

# 大视场猫眼镜头激光回波功率分布模型及特性分析

段帅军<sup>1</sup>, 樊桂花<sup>2\*</sup>, 张来线<sup>2</sup>, 刘瑞丰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>航天工程大学研究生院, 北京 101416;

<sup>2</sup>航天工程大学电子与光学工程系, 北京 101416

**摘要** 以基于猫眼效应的逆向调制激光通信为应用背景, 将猫眼镜头的角失调量转化为线失调量, 在柯林斯 (Collins) 衍射公式的基础上建立了大视场猫眼回波功率分布模型。仿真分析了离焦量、入射角、猫眼口径和焦距对回波功率分布的影响及猫眼回波光束的原路返回特性, 并进行了实验验证。结果表明: 入射角越大, 回波光斑的面积越小, 衍射越强烈, 且相同入射角下, 猫眼的口径越大, 焦距越小, 回波光斑受入射角的影响就越小; 同等离焦量下正离焦回波光斑的发散角小于负离焦; 猫眼回波的中心偏移量与入射角和离焦量呈线性关系, 且存在一个正离焦量值使回波光束能够原路返回。

**关键词** 光通信; 自由空间光通信; 光场分布; 猫眼光学镜头; 大入射角

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1006001

## Laser-Echo-Power Distribution Model of Large-Field Cat-Eye Lens and Characteristics Analysis

Duan Shuaijun<sup>1</sup>, Fan Guihua<sup>2\*</sup>, Zhang Laixian<sup>2</sup>, Liu Ruifeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Graduate, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

<sup>2</sup>Department of Electronic and Optics Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China

**Abstract** Considering the cat-eye effect based retro-modulating laser communication as the application background, a large-field cat-eye echo power distribution model is established based on the Collins diffraction formula by transforming the angular misalignment of the cat-eye lens into a line offset. The effects of the defocusing amount, incident angle, cat-eye diameter, and focal length on the echo power distribution and original return characteristics of the cat-eye echo beam are analyzed and verified with experiments. The results show that the larger the incident angle is, the smaller the echo spot area is, and the stronger the diffraction is. At the same incident angle, the larger the aperture of the cat-eye is, the smaller the focal length is, and the smaller the echo spot affected by the incident angle is. The divergence angle of the positive defocus echo spot at the same defocusing amount is smaller than that of the negative defocus. The center shift of the cat-eye echo varies linearly with both the incident angle and the defocusing amount, and there is a positive defocusing amount that causes the echo beam to return to the original path.

**Key words** optical communications; free space optical communication; light field distribution; cat-eye optical lens; large angle of incidence

**OCIS codes** 060.2605; 260.1960; 060.4210

## 1 引 言

猫眼效应是指猫眼光学系统能够将入射光束按照入射方向原路逆向反射回发射端的特性, 反射光强度比漫反射光强度高出 2~4 个数量级<sup>[1]</sup>。基于猫眼效应的逆向调制激光通信系统可以将小尺寸调制器与大口径光学系统匹配, 使自由空间光通信系

统在保证大视场、小后向发散角、高回波功率的同时有效提高通信速率<sup>[2-6]</sup>。

当前, 对猫眼效应回波特性的研究方法主要分为几何光学法<sup>[7-8]</sup>、衍射积分法<sup>[9-10]</sup>及角谱法<sup>[11-12]</sup>。文献[7]中采用几何光学法计算并分析了大入射角和离焦量对猫眼逆向调制中猫眼效应回波的发散角、中心偏移量和猫眼系统增益的影响。文献[8]中

收稿日期: 2019-04-09; 修回日期: 2019-05-21; 录用日期: 2019-05-31

\* E-mail: fanguihua@sina.com

基于矩阵光学,建立了入射激光斜入射和猫眼系统离焦下的猫眼效应回波能量与形状模型,并进行了实验验证。文献[9]中采用衍射积分法,对激光照射猫眼光学镜头产生的猫眼效应机理进行了理论推导和实验验证。文献[10]中运用广义惠更斯-菲涅耳衍射积分理论以及将光学窗口函数展开为有限个复高斯函数之和的方法,在倾斜系数很小的情况下,通过数值计算分析了高斯光束的倾斜系数和离轴量对猫眼效应回波光强分布的影响。文献[11]中基于角谱衍射理论,利用二维离散傅里叶变换的方法,通过数值分析和实验验证了大角度入射对猫眼回波光场分布的影响规律。以上研究分别存在以下不足:1)几何光学法忽略了激光在传播过程中的衍射现象,结果存在一定的误差;2)基于柯林斯(Collins)公式的衍射积分法只适用于光束近似傍轴传播,分析结果不适用于具有大视场角的猫眼逆向调制通信系统;3)角谱传播法虽然解决了大角度斜入射条件下的问题,但得到的反射光分布不能解析。本文将猫眼光学镜头的角失调量转换为线失调量,

采用物理光学衍射积分法建立了大视场猫眼回波功率分布模型,解决了上述问题,并通过仿真分析和实验验证了猫眼光学系统参数的变化对回波功率分布的影响。

## 2 模型建立

将倾斜离轴高斯光束通过猫眼光学镜头的传输过程展开分析,可以得到一个双透镜的简化模型,如图1所示,其中: $P_{in}$ 和 $P_{out}$ 为输入输出参考面; $z'$ 为猫眼光学系统主光轴的方向; $\theta_y$ 为高斯光束与 $z'$ 轴的夹角,即入射激光在 $y$ 方向的入射角; $R$ 为透镜1和透镜2的半径; $f$ 为透镜1和透镜2的焦距; $L_1$ 为输入参考面到透镜1前镜面的距离; $L_2$ 为透镜2后镜面到输出参考面的距离; $\delta$ 为离焦量。光束在第2个透镜前的离轴量 $\Delta x'$ 和 $\Delta y'$ 的表达式为

$$\begin{cases} \Delta x' = -2(f + \delta) \tan \theta_x \\ \Delta y' = -2(f + \delta) \tan \theta_y \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\theta_x$ 为高斯光束与 $x$ 轴的夹角,即入射激光在 $x$ 方向的入射角。

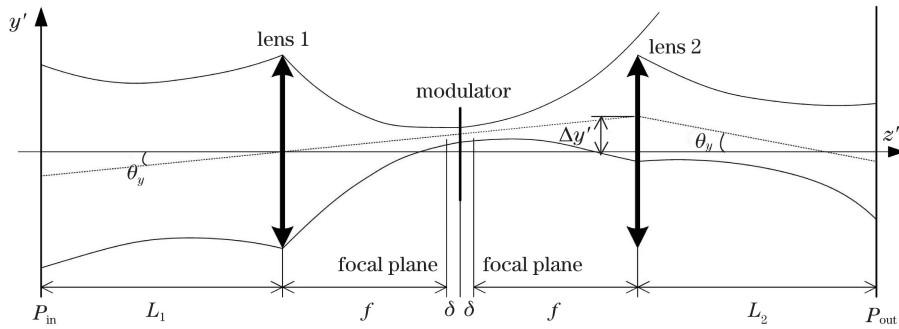


图1 倾斜高斯光束通过猫眼光学镜头的传输过程

Fig. 1 Transmission process of tilting Gaussian beam passing through cat-eye optical lens

将图1中猫眼光学镜头的角失调量转化为线失调量,可以使等效正入射光束通过线失调猫眼光学镜头,其传输过程如图2所示,其中: $z$ 轴为等效正入射激光束的入射方向。等效透镜2的中心在 $x$

方向和 $y$ 方向上与 $z$ 轴的偏移量 $\Delta x$ 和 $\Delta y$ 的表达式为

$$\begin{cases} \Delta x = \Delta x' \cos \theta_x = -2(f + \delta) \sin \theta_x \\ \Delta y = \Delta y' \cos \theta_y = -2(f + \delta) \sin \theta_y \end{cases}. \quad (2)$$

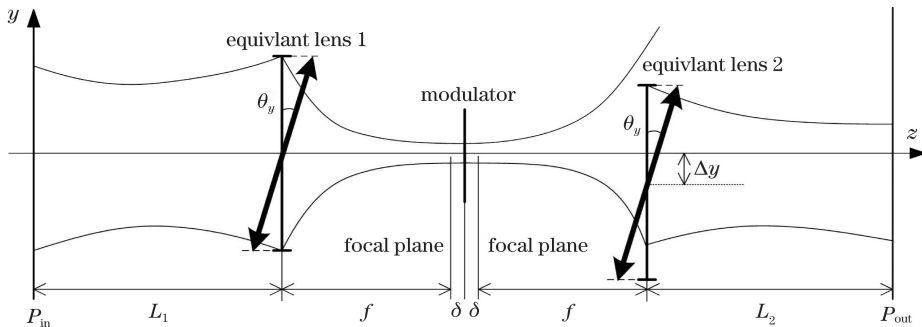


图2 等效正入射光束通过线失调猫眼光学镜头的传输过程

Fig. 2 Transmission process of equivalent normal incident beam passing through line misalignment cat-eye optical lens

将图 2 所示的光束传输过程进行矩阵分解,分为三个区间:输入参考面到等效透镜 1 前镜面、等效透镜 1 前镜面到等效透镜 2 前镜面以及等效透镜 2 前镜面到输出参考面,其中,后两个区间均带有硬边光阑。三个区间的传输矩阵分别为

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{(f+\delta)(1+K)}{f} & (f+\delta)(1+K) \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} a_3 & b_3 \\ c_3 & d_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{L_2}{f} & L_2 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中:  $K = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta_x} + \frac{1}{\cos^2\theta_y} - 1}}$ ;  $a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, c_2, d_2, a_3, b_3, c_3, d_3$  分别为三个区间中输入面到输出面之间变换矩阵的矩阵元。

由于猫眼光学镜头为倾斜状态,两个透镜的等效光阑形状为椭圆,在直角坐标系下,两个椭圆硬边光阑的窗口函数可表示为

$$T_1(x, y) = \begin{cases} 1, & \frac{x^2}{\cos^2\theta_x} + \frac{y^2}{\cos^2\theta_y} \leq R^2 \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad (6)$$

$$T_2(x, y) = \begin{cases} 1, & \frac{(x-\Delta x)^2}{\cos^2\theta_x} + \frac{(y-\Delta y)^2}{\cos^2\theta_y} \leq R^2 \\ 0, & \text{others} \end{cases}. \quad (7)$$

将(6)~(7)式展开为有限个复高斯函数之和<sup>[9]</sup>,可转化为

$$A_1(x, y) = \sum_{m=1}^M F_m \exp\left[-\frac{G_m}{R^2} \left(\frac{x^2}{\cos^2\theta_x} + \frac{y^2}{\cos^2\theta_y}\right)\right], \quad (8)$$

$$A_2(x, y) = \sum_{n=1}^M F_n \exp\left\{-\frac{G_n}{R^2} \left[\frac{(x-\Delta x)^2}{\cos^2\theta_x} + \frac{(y-\Delta y)^2}{\cos^2\theta_y}\right]\right\}, \quad (9)$$

式中: $x, y$  为坐标值; $F_m, F_n$  和  $G_m, G_n$  分别为两个展开的复高斯函数之和的展开系数和复高斯函数系数; $M$  为复高斯函数展开式的项数,当  $M=10$  时(取值见文献[13]),柯林斯衍射积分公式在直角坐标系下可转化为<sup>[14]</sup>

$$E(x, y) = \frac{1}{i\lambda b} \exp(ikL) \iint E_0(x_0, y_0) \cdot \exp\left\{\frac{ik}{2b} [a(x_0^2 + y_0^2) + d(x^2 + y^2) - 2(xx_0 + yy_0)]\right\} dx_0 dy_0, \quad (10)$$

式中: $\lambda$  为波长; $k$  为波数( $k=2\pi/\lambda$ ); $L$  为光程; $E_0$  为输入面的光场分布; $E$  为输出面的光场分布; $a, b, d$  为输入面到输出面传输矩阵的矩阵元。

设入射激光的束腰位置为输入参考面,则束腰半径为  $\omega_0$  的高斯光束在输入参考面的光场分布表达式为

$$E_0(x_0, y_0) = \exp\left(-\frac{x_0^2 + y_0^2}{\omega_0^2}\right), \quad (11)$$

式中: $x_0, y_0$  为光束在输入参考面坐标值。

根据柯林斯衍射积分公式,高斯光束从输入参考面到达等效透镜 1 的前场分布表达式为

$$E_1(x_1, y_1) = \frac{1}{i\lambda b_1} \exp(ikL_1) \iint E_0(x_0, y_0) \cdot \exp\left\{\frac{ik}{2b_1} [a_1(x_0^2 + y_0^2) + d_1(x_1^2 + y_1^2) - 2(x_1x_0 + y_1y_0)]\right\} dx_0 dy_0, \quad (12)$$

式中: $x_1, y_1$  为光束在等效透镜 1 前镜面坐标值。

将(11)式代入(12)式,并结合公式

$$\iint \exp(-P_x^2 x^2 - Q_x x - P_y^2 y^2 - Q_y y) dx dy = \frac{\pi}{P_x P_y} \exp\left(\frac{Q_x^2}{4P_x^2} + \frac{Q_y^2}{4P_y^2}\right), \quad (13)$$

可得等效透镜 1 的前场分布表达式为

$$E_1(x_1, y_1) = \frac{-ik}{2b_1} \frac{1}{P_1^2} \exp(ikL_1) \cdot \exp\left[\left(\frac{ik}{2b_1} - \frac{k^2}{4b_1^2 P_1^2}\right)(x_1^2 + y_1^2)\right], \quad (14)$$

式中: $P_x^2, P_y^2$  分别为  $x^2, y^2$  系数的相反数; $Q_x, Q_y$  分别为  $x, y$  系数的相反数,  $P_1^2 = \frac{1}{\omega_0^2} - \frac{ik}{2b_1}$ 。

假设焦平面处调制器的尺寸足够大,将(4)式、(8)式和(14)式代入(10)式,并利用(13)式化简,可得光场在等效透镜 2 的前场分布表达式为

$$E_2(x_2, y_2) = \frac{-ik}{2b_1} \frac{-ik}{2b_2} \frac{1}{P_1^2} \frac{1}{P_{2x} P_{2y}} \cdot \exp\{ik[L_1 + (1+K)(f+\delta)]\} \sum_{m=1}^M F_m \cdot \exp\left[\left(\frac{ikd_2}{2b_2} - \frac{k^2}{4b_2^2 P_{2x}^2}\right)x_2^2 + \left(\frac{ikd_2}{2b_2} - \frac{k^2}{4b_2^2 P_{2y}^2}\right)y_2^2\right], \quad (15)$$

式中:  $x_2, y_2$  为光束在等效透镜 2 前镜面坐标值;

$$P_{2x}^2 = \frac{k^2}{4b_1^2 P_1^2} - \frac{ikd_1}{2b_1} - \frac{ika_2}{2b_2} + \frac{G_m}{R^2 \cos^2 \theta_x}, P_{2y}^2 = \frac{k^2}{4b_1^2 P_1^2} - \frac{ikd_1}{2b_1} - \frac{ika_2}{2b_2} + \frac{G_m}{R^2 \cos^2 \theta_y}.$$

同理,将(5)式、(9)式和(15)式代入(10)式,并利用(13)式化简,可得输出参考面的光场分布表达式为

$$E_3(x_3, y_3) = \frac{-ik}{2b_1} \frac{-ik}{2b_2} \frac{-ik}{2b_3} \frac{1}{P_1^2} \frac{1}{P_{2x} P_{2y}} \frac{1}{P_{3x} P_{3y}} \cdot \exp\left[\frac{ikd_3}{2b_3}(x_3^2 + y_3^2)\right] \sum_{m=1}^M F_m \sum_{n=1}^M F_n \cdot \exp\left\{-\frac{G_n}{R^2} \left[\frac{(\Delta x)^2}{\cos^2 \theta_x} + \frac{(\Delta y)^2}{\cos^2 \theta_y}\right]\right\} \cdot \exp\{ik[L_1 + (1+K)(f+\delta) + L_2]\} \cdot \exp\left(\frac{Q_{3x}^2}{4P_{3x}^2} + \frac{Q_{3y}^2}{4P_{3y}^2}\right), \quad (16)$$

式中:  $x_3, y_3$  为光束在输出参考面坐标值,  $P_{3x}^2 =$

$$\frac{k^2}{4b_2^2 P_{2x}^2} - \frac{ikd_2}{2b_2} - \frac{ika_3}{2b_3} + \frac{G_n}{R^2 \cos^2 \theta_x}, P_{3y}^2 = \frac{k^2}{4b_2^2 P_{2y}^2} - \frac{ikd_2}{2b_2} - \frac{ika_3}{2b_3} + \frac{G_n}{R^2 \cos^2 \theta_y}, Q_{3x} = \frac{ikx_3}{b_3} - \frac{2G_n \Delta x}{R^2 \cos^2 \theta_x},$$

$$Q_{3y} = \frac{iky_3}{b_3} - \frac{2G_n \Delta y}{R^2 \cos^2 \theta_y}.$$

则输出参考面的光强分布为

$$I_3(x_3, y_3) = E_3(x_3, y_3) E_3^*(x_3, y_3), \quad (17)$$

式中:  $E_3^*(x_3, y_3)$  为  $E_3(x_3, y_3)$  的共轭。

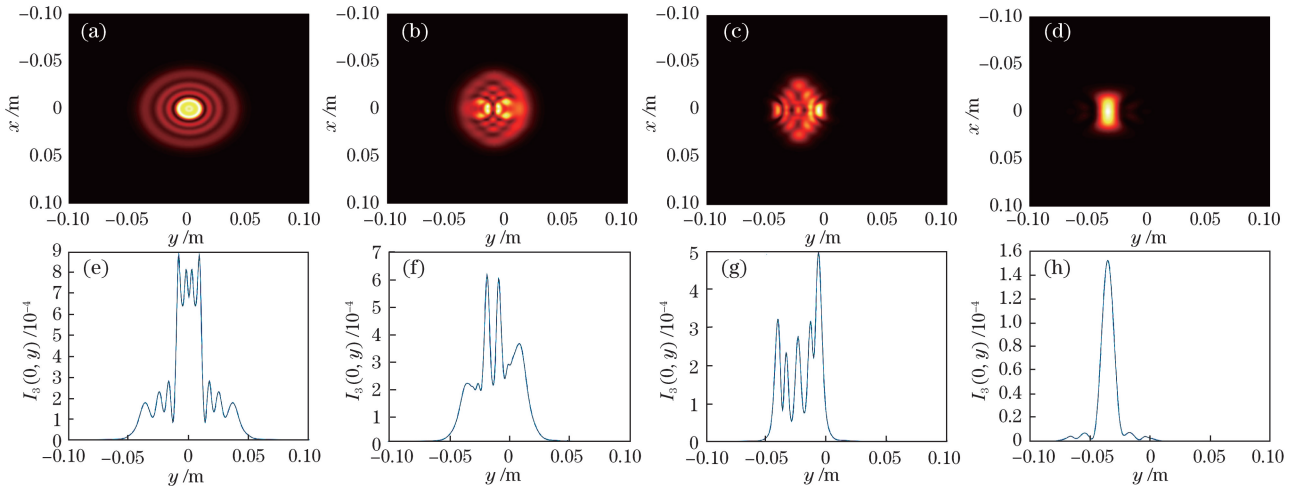


图 3 不同入射角的回波光斑和光强分布。(a)~(d)  $\theta=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 时的回波光斑;

(e)~(h)  $\theta=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 时的光强分布

Fig. 3 Echo spots and intensity distributions with different incident angles. (a)-(d) Echo spots when  $\theta=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ ;

(e)-(h) intensity distributions when  $\theta=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$

### 3 仿真与分析

通过(16)~(17)式可以计算出输出参考面猫眼回波的功率分布,数值计算中设入射激光的波长为 1064 nm,束腰半径为 1 mm,猫眼透镜焦距为 35 mm,口径半径为 50 mm。因为猫眼逆向调制光学系统为圆对称系统,所以只需考虑入射光束沿  $y$  轴方向斜入射的情况,即  $\theta_x=0$ 。

#### 3.1 入射角对回波功率分布的影响

改变入射角两个硬边光阑窗口函数  $T_1(x, y)$  和  $T_2(x, y)$ ,将影响回波功率的分布情况。等效正入射光束分别通过两个硬边光阑窗口函数的过程可以近似为正入射光束通过两个窗口函数在  $x$ - $y$  平面投影发生重叠的过程,该重叠区域即为猫眼系统的有效接收区域。因此当入射光束有一定的入射角时,回波光斑形状近似为两个等效光阑交汇产生的重叠形状。当  $\theta_y$  逐渐增大时,  $|\Delta y|$  逐渐增大,导致窗口函数  $T_2(x, y)$  在  $y$  轴的偏移量变大,而窗口函数  $T_1(x, y)$  未产生偏移,进而造成两硬边光阑窗口在  $x$ - $y$  平面投影的交汇重叠面积变小,即猫眼系统的有效接收面积减小。图 3 为  $L_1=L_2=100$  m 且离焦量为 0 时的不同入射角度下输出参考面得到的回波光斑和  $x=0$  沿  $y$  轴分布的光强值  $I_3(0, y)$  曲线图。由图可得随着入射角的增大,回波光斑形状逐渐变小,衍射效应增强,衍射峰数目减小,峰值光强变小。当入射角度增大到一定值时,两



等效光阑不产生交汇重叠,输出参考面无回波光斑。输出参考面有回波时偏移量  $\Delta y$  的取值范围约束公式可表示为

$$\Delta y \leq R \cos \theta_y. \quad (18)$$

代入(2)式,可求得  $\theta_y$  的取值范围:

$$\theta_y \leq \arctan \frac{R}{f + \delta}. \quad (19)$$

此时  $\theta_y$  的最大值即为猫眼光学系统的半视场角大小,由(19)式可以看出猫眼光学系统视场角的大小

与猫眼的口径和焦距有关,最大半视场角与猫眼口径半径正相关,与猫眼焦距负相关,即猫眼的口径越大、焦距越小,视场角就越大。图 4 和图 5 分别是不同焦距和口径的回波光斑图,可以看出,在相同的入射角下,猫眼的口径越大、焦距越小,回波光斑受入射角的影响就越小,光斑形状越趋向于光束正入射时的回波光斑。因此猫眼镜头要保证大口径、短焦距,这也更好地解释了文献[15]中所提到的问题,猫眼逆向调制光学系统必须尽可能使猫眼镜头拥有小的  $F$  数。

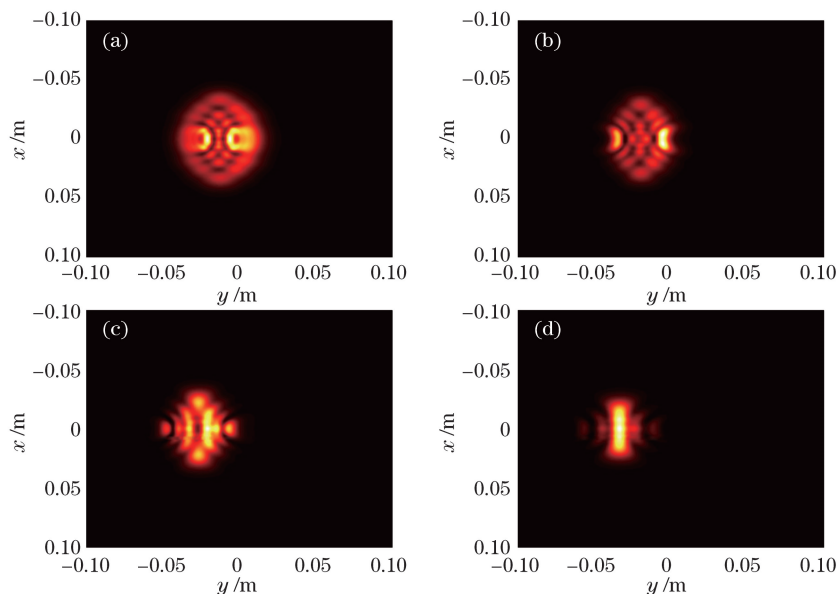


图 4 入射角  $20^\circ$ 、口径 50 mm 时不同焦距的回波光斑。(a)  $f=20$  mm; (b)  $f=30$  mm; (c)  $f=40$  mm; (d)  $f=50$  mm

Fig. 4 Echo spots with different focal lengths when incident angle is  $20^\circ$  and diameter is 50 mm.

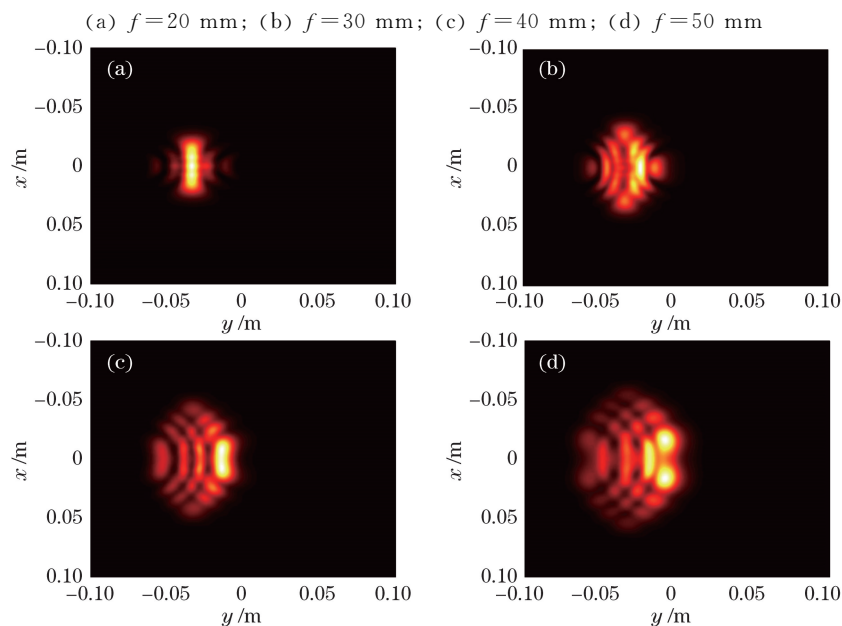


图 5 入射角  $20^\circ$ 、焦距 50 mm 时不同口径的回波光斑。(a)  $D=50$  mm; (b)  $D=60$  mm; (c)  $D=70$  mm; (d)  $D=80$  mm

Fig. 5 Echo spots with different diameters when incident angle is  $20^\circ$  and focal length is 50 mm.

(a)  $D=50$  mm; (b)  $D=60$  mm; (c)  $D=70$  mm; (d)  $D=80$  mm

### 3.2 离焦量对回波功率分布的影响

图 6 和图 7 为  $L_1=L_2=100$  m、入射角分别是  $0^\circ$  和  $20^\circ$  时不同离焦量下的回波光斑和光强分布曲线,由图可知,同等离焦量下,负离焦比正离焦的发散角要大;正离焦量增大回波先会聚后发散,

与之对应的是光强值先变大后变小;负离焦量增大光斑变大,光强值随之一直减小。因此在距离和猫眼镜头结构参数固定的情况下,存在一定的正离焦量,使得回波光束的束宽最小,回波的光强值最大。

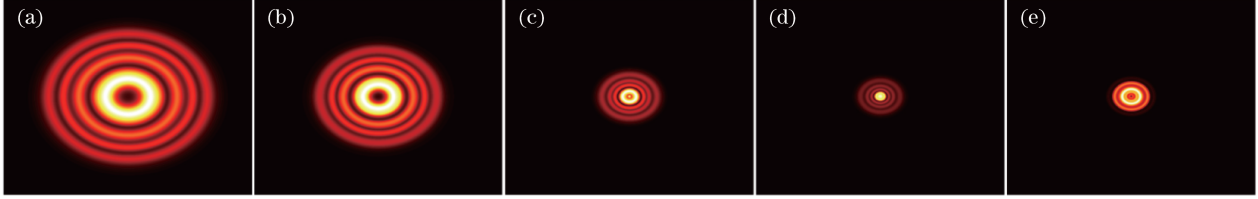


图 6 正入射不同离焦量的回波光斑。(a)  $\delta=-0.02$  mm; (b)  $\delta=-0.01$  mm; (c)  $\delta=0$  mm; (d)  $\delta=0.01$  mm; (e)  $\delta=0.02$  mm

Fig. 6 Echo spots with different defocusing amounts at normal incidence. (a)  $\delta=-0.02$  mm; (b)  $\delta=-0.01$  mm; (c)  $\delta=0$  mm; (d)  $\delta=0.01$  mm; (e)  $\delta=0.02$  mm

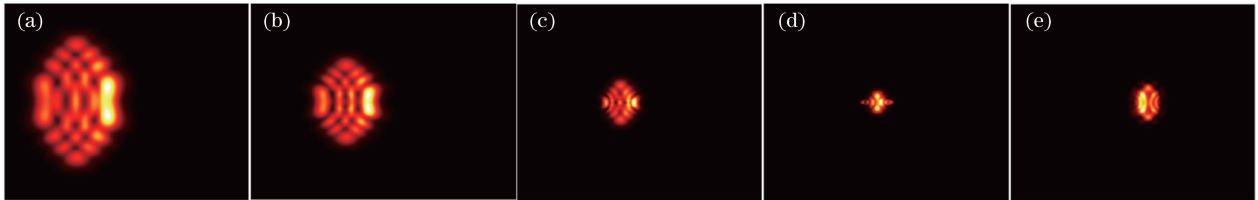


图 7 入射角  $20^\circ$  不同离焦量的回波光斑。(a)  $\delta=-0.02$  mm; (b)  $\delta=-0.01$  mm; (c)  $\delta=0$  mm; (d)  $\delta=0.01$  mm; (e)  $\delta=0.02$  mm

Fig. 7 Echo spots with different defocusing amounts at incident angle of  $20^\circ$ . (a)  $\delta=-0.02$  mm; (b)  $\delta=-0.01$  mm; (c)  $\delta=0$  mm; (d)  $\delta=0.01$  mm; (e)  $\delta=0.02$  mm

同时在图 7 中还发现:当斜入射时,光斑亮度呈非对称分布。负离焦以及正离焦的离焦量很小时光斑靠近  $y$  轴正方向一侧光强值较大;正离焦量增大到一定程度后,光斑靠近  $y$  轴负方向一侧较亮,且衍射条纹更加模糊,其原因是等效透镜 2 的光阑在  $y$  轴正方向上的边界清晰,而在  $y$  轴负方向上与光束相交而成的边界模糊,因此正方向上的衍射更为强烈,光斑更亮。正离焦使得回波光束先会聚后发散,从而使得发散后的光束衍射现象减弱,且发散时的光场分布方向与会聚时的相反,即光斑靠近  $y$  轴正方向一侧较亮。利用此结论可得,在入射角方向确定,且已知是正离焦的情况下,可以通过判断回波光斑亮弱的方向来确定接收面光束处于会聚状态还是发散状态,从而进一步调整离焦量使得猫眼逆向调制系统的接收端处的光强最大。

### 3.3 猫眼回波的原路返回特性

猫眼效应反射回波具有良好的原路返回特性,但是在有一定入射角的情况下会出现原路返回偏差现象,进而导致原路返回中心处的光强能量降低,影响猫眼逆向调制通信系统的通信质量。因此需要对猫眼回波的原路返回特性进行研究。一般认为回波

光束的质心位置表征猫眼回波的原路返回偏差值,按照一阶矩定义的光束质心位置为

$$\bar{x} = \frac{\iint x E_3(x_3, y_3) E_3^*(x_3, y_3) dx dy}{\iint E_3(x_3, y_3) E_3^*(x_3, y_3) dx dy} = \frac{\iint x I_3(x_3, y_3) dx dy}{\iint I_3(x_3, y_3) dx dy}, \quad (20)$$

$$\bar{y} = \frac{\iint y E_3(x_3, y_3) E_3^*(x_3, y_3) dx dy}{\iint E_3(x_3, y_3) E_3^*(x_3, y_3) dx dy} = \frac{\iint y I_3(x_3, y_3) dx dy}{\iint I_3(x_3, y_3) dx dy}. \quad (21)$$

将推导出的  $I_3(x_3, y_3)$  代入(20)式和(21)式,即可得猫眼回波的原路返回偏差。图 8 与图 9 是  $L_1=L_2=100$  m 时,离焦量、入射角度与回波光斑中心  $y$  轴偏移量之间的关系。由图 8 可知,当离焦量固定时,偏移量与入射角呈线性关系,入射角越大,回波光斑的中心偏移量就越大。由图 9 可知,当

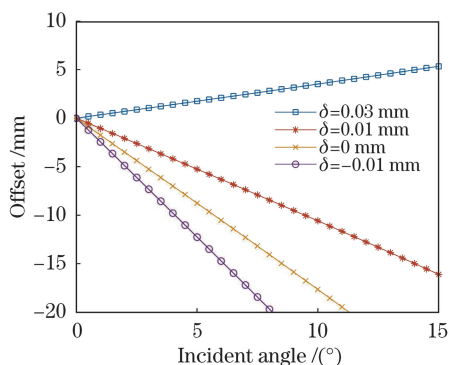


图 8 不同离焦量下偏移量与入射角的关系  
Fig. 8 Relationship between offset and incident angle under different defocusing amounts

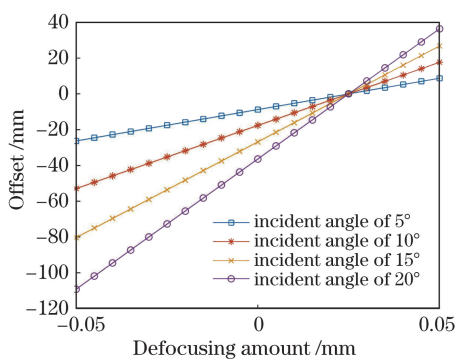


图 9 不同入射角下偏移量与离焦量的关系  
Fig. 9 Relationship between offset and defocusing amount at different incident angles

入射角固定时,偏移量与离焦量呈线性关系,正离焦使光斑中心向  $y$  轴正方向偏移,负离焦使光斑中心向  $y$  轴负方向偏移,且同等离焦量下,正离焦的偏移量小于负离焦。同时还发现当离焦量为 0.025 mm 时,入射角为  $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$  的偏移量均为 0,即存在一个固定的离焦量值,无论入射角怎样变化,光束原路返回。

#### 4 实验验证

为进一步验证仿真分析结果,采用如图 10 所示的实验方案。激光器发射激光,经过准直扩束、分束镜后到达猫眼光学系统,返回的光束再次经过分束镜在接收屏产生光斑,摄像机采集光斑图像后送至计算机进行处理。实验装置的主要参数如下:激光器为 532 nm 半导体激光器,发射功率为 100 mW,分束镜的分束比为 1:1,猫眼光学系统由透镜和平面反射镜组成,半视场角为  $8.7^\circ$ ,其中透镜口径为 40 mm,焦距为 130 mm,接收屏和激光器与猫眼光学系统的距离均为 10 m。

反射镜放置在平移台上,可通过移动平移台来实现猫眼光学系统离焦量的改变,猫眼光学系统整体放置在转台上,可通过调节转台角度来实现入射角度的变化。图 11、12 是正入射时,离焦量分别为  $-1, -0.5, 0, 0.5, 1$  mm 在接收屏产生的光斑图和

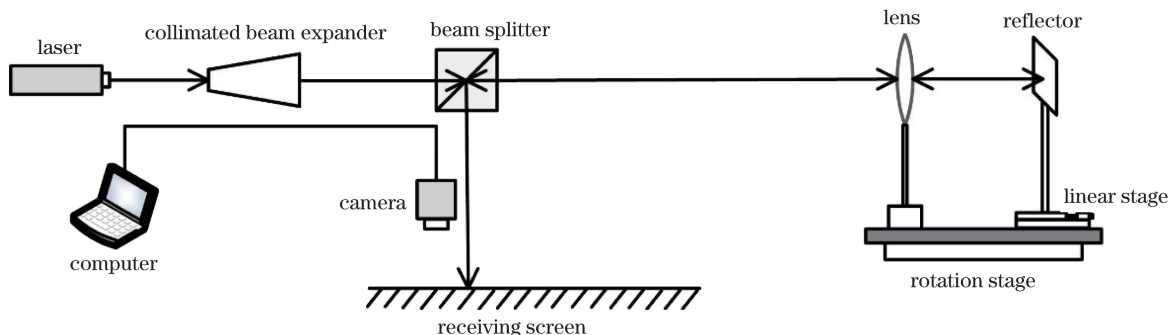


图 10 实验装置原理图  
Fig. 10 Diagram of experimental setup

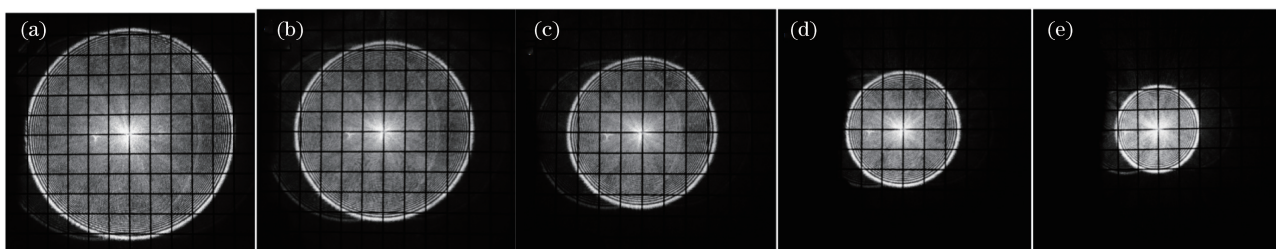


图 11 正入射不同离焦量的光斑实验图。(a)  $\delta = -1$  mm; (b)  $\delta = -0.5$  mm; (c)  $\delta = 0$  mm; (d)  $\delta = 0.5$  mm; (e)  $\delta = 1$  mm  
Fig. 11 Experimental spots with different defocusing amounts at normal incidence. (a)  $\delta = -1$  mm; (b)  $\delta = -0.5$  mm; (c)  $\delta = 0$  mm; (d)  $\delta = 0.5$  mm; (e)  $\delta = 1$  mm

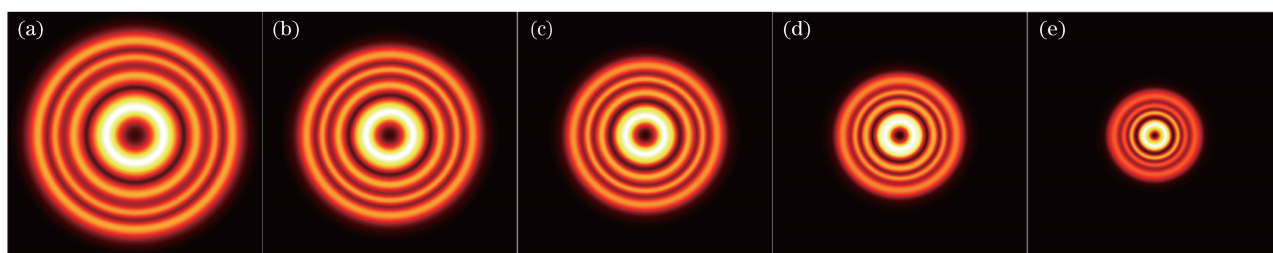


图 12 正入射不同离焦量的光斑仿真图。(a)  $\delta = -1$  mm; (b)  $\delta = -0.5$  mm; (c)  $\delta = 0$  mm; (d)  $\delta = 0.5$  mm; (e)  $\delta = 1$  mm

Fig. 12 Simulated spots with different defocusing amounts at normal incidence. (a)  $\delta = -1$  mm; (b)  $\delta = -0.5$  mm; (c)  $\delta = 0$  mm; (d)  $\delta = 0.5$  mm; (e)  $\delta = 1$  mm

仿真图。为了更好地观测光斑的形状与位置,接收屏上显示为  $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  的网格。从图 12 中可以看出回波光斑产生了明显的衍射条纹,光斑中心位置未发生偏移,即正入射情况下离焦量对光束原路返回特性无影响,光束原路返回,同等离焦量下正离焦的光斑比负离焦的光斑更集中,发散角更小。

图 13、14 是在非离焦量的情况下,入射角分别为  $0^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $4^\circ$ 、 $6^\circ$  和  $8^\circ$  时接收屏上的光斑图和仿真结果图。由图 13 可得,实验所得光斑为两等效光阑交汇重叠形状,且随着入射角度的增大而逐渐变小,当入射角为  $8^\circ$  接近半视场角时,衍射非常剧烈,光斑的轮廓接近于一条直线。

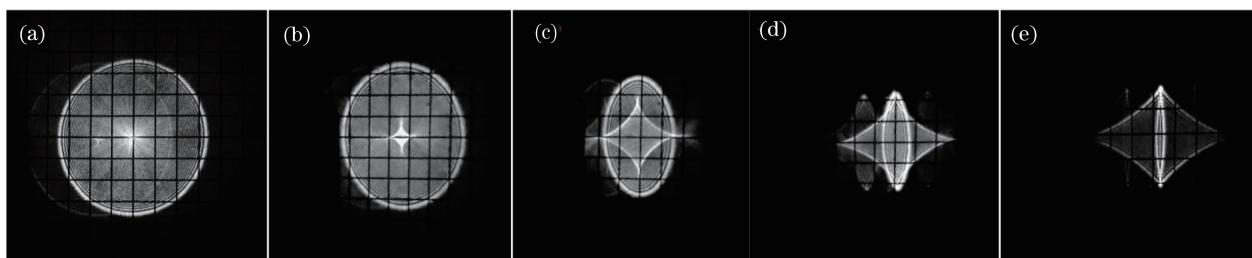


图 13 不同入射角的实验光斑图。(a)  $\theta = 0^\circ$ ; (b)  $\theta = 2^\circ$ ; (c)  $\theta = 4^\circ$ ; (d)  $\theta = 6^\circ$ ; (e)  $\theta = 8^\circ$

Fig. 13 Experimental spots under different incident angles. (a)  $\theta = 0^\circ$ ; (b)  $\theta = 2^\circ$ ; (c)  $\theta = 4^\circ$ ; (d)  $\theta = 6^\circ$ ; (e)  $\theta = 8^\circ$

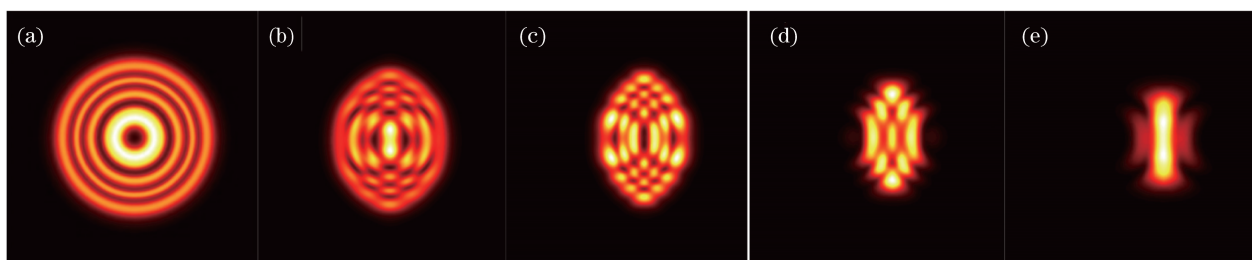


图 14 不同入射角的仿真光斑图。(a)  $\theta = 0^\circ$ ; (b)  $\theta = 2^\circ$ ; (c)  $\theta = 4^\circ$ ; (d)  $\theta = 6^\circ$ ; (e)  $\theta = 8^\circ$

Fig. 14 Simulated spots under different incident angles. (a)  $\theta = 0^\circ$ ; (b)  $\theta = 2^\circ$ ; (c)  $\theta = 4^\circ$ ; (d)  $\theta = 6^\circ$ ; (e)  $\theta = 8^\circ$

以上的实验结果与仿真结果光斑图基本吻合,实验结果能验证之前的理论分析,但两者之间仍存在以下区别:1)实验光斑的衍射现象更为强烈,衍射条纹更加密集,而仿真光斑的衍射条纹比较稀疏,且比较不同入射角的实验图与仿真图可知,随着入射角的不断增大两者光斑衍射级数的差距越来越大。2)实验光斑附近的一定距离处存在与主光斑形状相同但光强更弱的暗光斑。

区别 1)的原因是实验中考虑到实验距离有限,输出端采用了激光器加准直扩束镜,而仿真中的输

出端为直接激光器输出,同时实验中的猫眼光学系统由透镜和反射镜组成,轴外像差比较大。随着入射角的增大,激光入射在猫眼透镜的有效面积越来越小,致使衍射越来越强烈,进而导致实验与仿真光斑两者的衍射级数差别越来越大。区别 2)的原因是实验光路中的半透半反镜有一定的厚度,存在前后两个表面,激光回波经前表面反射到在接收屏上,显示为亮光斑,即主光斑;透过前表面经后表面反射的激光回波在接收屏上显示为暗光斑。由于半透半反镜的前后表面有一定距离,而激光回波与半透半



反镜的光轴成  $45^\circ$  角,这也导致了接收屏上主光斑与暗光斑之间存在一定的距离。

以正入射时光斑的质心为原点,测量非离焦时不同入射角相对质心原点的偏移,同时对偏移量进行仿真,实验与仿真结果如图 15 所示。结果表明实验与仿真基本吻合,入射角越大偏移量越大。由于入射角的选取对猫眼逆向调制通信链路的建立有较大影响,因此在实验过程中应根据入射角的变化来调整接收端相对于发射端的位置,以便接收到逆向调制端反射回来的信号。

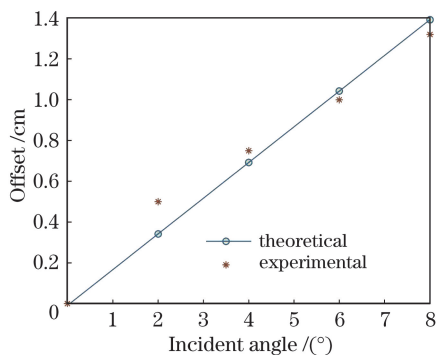


图 15 不同入射角下回波的偏移量

Fig. 15 Offset of echo at different incident angles

## 5 结 论

基于柯林斯衍射积分公式,将角失调量转化为线失调量,建立了大入射角条件下猫眼回波光场分布模型及解析公式,仿真分析了距离、离焦量、入射角对回波功率分布的影响以及回波的原路返回特性,并进行了实验验证,发现实验结果与理论分析基本吻合。研究表明,入射角越大,回波光斑的面积越小,衍射越强烈,且猫眼的口径越大、焦距越小,回波光斑受入射角的影响就越小;同等离焦量下正离焦回波光斑的发散角小于负离焦;入射角越大回波偏移量越大,同等离焦量下,正离焦的偏移量小于负离焦,同时存在一个固定的离焦量可使得光束原路返回。根据以上结论,猫眼逆向调制通信系统的逆向调制端应尽量采用大口径、短焦距猫眼来保证大视场角,以减弱入射角的影响,同时可以使猫眼具有一定的正离焦量来减小回波发散角、保持回波的原路返回特性。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang L X, Sun H Y, Fan G H, *et al.* Progress in free space optical communication technology based on cat-eye modulating retro-reflector[J]. Chinese Optics, 2013, 6(5): 681-691.
- [2] Ren J Y, Sun H Y, Zhang L X. Free space optical communication technology based on cat-eye modulating retro-reflector[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(1): 98-102.
- [3] Sun H Y, Zhang L X, Zhao Y Z, *et al.* Progress of free-space optical communication technology based on modulating retro-reflector[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 040004.
- [4] Chen Q, Wang H C, Hu X, *et al.* Spatial light modulator and its applications in free-space optical communications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 050008.
- [5] Li X Y, Zhang P, Tong S F. Bit error rate performance for modulating retro-reflector free space optical communication system based on adaptive threshold under atmospheric turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0606001.
- [6] Ke X Z, Zhang H. Indoor visible light uplink communication system based on inverse modulation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 020601.
- [7] Zhang L X, Sun H Y, Zhao Y Z, *et al.* Large incidence angle and defocus influence cat's eye retro-reflector[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9300: 93000C.
- [8] Wu D S, Liu B Q, Hu W G, *et al.* Echo characteristics model of cat-eye effect based on matrix optics[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0608001.
- [9] Zhao Y Z, Sun H Y, Song F H, *et al.* Research on the mechanism of reflection characteristics of laser



- irradiation on cat eye optical lens[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(4): 2284-2294.  
赵延伸, 孙华燕, 宋丰华, 等. 激光辐照猫眼光学镜头时的反射特性机理研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(4): 2284-2294.
- [10] Zhao Y Z, Sun H Y, Song F H, *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.
- [11] Zhao Y Z, Sun H Y, Fan P S, *et al.* Laser reflection characteristics of cat-eye effect under large angle oblique incidence[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(7): 1457-1461.  
赵延伸, 孙华燕, 樊鹏山, 等. 大角度斜入射情况下的猫眼效应激光反射特性[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(7): 1457-1461.
- [12] Long M C, Zhang H Y, Liu C, *et al.* Spatial modulation characteristics of micro-lens for irradiated laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1205001.  
龙美辰, 张海洋, 柳淳, 等. 微型镜头对辐照激光的空间调制特性[J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1205001.
- [13] Wen J J, Breazeale M A. A diffraction beam field expressed as the superposition of Gaussian beams[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1988, 83(5): 1752-1756.
- [14] Lü B D. *Laser optics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 11-14.  
吕百达. *激光光学* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 11-14.
- [15] Rabinovich W S, Goetz P G, Mahon R, *et al.* Performance of cat's eye modulating retroreflectors for free-space optical communications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5550: 104-114.