

倾斜离轴高斯光束通过猫眼光学镜头的传输特性

赵延伸¹ 孙华燕² 宋丰华² 戴得德¹

(¹ 装备指挥技术学院研究生管理大队, 北京 101416; ² 装备指挥技术学院光电装备系, 北京 101416)

摘要 运用矩阵光学理论以及将硬边光阑窗口函数展开为有限个复高斯函数之和的方法, 进一步推导了倾斜离轴高斯光束通过猫眼光学镜头的解析传输公式, 通过数值计算分析得到了倾斜系数和离轴量对猫眼效应反射光光强分布的影响规律。结果表明, 斜入射情况下猫眼效应反射光光强分布发生非对称畸变, 且倾斜系数较小和较大时有着不同的分布规律。并且, 离轴量与倾斜系数共同决定着猫眼效应反射光应用于激光主动探测的可行性。

关键词 激光光学; 猫眼效应; 猫眼光学镜头; 倾斜离轴高斯光束; 传输特性

中图分类号 TN 249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092909.2552

Propagation Properties of Oblique and Off-Axial Gaussian Beams Passing Through Cat-Eye Optical Lens

Zhao Yanzhong¹ Sun Huayan² Song Fenghua² Dai Dede¹

(¹ Company of Postgraduate Management, Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)
(² Department of Photoelectric Equipment, Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)

Abstract The propagation equations for oblique and off-axial Gaussian beams passing through cat-eye optical lens are deduced by using the theory of matrix optics and expanding the aperture function into a finite sum of complex Gaussian functions. By numerical computation, the laws governing the variation of the intensity distribution of the cat-eye reflected light with the obliquity factor and the off-axis magnitude are given. The result shows that the intensity distribution of the cat-eye reflected light under oblique condition has asymmetric aberrance, and the distribution rules at small and large different obliquity factors differ greatly. Furthermore, the feasibility of cat-eye effect reflected light used in the active laser detection system is determined by the obliquity factor and the off-axis magnitude.

Key words laser optics; cat-eye effect; cat-eye optical lens; oblique and off-axial Gaussian beams; propagation property

1 引 言

猫眼逆反射器具有将任意角度入射的光线原向返回的特性。因此, 它在应用于干涉测量、目标跟踪等领域时可以提高测量精度^[1~3], 在应用于激光器谐振腔时可以提高激光器的稳定性^[4~7], 在应用于纳米激光器测尺时可以提高测量范围^[8]。而大多数成像探测或非成像探测所用光学镜头的焦平面处都安装有反射或半反射元件, 它们与猫眼逆反射器一样, 在受到激光束辐照时能够产生原路返回的准直

回光, 这就是光学镜头的“猫眼效应”。利用被探测目标携带光学镜头的猫眼效应原理来进行激光主动探测, 可以大大提高探测距离和定位精度^[9,10]。

在这些应用中, 猫眼逆反射器作为合作目标, 具有较好的反射光特性和较大的接收角; 而光学镜头作为非合作目标, 其猫眼效应反射特性则较差, 原因在于其接收角较小, 一般为等于或小于其视场角, 且入射角对反射光特性有不利影响^[11,12]。为了从理论上对猫眼效应进行研究, 文献^[13]运用矩阵光学

收稿日期: 2008-10-07; 收到修改稿日期: 2009-02-19

基金项目: “十一五”国防预研基金(513210902)资助项目。

作者简介: 赵延伸(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事光电信息处理、激光主动探测等方面的研究。

E-mail: zhaoyan198@tom.com (中国光学学会会员号: SO40421128A)

导师简介: 孙华燕(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光电信息处理、激光主动探测等方面的研究。

E-mail: shy221528@vip.sina.com

理论对高斯光束通过猫眼光学镜头的传输过程进行了理论推导,比较系统地分析了猫眼光学镜头参数对反射光特性的影响规律,但所假设的情况为理想正入射。实际上激光束辐照猫眼光学镜头时的大多情况是斜入射,且入射光束中心光线与镜头主光轴之间存在离轴,此时的猫眼效应反射光特性规律需要进一步从理论上进行研究。因此,本文运用矩阵光学以及将硬边光阑窗口函数展开为有限个复高斯函数之和的方法,进一步推导了倾斜离轴高斯光束通过猫眼光学镜头的解析传输公式,所得结论更具一般性。并通过数值计算分析了倾斜系数和离轴量对猫眼效应反射光光强分布的影响规律。

2 传输方程

如图 1 所示为倾斜离轴高斯光束通过猫眼光学镜头的传输过程示意图。

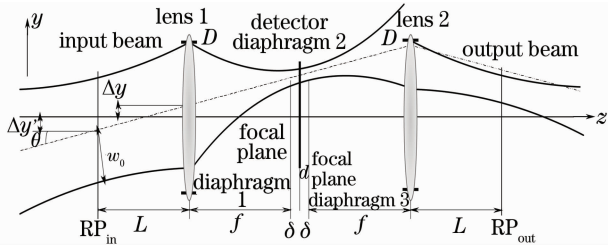


图 1 倾斜离轴高斯光束通过猫眼光学镜头的传输过程示意图

Fig. 1 Sketch of oblique and off-axis Gaussian beams passing through cat-eye optical lens

其中,输入参考面位于入射光束的束腰位置,输出参考面位于其对称位置。猫眼光学镜头主光轴方向为 z 方向, θ 为高斯光束与 z 轴的夹角即在 y 方向的入射角, Δy 为输入光束中心光线在透镜 1 前表面处与镜头主光轴沿 y 方向的位移, $\Delta y'$ 为输入光束中心光线在输入参考面处与镜头主光轴沿 y 方向的位移 (Δy 和 $\Delta y'$ 称为离轴参数), w_0 为入射光束的束腰半径, D 为透镜 1 和透镜 2 的有效口径, f 为透镜 1 和透镜 2 的焦距, d 为探测器即等效光阑 2 的直径, L 为输入参考面到透镜 1 前镜面以及透镜 2 后镜面到输出参考面的距离, δ 为离焦量(探测器位于透镜 1 的焦平面之后为正离焦,反之则为负离焦)。现将图 1 所示系统进行矩阵分解为四个区间:输入参考面到透镜 1 前镜面、透镜 1 前镜面到探测器所在平面、探测器所在平面到透镜 2 后镜面、透镜 2 后镜面到输出参考面,后三个区间均带有硬边光阑。其传输矩阵分别为

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

$$\begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\delta}{f} & f + \delta \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} a_3 & b_3 \\ c_3 & d_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f + \delta \\ -\frac{1}{f} & -\frac{\delta}{f} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} a_4 & b_4 \\ c_4 & d_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

为简化分析,只考虑二维的情况,即只考虑 y 方向的入射角。定义倾斜系数 $C = \tan \theta$, 则入射高斯光束在 y 方向的倾斜相位因子可以表示为^[14]

$$\varphi(y) = \exp(-ikCy), \quad (5)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数。则入射高斯光束在其束腰所在平面的光场分布为

$$E_0(y_0, 0) = \exp\left[-\frac{(y_0 - \Delta y')^2}{w_0^2}\right] \varphi(y_0), \quad (6)$$

式中 y_0 为光束横截面坐标值,且有

$$\Delta y' = \Delta y - CL. \quad (7)$$

根据 Collins 衍射积分公式^[15, 16], 波长为 λ 的高斯光束经过 $\begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix}$ 光学系统后到达透镜 1 的前场分布为

$$E_1(y_1, z) = \sqrt{\frac{ik}{2\pi b_1}} \int_{-\infty}^{+\infty} E_0(y_0, 0) \times \exp\left[-\frac{ik}{2b_1}(a_1 y_0^2 - 2y_0 y_1 + d_1 y_1^2)\right] dy_0. \quad (8)$$

将(6)式代入(8)式,并利用积分公式

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-(P^2 x^2 + Qx)] dx = \frac{\sqrt{\pi}}{P} \exp\left[-\left(\frac{Q}{2P}\right)^2\right], \quad (9)$$

得到

$$E_1(y_1, z) = \sqrt{\frac{ik}{2\pi L}} \frac{\sqrt{\pi}}{P_1} \exp\left(\frac{\Delta y'^2}{w_0^2}\right) \exp\left[-ik \frac{y_1^2}{2L}\right] \times \exp\left[-\frac{k^2 (y_1 - Q_1)^2}{4L^2 P_1^2}\right], \quad (10)$$

$$Q_1 = CL + \frac{2i\Delta y' L}{w_0^2 k}, \quad P_1^2 = \frac{1}{w_0^2} + \frac{ik}{2L}. \quad (11)$$

半径为 a 的硬边光阑的窗口函数可以表示为

$$\text{circ}(r) = \begin{cases} 1 & (r \leq a) \\ 0 & (r > a) \end{cases}. \quad (12)$$

将(12)式表示的圆孔函数展开为有限个复高斯函数之和^[17]

$$\text{circ}(r) = \sum_{j=1}^M F_j \exp\left[-\frac{G_j r^2}{a^2}\right], \quad (13)$$

式中 F_j 和 G_j 分别为展开系数和复高斯函数系数, 它们可由计算机优化得到。

制的 $\begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{bmatrix}$ 光学系统后到达探测器的前场分布为

利用 Collins 公式得到该高斯光束通过受光阑限

$$E_2(y_2, z) = \sqrt{\frac{ik}{2\pi b_2}} \exp\left(-\frac{ikd_2}{2b_2} y_2^2\right) \int_{-0.5D}^{0.5D} E_1(y_1, z) \exp\left[-\frac{ik}{2b_2}(a_2 y_1^2 - 2y_2 y_1)\right] dy_1. \quad (14)$$

将(10), (11), (13)式代入(14)式并利用积分公式(9)得到

$$E_2(y_2, z) = \sqrt{\frac{ik}{2\pi L}} \sqrt{\frac{ik}{2\pi b_2}} \frac{\sqrt{\pi}}{P_1} \exp\left(\frac{\Delta y'^2}{\omega_0^2} - \frac{k^2 Q_1^2}{4L^2 P_1^2}\right) \exp\left(-ik \frac{d_2 y_2^2}{2b_2}\right) \sum_{j_1=1}^{10} F_{j_1} \frac{\sqrt{\pi}}{P_2} \exp\left[-\frac{k^2 (y_2 - Q_2)^2}{4b_2^2 P_2^2}\right], \quad (15)$$

$$Q_2 = \frac{ib_2 k Q_1}{2L^2 P_1^2}, P_2^2 = \frac{ika_2}{2b_2} + \frac{ik}{2L} + \frac{k^2}{4L^2 P_1^2} + \frac{4G_{j_1}}{D^2}. \quad (16)$$

同理, 递推后可得该高斯光束依次通过受光阑限制的 $\begin{bmatrix} a_3 & b_3 \\ c_3 & d_3 \end{bmatrix}$ 光学系统和 $\begin{bmatrix} a_4 & b_4 \\ c_4 & d_4 \end{bmatrix}$ 光学系统后, 在输出参考面上即猫眼效应反射光在原路返回处的光场分布为

$$E_4(y_4, z) = \sqrt{\frac{ik}{2\pi L}} \sqrt{\frac{ik}{2\pi b_2}} \sqrt{\frac{ik}{2\pi b_3}} \sqrt{\frac{ik}{2\pi b_4}} \frac{\sqrt{\pi}}{P_1} \exp\left(-ik \frac{d_4 y_4^2}{2b_4}\right) \exp\left(\frac{\Delta y'^2}{\omega_0^2} - \frac{k^2 Q_1^2}{4L^2 P_1^2}\right) \sum_{j_1=1}^{10} F_{j_1} \frac{\sqrt{\pi}}{P_2} \times \\ \exp\left(-\frac{k^2 Q_2^2}{4b_2^2 P_2^2}\right) \sum_{j_2=1}^{10} F_{j_2} \frac{\sqrt{\pi}}{P_3} \exp\left(-\frac{k^2 Q_3^2}{4b_3^2 P_3^2}\right) \sum_{j_3=1}^{10} F_{j_3} \frac{\sqrt{\pi}}{P_4} \exp\left[-\frac{k^2 (y_4 - Q_4)^2}{4b_4^2 P_4^2}\right], \quad (17)$$

$$Q_3 = \frac{ib_3 k Q_2}{2b_2^2 P_2^2}, P_3^2 = \frac{ika_3}{2b_3} + \frac{ikd_2}{2b_2} + \frac{k^2}{4b_2^2 P_2^2} + \frac{4G_{j_2}}{d^2}, \quad (18)$$

$$Q_4 = \frac{ib_4 k Q_3}{2b_3^2 P_3^2}, P_4^2 = \frac{ika_4}{2b_4} + \frac{ikd_3}{2b_3} + \frac{k^2}{4b_3^2 P_3^2} + \frac{4G_{j_3}}{D^2}. \quad (19)$$

(17)式即为斜入射离轴高斯光束通过猫眼光学镜头的解析传输公式。当 $\theta = 0, \Delta y = 0$ 时, (17)式简化为文献[13]中的(15)式, 因此文献[13]分析的情况是倾斜系数和离轴量均为零时的特例。

实际上的猫眼光学镜头非常复杂, 它可以等效于一个带有 $n-1$ 个等效光阑的光学系统。经过类推后可以得出倾斜离轴高斯光束通过 $n-1$ 个带有光阑的光学系统后, 在原路返回处的光场分布为

$$E_n(y, z) = \sqrt{\frac{ik}{2\pi b_1}} \cdots \sqrt{\frac{ik}{2\pi b_n}} \frac{\sqrt{\pi}}{P_1} \exp\left(-ik \frac{d_n y_n^2}{2b_n}\right) \exp\left(\frac{\Delta y'^2}{\omega_0^2} - \frac{k^2 Q_1^2}{4b_1^2 P_1^2}\right) \sum_{j_2=1}^{10} F_{j_2} \frac{\sqrt{\pi}}{P_2} \exp\left(-\frac{k^2 Q_2^2}{4b_2^2 P_2^2}\right) \times \\ \cdots \sum_{j_{(n-1)}=1}^{10} F_{j_{(n-1)}} \frac{\sqrt{\pi}}{P_{n-1}} \exp\left(-\frac{k^2 Q_{n-1}^2}{4b_{n-1}^2 P_{n-1}^2}\right) \sum_{j_n=1}^{10} F_{j_n} \frac{\sqrt{\pi}}{P_n} \exp\left[-\frac{k^2 (y_n - Q_n)^2}{4b_n^2 P_n^2}\right], \quad (20)$$

$$Q_n = \frac{ib_n k Q_{n-1}}{2b_{n-1}^2 P_{n-1}^2}, P_n^2 = \frac{ika_n}{2b_n} + \frac{ikd_{n-1} k}{2b_{n-1}} + \frac{k^2}{4b_{n-1}^2 P_{n-1}^2} + \frac{G_{j_{(n-1)}}}{q^2}, \quad (21)$$

式中 q 为第 $n-1$ 等效光阑的半口径。

利用(20)式和(21)式可以分析倾斜离轴高斯光束通过具有复杂光学系统的猫眼光学镜头的传输变换, 可以得出任意参数下的反射光光场分布。结合光学设计软件还可以进行物理光学算法编程, 更加有效地分析高斯光束通过猫眼光学镜头的传输特性。下面在进行数值计算时考虑的是光强分布, 其表达式为

$$I_4(y_4, z) = E_4(y_4, z) E_4^*(y_4, z), \quad (22)$$

式中 $E_4^*(y_4, z)$ 为 $E_4(y_4, z)$ 的共轭。

3 数值分析

文献[13]已经对理想情况下猫眼光学镜头各参数对反射光光强分布的影响进行了分析, 因此本文只分析倾斜系数和离轴量对反射光光强分布的影响。设入射光束束腰处的轴上光强 $I_0(0, 0) = 1$, $\omega_0 = 1 \text{ mm}$, $\lambda = 1.06 \text{ } \mu\text{m}$, $L = 100 \text{ m}$, $f = 500 \text{ mm}$, $D = 100 \text{ mm}$, $d = 20 \text{ mm}$, $\delta = 0$ 。

3.1 倾斜系数的影响

设 $\Delta y = 0$, 定义原路返回处的中心位置为与输入面上光束中心位置关于探测器所在平面的对称

点,即输出面上 $y_4 = \Delta y' = -CL$ 的点。图 2 所示为不同倾斜系数时猫眼效应反射光在猫眼光学镜头处以及原路返回处的光强分布图。从图 2 可以看出:猫眼效应反射光在后向传输的过程中,其束宽逐渐增大,衍射级数逐渐减少,光强分布逐渐趋于平滑,衍射峰的形状分布特征变化不大[比较图 2(a)和(b),(c)和(d),(e)和(f)];倾斜系数较小时,反射光光强分布的左右衍射级数相等,且衍射级数受倾斜系数影响不大,只是光强分布发生偏移,倾斜系数越大偏移越大,最高衍射峰峰值越高[比较图 2(a)和(c),(b)和(d)],这是因为倾斜系数越大衍射越强,光强分布对比度越大;倾斜系数稍大时,其光强分布宽度迅速减小,左右衍射级数不相等,光强主要集中于中心衍射峰内;峰值光强在猫眼光学镜头处不位于镜头中心,而是位于 $y=10$ mm 处,但在原路返回处基本位于中心位置即 $y=-2$ m[比较图 2(e)和(f)],这说明随着传输距离的增加,斜入射时的猫眼效应反射光在后向传输过程中其峰值光强位置将逐渐趋于其原路返回中心位置。

此外,从图 2(b),(d),(f)还可以看出,反射光光强分布的中心坐标近似为 $-CL = \Delta y'$ 。在前面的

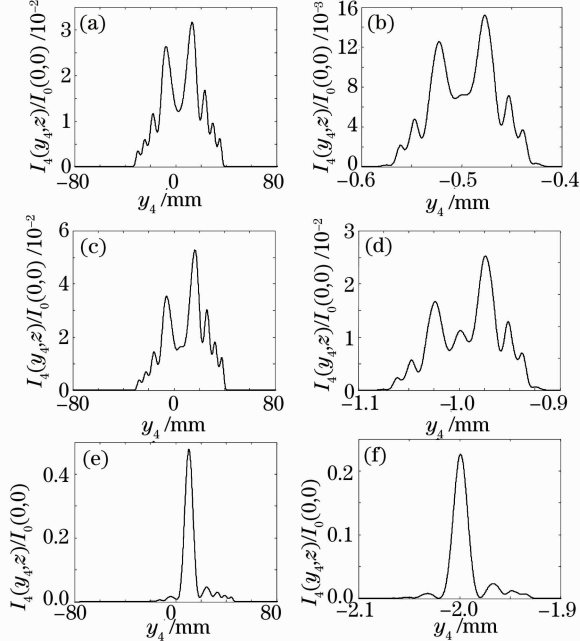


图 2 猫眼效应反射光在猫眼光学镜头处(a, c, e)和原路返回处(b, d, f)的光强分布图。(a) $C=0.005$; (b) $C=0.005$; (c) $C=0.01$; (d) $C=0.01$; (e) $C=0.02$; (f) $C=0.02$

Fig. 2 Intensity distribution of the cat-eye reflected light at the position of the lens(a, c, e) and the return place(b, d, f) when C is 0.005(a, b), 0.01(c, d), 0.02(e, f)

(11), (16), (18), (19) 式中, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 均为复数,无法体现各个参考位置处的光强分布中心坐标。经数值计算可知,透镜 1 前、探测器前、透镜 2 后,输出面处的光强分布中心坐标近似为 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 的实部,即

$$y_1 = \Delta y, \quad (23)$$

$$y_2 = \Delta y + C(f + \delta), \quad (24)$$

$$y_3 = \Delta y + 2C(f + \delta), \quad (25)$$

$$y_4 = \Delta y - CL + 2C(f + \delta) = \Delta y' + 2C(f + \delta). \quad (26)$$

从(26)式可见, L 较大且 C 较小时, $y_4 \approx \Delta y'$, 即猫眼效应反射光中心位置基本位于原路返回中心处,这从理论上进一步说明了猫眼效应反射光的原路返回性受倾斜系数的影响不大。但严格来讲,猫眼效应反射光的原路返回偏差绝对值(入射光和反射光中心坐标之差)与倾斜系数、焦距、离焦量均成正比。因此,在 L 较小时,若已知倾斜系数、焦距、离焦量、原路返回偏差绝对值中的 3 个值,则可以估算出另外一个参数。

3.2 离轴量的影响

在主动探测的实际应用中,最为一般的情况是倾斜系数和离轴量均不为零。设 $C=0.01$, 图 3 所示为离轴量不同时猫眼效应反射光在原路返回处的光强分布图。从图 3 可以看出,随着离轴量的增加,反射光光强分布特征迅速发生变化,峰值光强迅速降低,且在 $\Delta y=0.1$ m 时,反射光峰值光强位置已经远远偏离原路返回中心位置。因此,在利用猫眼效应进行激光主动探测以及其他信息传递和测量等应用时,允许的最大离轴量也就是猫眼效应反射光

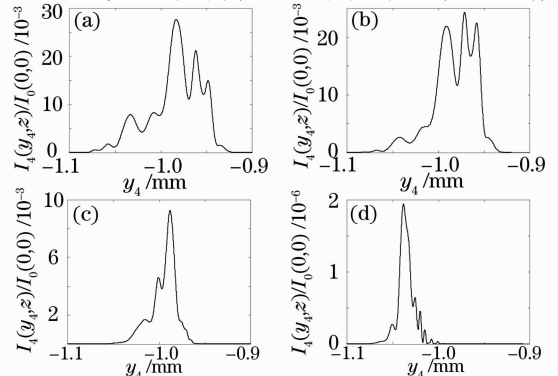


图 3 (a)离轴量 $\Delta y=0.01$ m; (b) 0.02 m; (c) 0.05 m; (d) 0.1 m 时,猫眼效应反射光在原路返回处的光强分布图

Fig. 3 Intensity distribution of the cat-eye reflected light at the return place when the off-axis magnitude is 0.01 m(a), 0.02 m(b), 0.05 m(c), 0.1 m(d)

的可探测空间范围。最大离轴量首先取决于入射光束在猫眼光学镜头处的直径,即取决于入射光束发散角和探测距离,其次还与倾斜系数有关,倾斜系数越大,光束的不对称分布越明显,允许的最大离轴量也就越小。

4 结 论

本文在文献[13]的基础上,进一步推导了倾斜离轴高斯光束通过猫眼光学镜头的解析传输公式,并类推到带有 $n-1$ 个等效光阑的复杂猫眼光学镜头的情况,然后分析了倾斜系数和离轴量对猫眼效应反射光光强分布的影响。研究表明,文献[13]推导的传输公式是本文推导的一个特例,这说明本文所得结果更具一般性。利用该公式可以对更为复杂的猫眼光学镜头模型进行建模仿真,可以得出更为准确的猫眼效应反射光空间分布。倾斜系数对猫眼效应反射光的原路返回性影响不大,但从严格意义上讲,只有倾斜系数、焦距、离焦量均为零时猫眼效应反射光才具有绝对的原路返回性,同时考虑倾斜系数与反射光光强分布之间的定性关系,在距离较近且倾斜系数较小时,可以将这些规律应用于对猫眼光学镜头的参数估计研究等领域。此外,离轴量是决定猫眼效应反射光能否被探测的关键,它与倾斜系数共同决定着可探测空间范围。为说明一般情况,本文以二维高斯光束情况进行,但也可以推导出三维情况。在三维情况下, x 和 y 方向的倾斜系数都将对猫眼效应反射光的畸变产生影响,其畸变规律将更加复杂并与各参数呈现更多的规律性,此外在远场情况下的猫眼效应反射光光强分布还受到大气干扰等因素的影响,继续研究此方面的内容有益于开拓猫眼效应在光学目标参数估计和信息传递等领域中的应用。

参 考 文 献

- 1 Toshiyuki Takatsuji, Mitsuo Goto, Sonko Osawa *et al.*. Whole-viewing-angle cat's eye retroreflector as a target of laser trackers [J]. *Measure Science & Technology*, 1999, **10**(7): 87~90
- 2 Lin Yongbing, Zhang Guoxiong, Li Zhen. An improved cat's eye retroreflector used in a laser tracking interferometer system [J]. *Measure Science & Technollogy*, 2003, **14**(6): 36~40
- 3 Zhang Guoxiong, Lin Yongbing, Li Xinghua *et al.*. Four-beam laser tracking interferometer system for three-dimensional coordinate measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1030~1036
张国雄, 林永兵, 李杏华等. 四路激光跟踪干涉三维坐标测量系统 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1030~1036
- 4 S. A. Dimakov, S. I. Kliment'ev, I. V. Khloponina. Cavity

- with a cat's-eye reflector based on elements of conical optics [J]. *J. Opt. Technol.*, 2002, **69**(8): 536~540
- 5 Xu Zhiguang, Zhang Shulian, Liang Dong *et al.*. Research of the laser transverse mode modulated by the cat's eye resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 86~90
徐志广, 张书练, 梁 栋等. 猫眼激光谐振腔横模选择特性研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 86~90
 - 6 Xu Zhiguang, Zhang Shulian, Du Wenhua *et al.*. Application of cat's eye resonator in long full-external He-Ne lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12): 1609~1613
徐志广, 张书练, 杜文华等. 猫眼谐振腔在全外腔长氦氖激光器中的应用 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(12): 1609~1613
 - 7 Xu Zhi Guang, Zhang Shu Lian, Li Yan *et al.*. Adjustment-free cat's eye cavity He-Ne laser and its outstanding stability [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(14): 5565~5573
 - 8 Du Wenhua, Zhang Shulian, Li Yan. Optimizing design of the cat's eye cavity in a nanometer laser ruler [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1305~1308
杜文华, 张书练, 李 岩. 纳米激光器测尺中猫眼腔的优化设计 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1305~1308
 - 9 C. Lecocq, G. Deshors, O. Lado-Bordowsky *et al.*. Sight laser detection modeling [C]. *SPIE*, 2003, **5086**: 280~286
 - 10 Sun Huayan, Zhao Yanzhong, Tang Liming *et al.*. Performance analysis of active laser detection system [C]. *Proc. 7th International Symposium on Test and Measurement*, 2007, **4**: 3024~3027
 - 11 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua. Effect of incidence angle on reflecting characteristics of cat eye effect [J]. *High Power Laser and Particles*, 2007, **19**(3): 364~368
赵延伸, 孙华燕, 宋丰华. 探测激光入射角对猫眼效应反射特性的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(3): 364~368
 - 12 Zhao Yanzhong, Song Fenghua, Sun Huayan *et al.*. Laser reflection characteristics of cat eye effect of cassegrain lens [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1149~1155
赵延伸, 宋丰华, 孙华燕等. 卡塞格伦镜头的猫眼效应激光反射特性 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1149~1155
 - 13 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua *et al.*. Research on the mechanism of reflection characteristics of laser irradiation on the 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
 - 14 Ji Xiaoling, Lü Baida. Transformation properties of gaussian beams passing through a tilted lens [J]. *Laser Technology*, 2001, **25**(5): 351~355
季小玲, 吕百达. 高斯光束通过倾斜光学元件的变换特性 [J]. *激光技术*, 2001, **25**(5): 351~355
 - 15 Zhou Pu, Hou Jing, Chen Zilun *et al.*. Study on the supermode and mode selection in multicore fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1812~1816
周 朴, 侯 静, 陈子伦等. 多芯光纤激光器的超模及模式选择问题研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1812~1816
 - 16 Wu Jianqiang, Tang Xiahui, Qin Yingxiong *et al.*. 90° Conical reflector resonator for high power transverse flow CO₂ Laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 628~632
武建强, 唐霞辉, 秦应雄等. 高功率横流 CO₂ 激光器的锥面反射镜谐振腔 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 628~632
 - 17 Liu Hongzhan, Xu Rongwei, Liu Liren *et al.*. Far-field approximation and divergence of Gaussian beam with phase aberrations diffracted by a circular aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 131~135
刘宏展, 徐荣伟, 刘立人等. 圆孔受限波差高斯光束的远场近似及发散度分析 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 131~135