

## “猫眼”目标探测距离方程

武东生<sup>1,2</sup>, 白廷柱<sup>1</sup>, 刘秉琦<sup>2</sup>, 胡文刚<sup>2</sup>, 周 斌<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081;  
2. 军械工程学院 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003)

**摘 要:** 利用矩阵光学方法对探测过程进行了建模, 对探测距离方程进行了推广, 使方程适用于“猫眼”光学系统离焦、探测光束斜入射的一般情况, 通过室外探测实验对探测距离方程进行了验证。理论分析和数值计算表明: 回波方向相对于入射光方向存在微小的回波方向偏差角, 但相同条件下回波发散角要远大于回波方向偏差角, 使回波足以形成对探测系统的覆盖; 在相同的探测参数条件下, 回波功率只与“猫眼”光学系统焦距和离焦量有关, 而与探测光束入射角、“猫眼”光学系统接收孔径无关。

**关键词:** 猫眼效应; 光学窗口; 探测距离方程

**中图分类号:** TN249    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2574-05

## Detection range equation of cat-eye target

Wu Dongsheng<sup>1,2</sup>, Bai Tingzhu<sup>1</sup>, Liu Bingqi<sup>2</sup>, Hu Wengang<sup>2</sup>, Zhou Bin<sup>2</sup>

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;  
2. Department of Electronic and Optics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** The detection range equation of cat-eye target was extended by modeling the detection process based on matrix optics, which can be applied to the situation that the cat-eye optical system had out-of-focus reflecting element and the detection beam was oblique incidence. The detection range equation was verified by field experiment. The results prove that there is small drift angle between the incidence beam and echo beam and the echo divergence angle is much larger than the echo drift angle, which makes the echo beam be large enough to cover the detection system. On conditions of the same detection parameters, the echo power is only related to the focal length and defocusing amount of the cat-eye optical system and has nothing to do with the incidence angel of detection beam and the receiving aperture of the cat-eye optical system.

**Key words:** cat-eye effect; optical window; detection range equation

收稿日期: 2013-01-10; 修订日期: 2013-02-25

基金项目: 国家部委预研项目(110010202)

作者简介: 武东生(1978-), 男, 博士生, 主要从事光电探测与跟踪方面的研究工作。Email: wds116@yahoo.cn

导师简介: 白廷柱(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电成像技术等方面的研究工作。Email: tzhbai@bit.edu.cn

## 0 引言

当用强光照射光电系统的光学窗口时,光电系统会存在明显的“猫眼”效应,近年来这种效应在军事上被广泛应用于激光对光电系统的主动探测<sup>[1-3]</sup>。为了估算激光对光电系统主动探测距离,国内学者从激光雷达作用距离方程出发建立了“猫眼”目标探测距离方程,而对于方程探讨的研究工作主要集中在正入射情况<sup>[4-6]</sup>,对于斜入射情况讨论较少且得出的表达式较为繁琐<sup>[7]</sup>。为了使探测距离方程能够适用于“猫眼”光学系统离焦、探测光束斜入射的一般情况且具有简明的形式,文中利用矩阵光学方法对探测

方程进行了推广,并利用实验对其进行了验证。

## 1 光束传输模型

“猫眼”光学系统可以简化为一个透镜和一个反射面的组合,按照光线传输方向,将光路按反射面对称展开,可得到“猫眼”光学系统的双透镜光束传输模型<sup>[8-9]</sup>,如图1所示。入射窗和出射窗为光学系统的同一个透镜,坐标系分别为 $o_0x_0y_0$ 和 $o_1x_1y_1$ 。探测系统所在平面坐标系为 $o_2x_2y_2$ 。三个坐标系相应坐标轴平行。“猫眼”光学系统焦距为 $f'$ ,孔径半径为 $r$ ,反射元件的离焦量为 $\delta$ 。探测系统距离“猫眼”光学系统的斜距离为 $R$ ,探测光束在子午面内斜入射且相对于“猫眼”光学系统光轴的入射角为 $\beta_0$ 。

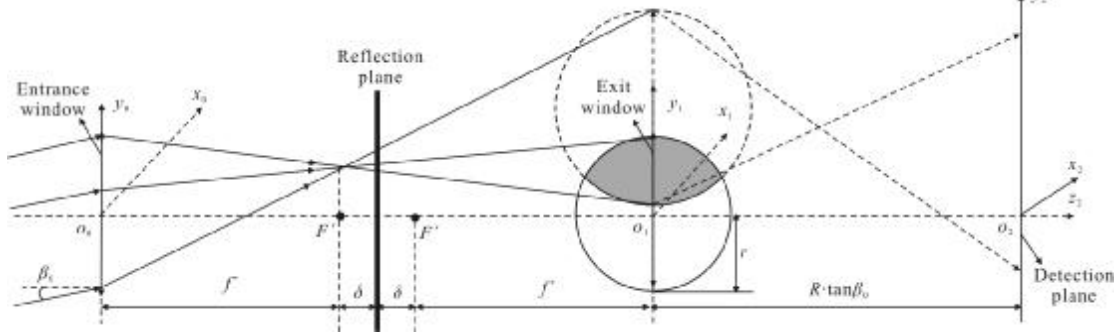


图1 “猫眼”光学系统的双透镜光束传输模型

Fig.1 Double lens beam transformation model of cat-eye optical system

## 2 探测距离方程分析及推导

### 2.1 回波对探测系统的覆盖

在研究探测距离方程之前首先应该明确“猫眼”目标回波能否形成对探测系统的覆盖,即探测系统能够接收到回波,这取决于回波方向偏差角与回波发散角的大小关系。对于传输矩阵是 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 的光学系统,入射面 $xy$ 与出射面 $x'y'$ 满足关系<sup>[11]</sup>:

$$\begin{bmatrix} x' \\ \alpha' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \alpha \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} y' \\ \beta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$ 分别为入射面光束的入射角; $\alpha'$ 、 $\beta'$ 为出射窗光束的出射角。

入射窗前端面到出射窗后端面的传输矩阵可以表示为:

$$T_1 = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f'+2\delta}{f'} & 2(f'+\delta) \\ -\frac{2\delta}{f'^2} & -\frac{f'+2\delta}{f'} \end{bmatrix} \quad (2)$$

入射窗边缘光线满足方程:

$$x_0^2 + y_0^2 = r^2 \quad (3)$$

将公式(2)、(3)带入公式(1),可得:

$$x_1^2 + (y_1 - B_1\beta_0)^2 = (A_1r)^2 \quad (4)$$

公式(4)对应了图1中出射窗上方的虚线圆,它是入射窗经光学系统在出射窗平面的投影。下方的圆对应了出射窗口径,阴影部分即表示能够完全通过“猫眼”光学系统的光束孔径。通过计算可得到阴影部分上、下边缘点出射光线的方向角为:

$$\begin{cases} \beta_{11} = \frac{C_1(r - B_1\beta_0)}{A_1} + D_1\beta_0 \\ \beta_{12} = C_1r + D_1\beta_0 \end{cases} \quad (5)$$

回波方向为:

$$\beta_1 = \frac{\beta_{11} + \beta_{12}}{2} = \beta_0 - \frac{2\delta^2(r - f'\beta_0)}{f'^2(f' + 2\delta)} \quad (6)$$

子午面内回波方向偏差角为:

$$\Delta\beta_1 = |\beta_1 - \beta_0| \quad (7)$$

子午面内回波发散角为:

$$\theta_1 = \frac{\beta_{11} + \beta_{12}}{2} \quad (8)$$

当  $0 \leq \beta_0 \leq \delta r / [f'(f' + \delta)]$  时, 入射窗在出射窗平面投影与出射窗为相互包含关系;  $\beta_0 \geq r/f'$  时, 图 1 中阴影部分的面积为 0, 不能产生回波。几种情况下回波方向偏差角和回波发散角表达式如

表 1 所示。

从表 1 可以看出, 回波方向与入射光方向之间存在一定的方向偏差角; 回波方向偏差角及回波发散角只和  $f'$ 、 $\delta$ 、 $r$ 、 $\beta_0$  四个参数有关; 正离焦时回波光束是会聚的, 负离焦时回波光束是发散的, 回波发散角随着离焦量的增大而增大; 当  $0 \leq \beta_0 \leq \delta r / [f'(f' + \delta)]$  时, 回波方向偏差角随着入射角的增大而增

表 1 不同入射角条件下回波方向偏差角、回波发散角表达式列表

Tab.1 Echo drift angle and divergence angle in different incidence angle

Incidence angle	Echo drift angle $\Delta\beta_i$	Echo divergence angle $\theta'$
$0 \leq \beta_0 \leq \frac{\delta r}{f'(f'+\delta)}, \delta \geq 0$	$\frac{2\delta}{f'+2\delta} \beta_0$	$-\frac{2r\delta}{f'(f'+2\delta)}$
$0 \leq \beta_0 \leq \frac{-\delta r}{f'(f'+\delta)}, \delta < 0$	$-\frac{2\delta}{f'} \beta_0$	$-\frac{2r\delta}{f'^2}$
$\left  \frac{\delta r}{f'(f'+\delta)} \right  < \beta_0 < r/f'$	$\frac{2\delta(r-f\beta_0)}{f'^2(f'+2\delta)}$	$\frac{-2\delta(r-\delta)}{f'^2(f'+2\delta)}(r-f\beta_0)$
$\beta_0 \geq r/f'$	Meaningless	Meaningless

大, 回波发散角此时与入射角无关; 当  $\delta r / [f'(f' + \delta)] < \beta_0 < r/f'$  时, 回波方向偏差角及发散角都随着入射角的增大而减小。图 2、3、4 为根据表 1 计算

得到的回波方向偏差角随入射角、离焦量及焦距的变化情况, 设  $r=f'/6$ 。从图中可以看出, 回波方向偏差角随离焦量的增大而增大, 随焦距的减小而增大, 以  $\beta_0 = \delta r / [f'(f' + \delta)]$  为拐点, 回波方向偏差角随离焦量、焦距的变化趋势存在差异。相同焦距、离焦量条件下, 当  $\beta_0 = \delta r / [f'(f' + \delta)]$  时, 回波方向偏差角取得最大值。

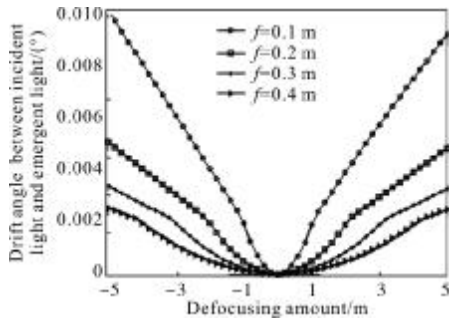


图 2 回波方向偏差角随离焦量、焦距变化曲线( $\beta_0=0.1^\circ$ )

Fig.2 Curves of echo drift angle changed with defocusing amount and focus length( $\beta_0=0.1^\circ$ )

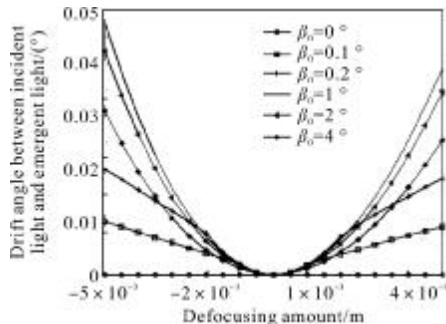


图 3 回波方向偏差角随离焦量、入射角变化曲线( $f'=100$  mm)

Fig.3 Curves of echo drift angle changed with defocusing amount and incidence angle ( $f'=100$  mm)

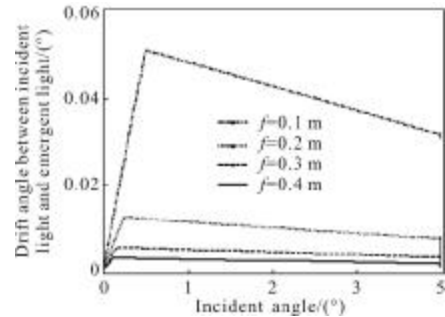


图 4 回波方向偏差角与入射角、焦距关系曲线( $\delta=-5$  mm)

Fig.4 Curve of echo drift angle changed with incident angle and focus length ( $\delta=-5$  mm)

图 5、6 为根据表 1 计算得到的回波发散角随入射角、离焦量及焦距的变化情况, 设  $r=f'/6$ , 并且对发散角取绝对值。从图中可以看出, 回波发散角随离焦量的增大而增大, 随焦距的减小而增大, 随入射角的增大而减小。

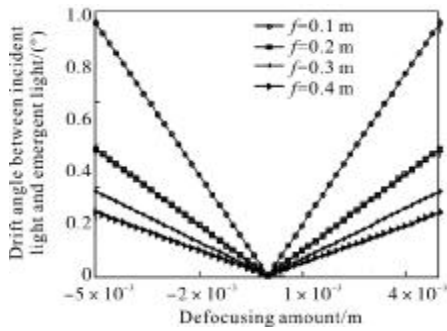


图 5 回波发散角随离焦量、焦距变化曲线( $\beta_0=0.1^\circ$ )

Fig.5 Curve of echo divergence angle changed with defocusing amount and focus length( $\beta_0=0.1^\circ$ )

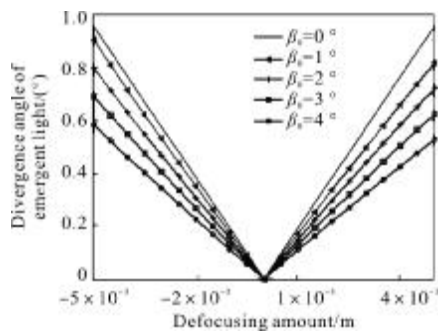


图 6 回波发散角随离焦量、入射角变化曲线( $f'=100\text{ mm}$ )

Fig.6 Curve of echo divergence angle changed with defocusing amount and incidence angle( $f'=100\text{ mm}$ )

对比图 2、3 和 5、6 可以看出：相同焦距、离焦量、入射角条件下，回波发散角要远大于回波方向偏差角，即回波虽有所偏移，但回波足以形成对探测系统的覆盖。

### 2.2 探测距离方程的推广

入射窗前端面到探测系统接收面传输矩阵为：

$$T_2 = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2\delta \cdot L - f'(f'+2\delta)}{f'^2} & \frac{2f'(f'+\delta) - L(f'+2\delta)}{f'^2} \\ \frac{2\delta}{f'^2} & -\frac{f'+2\delta}{f'} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中： $L=R \times \cos\beta_0$ 。

将公式(3)、(9)带入公式(1)，可求得入射窗边缘光线传输到探测平面时满足的关系为：

$$x_2^2 + (y_2 - B_2\beta_0)^2 = (A_2r)^2 \quad (10)$$

如果不受遮挡，入射窗接收的光波功率在探测平面会均匀散布在公式(10)所表示的圆范围内。出射窗的遮挡只影响光波在探测平面的光斑范围，而

对光斑的功率密度没有影响，所以探测系统接收到的光功率可表示为：

$$P_{\text{rct}} = P_s \rho_{\text{ct}}^2 \tau_{\text{ct}}^2 \tau_a \tau_r \frac{A_r \cos\beta_0}{\pi(A_2r)^2} \quad (11)$$

式中： $P_s$ 为“猫眼”光学系统入射窗接收的光波功率； $\rho_{\text{ct}}$ 为“猫眼”光学系统反射元件的反射率； $\tau_{\text{ct}}$ 为“猫眼”光学系统透过率； $\tau_a$ 为单程大气透过率； $A_r$ 为探测系统接收面积； $\tau_r$ 为探测系统透过率。

重新考虑“猫眼”目标探测距离方程<sup>[6]</sup>：

$$P_{\text{rct}} = \frac{P_i \tau_i \tau_a A_{\text{ct}}}{\frac{1}{4} \pi (R\theta)^2} \frac{\rho_{\text{ct}}^2 \tau_{\text{ct}}^2 \tau_a \tau_r A_r}{\frac{\pi (R\theta')^2}{4}} \quad (12)$$

式中： $P_i$ 为激光发射功率； $A_{\text{ct}}$ 为“猫眼”光学系统接收面积； $\tau_i$ 为激光发射系统透过率； $\theta$ 为激光探测光束发散角； $\theta'$ 为“猫眼”光学系统回波发散角。式中的第一个分式表示了“猫眼”光学系统入射窗接收到的激光功率，对应公式(11)中的  $P_s$ ，第二个分式表示从入射窗传输到探测面时探测系统接收到的激光功率，比较公式(11)和(12)，探测系统接收到的回波功率可表示为：

$$P_{\text{rct}} = \frac{4P_i \rho_{\text{ct}} \tau_i \tau_r \tau_a^2 \tau_{\text{ct}}^2 \cos^2\beta_0}{\pi R^2 \theta^2} \frac{A_r}{A_2^2} \quad (13)$$

公式推导中应用了关系式  $A_{\text{ct}} = \pi r^2 \cos\beta_0$ 。

由公式(13)可知：探测系统接收到的回波功率与“猫眼”光学系统接收孔径大小无关。一般光学系统视场角较小，余弦值近似为 1，所以可认为在“猫眼”光学系统视场范围内，回波功率与入射角无关，也即对于不同的光学系统，只要保证焦距、离焦量和探测距离相同，探测概率是相同的。

### 3 实验验证

为了对探测距离方程进行验证，应用搭建的实验平台做了外场实验。探测距离 2 500 m，探测光束为 1 064 nm 连续激光，发射功率 0.6 W，激光发散角 1 mrad，探测接收孔径 42 mm，“猫眼”光学系统物镜焦距 152 mm，反射元件离焦量 1 mm，“猫眼”光学系统视场角 8°。实验中关闭红外 CCD 自动增益功能，1 064 nm 灵敏度为 33  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。图 7 为应用 CCD 采集到不同入射角情况下的“猫眼”目标图像(从左至右，从上至下入射角依次为 0°~11°)。

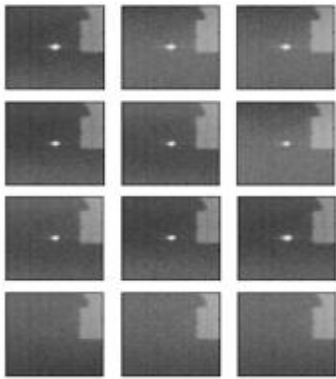


图 7 不同入射角情况下“猫眼”目标图像

Fig.7 Images of cat-eye target with different incidence angle

图 8 为利用图 7 实验结果以及公式(13)计算得到的回波功率随入射角变化的曲线。从图中可以看出,在“猫眼”光学系统的视场角范围内回波功率不随入射角而变化,回波功率保持恒定值,当入射角大于视场角时,回波功率迅速降为 0。实验数据与理论计算结果基本一致。图中回波功率有一定的起伏为大气湍流造成。

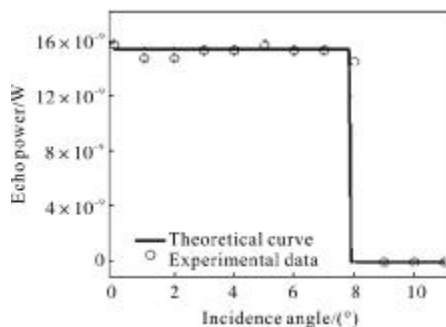


图 8 回波功率随入射角的变化曲线

Fig.8 Echo power changed with incidence angle

## 4 结论

文中利用矩阵光学方法,对“猫眼”目标探测距离方程进行了重新建模和推导,使其能够应用于探测光束斜入射、“猫眼”光学系统离焦的一般情况。通过理论分析和数值计算,证明了回波方向与入射光方向并非严格的一致,而是存在一个微小的回波方向偏差角。由于回波发散角要远大于回波方向偏差角,所以回波光束足以形成对探测系统的覆盖,这就保证了所推导的探测距离方程的意义和使用价值。理论分析和实验研究表明,在“猫眼”目标的视场范围内,回波功率不随入射角、光学系统孔径的变化而变化。在相同探测的条件下,回波功率只与光学系统焦距、离焦量有关。

## 参考文献:

- [1] Lecocq C, Deshors G, Lado-Bordowsky O, et al. Sight laser detection modeling [C]//SPIE, 2003, 5086: 280-26.
- [2] Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua, et al. Research and prospect of Cat-Eye effect used for active laser detection technique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(10): 38-47. (in Chinese)  
赵延伸, 孙华燕, 宋丰华, 等. 猫眼效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): 38-47.
- [3] Shi Guang, Zhang Haiyang, Geng Zhongbo, et al. Experiment of large field laser active detection system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(4): 890-984. (in Chinese)  
时光, 张海洋, 耿仲博, 等. 大视场激光主动探测系统实验 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 890-984.
- [4] Zhao Xunjie. Active laser detection technology [J]. Electro-optics & Passive Countermeasure, 1998(2): 1-4. (in Chinese)  
赵勋杰. 激光主动侦察技术 [J]. 光电对抗与无源干扰, 1998 (2): 1-4.
- [5] Zhao Xunjie, Gao Zhiyun, Zhang Yingyuan. Technology of active laser reconnaissance and the application in the military [J]. Optical Technology, 2003, 29(4): 415-417. (in Chinese)  
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, 29(4): 415-417.
- [6] Lei Ping, Xing Hui, Xue Ting, et al. Analysis of detecting capability for active laser detection system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(6): 981-985. (in Chinese)  
雷萍, 邢晖, 薛挺, 等. 激光主动探测系统的探测能力分析 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 981-985.
- [7] Zhang Bo, Zhang Chu, Wu Dongsheng, et al. Analysis of oblique incident angle on retro-reflected wave power in cat-eye target[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(10): 1046-1050. (in Chinese)  
张博, 张雏, 武东生, 等. 斜入射条件下“猫眼”目标回波功率分析[J]. 激光与红外, 2009, 39(10): 1046-1050.
- [8] Mieremet A L, Schleijsen Ric (H.)M A, Pouchelle P N. Modeling the detection of optical sights using retro-reflection [C]//SPIE, 2008, 6950: 69500E1-10.
- [9] Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua, et al. Propagation properties of oblique and off-axial Gaussian beams passing through cat-eye optical lens [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29 (9): 2552-2556.  
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, 2009, 29(9):2552-2556.
- [10] Wei Jixiang, Wei Guanghui, Ha Liuzhu, et al. Matrix Optics [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1995: 29. (in Chinese)  
魏吉祥, 魏光辉, 哈流柱, 等. 矩阵光学[M]. 北京:兵器工业出版社, 1995: 29.