

高斯光束通过猫眼逆反射器的变换特性

谷锁林¹, 赵延仲²

(1. 中国酒泉卫星发射中心, 甘肃 酒泉 732750; 2. 装备指挥技术学院研究生管理大队, 北京 101416)

摘要:运用矩阵光学对高斯光束通过猫眼逆反射器的传输变换进行了理论推导, 并对猫眼逆反射器后向反射光特性进行了分析。研究表明, 当入射光腰与猫眼逆反射器的距离不同时, 选取合理的正离焦量可以得到比输入高斯光束发散角更小的反射光束。

关键词:矩阵光学; 高斯光束; 猫眼逆反射器; 变换特性; 猫眼效应

中图分类号: TN249

文献标识码: A

Transformation Properties of Gaussian Beam Passing through the Cat Eye Retro-reflectors

GU Suo-lin¹, ZHAO Yan-zhong²

(1. China Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan 732750, China; 2. Company of Postgraduate Management, the Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)

Abstract: The theoretical derivation about transformation properties of Gaussian beam passing through cat eye retro-reflectors was made with matrix optics and reflected character of the cat eye retro-reflectors was analyzed in the paper. The search results show that we can get the reflected beam with more smaller than incidence Gaussian beam if we choose a rational positive focal shift size as different distances between the waist of incidence beam and the cat eye retro-reflectors.

Key words: matrix optics; Gaussian beam; cat eye retro-reflectors; transformation properties; cat eye effect

1 引言

猫眼逆反射器具有对入射激光原路返回的准直特性, 它在应用于激光器谐振腔时可以提高激光器的稳定性^[1], 此外还可以应用于信息变换等研究。现今猫眼效应已经广泛应用于激光主动探测、成像、目标识别等领域, 对此有很多理论与实验研究^[2-11]。已有工作大都采用简单的几何分析对猫眼效应进行研究^[2-5], 而实际上激光束有着自身的传播规律, 几何光学只能是一种近似的方法。为了深入研究高斯光束通过猫眼逆反射器的变换特性, 本文运用矩阵光学方法以及高斯光束的变换规律对猫眼逆反射器进行理论推导。

2 理想猫眼逆反射器

理想的猫眼逆反射器如图1所示。从矩阵光学理论可知, 高斯光束通过猫眼逆反射器的变换矩

阵^[12]为:

$$M_0 = \begin{bmatrix} A_0 & B_0 \\ C_0 & D_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

设入射激光束束腰位于透镜前焦面处, 该高斯光束在此处的入射复参数为 q_0 , 反射光束在前焦面处的复参数为 q'_0 , 根据高斯光束的 $ABCD$ 定律可以推导出 $q'_0 = q_0$ ^[12], 即反射光束与入射光束在束腰处的参数完全一致。同理, 设入射激光束在前焦面之前任距离 l 处的入射复参数为 q , 反射光束在此处的复参数为 q' , 其变化矩阵为:

作者简介: 谷锁林(1980-), 男, 硕士, 工程师, 现主要从事数据处理的研究。E-mail: gusuolin@163.com

收稿日期: 2007-10-08; 修订日期: 2007-11-13

$$M' = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} M \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -2l \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

则有:

$$q' = \frac{A'q + B'}{C'q + D'} = q + 2l \quad (3)$$

又由于 $q = q_0 - l$, $q' = q_0' + l = q_0 + l$, 而 q_0 为光腰参数, 则 q' 与 q 是关于 q_0 对称的两个位置的参数, 则 $q' = q$ 。这说明当入射光腰位于前焦面上时, 反射光束与入射光束具有同样的发散角、束腰宽度以及束腰位置, 两者完全相同。

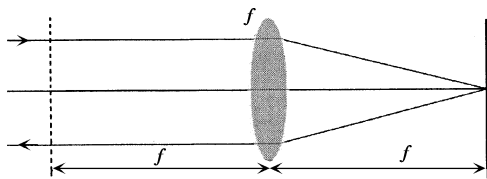


图1 理想猫眼逆反射器

3 存在离焦的猫眼反射器

存在离焦量的情况下, 激光束通过猫眼逆反射器的矩阵分解示意图如图2所示。

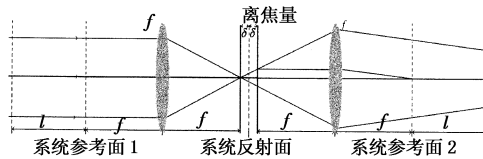


图2 猫眼逆反射器矩阵分解示意图

3.1 传输方程

图2中入射光光腰距离透镜前焦面距离为 l , 设输入光腰处以及展开系统的对称位置为参考平面, 对应复参数分别为 q_i, q_r , 则此时的变换矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & f+l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2f+2\delta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & f+l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{2\delta l}{f^2} - 1 & \frac{2\delta l^2}{f^2} - 2l \\ \frac{2\delta}{f^2} & \frac{2\delta l}{f^2} - 1 \end{bmatrix}$$

其中, f 为透镜焦距; δ 为离焦量。根据 $ABCD$ 定律, 则有:

$$q_r = \frac{(\frac{2\delta l}{f^2} - 1)q_i + \frac{2\delta l^2}{f^2} - 2l}{\frac{2\delta}{f^2}q_i + (\frac{2\delta l}{f^2} - 1)} \quad (5)$$

$$= \frac{(2\delta l - f^2)q_i + 2\delta l^2 - 2lf^2}{2\delta q_i + 2\delta l - f^2}$$

将 $\frac{1}{q_i} = -i \frac{\lambda}{\pi w_i^2}$ 代入式(5), (w_i 为入射光束腰

半径), 推导得:

$$w_r^2 = \frac{w_i^2 f^4 \lambda^2 [\pi^2 w_i^4 (2\delta l - f^2)^2 + 4\lambda^2 l^2 (\delta l - f^2)^2]}{\pi^2 w_i^4 f^8 \lambda^2 + 4(2\delta l - f^2)^2 [\lambda^2 l (\delta l - f^2) + \delta \pi^2 w_i^4]^2} \quad (6)$$

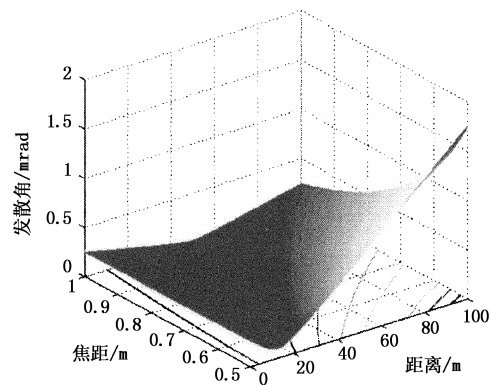
其中, w_r 为反射光束的束腰半径; z 为束腰位置。解之可得反射光束发散角:

$$\theta_r = \frac{\lambda}{\pi w_r} = \sqrt{\frac{\pi^2 w_i^4 f^8 \lambda^2 + 4(2\delta l - f^2)^2 [\lambda^2 l (\delta l - f^2) + \delta \pi^2 w_i^4]^2}{\pi^2 w_i^4 f^4 [\pi^2 w_i^4 (2\delta l - f^2)^2 + 4\lambda^2 l^2 (\delta l - f^2)^2]}} \quad (7)$$

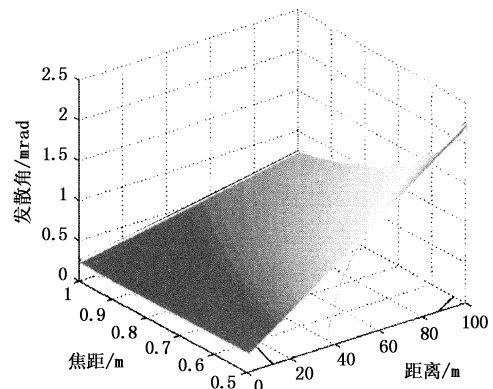
当负离焦时, 公式不变, 仅是数值为负即可。

3.2 特性分析

由于输入光腰距猫眼逆反射器的距离较大时入射光束宽度将超过透镜限制, 须考虑光阑衍射等因素的影响, 因此分析只考虑 $l < 100\text{m}$ 之内的情况。入射发散角 0.25mrad 。从图3可以看出, 正离焦与负离焦的差别在距离 l 增大时也逐渐增大, 负离焦时焦距、距离均始终与发散角成线性。而在正离焦时, 能够得到最小发散角的距离 l 与焦距成正比, 且焦距越大, 远距离时的发散角越小。



(a) 正离焦 10mm



(b) 负离焦 10mm

图3 输出发散角与焦距和距离的关系

从图4可以更加明显的看出,负离焦时的发散角要大于同等数值的正离焦。而无论距离多远,只要离焦量为0,则发散角保持不变,这个值可以从式(6)中令离焦量为0而求得 $w_r = w_i$,即 $\theta_r =$ 入射发散角,这里为0.25mrad。这说明只要是理想的目标系统,在理论上猫眼效应反射光束参数是与入射光束参数严格一致的。但是在距离较近时,甚至是离焦量越大,发散角越小,这说明合理的选择距离和离焦量可以达到压缩发散角的目的,从图4中可见,发散角最小可以达到0.05mrad之下。

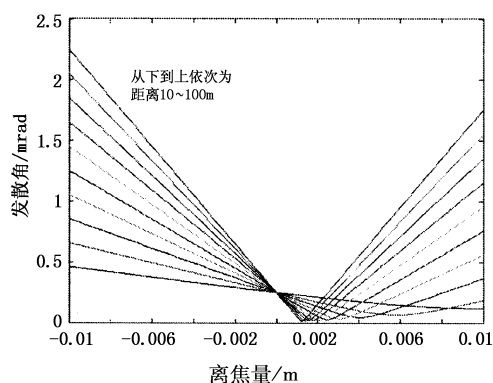
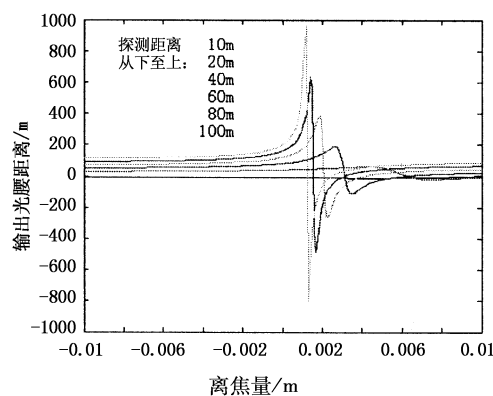
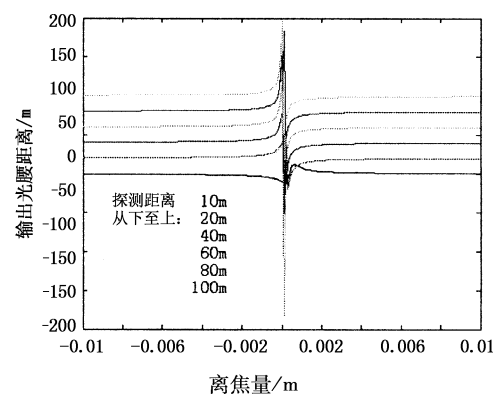


图4 不同距离时离焦量与发散角的关系(焦距0.5m)

图5为输出光腰位置与焦距、离焦量、发射距离的关系图。可以看出,正离焦时出射光腰位于焦面之后,负离焦时光腰位于焦面之前,焦距越大,光腰位置随离焦量的变化速率越平缓。



(a) 焦距为0.5m



(b) 焦距为0.1m

图5 输出光腰距离与离焦量的关系

3.3 输入光腰位于前焦面上的特例分析

当输入光腰位置不在前焦面上时,公式非常复杂,很难求出某些有意义的极值点。当输入光腰位于前焦面上时,即令 $l=0$,则式(6)简化为:

$$w_r^2 = \frac{w_i^2}{1 + \frac{4\pi^2 \delta^2 w_i^4}{\lambda^2 f^4}} \quad (8)$$

则反射光束发散角为

$$\theta_r = \frac{\lambda}{\pi w_r} = \frac{\lambda}{\pi w_i} \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 \delta^2 w_i^4}{\lambda^2 f^4}} \quad (9)$$

从图6可见,在入射发散角保持0.25mrad不变时,主要影响反射光束发散角的是离焦量和焦距。离焦量越大,发散角越大,焦距越小,发散角越大。

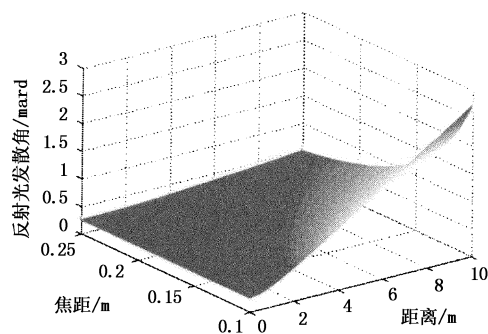


图6 反射光束发散角与焦距和离焦量的关系

而从图7(离焦量为10mm)可见,入射激光发散角与反射光发散角呈非线性关系,入射发散角稍小时,反射光发散角与其成反比,说明入射发散角越小离焦量对反射光的发散作用越明显。而随着入射发散角的增大,两者开始基本保持线性,而且逐渐趋于相等,离焦量对其影响程度逐渐减弱。可见,对于存在离焦的猫眼逆反射器,对应有一个最佳的入射激光发散角,此时可以得到最小的反射光发散角,尤其是在焦距较小时,太小入射光发散角并不是最有利的。

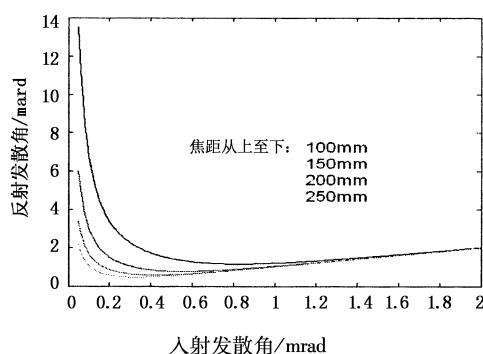


图7 反射光束发散角与入射发散角及焦距的关系

使式(9)对 θ_i 求导求极值点,可得最佳的入射

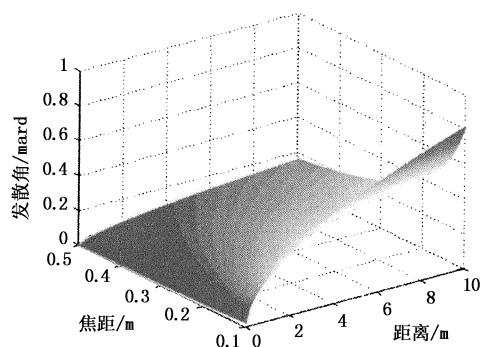
光发散角:

$$\theta_{i0} = \sqrt{\frac{4\delta^2\lambda^2}{\pi^2 f^4}} \quad (10)$$

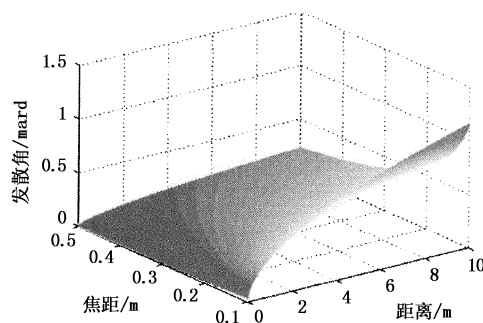
代入式(9)可得对应的最小反射光发散角为:

$$\theta_{r0} = \theta_{i0} \sqrt{1 + \frac{4\pi^2\delta^2(\lambda/\pi\theta_i)^4}{\lambda^2 f^4}} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{4\delta^2\lambda^2}{\pi^2 f^4}} \quad (11)$$

如图8所示为最佳入射光发散角及对应的最小反射光发散角随焦距和离焦量变化的变化情况。



(a)最佳入射光



(b)对应的反射光

图8 最佳入射光发散角及对应最小
反射光发散角与焦距和离焦量的关系

4 结论

本文运用矩阵光学对高斯光束通过猫眼逆反射器的传输变换进行了理论推导,给出的公式描述了猫眼逆反射器后向反射光的具体特性,与以前的几何光学分析相比更为严谨,也更为数学化,可以为猫眼效应的其他应用研究提供重要的方法借鉴。两个特殊结论对猫眼效应应用有重要启示作用:选取合理正离焦量可以得到比输入高斯光束发散角更小的反射光束;对应有一个最佳的入射光束发散角,可以得到最小的反射光发散角。远距离时高斯光束通过猫眼逆反射器的传输变换也就是激光束经过猫眼目标的传输变换,此时需

要考虑硬边光阑、斜入射畸变等因素的影响,这对猫眼效应的应用研究更具现实重要意义,将在之后的工作中继续深入研究。

参考文献:

- [1] Xu Zhi-guang, Zhang Shu-lian, Li Yan, et al. Theoretic analysis of the cat's eye cavity He-Ne laser [J]. Acta Phys. Sin, 2006; 4665. (in Chinese)
- [2] Zhao Xun-jie, Gao Zhi-yun, Zhang Ying-yuan. Technique of active laser reconnaissance and the applications in the military [J]. Optical Technique, 2003, 29(4): 415 - 417. (in Chinese)
- [3] Zhao Yan-zhong, Sun Hua-yan, Song Feng-hua. Effect of incidence angle on reflecting characteristics of cat eye effect [J]. High Power Laser and Particles, 2007, 19(3): 364 - 368. (in Chinese)
- [4] Zhao Yan-zhong, Sun Hua-yan, Song Feng-hua, et al. Effect of focal shift on reflecting character of "cat eye effect" [J]. Laser Technology, 2008, 32(1): 71 - 74. (in Chinese)
- [5] Zhao Yan-zhong, Song Feng-hua, Sun Hua-yan, et al. Laser reflected character of "cat eye effect" by the ZEMAX [J]. Optical Technique, 2007, 33(sup): 89 - 91. (in Chinese)
- [6] Zhao Yan-zhong, Sun Hua-yan, Song Feng-hua, et al. Laser reflection characteristics of Cat Eye Effect of photoelectric equipment [J]. Proc of 7th International Symposium on Test and Measurement, 2007, 4: 2991 - 2994.
- [7] C Lecocq, G Deshors, O Lado-Bordowsky, et al. Sight laser detection modeling [J]. Proc. SPIE, 2003, 5086: 280 - 286.
- [8] 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.
- [9] 卿光弼,王学楷,郭勇,等."猫眼效应"的物理模型及证明[J].激光技术,1995,19(4):244-247.
- [10] 葛成良,黄志伟,季云松,等.基于"猫眼效应"的目标识别[J].强激光与粒子束,2003,15(7):632-634.
- [11] 赵洪卫,王江,宋敏,等.激光照射"猫眼效应"实验研究[J].激光技术,2005,29(1):62-65.
- [12] 吕百达.激光光学[M].第3版.北京:高等教育出版社,2003.