

文章编号: 1001-3806(2008)01-0071-04

离焦量对“猫眼效应”反射特性的影响

赵延仲¹, 孙华燕², 宋丰华^{2*}, 赵琳峰³

(1. 装备指挥技术学院 研究生院, 北京 101416 2 装备指挥技术学院 光电装备系, 北京 101416 3 中国人民解放军 63892 部队, 洛阳 471300)

摘要: 为了研究目标光学系统在焦平面反射元件离焦情况下的“猫眼效应”反射特性, 采用 ZEMAX 光学设计及分析软件对“猫眼”目标进行建模和仿真, 得出了入射激光通过“猫眼”目标后的能量通过率、后向反射激光束的发散角、远场光斑及其能量分布情况等特性, 以及正负离焦量对反射特性影响的区别, 并且得出在离焦情况下能够产生“猫眼效应”后向反射光所必需的入射激光束的入射角范围。结果表明, 离焦量对“猫眼效应”后向反射光特性有决定性的影响, 尤其是对远场光强影响较为显著, 这为激光主动探测体制的探测能力分析提供了可靠性依据。

关键词: 激光技术; 反射特性; ZEMAX 仿真; 猫眼效应; 离焦量

中图分类号: TN249 O435.1 **文献标识码:** A

Effect of focal shift on reflecting character of “cat eye effect”

ZHAO Yan-zhong¹, SUN Hua-yan², SONG Feng-hua², ZHAO Lin-feng³

(1. Institute of Graduate Student Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China 2. Department of Photoelectric Equipment Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China 3. 63892 Army Unit PLA, Luoyang 471300, China)

Abstract In order to study the laser reflected character of “cat eye effect” of the target's optical system when the reflecting apparatus on the focal plane is focal shift modeling and simulation for the “cat eye” aim were carried out by using the optical design and analysis software named ZEMAX. Adopting the above method, the reflecting characters were obtained including the energy transit ratio when the incident laser through the “cat eye” aim, the far field divergence, the far field focus and the energy distributing character of the back reflecting laser. Then the different effect from positive and negative focal shift on reflecting character was put forward. At last the angle range of the incident laser beam was obtained which is necessary for the back reflecting beam of “cat eye effect” when the target optical system is focal shift. The results show that the size of focal shift has a decisive effect on the back reflecting light's characteristic, especially its far field light's intensity. These results provide reliable evidence for the analysis of detecting ability of the active laser detecting system.

Key words laser technique; reflecting character; simulation by ZEMAX; cat eye effect; focal shift

引 言

一般光学系统的焦平面处都安装有反射元件, 使得入射激光束入射到其光学窗口时能够发生光束原路返回现象, 即光学窗口存在的“猫眼效应”现象^[1-7]。利用此种原理, 可以主动发射激光束并接收其原路返回光进行信息处理来达到探测的目的^[7]。在目标镜头理想非离焦情况下, “猫眼效应”后向反射光强度与入射光强度可以有很高的比值。但是对于实际光学系统, 离焦量往往是不可避免的, 常常由于装配和元件加

工误差等原因, 光学仪器内的分划板、光敏面等不一定正好位于焦平面上, 有的则为了特殊的需要, 人为地设置一定的离焦量, 而且一般的光学系统由于像差等原因的存在, 对于轴外入射光而言也往往存在离焦。由于离焦使得激光在反射元件上的反射复杂化, 进而对后向反射光特性以及“猫眼效应”现象的产生造成显著影响。笔者先从理论上进行了简单分析, 进而通过软件建立镜头反射模型来仿真分析离焦量对“猫眼效应”反射特性的影响。

1 模型建立

为了运用软件对光学窗口的“猫眼效应”反射特性进行定性分析, 需要建立比较通用的模型。“猫眼效应”的物理模型一般可以等效简化为一个单透镜和一个反射面组合的光学系统, 将其反射光束与入射光

基金项目: 部委级基金资助项目

作者简介: 赵延仲 (1984), 男, 硕士研究生, 主要从事光电信息处理与对抗方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: sfh20052005@163.com

收稿日期: 2006-10-08 收到修改稿日期: 2006-11-07

束展开,可以得到一个 $4f$ 模型^[8-9],如图1所示。

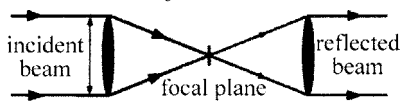


Fig 1 Equivalent model of "cat eye effect"

按照这个简化的光路模型可知,“猫眼”目标反射光特性是入射角 θ (入射光束的中心光线与“猫眼”目标光学系统主光轴的夹角)、入射激光束发散角 θ_{in} 、“猫眼”目标镜头口径 D 、焦距 f 、离焦量 δ 、焦平面反射元件即探测器尺寸 d 的函数。设能够原路返回的入射光束宽度(后称有效口径)为 D' ,反射激光束发散角为 θ_r 。规定反射元件位于焦点之后,入射光束会聚点位于反射元件之前的离焦称为正离焦,反之为负离焦。

2 理论分析

2.1 非离焦时的情况

设镜头的全视场角为 $\beta = 2\arctan(d/2f)$,其中 d 为探测器尺寸。当入射角满足 $\theta > 0.5\beta$ 时,光束传播情况如图2a所示,没有光束返回现象。当 $0 < \theta \leq 0.5\beta$ 时,如图2b所示。

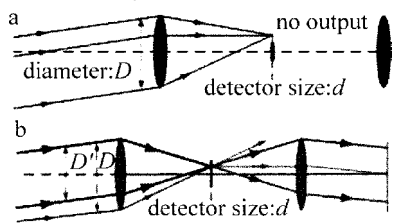


Fig 2 Reflection of "cat eye effect" of no focal shift

a—the angle of incidence is larger than the semi-field view angle b—the angle of incidence is smaller than the semi-field view angle

可以看出,入射角必须满足小于半视场角的条件,才可能有后向反射光产生,并且,斜入射对反射光束的发散角没有影响,只是影响有效口径,降低能量通过率。在半视场角之内,有效口径和后向反射光束发散角满足下两式:

$$D' = D - 2f \tan\theta \quad (1)$$

$$\theta_r = \theta_{in} \quad (2)$$

按照(1)式,当入射角为 0° 时,即完全理想的情况下, $D' = D$,入射光束能够全部原路返回,这即是完全理想情况下的“猫眼效应”。

2.2 离焦时的情况

如图3所示,分别为正离焦和负离焦时没有光束

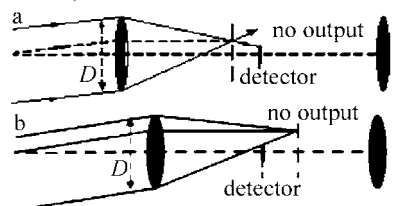


Fig 3 The angle of incidence is larger than the semi-field view angle
a—positive focal shift b—negative focal shift

返回的情况,此时当入射角满足下式:

$$\theta > 0.5\beta' = \arctan\left[\frac{df + \mathcal{D}}{2f(f + \delta)}\right] \quad (3)$$

式中, β' 指探测器能接收到入射光的临界视场角。当入射角满足 $0 < \theta \leq 0.5\beta'$ 时,与非离焦情况相似,光束部分返回,目标系统有效口径和后向反射光束发散角满足下面两式:

$$D' = (D - 2f \tan\theta) \frac{f + \delta}{f + 2\delta} \quad (4)$$

$$\theta_r = \theta_{in} + \frac{2\delta}{f^2} (D - 2f \tan\theta) \frac{f + \delta}{f + 2\delta} \quad (5)$$

可以看出,当离焦量为 0 时,(4)式、(5)式可以简化为(1)式、(2)式。正离焦和负离焦满足相同公式,只是负离焦时 δ 值为负。在入射角为 0° 或很小的一段范围内,正离焦和负离焦则满足不同的公式:

$$D' = \frac{Df}{f + 2\delta} \quad (6)$$

$$\theta_r = \theta_{in} + \frac{2\mathcal{D}}{f(f + 2\delta)} \quad (7)$$

$$D' = D \quad (8)$$

$$\theta_r = \theta_{in} + 2\mathcal{D} f^2 \quad (9)$$

正离焦满足(6)式、(7)式,负离焦满足(8)式、(9)式。

可见,由于光束会聚点的不同,导致两种离焦情况对“猫眼效应”反射特性影响的不同。由于光束传播时要遵循衍射传播定律和激光束的特殊传播规律,反射光束的远场特性受离焦量的影响更加显著,两种离焦量情况的区别也更加明显。理论上的几何分析无法对光束远场特性以切合实际的解释,下面通过软件来仿真其远场特性。

3 仿真分析

ZEMAX 能够根据光学元件的尺寸大小以及传播距离大小,自动选择光束传播应该符合菲涅耳衍射还是夫琅和费衍射,而且能够提供高斯光源建模,光束传播按照高斯光束的传播规律,符合真实情况^[10-11]。

首先优化一个理想单透镜并建立其展开的反射模型,大体与图1相同。镜头口径为 150mm、等效焦距为 300mm、离焦量为 0、视场角为 3° 、探测器有效尺寸为 19.76mm。入射激光束为高斯光束,波长为 $1.064\mu\text{m}$,远场发散角(全)为 0.1mrad 、总功率为 100W,在发射系统处最高功率密度为 $3.493 \times 10^{-1} \text{W}/\text{mm}^2$,入射光束入射角为 0° ,发射接收系统到目标系统距离为 30km。

3.1 后向反射激光特性

保持发射光束以及目标系统的参数不变,使离焦量逐渐变化,变化范围为 $(-100\mu\text{m}, 100\mu\text{m})$ 。图4所

示为非离焦以及正负离焦 100 μm 时的远场 (距目标 30km 的接收系统处) 光斑光强能量分布图。

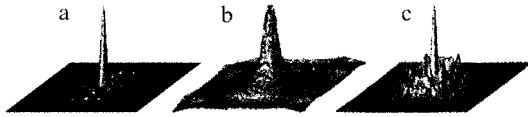


Fig 4 Energy distribution

a—no focal shift b—positive focal shift c—negative focal shift

可以看出, 非离焦时光束能量分布非常理想; 负离焦比正离焦时所产生的后向发散角稍大, 但是其中心能量却比正离焦集中, 由于实际中可用的仅仅是其原路返回的中心部分能量, 因此, 同等离焦量情况下负离焦对“猫眼效应”反射激光特性更有利。

离焦量逐渐变化, 反射激光的远场光斑光强分布图是一个逐渐过渡的过程, 其具体的高斯参数以及能量特性数据见表 1。其中能量通过率是指经过反射模

Table 1 Laser reflected character of “cat eye effect”

focal shift/ μm	far field divergence/m rad	energy passing ratio/%	encircled power/W	peak irradiance $/(\mu\text{W} \cdot \text{mm}^{-2})$
-100	6.781	2.460	2.699×10^{-1}	2.116
-80	5.447	2.480	2.231×10^{-1}	1.463
-60	4.113	2.501	4.024×10^{-1}	1.670
-40	2.779	2.505	6.146×10^{-1}	4.167
-20	1.445	2.496	7.047×10^{-1}	3.937
-10	0.778	2.441	5.796×10^{-1}	2.968
-5	0.445	2.364	6.483×10^{-1}	4.210
-1	0.178	2.164	9.432×10^{-1}	9.633
0	0.111	2.091	1.235	11.955
1	0.045	1.994	1.529	14.418
5	0.222	1.879	1.566	17.100
10	0.563	2.263	5.372×10^{-1}	3.521
20	1.222	2.444	3.364×10^{-1}	1.078
40	2.556	2.486	1.987×10^{-1}	3.300×10^{-1}
60	3.890	2.479	9.852×10^{-2}	4.387×10^{-1}
80	5.224	2.463	6.117×10^{-2}	2.189×10^{-1}
100	6.558	2.444	5.183×10^{-2}	8.595×10^{-2}

型之后的总能量与入射光束总能量的比值, 同时假设接收系统口径为 1m, 则其能够接收的只是部分“猫眼效应”原路返回光的光能, 即后向反射光束在中心 1m 直径内的包围圆能量, 此处为单位时间内的能量, 定义其为包围圆功率。另外, 为了符合实际情况, 在建立镜头模型时针对平行入射光而设计, 但是入射探测激光存在发散角, 使得在非离焦时实际上已经存在离焦, 这也是在分析“猫眼效应”反射激光用于主动探测时, 离焦在所难免的一个原因, 本文中研究的入射激光参数

下, 这个误差离焦量大约为 0.7 μm 。

从表 1 可以看出, 离焦量是引起“猫眼效应”后向反射激光发散角的决定性因素, 发散角进而引起功率衰减; 后向反射激光的发散角基本符合前面的 (7) 式和 (9) 式, 负离焦时发散角稍大; 总的能量通过率则在离焦量稍大时 (大约大于 40 μm) 才符合理论公式, 离焦量稍小时则刚好相反, 这是由于离焦量很小时光束在反射元件上的光斑尺寸很小, 衍射级数较大, 导致部分能量无法通过出瞳而丢失; 非离焦时由于后向反射激光发散角很小, 使得中心包围圆的功率已占总功率的 60% 左右, 而在正离焦几微米时则更大 (入射光束实际焦点与镜头焦点误差的缘故), 离焦量很小时最高功率密度能达到 $10^{-5} \text{W}/\text{mm}^2$ 量级; 同样离焦量情况下, 虽然负离焦时后向反射光发散角相对正离焦稍大, 但由于其中心能量比较集中, 使得其中心最高功率和包围圆的功率均比正离焦时高出很多, 离焦量逐渐增大时正离焦情况功率衰减也更快。

3.2 入射角范围

上面讨论的是入射光束垂直镜头表面入射的情况, 得出的反射特性数据是最佳值。实际上由于发射接收系统与目标系统之间相对位置的限制, 不可能总是正入射。下面考虑斜入射情况以及在不同离焦量对应的能产生“猫眼效应”后向反射光的最大入射角。

在上面模型的基础上, 改变入射角, 可以得出入射角以及离焦量共同作用下的后向反射激光特性, 由于仿真数据量较大, 在此只给出发散角与离焦量和入射角的关系图如图 5 所示, 其它具体的远场能量特性主要是由发散角决定的, 变化规律与正入射时相似。

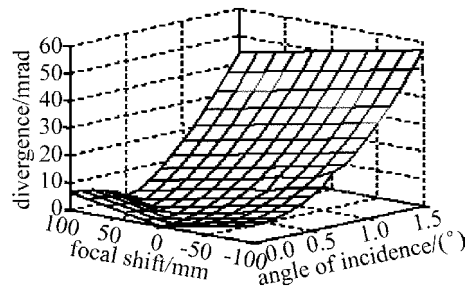


Fig 5 The relation of the divergence with the angle of incidence and the focal shift

可以看出, 随着入射角的增大, 最小发散角不是发生在非离焦时, 而是转移到正离焦。这是由于镜头存在像差, 斜入射时轴外光束会聚于镜头焦平面之后。因此, 这里实际的离焦量是由固有离焦量和入射角所共同决定的。

前面 (3) 式决定的最大入射角即半临界视场角是在理想的情况下。考虑到接收系统的探测能力限制, 取反射激光在接收系统处 (原路返回处) 的最大功率

密度约等于 10^{-8} W/mm^2 时对应的入射角为最大入射角。离焦量与最大入射角的关系见表 2。

Table 2 The relation of the focal shift and the largest angle of incidence

focal shift/mm	- 100	- 80	- 60	- 40	- 20	0	20	40	60	80	100
largest incidence angle/(°)	0.973	1.210	1.215	1.242	1.251	1.256	1.288	1.289	1.334	1.356	1.379

量通过率,但是由于发散角的增大使得其远场功率密度无法满足应用要求。表中的数据与图 5 是相符合的,由于入射角度较大时,最小发散角向正离焦转移,使得随着离焦量的增大能够满足要求的入射角范围也越大。当固有离焦量大于由斜入射引入的离焦量时,能够满足要求的最大入射角将随着离焦量增大而减小。

4 结 论

通过仿真分析可知,“猫眼效应”后向反射激光的发散角主要是由离焦量引起的,而其远场能量特性主要又是由发散角决定的,因此,离焦量是影响“猫眼效应”是否显著,以及是否满足应用要求的最重要因素。在同样离焦量的情况下,负离焦引起的发散角比正离焦稍大,但是却有着不同的发散效果,使得负离焦时的反射激光特性更加有利于应用;对于斜入射光束而言,由入射角增大引起的发散角的增大也可以看成是轴外光束的离焦所造成的,这个由入射角引起的离焦量可以抵消目标系统固有的正离焦量,因此,在斜入射时正离焦量对“猫眼效应”后向反射激光特性起积极作用;在正离焦量不是非常大的情况下(视目标系统对轴外光的像差矫正不同而不同),随着离焦量的增大,能够满足要求的入射角范围亦越大,主动探测系统的可动范围也越广,这是对主动探测有利的方面;针对空中目标,其视场角一般在几度左右,离焦量也不是很大,按照仿真的数据,在入射激光功率为 100W 左右,距离为几十公里时,接收系统接收的功率密度可以达到微瓦每平方毫米量级,考虑到大气透过率与光学系统的透

表 2 中给出的最大入射角为实际可用的最大入射角,入射角继续增大时仍有反射光,甚至仍有很高的能

过率以及反射元件的反射率等,在充分改善发射系统发射光束质量以及合理选定发射位置的前提下,至少可以达到 10^{-8} 量级,对于现有的探测元件的探测能力来说,完全是可行的。

参 考 文 献

- [1] ZHAO X J, GAO Zh Y, ZHANG Y Y. Technique of active laser reconnaissance and the applications in the military [J]. Optical Technique 2003, 29(4): 415-417(in Chinese).
- [2] JIANG Zh G, TAN J Ch, LIANG J *et al*. Suitability of “cat’s eye” effect for reconnaissance by the scanning laser [J]. Laser Technology 2005, 29(5): 549-551(in Chinese).
- [3] MA H Zh. Study on the reflective characteristics of the targets and the “cat’s eye” effect [J]. Laser Technology, 2003, 27(6): 600-602(in Chinese).
- [4] ZHENG R. Analysis of laser detection distance for ground optics lens [J]. Electro-Optic Technology Application, 2005, 20(4): 16-19(in Chinese).
- [5] LECOCQ C, DESHORS G, LADO-BORDOWSKY O, *et al*. Sight laser detection modeling [J]. Proceedings of The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers 2003, 5086: 280-286.
- [6] LI Y Q, LIANG F. Optical target discernment on cat’s eye effect [J]. Laser & Infrared 2000, 30(4): 252-253(in Chinese).
- [7] GU S L, SUN H Y, ZHANG Y J *et al*. Laser active detection of aerial target [J]. Laser & Infrared 2005, 35(7): 476-478(in Chinese).
- [8] GE Ch L, HUANG Zh W, JI Y S *et al*. Target classification with “cat eye effect” [J]. High Power Laser and Particles 2003, 15(7): 632-634(in Chinese).
- [9] QING G B, WANG X K, GUO Y, *et al*. Physical model of “cat eye effect” and its certification [J]. Laser Technology 1995, 19(4): 244-247(in Chinese).
- [10] ZEMAX Development Corporation. ZEMAX Optical Design Program User’s Guide [EB/OL]. [2005-02-03]. <http://www.zemax.com>.
- [11] GEARY JM. Introduction to lens design with ZEMAX [M]. Vignier Wilmann-Bell Inc 2002: 11-20.

(上接第 26页)

- [4] XIA L, QIAN L J. Serrated aperture apodizers of high energy ultrashort pulse laser beam [J]. Chinese Journal of Lasers 2004, 31(1): 57-61(in Chinese).
- [5] LIU Y X, LÜ B D. Diffraction of laser beams with amplitude modulations passing serrated apertures [J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 50-52(in Chinese).
- [6] AUERBACH JM, KARPENKO V P. Serrated aperture apodisers for high energy systems [J]. Appl Opt 1994, 33(15): 3179-3183.
- [7] WANG W K, JIANG J B, LU Y T, *et al*. Sector type apertures’ far field diffraction and the diffraction of dentate apertures used to cut the

- high frequency [J]. Acta Photonica Sinica 2002, 31(5): 629-632(in Chinese).
- [8] LIU J, WANG E Y, DING L E. Study on the pinhole size in the spatial filter of the CPA system [J]. Acta Optica Sinica 2006, 26(1): 71-76(in Chinese).
- [9] LÜ B D. Propagation and control of high-power lasers [M]. Beijing National Defense Industry Press 1991: 85~ 88(in Chinese).
- [10] YANG G G, SONG F J. Advance physical optics [M]. Hefei University of Science and Technology of China Press 1991: 85-88(in Chinese).