

·测试、试验与仿真·

## “猫眼”目标探测影响因素及仿真分析

董亮, 杨智勇

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300000)

**摘要:**研究了光电成像系统中广泛存在着的“猫眼”效应, 针对“猫眼”目标的回反射特性, 建立了不同情况下回波强度的数学模型, 并据此模型, 借助 TracePro 软件对典型目标在不同激光发射距离、不同镜头离焦量、不同入射角度下的“猫眼”效应进行仿真计算分析。结果表明, 理论计算和仿真结果一致, 因此可以用于指导未来激光主动探测系统设计。

**关键词:**“猫眼”效应; TracePro 仿真; 离焦量; 入射倾角; 探测距离

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-01-0072-04

## Influence Element and Simulation Analysis of Cat-eye Target Detection

DONG Liang, YANG Zhi-yong

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300000, China)

**Abstract:** Cat-eye effect widely existing in electro-optical imaging system is researched. According to the retro-reflection property of a cat-eye target, a mathematical model under different echo wave intensity is established. Based on the model and TracePro software, the cat-eye effect of a typical target with different laser emission distance, lens focal shift and incident angel is simulated and analyzed. Results show that theoretical calculation accord with the simulation results, so it can be used to guide laser active detection system design in the future.

**Key words:** cat-eye effect; TracePro simulation; de-focus; incident angel; detection range

由于“猫眼”效应在光电侦察、追踪以及光通信等光电设备中发挥的重要作用, 因而其应用引起了广泛的重视<sup>[1-4]</sup>。由于光电观瞄设备与其他光电设备所用光学镜头的焦平面具有一定的反射率, 根据光路可逆原理, 当其受到激光束辐照时能够产生一个相对较强的回波信号, 回波功率通常比漫反射目标的回波强 $10^2 \sim 10^4$ 倍, 这种现象被称为“猫眼”效应<sup>[5-6]</sup>。深入分析“猫眼”回波功率的计算公式及其影响因素具有很高的研究价值<sup>[7]</sup>。

### 1 “猫眼”效应理论模型

运用几何光学方法推导“猫眼”效应的回波发散角。首先将“猫眼”目标等效为两个透镜和一个反射面组成的“4f”模型, 如图1所示。

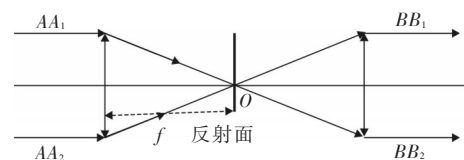


图1 “猫眼效应”等效模型

正入射光线 $AA_1$ 经透镜汇聚到 $O$ 点, 被光敏面反射后沿 $BB_1$ 方向传播, 根据光路对称性,  $AA_2$ 入射后从 $BB_2$ 输出, 这相当于将“猫眼”目标反射光线等效为图1中的出射光线。具有“猫眼效应”的光电设备, 由于装配或加工误差, 其光敏面、分划板不一定正好位于焦平面上, 离焦量的产生不可避免地影响“猫眼”目标的有效接收孔径面积和回波发散角, 进而影响回波功率的大小。因此, 分析正入射条件下反射面离焦量引起的回波功率发散角很有必要。现

推导如下:设“猫眼”目标透镜的直径为 $D$ ;半径为 $r$ ;焦距为 $f$ ;反射面离焦量为 $d$ ;离焦情况下入射的有效半径为 $r'$ ;设回波发射角为 $\theta_s$ ;回波反射角为 $\theta'$ 。图2为反射面正向离焦情况,图3为正离焦条件下“猫眼”效应等效模型。

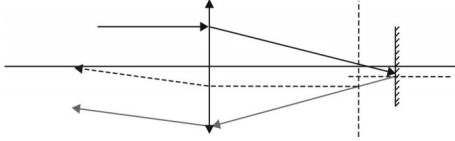


图2 正离焦条件下“猫眼”效应图

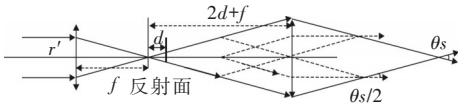


图3 正离焦条件下“猫眼”效应等效模型

根据三角形相似性,  $\frac{r'}{f} = \frac{r}{f+2d}$ , 得到正离焦时“猫眼”目标的有效孔径半径为

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

正离焦条件下“猫眼”目标的回波发散角为

$$\tan \frac{\theta_s}{2} = \frac{r - \frac{fr}{f+2d}}{f} = \frac{2rd}{f(f+2d)}$$

$$\theta_s \approx 2 \tan \frac{\theta_s}{2} = \frac{2dD}{f(f+2d)} \quad (2)$$

反射面负离焦情况如图4所示。有效半径等于目标透镜半径 $r$ , 根据三角形相似性得出下式

$$x = \frac{r(f-2d)}{f} \quad (3)$$

“猫眼”目标回波发散角为

$$\tan \frac{\theta_s}{2} = \frac{r-x}{f}$$

$$\theta_s \approx 2 \tan \frac{\theta_s}{2} = \frac{2dD}{f^2} \quad (4)$$

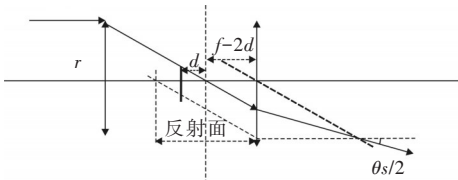


图4 负离焦条件下“猫眼效应”等效模型

下面推导激光照射“猫眼”目标的回波功率计算公式:发射激光的束散角为 $\theta$ ;回波反射角为 $\theta'$ ;探

测距离为 $R$ ;发射激光功率为 $P_i$ ;回波功率为 $P$ ;发射光学系统透过率为 $\tau_i$ ;“猫眼”目标光学系统透过率为 $\tau_s$ ;接收光学系统透过率为 $\tau_r$ ;大气的透过率为 $\tau$ ;“猫眼”目标透镜直径为 $D$ ;“猫眼”目标有限孔径接收面积为 $A_r$ ;回波探测器透镜直径为 $\phi$ ;回波探测器接收面积为 $A_s$ ;正离焦时,“猫眼”目标的有效接收面积为

$$A_s = \pi r'^2 = \pi \left[ r'^2 \frac{fD}{2(f+2d)} \right]^2 \quad (5)$$

负离焦时,“猫眼”目标的有效接收面积为

$$A_s = \pi r^2 = \pi \left[ \frac{D}{2} \right]^2 \quad (6)$$

“猫眼”目标的反射角为

$$\theta' = \theta + \theta_s \quad (7)$$

对于一般的光学系统: $f \gg d$ , 代入式(2)、式(4)、式(5)、式(6)得到“猫眼”目标的回波发散角为

$$\theta_s = \frac{2dD}{f^2} \quad (8)$$

“猫眼”目标的有效接收面积为

$$A_s = \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (9)$$

激光入射到正离焦的猫眼目标系统时,利用几何分析回波接收系统与发射系统空间距离很近且光轴相互平行,则不难得到激光传输到猫眼目标系统处的激光功率密度为

$$P_1 = \frac{4P_i \tau_i \tau_r}{\pi \theta^2 R^2} \quad (10)$$

猫眼有效接收面积为 $A_r$ ,激光经猫眼目标反射后的功率为

$$P_2 = \frac{4P_i T_i \tau_s^2 \tau_r A_s \rho}{\pi \theta^2 R^2} \quad (11)$$

设激光反射到接收系统时的光斑面积为 $S$ ,则有以下式

$$S = \pi \left( \frac{R\theta'}{2} \right)^2 \quad (12)$$

被有效接收面积为 $A_r$ 的光学系统光敏面接收到的激光功率为

$$P = \frac{4P_i T_i \tau_s^2 \tau_r^2 \tau_r A_s A_r \rho}{\pi \theta^2 R^2 S} \quad (13)$$

$$A_r = \pi \left( \frac{\phi}{2} \right)^2$$

将式(7)、式(8)、式(9)、式(12)代入式(13)得到

$$P = \frac{P_i T_i \tau_s^2 \tau_r^2 \tau_r D^2 \phi^2 \rho}{\theta^2 R^4 \left( \theta + \frac{2dD}{f^2} \right)^2} \quad (14)$$

## 2 仿真研究

TracePro是一套普遍用于光学分析、辐射度分析的光线追迹模拟软件,它具有很强处理复杂几何图形的能力,支持图形显示、可视化操作,能够导入、导出CAD软件和镜头设计软件的数据格式,提供3D实体模型的数据库。TracePro的工作原理是将入射光均分为每条光线,然后对每条光线按照其在不同介质中的传播规律进行计算。图5是使用271条光线对“猫眼”效应进行仿真的示意图。文中仿真数据使用的是74985001条光线进行模拟。仿真使用准理想的透镜对第1节中的结论、公式进行了验证。

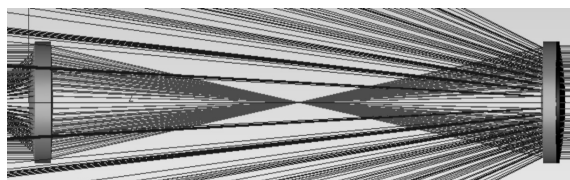


图5 TracePro仿真“猫眼”效应示意图

### 2.1 准理想透镜(APO)

为了验证“猫眼”效应理论模型,使用准理想透镜镜头进行仿真。APO镜头焦距为100 mm,口径为10 mm,图6是镜头的轴向像差图。由图6中可以看出,镜头半径4 mm以内的区域,其轴向像差最大值不过15  $\mu\text{m}$ ,于是仿真时,进一步将入射光瞳限制在4 mm。

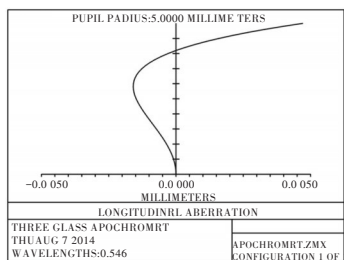


图6 APO镜头的轴向色差图

#### 2.1.1 不同距离的“猫眼”效应

仿真采用0.546  $\mu\text{m}$ 的入射激光,离焦量选为负1 mm。图7为探测距离1 km处回波光斑图样。通过仿真得到镜头处回波功率值,并与理论计算的结果比较。图8为APO镜头的“猫眼”效应回波功率的仿真结果与理论计算结果。

理论计算取目标镜头口径为8 mm,焦距100 mm,进入猫眼目标内的能量为1 W,镜头的透过率由仿

真过程可以查出为0.9,成像面的反射率设置为1。探测系统口径为100 mm,探测镜头透过率为1。

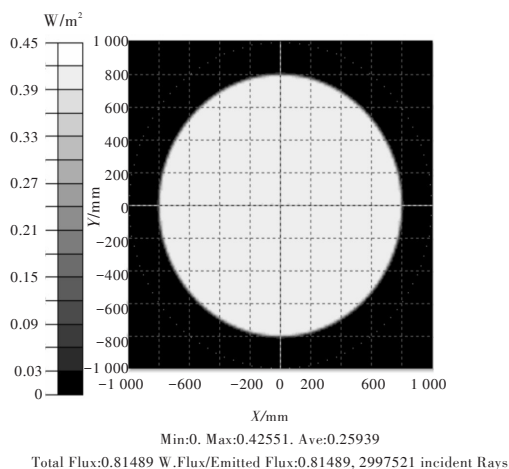


图7 探测距离为1 km的回波光斑图样

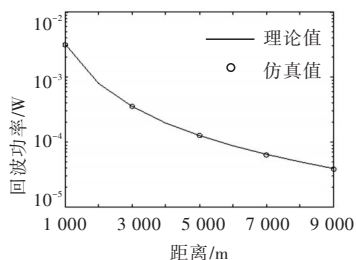


图8 APO镜头的“猫眼”效应回波功率的仿真结果与理论计算结果

从图8中可以看出,理论模型计算结果与软件仿真结果一致。

#### 2.1.2 “猫眼”目标的不同离焦量

离焦量的变化是影响回波功率大小的一个重要因素,针对离焦量的变化进行仿真计算。仿真模型中仅改变离焦量大小,目标镜头其他参数不变。仿真分析了不同离焦量条件下的回波发散角与回波能量,仿真结果与理论计算一致。如图9、图10所示。

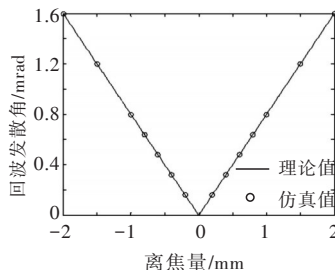


图9 不同离焦量情况下,回波发散角的仿真值与理论值

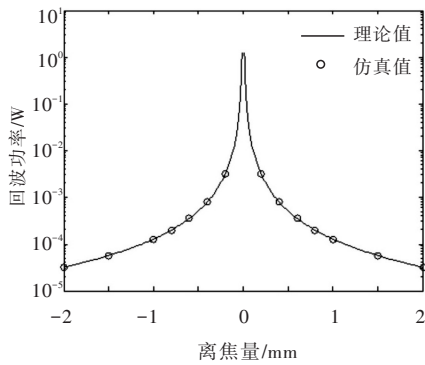


图10 不同离焦量情况下,回波功率的仿真值与理论值

### 2.1.3 激光入射“猫眼”目标的不同角度

上述的分析针对激光正入射“猫眼”目标,实际使用中更多的是入射激光与“猫眼”目标成一定角度的斜入射情况。通过对理论模型分析,斜入射会改变回波光斑的形状,即有部分入射激光由于遮挡而无法出射,进而影响激光的出射效率。下面通过仿真的方法验证这一理论。

仿真目标参数取负离焦 0.5 mm,探测距离  $L=1$  km,光圈  $D=8$  mm,入射角度依次为 0.005,0.01,0.015,0.02,0.025(单位:rad)。通过仿真分析,1 km 处回波光斑及横截面形状如图 11 所示。

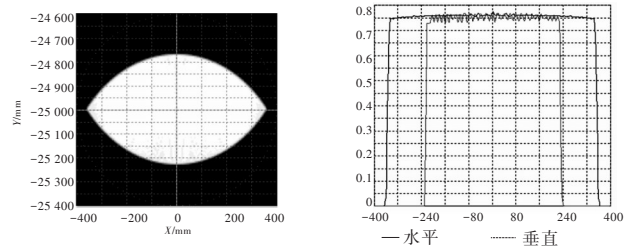


图11 1 km 外的回波光斑形状与横截面

仿真表明,随着激光入射角度的增大,“猫眼”效应回波光斑逐渐被“压扁”,其面积有所减小,这说明可以探测到“猫眼”效应的区域减小。对所摆放探测器的位置提出了指导。

## 3 结论

利用几何光学的方法对“猫眼”效应进行了研究,通过建立离焦引起的回波发散角模型并推导出“猫眼”目标回波功率计算公式,结合光线追迹软件,对影响“猫眼”目标回波功率的各项因素进行数值分析及验证。结果表明,理论模型与追迹仿真结果具有很好的一致性,因此文中结论可以用于指导未来激光主动探测系统设计。

## 参考文献

- [1] 魏光辉,杨培根. 激光技术在兵器工业中的应用[M]. 北京:兵器工业出版社,1995:351.
- [2] Laurel Sadler, Troy A Alexander. Mobile Optical Detection System for Counter-Surveillance[J]. Proc. of SPIE, 7694.
- [3] 赵延伸,孙华燕,宋丰华,等. 猫眼效应应用于激光主动探测技术的研究现状与发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(10):42-51.
- [4] 马浩洲. 目标反射特性与“猫眼”效应研究[J]. 激光技术, 2003, 27(6):600-602.
- [5] 董小刚,朱海军,殷刚. 基于“猫眼效应”的激光主动侦查系统探测距离分析[J]. 激光与红外, 2011, 41(1):67-70.
- [6] 谷锁林,孙华燕,张永基,等. 空间目标的激光主动探测[J]. 激光与红外, 2005, 35(7):476-478.
- [7] 赵勋杰,高雅允,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(7):415-417.

