离焦量的不同,成像设备的视场会发生变化,光敏面与镜头距离越远,视场越小,但并不影响对目标的观察。

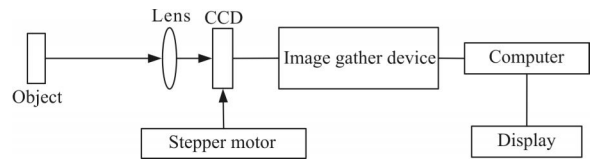


图 9 图像采集原理图

Fig.9 Principle scheme of image gathering

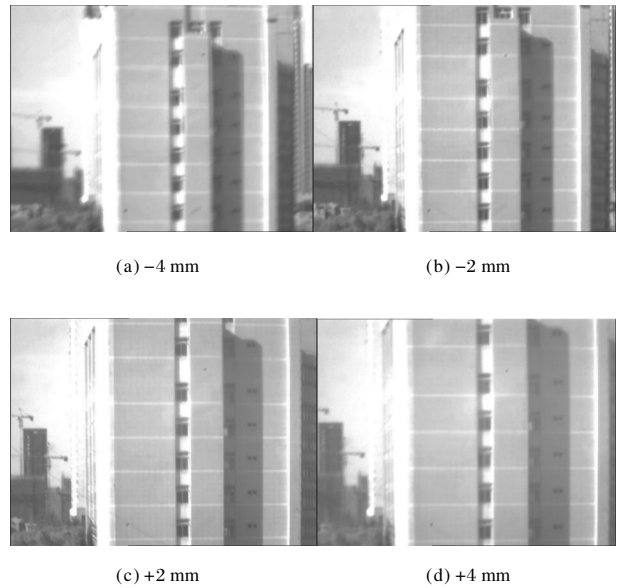


图 10 不同离焦对成像效果的影响

Fig.10 Image quality vs different defocusing distance

图像的灰度平均梯度(gray mean gradients, GMG)越大,表明图像越清晰,图像质量越好。设光敏面偏离焦平面点后,大小  $M \times N$  为的图像中某像素位置处的图像灰度值变为  $g(i, j)$ ,则对于所采集到的整幅图像,其灰度平均梯度可表示为<sup>[8]</sup>:

$$GMG = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{[g(i, j) - g(i+1, j)]^2 + [g(i, j) - g(i, j+1)]^2}}{2(M-1)(N-1)} \quad (3)$$

计算得到的灰度平均梯度如表 2 所示。

表 2 GMG 随离焦量的变化

Tab.2 GMG vs defocusing distance

Defocusing distance/mm	No.1	No.2	GMG	Decrease range
-4	1.097 4	0.978 5	1.037 95	14.8%
-2	1.217 1	1.213 2	1.215 15	3.0%
0	1.223 2	1.214 4	1.218 8	0
+2	1.206	1.206 9	1.206 45	1.0%
+4	0.906 2	1.063 1	0.999 65	17.9%

从计算结果可以看出,微小的离焦不会造成图像整体清晰度的快速下降,如表 2 所示 3% 和 1%;但随着离焦量的增大,图像的清晰度下降速度增大。由此可知,离焦会造成图像灰度平均梯度的下降,并且会影响光电装备的成像质量,但结合第 1 节理论分析和实验可知,微小的离焦量即可造成回波功率的大幅度下降。所以在有限牺牲光电装备成像效果的情况下,控制适当的离焦量,可以降低该类装备由于猫眼效应被探测的概率,提高战场生存能力。

#### 2.4 离焦猫眼目标像质增强

由于光电成像设备的目的是捕获、发现目标,离焦造成图像清晰度下降,不利于光电设备性能的发挥。为获取更多的图像信息,需要对离焦后的猫眼目标图像进行修复,主要是提升图像的高频部分,增强图像的边缘细节。

根据成像系统的退化原理,空域中退化图像  $g(x,y)$  可表示为原图像  $f(x,y)$  和退化函数  $h(x,y)$  的卷积叠加噪声  $n(x,y)$  的形式<sup>[9]</sup>。

$$g(x,y)=f(x,y)*h(x,y)+n(x,y) \quad (4)$$

根据傅里叶变换,空域内的卷积经傅里叶变换到频域内为乘积形式,计算简单,所以公式(4)表示为:

$$G(u,v)=F(u,v)H(u,v)+N(u,v) \quad (5)$$

式中: $G(u,v)$ 、 $F(u,v)$ 、 $H(u,v)$ 、 $N(u,v)$  分别为  $g(x,y)$ 、 $f(x,y)$ 、 $h(x,y)$ 、 $n(x,y)$  的二维傅里叶变换。

图像恢复方法较多,文中采用刃边法和高斯拟合的方式获取点扩散函数后,选择维纳滤波进行图形恢复<sup>[10]</sup>。由于实践过程中,许多场合并不总是知道噪声的分布,最终恢复图像的频域表达式为:

$$F(u,v)=\frac{1}{H(u,v)} \frac{|H(u,v)|^2}{|H(u,v)|^2+K} \cdot G(u,v) \quad (6)$$

式中: $H(u,v)$  为高斯拟合后 PSF 的二维傅里叶变换,利用刃边法获得点扩散函数后再用傅里叶变换得到; $K$  为恢复过程中的规整化值,是使得 GMG 最大时的取值。

利用上述方式对不同离焦程度的图像进行修复,结果如图 11 所示。

从图 11 可以看出,修复后的图像清晰度明显提高。同样利用灰度平均梯度的方式对修复的图像进行清晰度评价,并与离焦图像清晰度进行比较,结果

如表 3 所示。

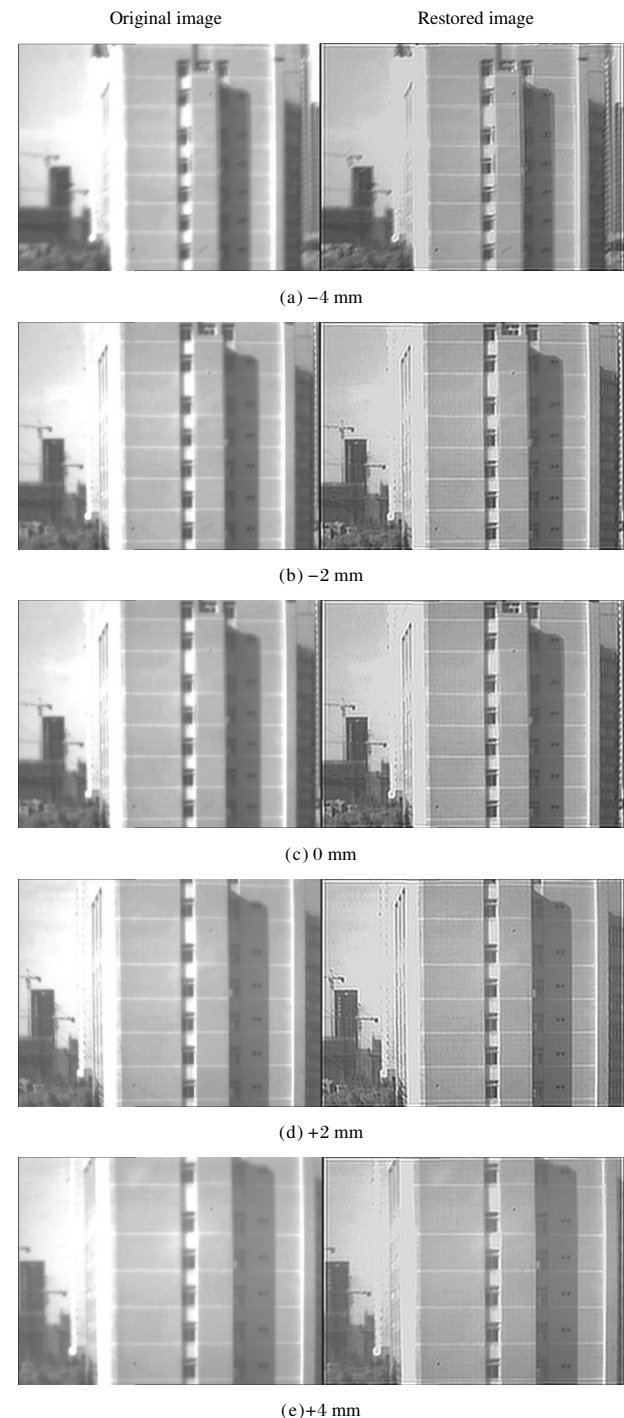


图 11 不同离焦量的原图与修复图

Fig.11 Original image and restored image vs different defocusing distance

由于图像恢复处理增强了图像细节和边缘特征,灰度平均梯度明显增大,表明恢复后图像包含的信息更多,图像更清晰。由于离焦量不同导致的恢复结果也不同,当离焦量较小时(如 2 mm),图像清晰度基本能恢复到未离焦状态,当离焦量较大时(如

表3 GMG 值比较

Tab.3 Comparison of GMG

Defocusing distance/mm	Original image GMG	Restored image GMG	Range
-4	1.037 95	1.805 7	18.6%
-2	1.215 15	2.198 2	0.85%
0	1.218 8	2.217 1	0
+2	1.206 45	2.43 12	9.7%
+4	0.999 65	1.577 1	28.9%

4 mm),采用同样的恢复方式,图像清晰度低于未离焦状态;并且相同的正离焦量和负离焦量所得到GMG值不同,这主要是因为实验图像采集、计算精度、噪声抑制等方面存在误差。

### 3 结论

通过对光电成像设备猫眼效应理论模型的分析 and 推导,研究了离焦对猫眼效应回波功率的影响,并通过实验的方式进行验证。数值分析和实验研究结果表明,离焦量的变化引起回波发散角的变化,进而影响回波功率;并且在相同离焦量的情况下,负离焦所导致的回波功率衰减程度较正离焦更大。离焦的光电系统激光回波功率迅速降低,这将造成激光主动侦察设备对该离焦的成像系统探测距离减小和识别概率下降,说明利用离焦的方式实现猫眼目标激光隐身是一种可行的技术途径,其优势在于将光电成像设备固化在某个离焦值上,即达到一定的隐身目的,并且负离焦所达到的隐身效果更好。离焦系统的光通量不变,同时图像的质量有一定下降,但下降程度可以控制在可接受范围内。为了补偿因离焦造成的光电设备图像质量下降,可通过由测量获取的退化函数对图像进行修复,并辅之以图像增强处理。通过对图像进行修复,不但能提高非离焦图像的清晰度,而且将较小离焦量的图像清晰度恢复到非离焦的状态,以抵消由于离焦隐身带来的像质降低。所以,通过离焦方式实现猫眼目标隐身具有可行性。

### 参考文献:

[1] Mieremet Arjan L, Schleijsen Rich M A, Pouchelle P N. Modeling the detection of optical sights using retro-reflection [C]//SPIE, 2008, 6950: 69500E1-10.

- [2] Christophe Lecocq, Gilles Deshors, Olga Lado-Bordowsky, et al. Sight Laser Detection Modeling [C]//Proc of SPIE, 2003, 5086: 280-286.
- [3] Zhao Xunjie, Gao Zhiyun, Zhang Yingyuan. Technique of active laser reconnaissance and the applications in the military [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(4): 415-417. (in Chinese)  
赵勋杰, 高稚允, 张英远. 基于“猫眼”效应的激光侦察技术及其在军事上的应用 [J]. 光学技术, 2003, 29(4): 415-417.
- [4] Arjan L Mieremet, Ric M A Schleijsen, Frank J M van Putten, et al. Retroreflection reduction by masking apertures [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(4): 043202-1-11.
- [5] Liu Bingqi, Zhou Bin, Zhang Yu. Implementation of effective stealth for cat-eye target by dielectric high reflectivity mirror [J]. *Semiconductor OptoElectronics*, 2012, 33(1): 117-119. (in Chinese)  
刘秉琦, 周斌, 张瑜. 利用介质膜高反镜实现“猫眼”目标有效隐身 [J]. 半导体光电, 2012, 33(1): 117-119.
- [6] He Ting, Niu Yanxiong, Zhang Peng, et al. Original analysis and influence of the focal shift on the retroreflected power of cat's eye effect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 2956-2960. (in Chinese)  
和婷, 牛燕雄, 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.
- [7] Nabouls Mahera L. Fog attenuation prediction for optical and infrared waves [J]. *Opt Eng*, 2004, 43(2): 319-329.
- [8] Zhang Laixian, Sun Huayan, Guo Huichao, et al. Auto focusing algorithm based on largest gray gradient summation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(5): 605-610. (in Chinese)  
张来线, 孙华燕, 郭惠超, 等. 基于图像灰度梯度最大值累加的自动调焦算法 [J]. 光子学报, 2013, 42(5): 605-610.
- [9] Zhang Caifang, Tian Yan, Liu Jian, et al. Automatic PSF identification for motion blurring image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 248-251. (in Chinese)  
张采芳, 田岩, 柳健, 等. 运动模糊图像点扩展函数的自动识别方法 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 248-251.
- [10] Wu Zhenyu, Du Shaojun, Yao Hongli. Restoration and identification of defocus blurred image based on in-focus degree [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 772-776. (in Chinese)  
吴振宇, 杜少军, 姚洪利. 采用聚焦度量的散焦模糊图像参数鉴别及复原 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 772-776.