

光学系统的球差对激光主动侦察的影响

豆贤安,孙晓泉,程玉宝

(电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室,安徽 合肥 230037)

摘要:利用光学窗口“猫眼效应”进行的激光主动侦察易受光学镜头的像差的影响。通过建立球差光学系统“猫眼效应”的理论模型,并运用数值仿真计算的方法,分析了目标光学系统的球差与侦察激光的回波发散角、接收功率以及最大侦察距离等参数的关系。结果表明目标光学系统的球差会明显增大回波发散角、降低回波接收功率和减小最大侦察距离,对激光主动侦察造成不良的影响。

关键词:激光主动侦察;“猫眼效应”;球差

中图分类号:TN249

文献标识码:A

Influence of Optical System's Spherical Aberration on Active Laser Reconnaissance

DOU Xian-an, SUN Xiao-quan, CHENG Yu-bao

(Pulsed Power Laser Technology State Key Laboratory, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: The active reconnaissance which is based on optical system's "cat-eye" effect is easy influenced by optical system's aberration. A model of spherical aberration optical system's "cat-eye" effect was established and the numerical simulation calculation method was used to analyse the relationships of target optical system's spherical aberration with the reconnaissance laser's echo divergence angle, the received echo power and the maximum reconnaissance distance. The results indicates that target optical system's spherical aberration could observably increase the echo divergence angle, decrease the received echo power and the maximum reconnaissance distance. It brings bad influence to the active laser reconnaissance.

Key words: active laser reconnaissance; "cat-eye" effect; spherical aberration

1 引言

随着光电装备在战场上的大量应用,对其实施激光主动侦察成为军事领域的研究热点。利用光学窗口的“猫眼效应”可以产生比普通漫反射目标高2~4个量级的回波,有利于对光电装备进行侦察定位^[1-3]。在实际激光主动侦察中,光学窗口的回波受到很多因素的制约,例如:探测器的离焦和倾斜、光学镜头的像差等。目前国内对光学系统探测器的离焦和倾斜对猫眼效应的影响已经进行了较为深入的研究^[4-5],而关于像差对猫眼效应的影响的研究

的还没有公开的报道。球差是一种比较典型的像差,它是光轴上的物点发出的离光轴高度不同的光线经光学系统各面折射后,在光轴上的截距相对于理想像点的偏离^[6]。

本文主要针对球差对激光主动侦察的影响进行研究,建立球差光学系统“猫眼效应”的理论模型,通过理论推导和数值计算分析球差与激光回波的发

作者简介:豆贤安(1983-),男,研究生,主要从事光电技术方面的研究。E-mail:dou.xian.an@163.com

收稿日期:2008-09-20

散角、接收功率以及主动侦察的最大距离等参数的关系。

2 球差光学系统“猫眼效应”的理论模型

在激光主动侦察中,由于侦察的目标距离较远,入射激光束能够全部覆盖目标的光学窗口,目标的光学窗口的口径相对于入射光斑只是很小的一部分,因此可以将入射光束看成是能量均匀分布的平行光束。军用光学系统一般工作距离都比较远,视场也很小。对其进行激光主动侦察时,侦察激光只有在接近正入射的情况下,才有可能进入目标光学系统发生猫眼效应,产生较强回波。当侦察激光正入射到目标光学系统时,则球差是其唯一的像差。若把光学系统简化为一个薄透镜和一个反射面的组合,并将反射光束与入射光束按反射面对称展开^[7],则球差光学系统的猫眼效应等效原理图和等效光路图分别如图1、图2所示。

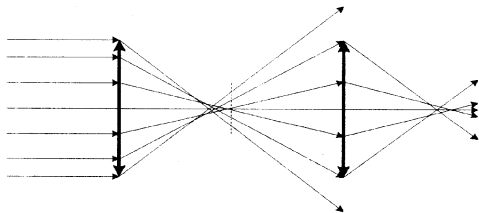


图1 球差光学系统猫眼效应的等效原理图

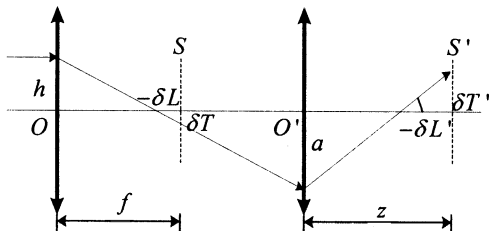


图2 球差光学系统猫眼效应的等效光路图

图中 h 为入射光线与光学系统主光轴的距离; a 为反射光线与透镜的交点到光轴的距离;光学系统焦距为 f ,口径为 D ; S 和 S' 分别为入射和反射光线的像平面; z 为反射光线的像距; $\delta L, \delta T; \delta L', \delta T'$ 分别为入射和反射光线的轴向及垂轴球差。

入射光线轴向初级球差^[6] δL 为:

$$\delta L = A_1 h^2 \quad (1)$$

其中, A_1 为初级球差系数。由于正透镜产生负球差,所以 δL 和 A_1 都是负数。由图2所示的几何关系得:

$$a = \frac{f - \delta L}{f + \delta L} h \quad (2)$$

反射光线经透镜会聚成像,由高斯物像关系^[8]得:

$$\frac{1}{f - \delta L} + \frac{1}{z} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

则像平面距透镜的距离为:

$$z = f(1 - \frac{f}{\delta L}) \quad (4)$$

反射光线的轴向球差 $\delta L'$ 为:

$$\delta L' = A_1 a^2 \quad (5)$$

由几何关系得:

$$\frac{a}{\delta T'} = \frac{z + \delta L'}{-\delta L'} \quad (6)$$

则反射光线垂轴球差 $\delta T'$ 为:

$$\delta T' = \frac{-\delta L' a}{z + \delta L'} \quad (7)$$

回波发散角 θ_s 为:

$$\theta_s = 2 \arctan \frac{\delta T'}{-\delta L'} \quad (8)$$

当反射光线与透镜的交点离轴距离大于透镜半径 $a > D/2$ 时,就会被遮挡。所以当 $a = D/2$ 时可由式(4)求出光学系统的有效口径为 $D' = D(f + \delta L)/(f - \delta L)$ 。军用光学系统的轴向球差 δL 一般是一个相对较小的量,所以它对光学系统的有效口径影响很小,可以近似认为:

$$D' \approx D \quad (9)$$

根据式(1)、式(2)、式(4)、式(5)、式(7)、式(8)、式(9)可以求出光学系统的回波发散角为:

$$\theta_s \approx \frac{4A_1 D^3}{A_1^2 D^4 + 4fA_1 D^2 - 16f^2} \quad (10)$$

由上式可以看出回波发散角随系统焦距增大而减小,随初级球差系数的绝对值和系统口径增大而增大。

3 光学系统球差对激光侦察的影响分析

假设侦察激光器发射的激光脉冲峰值功率为 P_t ;发射光学系统的透过率是 K_t ;不考虑大气扰动,单程大气透过率为 T_a ;发射激光束发散角为 θ_t ;设距目标光学窗口的距离为 R 。激光主动侦察原理如图3所示。

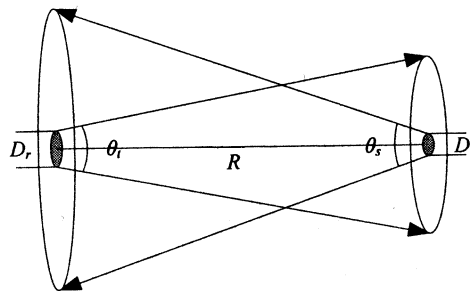


图3 激光主动侦察原理图

侦察激光经过远距离大气传输到达目标光学窗口的功率密度为:

$$E_t = \frac{P_t K_t T_a}{\frac{1}{4} \pi \theta_t^2 R^2} \quad (11)$$

目标光学系统的口径 D , 则目标光学窗口接受到的功率 P_c 为:

$$P_c \approx E_t \left(\frac{1}{4} \pi D^2 \right) \quad (12)$$

当目标光学系统有球差的时, 其回波发散角由式(10)表示; 当目标光学系统没有球差时其回波发散角为其光学窗口的衍射极限:

$$\theta_s = 2.44 \frac{\lambda}{D} \quad (13)$$

侦察激光经目标光学系统反射后, 再经过远距离大气传输到达接收系统处的功率密度为:

$$E_r = \frac{P_c \rho T_a}{\frac{1}{4} \pi \theta_s^2 R^2} \quad (14)$$

其中, ρ 为目标光学系统探测器的反射率。

接收光学窗口的口径为 D_r , 收集系数为 η , 透过率为 K_r , 则接收到的回波接收功率为 P_r :

$$P_r = \frac{P_c \rho K_r K_t T_a^2 \eta D^2 D_r^2}{\theta_t^2 \theta_s^2 R^4} \quad (15)$$

若接收系统最小可探测功率为 $P_{\min}$, 则最大侦察距离 $R_{\max}$ 为:

$$R_{\max} = \left(\frac{P_c \rho K_r K_t T_a^2 \eta D^2 D_r^2}{\theta_t^2 \theta_s^2 P_{\min}} \right)^{1/4} \quad (16)$$

4 数值计算

假设激光侦察设备的使用 $10.6 \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光器, 其发射脉冲的峰值功率 P_t 为 0.1 MW , 激光束发散角 θ_t 为 1 mrad , 发射光学系统的透过率是 K_t 为 0.9 , 接收光学窗口的口径 D_r 为 200 mm , 最小可探测功率 $P_{\min}$ 为 $10 \mu\text{W}$, 收集系数 η 为 0.9 , 透过率 K_r 为 0.9 , 单程大气透过率 T_a 为 0.9 。

对 100 km 处的口径 D 为 200 mm , 焦距 f 为 150 mm , 探测器反射率 ρ 为 0.3 , 球差 $\delta L_{0.707}$ 为 -0.05 mm 的某成像光学系统实施侦察。取该成像系统无球差的情况作为参照, 进行仿真计算。相关参数计算结果如表 1 所示。

表 1 有无球差光学系统的相关参数计算结果对比

	D'/mm	$\theta_s/\mu\text{rad}$	$P_r/\mu\text{W}$	$R_{\max}/\text{km}$
无球差	200	129.3	17.0	114.1
有球差	199.7	444.3	1.4	61.6

表 1 数据说明: 与无球差系统相比球差光学系统的有效口径减小了 0.3 mm , 回波发散角增大了 3.4 倍, 接收功率和最大侦察距离分别降低了 8.5% 和 54% 。

由数值计算结果可以得出以下结论:

(1) 球差对目标光学窗口的有效口径影响较小;

(2) 球差会显著增大目标光学窗口的回波发散角;

(3) 球差会造成目标光学窗口的回波接收功率大幅衰减;

(4) 球差会大大降低激光主动侦察的最大侦察距离。

5 结论

球差会造成回波发散角明显增大, 导致“猫眼效应”的回波接收功率和激光主动侦察的作用距离大幅下降, 对激光主动侦察带来较为不利的影响。本文只研究了像差中的初级球差对激光主动侦察的影响, 其他各种像差对激光主动侦察造成影响, 需要进一步探索。

参考文献:

- [1] Cojan, Yves, Fertala, et al. Method and system for protecting optoelectronic search and tracking equipment from an illumination[P]. United States, 2001: 6194723.
- [2] Mazerolle, Denis, Puech, et al. System for the reduction of laser equivalent surface and for optical protection[P]. United States, 2000: 6097527.
- [3] 姜海林, 邹继伟, 聂劲松. 基于“猫眼”效应探测隐身飞机的系统构想[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 846-848.
- [4] 孙晓泉, 吕跃广. 激光对抗原理与技术[M]. 北京: 解放军出版社, 2000: 116-117.
- [5] 卞学丽. “猫眼”系统中离焦量的变化对回波功率的影响[J]. 中国测试技术, 2007, 33(2): 84-86.
- [6] 刘钧, 高明. 光学设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006: 6-8.
- [7] 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.
- [8] 胡玉禧, 安连生. 应用光学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006: 48-49.