

文章编号 1004-924X(2015)07-1948-09

## 空间激光主动探测离轴三反系统的猫眼效应

陆 君<sup>1</sup>, 王挺峰<sup>2</sup>, 李远洋<sup>2,3\*</sup>, 王 锐<sup>2</sup>, 孙 涛<sup>2</sup>, 郭 劲<sup>2</sup>

(1. 第二炮兵装备研究院, 北京 100085; 2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所  
激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**采用光线追迹法, 分析了空间环境下离轴三反结构系统的猫眼效应。给出了离轴三反系统的像面倾斜、视场和离焦对猫眼回波效率和发散角的影响, 证明了离轴三反系统像面倾斜量是决定能否发生猫眼效应的主要因素。提出利用阈值法实现激光主动探测猫眼信号的基本原理, 并结合高阶余弦漫反射模型, 分析了目标漫反射信号对猫眼信号检测的影响。估算了 20 km 到 120 km 探测距离下, 理论上所需不同光束质量激光的最小脉冲能量。仿真表明, 当发射光束的全角发散角为 0.3 mrad 时, 50 km 和 120 km 探测距离下所需的最小激光脉冲能量分别为 0.7 mJ 和 3.1 mJ。最后, 通过原理实验, 验证了空间激光主动探测法探测目标“猫眼”效应的可行性。

**关键词:**激光主动探测; 猫眼效应; 离轴三反系统; 回波特性; 光线追迹

**中图分类号:** TH703; V556.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152307.1948

## Active laser detection of cat's eye effect for space-based off-axis three mirror optical system

LU Jun<sup>1</sup>, WANG Ting-feng<sup>2</sup>, LI Yuan-yang<sup>2,3\*</sup>, WANG Rui<sup>2</sup>, SUN Tao<sup>2</sup>, GUO Jin<sup>2</sup>

(1. *The Second Artillery Equipment Academy, Beijing 100085, China*; 2. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: redapple115@163.com*

**Abstract:** The cat's eye effect of a space-based Off-axis Three Mirror (OTM) system was analyzed by using the ray tracing method. The effects of image tilt, views of field and the defocus of the OTM system on the echo efficiency and beam divergence angle of cat's eye retro-reflection were given. Then, it pointed out that the image tilt size of the OTM system is a main factor to produce cat's eye echo wave. A threshold method was proposed to actively detect the cat's eye signals, then the influence of diffuse reflection from a target on the detection of cat's eye signals was analyzed by combining the high order cosine scattering mode. The minimum laser pulse energy requirements for 20 km to 120 km detection range under different transmissive beam qualities were given theoretically. The simulation results show that when the beam divergence entire angle is 0.3 mrad, the minimum laser pulse energy requirements at the detection distances of 50 km and 120 km are 0.7 mJ and 3.1 mJ, respectively. Finally, an experiment was

**收稿日期:** 2014-06-23; **修订日期:** 2014-08-19.

**基金项目:** 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2013AAXXXXXXX)

carried out to verify the feasibility of the active detection of OTM systems with the cat's eye effects.

**Key words:** active laser detection; cat's eye effect; off-axis three mirror system; retro-reflection characteristics; ray tracing

### 1 引 言

在光学系统中,焦平面处通常会安装具有一定反射特性的光电探测器,当光学系统受到激光直接照射时,能够产生按原路返回的准直光,致使光学系统的回光亮度比其他漫反射体的回光亮度高出 2~4 个数量级,这种现象称为猫眼效应。利用猫眼效应与漫反射在回光亮度上的差异,不但可以提高光学系统的识别概率<sup>[1-3]</sup>,而且能够显著增大探测系统的作用距离<sup>[4-5]</sup>。

本文针对猫眼效应在天基激光主动探测方面的应用,详细分析了离轴三反系统的猫眼回波特性,结合文献[5]中关于离轴三反结构对猫眼回波影响的结果,确定了主动探测系统的具体结构参数和信号提取方法。最后搭建了原理实验系统,验证了利用离轴三反系统的猫眼效应进行空间激光主动探测的可行性。

### 2 激光主动探测猫眼效应的理论模型

猫眼效应的模型主要由激光发射系统,接收系统和目标系统 3 部分构成。激光发射系统和接收系统同轴或相距很近,在目标与发射系统间光在自由空间传输。令发射系统出射的激光总能量为  $E_t$ ,远场发散角为  $\theta_t$ (半角),发射系统透过率为  $\tau_t$ ,目标光学系统的入瞳直径为  $D_o$ ,则目标系统的接收光场能量为:

$$E_o = \frac{0.25\pi E_t D_o^2 \tau_t}{\pi L^2 \theta_t^2}, \quad (1)$$

其中: $L$ 为发射系统到目标的传输距离。为了尽量减小问题的复杂性,引入猫眼效应回波效率的概念,将该参数定义为:

$$T = E_r/E_o, \quad (2)$$

其中: $E_r$ 为猫眼效应产生的回波能量。回波效率  $T$  将目标光学系统作为整体处理,反映了目标发生猫眼效应的能量效率。

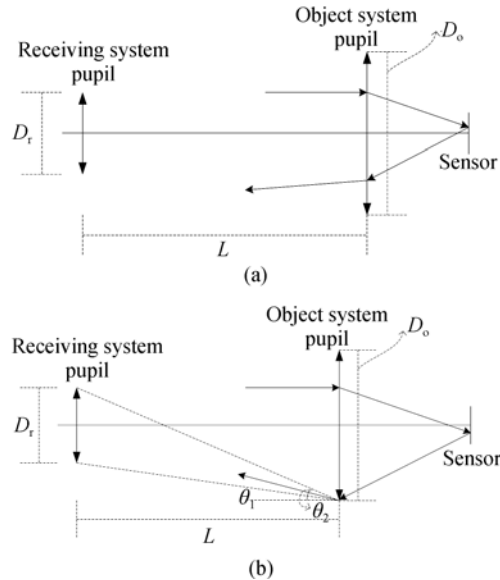


图 1 离焦条件下,猫眼效应回波光路图

Fig. 1 Layouts of cat's eye retro-reflection under defocus

在猫眼回波由目标向接收系统传输的过程中,回波信号能量主要由回波远场发散角  $\theta_r$  决定。当目标系统存在离焦时,回波为非准直光。图 1 (a)为离焦导致回波发散的情况,图 1(b)表示离焦导致回波会聚的情况。给定接收系统的入瞳直径为  $D_r$ ,依据图 1(a)中的几何关系,回波发散时接收系统接收到的回波能量为:

$$E = \frac{0.25 \tau_r E_r D_r^2}{(L\theta_r + D_o/2)^2}, \quad (3)$$

其中  $\tau_r$ 为接收系统透过率。

由于猫眼回波会聚时的情况较为复杂,引入两个特征角度  $\theta_1$  和  $\theta_2$ ,分别为:

$$\theta_1 = \frac{D_o - D_r}{2L}, \theta_2 = \frac{D_o + D_r}{2L}. \quad (4)$$

当  $\theta_1 < \theta_r < \theta_2$  时,从图 1(b)中可以看出,全部回波能量进入接收系统入瞳,即:

$$E = \tau_r E_r. \quad (5)$$

当  $\theta_r < \theta_1$  或  $\theta_r > \theta_2$  时,经推导得到:

$$E = \frac{0.25 \tau_r E_r D_r^2}{(L\theta_r - D_o/2)^2}. \quad (6)$$

在式(3),(5)和(6)中,发射激光远场发散角、

系统透过率、系统口径及传输距离等都是系统的固有参数,猫眼回波效率  $T$  和回波光束远场发散角  $\theta_r$  这两个参数由目标光学系统的具体结构决定。因此,为了分析基于猫眼效应的主动探测技术对空间光学系统的探测性能,需要研究目标光学系统的结构对回波效率和发散角的影响规律。

### 3 离轴三反系统结构对猫眼效应的影响

为了研究离轴三反结构对猫眼效应的影响,光场以平面波形式入射到离轴三反系统,用 Zemax 软件对光线进行追迹<sup>[6]</sup>。使用理想平面镜代替像面,模拟猫眼效应。统计进入目标的光线数量为  $N_i$ ,离开目标返回的光线数量为  $N_r$ ,则该系统猫眼效应的回波效率  $T$  为:

$$T = \frac{R_i N_r}{N_i}, \quad (7)$$

其中:像面成像探测器表面反射率  $R_i$  为常量,回波效率  $T$  主要由返回光线数目  $N_r$  决定。为了便于计算,仿真中令  $R_i = 1$ ,暂时忽略其影响。

表 1 离轴三反系统的基本结构参数

Tab. 1 Structure parameters of off-axis three mirror system (mm)

No.	Radius	Thickness	Glass	Conic
OBJ	Infinity	Infinity	—	—
1	-7 745.026	-2 452.499	Mirror	-4.927
2	-3 110.388	2 452.499	Mirror	-2.434
3	-5 182.560	-2 183.826	Mirror	-1.286
IMA	Infinity	—	—	—

本文以一个典型离轴三反系统为实例进行分析,得到了一些普遍适用的结论。该系统的结构参数由表 1 给出,离轴方式为视场离轴,离轴量为  $3.5^\circ$ 。系统的入瞳直径为 700 mm,有效焦距 (EFL) 为 7 m,所以是一个  $F/10$  的系统。离轴三反系统的视场一般为线视场,因此该系统的半视场角为  $2^\circ \times 0.1^\circ$ , X 轴方向视场远远大于 Y 轴视场。图 2 为该系统的结构示意图。

#### 3.1 像面倾斜对猫眼效应的影响

离轴三反系统在共轴系统基础上引入离轴量。分析表明,如果以离轴系统的零视场主光线

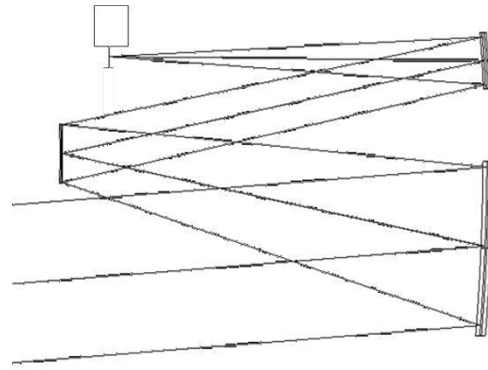


图 2 离轴三反系统结构示意图

Fig. 2 Structure of off-axis three mirror system

为光轴,其一阶特性与共轴系统类似。这说明对于离轴三反系统来讲,离轴量不是决定能否发生猫眼效应的最主要因素。而一些文献提到离轴三反可能不存在猫眼效应<sup>[5]</sup> 主要是因为优化时,离轴三反的像面是允许倾斜的,此时反射光束可能会被光学元件边缘阻挡,无法产生回波。因此,需要分析像面倾斜量对回波效率的影响。

不改变离轴三反系统的其它结构,只改变其像面倾斜量,得到回波效率随像面倾斜的变化曲线如图 3 所示。虽然此时系统不符合光学设计要求,但是可以从原理上反映像面倾斜对猫眼回波的影响。图 3 中当像面倾斜约为  $0.48^\circ$  时,该系统的猫眼效应回波效率达到峰值,并且峰值接近于 1,此时零视场主光线与像面垂直,但是系统不能清晰成像。如果将像面倾斜量调整为  $0^\circ$ ,则该系统能够正常成像,此时回波效率约为 0.88。图 3 表明离轴三反系统的主光线与像面法线偏离量越大,系统猫眼回波效率越低。当像面倾斜角度小

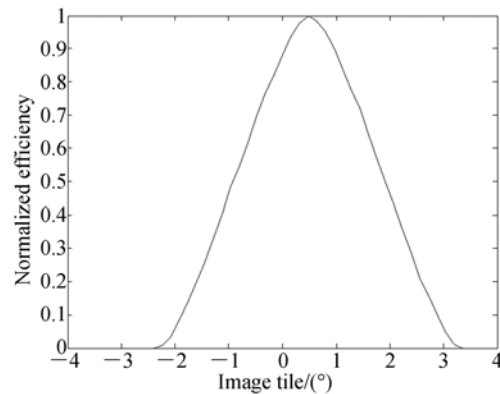


图 3 回波效率随像面倾斜的变化

Fig. 3 Variation of retro-reflect efficiency with image tilt

于  $-2.4^\circ$  或者大于  $3.36^\circ$  时,系统的回波效率趋于零,无法观察到猫眼回波。因此,在设计时像面倾角过大会导致离轴三反系统不存在猫眼效应。但是通过对多个离轴三反系统进行考证<sup>[7-9]</sup>,除了某些特殊的成像系统,多数设计不会使像面倾斜角过大,因此考虑离轴三反的猫眼效应仍有实际意义。

### 3.2 倾斜入射对猫眼效应的影响

对于非合作目标,进入目标的光场存在视场,需要分析入射光束视场对猫眼回波效率的影响。图 4(a)为猫眼回波效率随 Y 视场的变化曲线。离轴三反系统在 Y 方向的半视场角为  $0.1^\circ$ ,由于目标采用了视场离轴,因此本身有  $3.5^\circ$  的偏移量。观察图 4(a)中回波效率随视场的变化情况,当入射光束在离轴三反视场内时,回波效率基本为常量;当入射光束超出离轴三反的视场时,回波

效率迅速下降,并趋近于零。由于设计时加入了一些余量,因此视场角略大。图 4(b)为猫眼回波效率随 X 方向视场的变化情况。与 Y 方向视场的仿真结果类似,当激光从目标视场外入射时,不产生猫眼回波。当激光入射方向在系统视场内时,回波效率保持较高水平。但是由于 X 方向的大视场产生较大的高阶像差,导致回波效率随着视场的增大略有下降。为了校正边缘视场的高阶像差,对边缘视场进行渐晕处理。图 4(b)给出了不同程度渐晕下,回波效率随视场的变化。从图中可以看出,渐晕对中心视场几乎没有影响,但是使边缘视场的回波效率下降,下降幅度与渐晕程度正相关。当离轴三反系统的像面倾斜量确定后,视场只影响猫眼效应的产生范围,不影响回波效率 T。

### 3.3 系统离焦对猫眼效应的影响

由于目标光学系统焦距很长,所以系统调焦所引入的离焦量对猫眼效应的回波效率影响微弱,

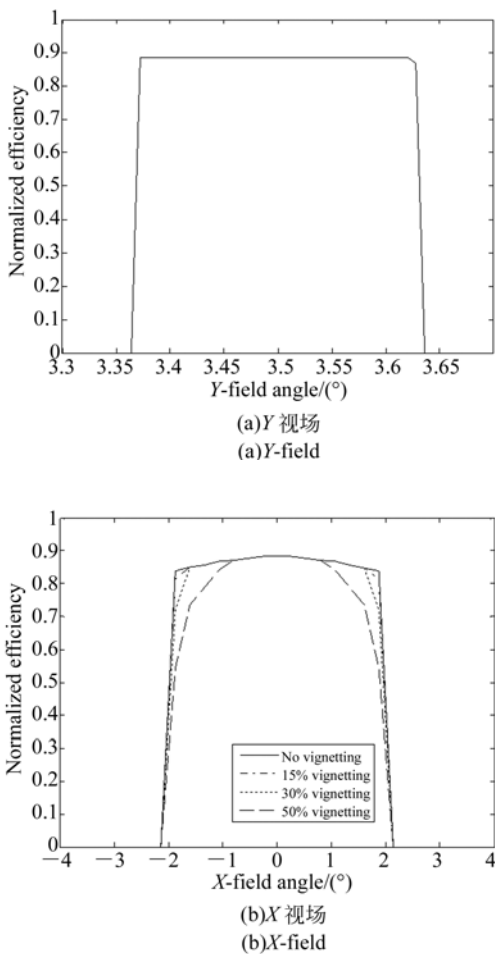


图 4 猫眼回波效率随视场变化

Fig. 4 Variation of retro-reflect efficiency with fields

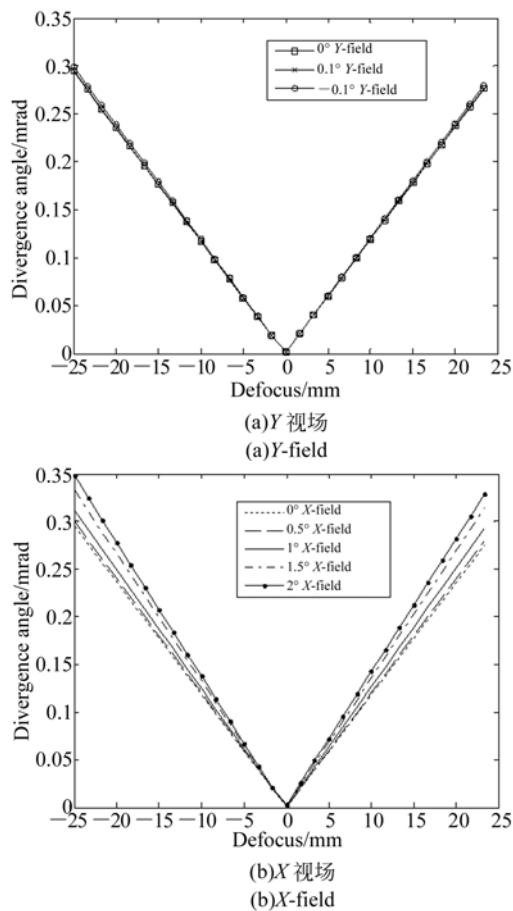


图 5 猫眼回波发散角随离焦变化

Fig. 5 Variation of divergence angle of cat's eye retro-reflection wave with defocus

可以忽略;但是,微小的离焦对回波发散角  $\theta_r$  的影响很显著。图 5(a)为猫眼回波发散角随离焦和 Y 方向视场的变化曲线。由于 Y 方向视场全角只有  $0.2^\circ$ ,所以曲线随视场角的变化不显著。图 5(b)是猫眼回波发散角随离焦和 X 方向视场的变化曲线,图中只计算了视场角为正值时的情况。由于离轴三反系统在 X 方向视场是对称的,所以视场角为负值时的结果与正值时的结果完全一致,在此不做赘述。由于 X 方向视场远大于 Y 方向视场,所以猫眼效应回波发散角随视场的变化更为显著。视场越大,发散角随离焦变化的斜率越大。

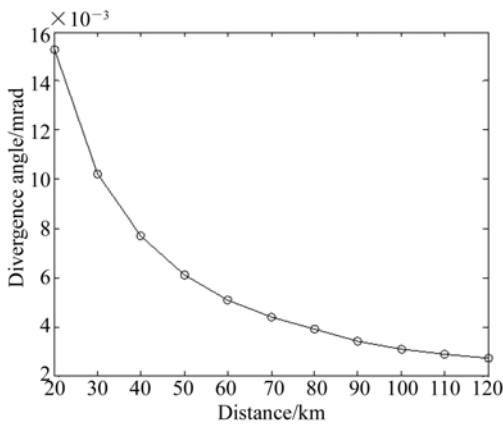


图 6 猫眼回波发散角随探测距离的变化

Fig. 6 Variation of divergence angle of cat's eye retro-reflective wave with distance

图 5 中假设入射光束为平面波,此时零离焦回波发散角几乎为零,实际应用中入射光束可能不是平面波。在实际探测环境下,目标光学系统工作在零离焦附近。但是,由于探测激光发射系统距离目标光学系统较近,激光光源对于目标系统是有限远处的点光源,所以进入目标的不是平面波,而是球面波,导致目标即使处于无离焦状态,其回波发散角也不为零。由光线追迹结果可得,激光正入射零离焦离轴三反系统时,猫眼回波发散角随探测距离的变化如图 6 所示。随着探测距离的增大,回波发散角逐渐减小。如果在图 5 中计入由探测激光的球面波特性造成的离焦,将图 5 中的曲线按图 6 中零离焦回波发散角进行平移即可。

#### 4 基于猫眼效应的激光主动探测系统

主动探测系统各参数的确定与回波信号的提取方式密切相关,这里采用阈值法提取猫眼回波信号<sup>[3]</sup>。该方法的主要限制因素是目标漫反射太阳光在 CCD 上产生的背景信号,因此目标的漫反射特性对确定探测系统的参数十分重要。

空间目标对太阳光照的漫反射情况复杂,用简单理想漫反射面(朗伯面)描述空间目标的反射特性时误差较大。为了在保证一定精度的同时简化分析,本文采用高阶余弦散射模型。空间目标的三阶余弦散射在接收系统处产生的辐照度为<sup>[10]</sup>:

$$E_{ap} = \int \frac{2A \cos \theta_i \cos^3 \theta_o E_{sun}(\lambda) \rho(\lambda)}{\pi L^2 (2 - \sin^4 \theta_i - \cos^4 \theta_i)} d\lambda, \quad (8)$$

式中:  $E_{sun}(\lambda)$  为太阳光谱辐照度<sup>[10]</sup>,  $L$  为目标与接收系统之间的距离,  $\rho(\lambda)$  为目标反射率,  $A$  为目标的有效反射面积,  $\theta_i$  和  $\theta_o$  分别为入射光线和探测器观测方向与反射面法线的夹角,  $\theta_i$  和  $\theta_o$  的取值均为  $[0, \pi/2]$ 。

接收系统能够实现对猫眼信号的聚焦。令接收系统焦距为  $f$ , CCD 单像素的线尺寸为  $\Delta x$ , 根据成像系统的几何关系可得:

$$A_{px} = \left( \frac{\Delta x}{f} R \right)^2, \quad (9)$$

其中:  $A_{px}$  为像面上单一像素在物空间对应的等效面积元。物空间  $A_{px}$  面积内可能包含多种反射材料,其中第  $k$  种材料的反射率为  $\rho_k(\lambda)$ , 面积为  $A_{px-k}$ , 入射与观察角分别为  $\theta_{i-k}$  和  $\theta_{o-k}$ 。由此得到目标漫发射光在单像素中产生的信号功率为:

$$E_{px} = \sum_k \int \frac{2A_{px-k} \cos \theta_{i-k} \cos^3 \theta_{o-k}}{\pi R^2 (2 - \sin^4 \theta_{i-k} - \cos^4 \theta_{i-k})} \times E_{sun}(\lambda) \rho_k(\lambda) d\lambda. \quad (10)$$

阈值法提取猫眼信号只与背景信号在单像素中的最大值相关。令等效面积元内材料的最大反射率为  $\rho_{k-max}(\lambda)$ , 结合式(9)和式(10)能够得到单像素背景信号的最大功率为:

$$E_{px-max} = \frac{2\Delta x^2}{\pi f^2} \int \rho_{k-max}(\lambda) E_{sun}(\lambda) d\lambda. \quad (11)$$

公式(11)反映了用阈值法提取猫眼信号的过程中,目标漫反射太阳光能够在像面单像素内产生的最大背景。

主动探测系统参数如下:猫眼信号接收系统的入瞳直径为 300 mm,取系统成像  $F$  数为 10,则接收系统焦距  $f = 3\ 000\ \text{mm}$ ,选用 Basler avA1000 作为成像器件,该相机的 CCD 探测器的像元面积为  $5.5\ \mu\text{m} \times 5.5\ \mu\text{m}$ 。卫星表面裹覆材料的反射率最高可达 0.8,假设材料反射率在可见光范围内随波长的变化不显著,取  $\rho_{r\text{-max}}(\lambda) = 0.8$ 。将上述参数带入式(11),目标可能产生的最大单像素背景功率为  $E_{\text{px-max}} = 9.411 \times 10^{-10}\ \text{W/pixel}$ 。相机在保持 120 frames/s 的视频输出速率下,最大积分时间为 8 ms,由此可得单帧图像可能的最大单像素背景能量为  $7.529\ 5 \times 10^{-12}\ \text{J/pixel}$ 。

采用阈值法提取猫眼信号的最基本条件是在回波信号在单像素中的能量大于背景信号的单像素最大能量,而且为了保证低虚警概率,猫眼信号应高出背景信号最大值的 5~6 倍以上<sup>[2]</sup>。因此,如果一帧图像中只接收到一次光脉冲,则猫眼回波信号的单像素能量最低应达到  $3.764\ 8 \times 10^{-11}\ \text{J/pixel}$ 。对于无像差理想光学系统,猫眼回波信号在 CCD 上的成像光斑大小应为接收系统的衍射极限,但是由于光学设计残留像差、系统装调误差和少量离焦的存在,回波聚焦光斑最多可弥散到约 10 pixel,因此,回波进入接收系统的最低能量应达到  $3.764\ 8 \times 10^{-10}\ \text{J}$ 。

结合本文第三部分给出的离轴三反系统实例,仿真计算猫眼效应产生的回波信号。令发射激光系统的总透过率为 0.8,接收系统透过率为 0.5。目标系统传感器 (CCD) 的反射率  $R_t = 0.01$ <sup>[1]</sup>。由光线追迹结果可知,猫眼回波是发散的,因此结合式(3)和对回波发散角  $\theta_r$  及回波效率  $T$  的讨论,并令接收系统需要的最小能量  $E = 3.764\ 8 \times 10^{-10}\ \text{J}$ ,可以得到发射激光的最小脉冲能量  $E_s$ 。图 7 为不同发射激光发散角时,最小激光脉冲能量随探测距离的变化规律。可以看出:当探测距离较小时,发散角的影响不显著;但是随着探测距离的增加,发散角对探测距离的影响逐渐增大。当发射光束全角发散角为 0.3 mrad 时,50 km 探测距离下所需的最小激光脉冲能量为 0.7 mJ,120 km 探测距离下所需的最小激光脉冲能量为 3.1 mJ。随着光束质量变差,发散角变大,对发射能量的要求逐渐提高。当发射光束发散角增大到 0.5 mrad 时,50 km 探测距离下所需的最小激光脉冲能量为 1.9 mJ,120 km 探测距

离下所需的激光最小脉冲能量应达到 8.7 mJ。

由于猫眼探测系统及目标散射的复杂性,本节分析过程中不可避免地加入了一些近似成分,因此理论分析结果无法保证很高的精度。但是能够确定的是分析和仿真的结果在量级上是正确的,对利用猫眼效应的空间主动探测系统设计具有指导意义。

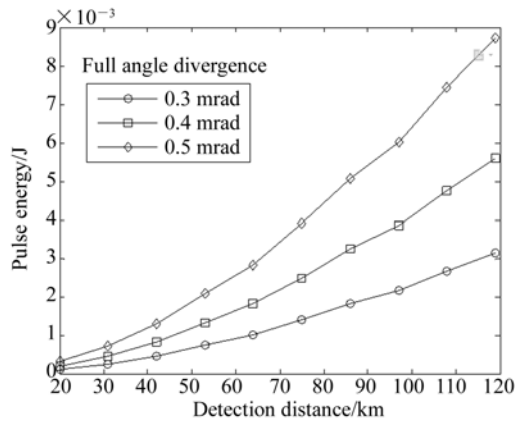


图 7 最小探测激光脉冲随探测距离与发散角(全角)的变化  
Fig. 7 Variation of minimum laser pulse power with detection distance and full divergence angle

### 5 基于猫眼效应的激光主动探测实验

猫眼效应实验的光路如图 8 所示,激光器波长为 532 nm,它输出功率为 1 mW 的偏振光场。中性密度滤光片的衰减倍率为 100。负透镜的作用是使激光在目标处发散,覆盖目标所在的范围。

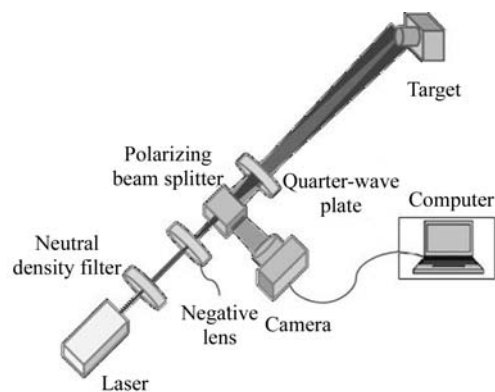


图 8 猫眼效应模拟实验光路图  
Fig. 8 Experimental system for active detection using cat's eye effect

偏振棱镜和 1/4 波片组合用于隔离发射激光光束和猫眼回波,以实现猫眼效应的探测。接收系统为 CCD 相机,目标距接收系统约 8 m,目标为 CMOS 相机。接收系统输出目标图像后,利用计算机鉴别和提取猫眼回波信号。

激光器发射光束经过衰减片衰减后光能约为  $10^{-5}$  W,然后经过负透镜获得了很大发散角,所以当激光传输至目标时,目标只接收到了约为发射激光总能量 1/100 的能量,因此,进入接收系统的总能量约为  $10^{-7}$  W。考虑到相机积分时间为 0.01 s 和反射损耗约为 1/10,发射系统的等效激光脉冲能量约为  $9 \times 10^{-7}$  mJ。实验表明,当传输距离为 8 m,发射系统的等效能量在  $10^{-7}$  量级时,猫眼回波能量仍然可以使 CCD 达到饱和。由于空间中大气极其稀薄,因此几乎不存在湍流扰动和大气吸收。结合上述实验结果,由光能传输的平方反比定律可知,当发射系统的等效能量达到毫焦量级时,几十公里到一百公里的探测距离是能够达到的。

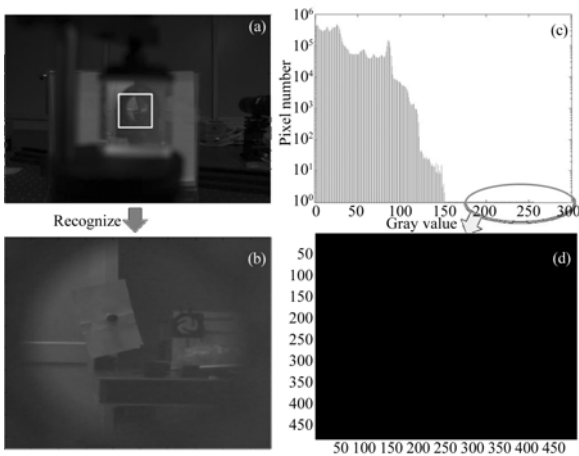


图 9 激光从目标视场外入射时的实验结果. (a) 初始数据; (b) 识别结果; (c) 识别结果的直方图; (d) 阈值法的探测结果

Fig. 9 Experimental results when laser comes from outside target field. (a) Original data; (b) Recognized result; (c) Histogram of (b); (d) Detection result by using threshold method

图 9 给出了利用猫眼效应进行主动探测的一组实验结果。在该组实验中,激光从目标视场外入射。图 9 (a) 为接收系统相机给出的初始数据图片。在该图片基础上,利用图像处理算法识别并提取出目标所在区域,如图 9 (b) 所示。

图 9 (c) 为图 9 (b) 的灰度直方图。从直方图中可以看出,成像信号灰度基本处于 150 以下。在猫眼信号的仿真中,为了将虚警率降到极低的程度,猫眼信号的提取阈值高于成像信号最大值的 5~6 倍。在此实验中,为了方便研究成像信号对猫眼信号提取的影响,故将猫眼信号的提取阈值的灰度值设为 180。图 9 (d) 为利用阈值法检测猫眼信号的结果,从图中可以看出没有检测到任何信号。

保持图 9 中的背景光照,激光强度等条件不变,轻微转动目标相机,使激光从目标视场内入射,得到一组实验结果如图 10 所示。图 10(b) 为从图 10(a) 的初始数据中识别并提取目标后的结果,从图中可以看出目标相机镜头附近出现强烈的反射光。由于实验中目标相机光轴与激光发射光轴不平行,而且目标相机镜头为曲率很大的凸面,因此不可能是镜头的镜面反射光,只可能是按原光路返回的猫眼效应回波信号。将图 10(b) 的数据按直方图给出后,利用阈值法提取了大于 180 灰度值的信号,检测结果如图 10(d) 所示,猫眼回波信号被成功地检测和提取,说明利用阈值法提取猫眼回波的主动探测机理是可取的。与图 9 中的结果进行对比,证明了第三节中猫眼回波与目标视场的关系。

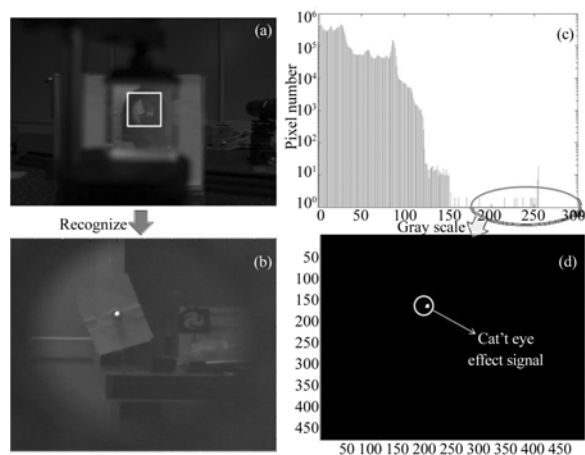


图 10 激光从目标视场内入射时的实验结果. (a) 初始数据; (b) 识别结果; (c) 识别结果的直方图; (d) 阈值法的探测结果

Fig. 10 Experimental results when laser comes from inside target field. (a) Original data; (b) Recognized result; (c) Histogram of (b); (d) Detection result by using threshold method

图 11 为保持目标相机位置和探测激光强度不变,加强背景光照后的实验结果。信号的识别与提取步骤与前两次实验相同,最终得到的检测结果如图 11(d)所示。由此可见,阈值灰度设置为 180 时,虽然成功检测到了猫眼回波信号,但是出现了两处虚警。如果转动相机,使发射系统移出目标视场,则图 11(d)中间处的猫眼回波信号会消失,而其它两处虚警不会改变。此时会对目标产生误判。因此,180 灰度的阈值已经无法正确检测目标视场,必须要提高猫眼回波信号的检测阈值。此实验表明提高检测阈值和激光功率能够降低虚警概率。

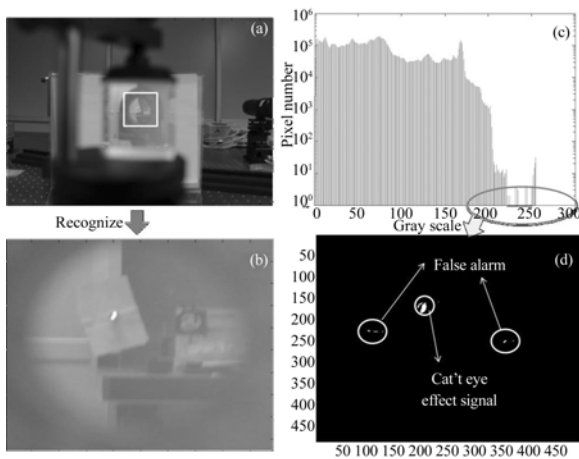


图 11 目标相机位置和探测激光强度不变时得到的实验结果。(a) 初始数据;(b) 识别结果;(c) 识别结果的直方图;(d) 阈值法的检测结果

Fig. 11 Experimental results when target camera position and laser intensity remain a constant. (a) Original data; (b) Recognized result; (c) Histogram of (b); (d) Detection result using threshold method

## 6 结 论

本文给出了基于猫眼效应的主动探测模型,分析表明离轴三反系统的结构参数对基于猫眼效应的主动探测有重要影响。在给出的离轴三反光学系统实例的基础上,采用光线追迹法分析了目标光学系统猫眼回波效率  $T$  随像面倾斜和视场角的变化规律,得到了猫眼回波发散角  $\theta$  随离焦距的变化特性,并指出离轴三反系统能否产生猫眼回波由像面倾角决定。利用目标三反系统猫眼效应的分析结果,结合目标的漫反射理论,确定了阈值法提取猫眼主动探测信号的系统参数。仿真表明,当发射光束的全角发散角为 0.3 mrad 时,50 km 探测距离下所需的最小激光脉冲能量为 0.7 mJ,120 km 探测距离下所需的最小激光脉冲能量为 3.1 mJ。当发射光束的发散角增大到 0.5 mrad 时,50 km 探测距离下所需的最小激光脉冲能量为 1.9 mJ,120 km 探测距离下所需的激光最小脉冲能量达到 8.7 mJ。而在实际应用中,相应的数值可能会有所出入,但是量级相同。原理性试验表明,本文中目标的猫眼回波特性的分析是正确的,实验系统参数推算与仿真计算的结果在量级上相同,证明了阈值法提取猫眼激光主动探测信号切实可行。由此表明,提高激光功率和检测阈值是增大探测距离、减小虚警概率的主要途径。

## 参考文献:

- [1] 葛成良,黄志伟,季云松,等. 基于“猫眼效应”的目标识别[J]. 强激光与离子束, 2003,15(7): 632-634.  
GE CH L, HUANG ZH W, JI Y S, *et al.*. Target classification with “cat eye effect” [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(7): 632-634. (in Chinese)
- [2] 武东生,白廷柱,刘秉琦,等. 猫眼效应回波的动态成像探测与目标识别[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0811003-1-6.  
WU D SH, BAI T ZH, LIU B Q, *et al.*. Dynamic imaging detection and target recognition for cat-eye effect echo [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0811003-1-6. (in Chinese)
- [3] LECOCQ C, DESHORS G, LADO-BORDOWSKY O, *et al.*. Sight laser detection modeling [J]. *SPIE*, 2003, 5086: 280-286.
- [4] RICHARDSON R L, GRIFFITHS P R. Design and

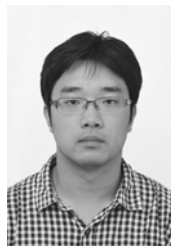
- performance considerations of cat's-eye retroreflectors for use in open-path Fourier-transform-infrared spectrometry [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(30): 6332-6340.
- [5] 赵延仲, 孙华燕, 宋丰华, 等. 离轴三反式光学镜头的猫眼效应激光反射特性[J]. 装备指挥技术学院学报, 2009, 20(1): 101-105.  
ZHAO Y ZH, SUN H Y, SONG F H, *et al.*. Laser reflection characteristics of cat eye effect of off-axis three-mirror optical lens [J]. *Journal of the Academy of Equipment Command and Technology*, 2009, 20(1): 101-105. (in Chinese)
- [6] YANG B, CHAO K, TSAI J. Modeling of micro cat's eye retroreflectors using a matrix-based three-dimensional ray tracing technique[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(25): 6020-6030.
- [7] 刘磊. 空间三反相机调焦范围的确定[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 631-636.  
LIU L. Focusing range of space off-axial TMA optical camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 631-636. (in Chinese)
- [8] 赵文才. 改进的离轴三反光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2837-2843.  
ZHAO W C. Design of improved off-axial TMA optical systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2837-2843. (in Chinese)
- [9] 赵文才, 马军. 双向大视场消畸变低温红外目标模拟光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2619-2625.  
ZHAO W C, MA J. Design of cryogenic infrared target simulation system with bidirectional and wide field for eliminating distortion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2619-2625. (in Chinese)
- [10] 汪洪源, 张伟, 王治乐. 基于高次余弦散射分布的空间卫星可见光特性[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 593-598.  
WANG H Y, ZHANG W, WANG ZH L. Visible characteristics of space satellite based on Nth cosine scattering distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(3): 593-598. (in Chinese)

## 作者简介:



陆 君(1980—),男,北京人,博士,主要从事激光应用方面的研究。E-mail: redapple115@163.com

## 通讯作者:



李远洋(1988—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事激光应用方面的研究。E-mail: liyuan1108@sina.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)