

# 基于“猫眼效应”的激光主动探测技术应用研究

都元松,董文锋,罗威,黎波涛  
(空军预警学院,湖北 武汉 430019)

**摘要:**基于“猫眼效应”的激光主动探测技术,是对无人机光电系统实施强激光干扰较为有效的探测和效果评估方法。基于对光学探测系统参数理论分析,建立了因离焦量而引起的回波发散角及回波功率计算模型。从激光发散角、入射角、反射角等方面研究了激光主动探测技术所受影响因素,为判别干扰是否有效,对激光回波探测功率的影响因素进行细化分析,在仿真条件下计算出激光干扰有效的入射角度范围。

**关键词:**主动探测;“猫眼效应”;回波功率;有效入射角度

**中图分类号:**TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.07.008

## Application of laser active detection technology based on cat's eye effect

DU Yuan-song, DONG Weng-feng, LUO Wei, LI Bo-tao  
(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** Laser active detection technology based on cat's eye effect is an effective detection and effect evaluation method for the implementation of strong laser interference on the UAV photoelectric system. Based on the theoretical analysis of optical detection system's parameters, the calculation model of echo divergence angle and echo power caused by defocus is established. The influence factors of laser active detection technology are studied from the aspects of laser divergence angle, incidence angle and reflection angle. In order to determine whether it is valid, the influence factors of laser echo detection power are analyzed finely, and the effective angle range of laser interference is calculated under simulation conditions.

**Key words:** active detection; cat's eye effect; echo power; effective incident angle

### 1 引言

近年来,无人机研制成果得到突破性进展,并在几次局部战争中大放异彩。为应对“全球鹰”无人机对我国沿海等重要军事设施光电侦察,采用强激光干扰是应对“全球鹰”无人机光电侦察的有效手段之一,但对远距离激光干扰效果评估并没有找到较为有效的评估方法。基于“猫眼效应”的激光主动探测技术能够有效提高激光回波功率,而“全球鹰”无人机探测系统的结构符合“猫眼”系统理论,

为此我们认为将“猫眼效应”应用于强激光干扰“全球鹰”无人机光电侦察系统的效果评估,是一种较为有效可行的方式方法。

现有的对“猫眼效应”研究大多从激光发射端、大气衰减、目标探测系统光学孔径以及反射端影响出发。如文献[1]提出的一种利用激光信号检测设备,在外场测量试验点位的激光信号参数,同时在内场建立光电探测器激光损伤阈值库,最后结合光学观瞄设备的光学系统参数来评估强激光的干扰效

果;文献[2]分析了强激光在大气传输中产生的折射、吸收、散射和湍流等线性光学效应,以及热晕、受激拉曼散射和大气击穿等非线性光学效应;文献[3]对激光发散角的影响进行了研究;文献[4]从光学角度分析了猫眼镜头在连续激光主动探测下的正、负离焦等效模型;文献[5]分析了倾斜离轴高斯光束通过猫眼光学系统的回波特性。文献[6]提出基于压缩感知的猫眼识别算法,能够测量多输入主、被动图像的向量,并在重建前直接处理。实际光学系统与理想“猫眼”系统相比可能存在离焦现象,因此本文将研究并推导离焦量对“猫眼”目标回波发散角的影响,以及在不同入射角度情况下对目标回波功率的影响,得出对“全球鹰”无人机干扰有效性的判定,为下一步评估对“全球鹰”无人机干扰效果做铺垫。

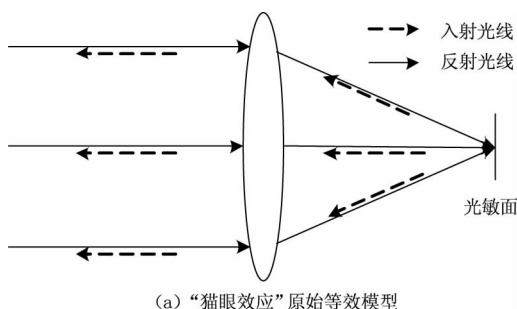
## 2 激光入射“猫眼”系统理论模型

### 2.1 激光主动探测模型

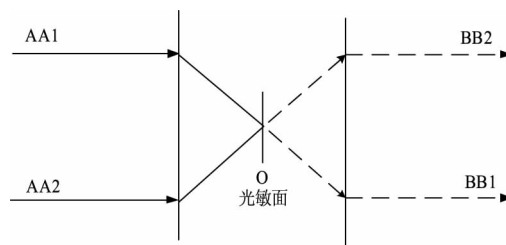
由于光电探测设备光学通道内部构造存在“猫眼效应”,通过激光照射光学侦察设备,检测因“猫眼效应”产生的回波功率大小,从而可以实现对空中光学侦察目标的检测。

随着探测器的晃动或改变光照的角度,光线能够灵活的移动以及自由开合,多路光线经探测系统后会使得光路变窄或合成一条或几条亮带,且单位面积内的光功率会有所增加,如图1(a)所示。其现象如同黑夜中猫的眼睛被光照射后而发出的光,这种奇特的光学现象称之为“猫眼效应”。根据“猫眼效应”,当干扰激光对敌侦察设备进行照射时,经光学孔径发射的激光会按照原路返回并指向光源,且回波能量是普通回波能量的2~4倍<sup>[7]</sup>。“猫眼效应”具有能够使探测光线按照原路返回以及增强回波能量的特点。

正入射光线从 $AA_1$ 、 $AA_2$ 入射,经光学透镜汇聚到焦点 $O$ ,被光敏面反射后分别沿 $BB_1$ 、 $BB_2$ 方向从光学透镜中射出。“猫眼效应”简单物理展开模型,如图1(b)所示。



(a) “猫眼效应”原始等效模型



(b) “猫眼效应”展开等效模型

图1 “猫眼效应”等效模型

Fig. 1 The “cat's eye effect” equivalent model

### 2.2 离焦量对“猫眼”回波发散角的影响

由于设备在安装及制造过程中存在误差,焦点与光敏面并非如理想状态下在同一焦平面上,因此离焦量势必将会影响猫眼目标的回波发散角,从而影响接收端的回波功率。设“猫眼”目标透镜半径为 $r$ ;“猫眼”目标透镜直径为 $D$ ;焦距为 $l$ ;离焦量为 $d$ ;离焦情况下的入射激光光束半径为 $r'$ ;回波发散角为 $\theta_s$ 。图2表示正离焦情况下的猫眼目标等效模型,图3表示负离焦情况下的猫眼目标等效模型<sup>[4]</sup>。

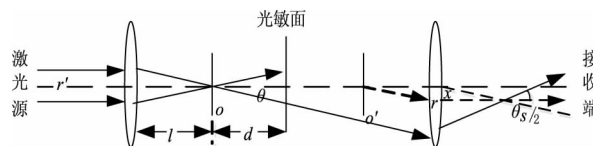


图2 正离焦情况下“猫眼”效果图

Fig. 2 The “cat's eye” effect diagram in the case of positive defocus

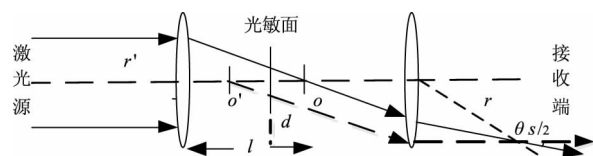


图3 负离焦情况下“猫眼”效果图

Fig. 3 The “cat eye” effect in the case of negative defocus

正离焦情况下,根据三角形相似定理可得:

$$\frac{r'}{l} = \frac{r}{l + 2d} \quad (1)$$

$$\tan \theta = \frac{r}{l + 2d} = \frac{x}{l} \quad (2)$$

则由式(1)和式(2)推出:

$$\tan\left(\frac{\theta_s}{2}\right) = \frac{r - x}{l} \quad (3)$$

则有:

$$\theta_s = 2 \tan^{-1} \left( \frac{dD}{l(l + 2d)} \right) \approx \frac{2dD}{l(l + 2d)} \quad (4)$$

在负离焦情况下,同理可得:

$$\theta_s = \frac{2dD}{l^2} \quad (5)$$

由于在实际光学孔径中  $l \gg d$ ,  $r' = \frac{D}{2}$ , 则“猫眼”目标有效接收面积  $A_s = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$ , 正、负离焦情况下回波发散角  $\theta_s = \frac{2dD}{l^2}$  [4]。

### 2.3 激光入射角对猫眼回波功率的影响

分析正入射条件下正、负离焦对回波发散角和回波功率的影响显得尤为重要, 现具体分析推导如下。设  $\theta$  为发射激光束发散角;  $\theta'$  为回波反射角;  $R$  为探测距离;  $p_t$  为激光发射功率;  $P$  为回波功率;  $\tau_t$  为发射端孔径光学透过率;  $\tau_s$  为猫眼目标光学透过率;  $\tau_r$  为接收光学透过率;  $\tau$  为大气透过率;  $D$  “猫眼”目标直径;  $A_s$  为“猫眼”目标有效孔径接收面积;  $\gamma$  为目标透镜透射率;  $D'$  为回波探测器透镜直径。

由上述参数设置可知, 当激光照射至目标透镜时的光斑直径为  $\theta R$ , 则照射激光在被测目标处的光斑面积为:

$$S' = \pi \left(\frac{\theta R}{2}\right)^2 \quad (6)$$

由于激光照射探测器时, 势必会产生一定的夹角, 使得“猫眼”目标有效孔径接收面积理论值与真实值存在一定的偏差, 所以猫眼目标存在一定夹角时, 其有效接收面积 [8] 为:

$$A_s = 2 \left( \frac{D^2}{4} \arccos \frac{2f \tan a}{D} - f \tan a \sqrt{\frac{D^2}{4} - (f \tan a)^2} \right) \quad (7)$$

其中,  $a$  为探测器偏离猫眼目标位置, 且  $a = \arctan\left(\frac{D}{2f}\right)$  为最大偏离角, 当  $a$  超过最大偏离角时, 目标无回波。其态势图如图4所示。

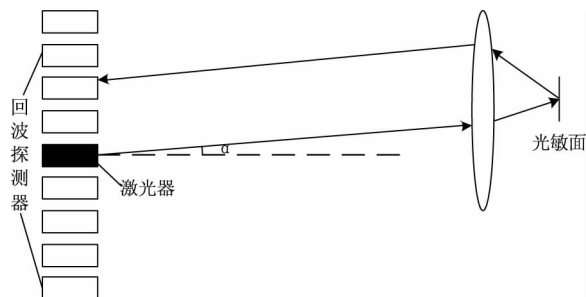


图4 回波探测器接收功率最大偏离角变化态势图

Fig. 4 Change situation chart of maximum deviation angle of receiving power of echo detector

设激光到达目标透镜入射时功率密度为  $p_1$ ,

则有:

$$p_1 = \frac{p_t \tau_t \tau}{S'} = \frac{4p_t \tau_t \tau}{\pi \theta^2 R^2} \quad (8)$$

设激光经目标透镜传播出射时功率为  $p_2$ , 则有:

$$p_2 = p_1 \tau_s \tau_s A_s \gamma = \frac{4p_t \tau_t \tau_s^2 \tau A_s \gamma}{\pi \theta^2 R^2} \quad (9)$$

设探测激光经猫眼效应反射到接收镜头处的光斑面积为  $S$ , 则  $S$  为:

$$S = \pi \left(\frac{R\theta'}{2}\right)^2 \quad (10)$$

其中,  $\theta' = \theta + \theta_s$ ;

则当激光照射至接收端前段透镜时, 功率密度  $p_3$  为:

$$p_3 = \frac{4p_t \tau_t \tau_s^2 \tau A_s \gamma}{\pi \theta^2 R^2} \frac{1}{S} \quad (11)$$

当激光照射至接收端光敏面时, 接收功率  $p_4$  为 [9]:

$$p_4 = \frac{4p_t \tau_t \tau_s^2 \tau A_s \gamma}{\pi \theta^2 R^2} \frac{1}{S} \tau_r A_r = \frac{4p_t \tau_t \tau_s^2 \tau^2 A_s \gamma \tau_r A_r}{\pi \theta^2 R^2 S} \quad (12)$$

其中, 光敏面接收面积  $A_r = \pi \left(\frac{D'}{2}\right)^2$ 。

### 3 不同波长下激光发散角测量

激光经远距离传输势必存在发散现象, 当激光器光敏面处于光学系统焦点时, 由公式  $\theta_s \approx 1.22 \frac{a\lambda}{D}$  可知, 孔径  $D$  越大, 波长  $a$  越小, 则激光发散角  $\theta_s$  越小。由此可知, 当发射功率一定时, 为实现单位面积内功率最大, 减小激光发散角变得尤为重要, 其具体扩束方式如图5所示, 小物镜的后焦点与大物镜的前焦点重合, 激光经过小物镜聚焦后由大物镜扩束并准直, 从而形成发散角相对较小的宽光束, 实现对激光束发散角的压缩。

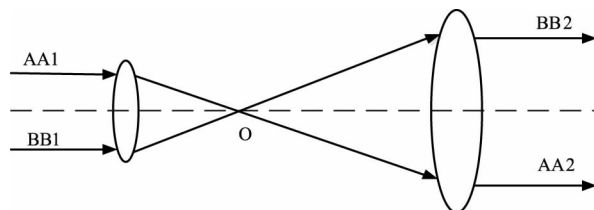


图5 激光扩束等效模型

Fig. 5 Laser beam expansion equivalent model

由于激光在远场存在一定的发散角, 对于满足高斯分布的激光光束, 与之对应的激光发散角内的能量占据总能量的 86.5% [10]。激光发散角越小, 其单位面积所占能量比例越大, 为了实现在特定距离

上全部光斑均落在目标上,要求激光发散角尽可能的减小。高斯光束轮廓图如图6所示。由图可知随着距离的不断增大,发散角也随之不断增大( $\theta_2 > \theta_1$ ),当达到一定距离时,以恒定的锥角不断叠加<sup>[11]</sup>,激光的发散程度由发散角来决定,因此我们采取如图5所示方式增大激光出射孔径,并减小激光波长,以达到减小发散角的目的。

当探测器光敏面处于光学系统焦点时,由公式 $\theta_s \approx 1.22 \frac{\lambda l}{D}$ 可知,不同波长下的激光其激光发散角也不相同,本文采用同一厂家生产的两种波长不同的激光器进行实测分析,如图7所示。其实测探测距离 $L$ 分别为1 m、1.5 m、1.8 m、2.0 m、2.5 m、3.0 m与3.5 m时,具体发散角 $\sigma$ 变化如表1和表2所示。

表1 635 mm 激光器发散角 $\sigma$ 变化结果

Tab.1 Variation of divergence angle of 635 mm laser

| $L/m$    | 1.0     | 1.5     | 1.8     | 2.0     | 2.5     | 3.0     | 3.5     | 均值      |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $\sigma$ | 0.28937 | 0.24828 | 0.23873 | 0.22918 | 0.24956 | 0.25349 | 0.24868 | 0.25104 |

表2 808 mm 激光器发散角 $\sigma$ 变化结果

Tab.2 Variation of divergence angle of 808 mm laser

| $L/m$    | 1.0     | 1.5     | 1.8     | 2.0     | 2.5     | 3.0     | 3.5     | 均值     |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| $\sigma$ | 0.43400 | 0.45267 | 0.47745 | 0.40106 | 0.45211 | 0.44128 | 0.45471 | 0.4448 |

#### 4 仿真与数据分析

##### 4.1 离焦量变化对激光回波发散角影响

由公式(4)和公式(5)可知,仿真计算离焦量对

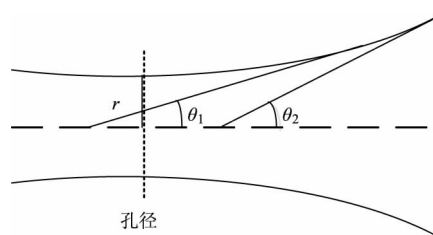


图6 照射激光发散角轮廓模型

Fig.6 Irradiating laser divergence angle contour model

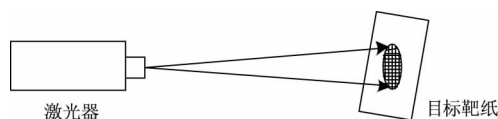


图7 激光器实测模型图

Fig.7 Laser measured model diagram

表1 635 mm 激光器发散角 $\sigma$ 变化结果

Tab.1 Variation of divergence angle of 635 mm laser

| $L/m$    | 1.0     | 1.5     | 1.8     | 2.0     | 2.5     | 3.0     | 3.5     | 均值      |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $\sigma$ | 0.28937 | 0.24828 | 0.23873 | 0.22918 | 0.24956 | 0.25349 | 0.24868 | 0.25104 |

表2 808 mm 激光器发散角 $\sigma$ 变化结果

Tab.2 Variation of divergence angle of 808 mm laser

| $L/m$    | 1.0     | 1.5     | 1.8     | 2.0     | 2.5     | 3.0     | 3.5     | 均值     |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| $\sigma$ | 0.43400 | 0.45267 | 0.47745 | 0.40106 | 0.45211 | 0.44128 | 0.45471 | 0.4448 |

猫眼回波发散角的影响,结果如表3和图8(a)所示。其中 $l$ 表示焦距, $d$ 表示离焦量, $\theta_s$ 表示正离焦,用 $\theta_{sl}$ 表示负离焦。

表3 离焦量对猫眼回波发散角的影响

Tab.3 The influence of the distance from coke to the angle of the echo of cat's eye

| $l/cm$            | 2.8    | 2.8    | 2.8    | 2.8    | 2.8    | 2.8    | 2.8    | 2.8    |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $d/cm$            | 0.10   | 0.15   | 0.20   | 0.25   | 0.30   | 0.35   | 0.40   | 0.45   |
| $D/cm$            | 20     | 20     | 20     | 20     | 20     | 20     | 20     | 20     |
| $\theta_s/rad$    | 0.4675 | 0.6655 | 0.8398 | 0.9920 | 1.1247 | 1.2405 | 1.3417 | 1.4305 |
| $\theta_{sl}/rad$ | 0.4762 | 0.6912 | 0.8929 | 1.0823 | 1.2605 | 1.4286 | 1.5873 | 1.7375 |

由表3可以看出,随着离焦量的不断增大,其正、负离焦的回波发散角不断增大,且相邻间回波发散角差值却随着离焦量的不断增大而减小。由图8(a)可以看出,正离焦量的变化速度小于负离焦量的变化速度示。

当 $l \gg d$ ,如“全球鹰”光电/红外探测器焦距

$l = 1.75 \text{ m}^{[12]}$ ,离焦量对猫眼回波发散角的影响如表4和图8(b)所示。

表4验证了当实际光学孔径 $l \gg d$ 时,正负离焦量趋于相同,其离焦量变化态势如图8(b)所示。且正、负离焦情况下回波发散角均约为 $\theta_s = \frac{2dD}{l^2}$ 。

表4  $l \gg d$  时, 离焦量对猫眼回波发散角的影响Tab. 4 The influence of the distance from coke to the angle of the echo of cat's eye when  $l$  is greater than  $d$ 

|                          |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $l/\text{m}$             | 1.75   | 1.75   | 1.75   | 1.75   | 1.75   | 1.75   | 1.75   | 1.75   |
| $d/\text{cm}$            | 0.10   | 0.15   | 0.20   | 0.25   | 0.30   | 0.35   | 0.40   | 0.45   |
| $D/\text{cm}$            | 20     | 20     | 20     | 20     | 20     | 20     | 20     | 20     |
| $\theta_s/\text{rad}$    | 0.0129 | 0.0193 | 0.0255 | 0.0317 | 0.0379 | 0.0439 | 0.0500 | 0.0559 |
| $\theta_{sl}/\text{rad}$ | 0.0129 | 0.0193 | 0.0255 | 0.0317 | 0.0379 | 0.0439 | 0.0500 | 0.0559 |

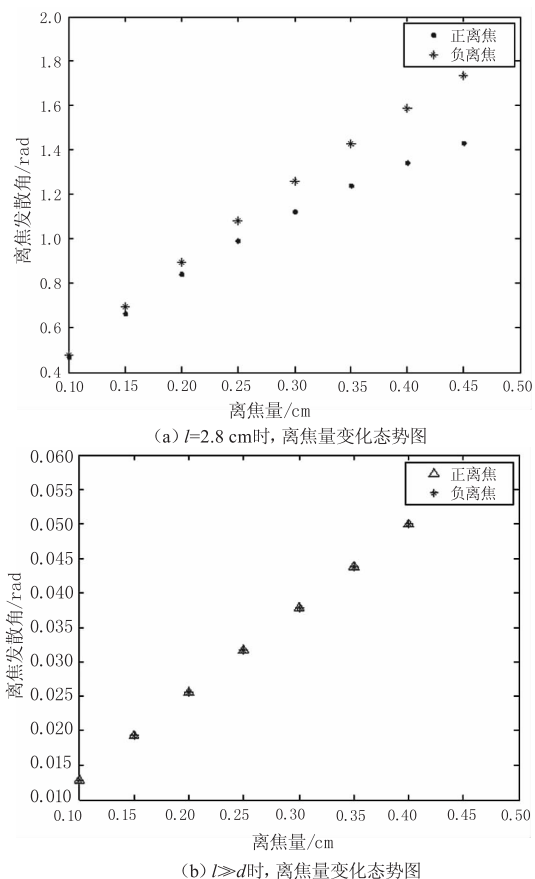


图8 回波发散角随离焦量变化态势图

Fig. 8 Echo divergence angle with the change of defocus

## 4.2 入射角变化对激光回波功率的影响

假设被测目标光电探测器 CCD 位于焦平面上, 激光出射功率为  $3 \times 10^6\text{ W}$ , 激光发射时激光束发散角为  $1\text{ rad}$ , 探测距离为  $10^4\text{ m}$ , 波长  $0.523\text{ }\mu\text{m}$ , 离焦量为 0, 发射端孔径光学透过率为 95%, 接收端光学透过率为 95%, 大气透过率为 80%, “猫眼”目标光学透过率为 99%, 目标透镜透射率为 98%, “猫眼”目标回波发散角为  $1\text{ rad}$ , “猫眼”目标直径为  $28\text{ cm}$ , 回波探测器透镜直径为  $30\text{ cm}$ 。采用公式仿真计算不同偏离角下的目标有效孔径接收面积以及回波探测器接收功率, 如图 9 和 10 所示。

由公式  $\alpha = \arctan\left(\frac{D}{2f}\right)$  计算可知, 其最大偏离

角不超过  $1.533\text{ rad}$ 。由图 9~10 可以看出, 若大于最大偏离角, 则目标无回波, “猫眼”目标有效孔径接收面积以及回波探测器接收功率均趋于零; 且“猫眼”目标有效孔径接收面积随着激光入射角度的不断增大而不断减小, 当激光入射角度大于  $1\text{ rad}$  时, “猫眼”目标有效孔径接收面积及回波探测器接收功率成指数倍减小并逐渐趋于临界值。

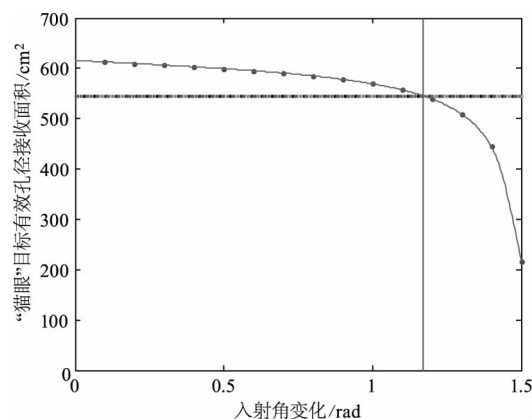


图9 “猫眼”目标有效孔径接收面积随入射角变化曲线图

Fig. 9 Curve map of the effective aperture receiving area of the “cat’s eye” target with the incident angle

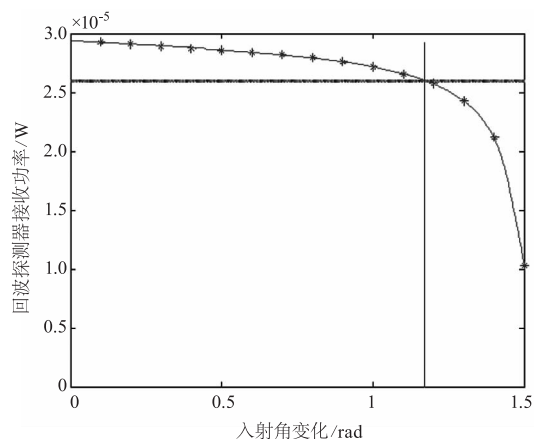


图10 回波探测器接收功率随入射角变化曲线图

Fig. 10 Graph of the change of receiving power with angle of incidence

由公式 (12) 可知, “猫眼”目标有效孔径接收面积与回波探测器接收功率成正比。一般而言,

随着激光功率密度由小增大,探测器的响应依次经历4个区域:线性区、饱和区、混沌区、零输出区。激光功率密度较小时,探测器输出电压随激光功率密度的增大而线性增大,此时位于线性区内,即探测器的正常工作区域。由图10可以看出,回波探测器接收功率随着入射角度的变化存在着一定的线性关系。

为实现对“全球鹰”无人机光电探测系统有效干扰,我们采取激光主动探测技术对“全球鹰”无人机实施强激光干扰,并对经“全球鹰”无人机光电侦察系统反射回来的激光回波功率进行探测,在模拟仿真场景下,设置探测器检测灵敏度为 $2.6 \times 10^{-5} \text{ W}$ ,当被测“猫眼”目标光学系统孔径一定时,可以反演出入射角的最大值为 $1.172 \text{ rad}$ ,当入射偏角超过其最大入射偏角时回波探测器探测不到经“全球鹰”无人机光电侦察系统反射回来的激光回波功率,视为探测无效或没有发现目标。

## 5 结 论

实现对无人机光电侦察探测系统的强激光干扰前提是有效发现目标并对其进行实时跟踪,由于目标距离远,特征信号弱,如何提高检测概率是目前的重要难点之一。猫眼效应是有效提取回波特征的技术之一;分析猫眼效应的原理,指出猫眼效应的效果受到被测光电侦察系统光学系统的结构误差影响,分析了被测光电系统光敏面离焦情况下,猫眼回波的功率强弱与探测激光入射角、被测目标有效接收面积的关系,推导并计算出激光探测有效时入射角度的范围。研究可为实施对无人机光电侦察系统的有效跟踪和干扰创造条件。

## 参考文献:

- [1] KANG Wenyun, QIAO Guangling. Study for evaluation method of high-power laser countering optical observation-aim device[J]. Laser & Infrared, 2002, 32(1): 23–24. (in Chinese)  
康文运, 乔广林. 强激光对光学观瞄设备干扰效果评估方法研究[J]. 激光与红外, 2002, 32(1): 23–24.
- [2] HU Bo. Analysis on high-energy laser atmospheric transmission characteristic and adaptive optics technology[J]. Electro-Optic Technology Application, 2003, 73(5): 7–10. (in Chinese)  
胡波. 强激光大气传输特性分析及自适应光学技术[J]. 光电技术应用, 2003, 73(5): 7–10.
- [3] ZHANG Debin, SONG Yuhua, WANG Quansheng, et al. Error analysis of laser divergence angle measurement[J]. Laser Technology, 2016, 40(6): 926–929. (in Chinese)  
张德斌, 宋余华, 王全胜, 等. 激光发散角测量的误差分析[J]. 激光技术, 2016, 40(6): 926–929.
- [4] GUO Rongxing, SUN Junling, ZHAO Cheng, et al. Study on the laser active detection technology based on the Cat's eye effect[J]. Journal of Shandong Agricultural University, 2016, 47(2): 278–282. (in Chinese)  
郭荣幸, 孙俊灵, 赵成, 等. 基于猫眼效应的激光主动探测技术研究[J]. 山东农业大学学报, 2016, 47(2): 278–282.
- [5] ZHAO Yanzhong, SUN Huayan, SONG Fenghua. Propagation properties of oblique and of f-axial gaussian beams passing through cat-eye optical lens[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 39(10): 1046–1050. (in Chinese)  
赵延伸, 孙华燕, 宋丰华, 等. 倾斜离轴高斯光束通过猫眼光学镜头的传输特性[J]. 光学学报, 2014, 39(10): 1046–1050.
- [6] LI Li, Hui Li, Ersheng Dang, and Bo Liu. Compressive sensing method for recognizing cat-eye effect targets[J]. Optical Society of America, 2013, 52(28): 7033–7039.
- [7] LI Xudong, MI Jianjun, RU Zhibing, et al. Cat eye effect based on active laser detection[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(2): 342–347. (in Chinese)
- [8] HUA Wenshen, ZHANG Yue, WANG Yuanbo. Analysis of influence factors for anti-detectionability of cat-eye optical windows[J]. Laser Technology, 2013, 37(3): 380–384. (in Chinese)  
华文深, 张悦, 王元铂, 等. 猫眼光学窗口反侦察能力影响因素分析[J]. 激光技术, 2013, 37(3): 380–384.
- [9] DONG Liang, YANG Zhiyong. Influence element and simulation analysis of cat-eye target detection[J]. Electro-Optic Technology application, 2015, 30(1): 72–75. (in Chinese)  
董亮, 杨智勇. “猫眼”目标探测影响因素及仿真分析[J]. 光电技术应用, 2015, 30(1): 72–75.
- [10] LU B D. Laser optics: laser beam propagation, transformation and beam quality control[M]. 2nd ed. Chengdu: Sichuan University Publishing Press, 1992: 60–63.
- [11] Koehn W. Solid-state laser engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 171–181.
- [12] JI Xiaoguang, LI Yidong. Meiguo Gaokong Changhangshi Wurenji—QR-4 “Quanqiyue”[M]. Aviation industry press, 2011. (in Chinese)  
季晓光, 李屹东. 美国高空长航时无人机: QR-4 “全球鹰”[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.