

斜入射条件下“猫眼”目标回波功率分析

张博¹, 张维¹, 武东生¹, 刘杰¹, 陈燕²

(1. 军械工程学院光学与电子工程系, 河北石家庄 050003; 2. 中国人民解放军驻二四七厂军事代表室, 山西太原 030009)

摘要:建立了斜入射条件下“猫眼”目标回波功率的计算模型,在此基础上建立了非离焦和离焦两种情况下“猫眼”目标反射的几何模型,推导出非离焦和正负离焦条件下入射角的变化范围,引入有效接收面积概念,得到了正负离焦引起的“猫眼”目标的回波发散角和有效接收面积,得到了斜入射条件下“猫眼”目标的回波功率计算公式,对入射角和离焦量对“猫眼”目标回波功率的影响进行了数值模拟。结果表明:入射角和离焦量的共同作用引起“猫眼”目标有效接收面积和回波发散角的变化,进而引起反射光场能量分布的变化,只有满足特定条件的入射角才能产生回波功率,入射角和离焦量的增大引起回波功率的减小,其中离焦量的变化对回波功率的影响作用显著,当入射角和离焦量都为零时接收到的回波能量最强。

关键词:“猫眼”效应;回波功率;入射角;离焦量;有效接收面积

中图分类号: TN249

文献标识码: A

Analysis of oblique incident angle on retro-reflected wave power in “cat-eye” target

ZHANG Bo¹, ZHANG Chu¹, WU Dong-sheng¹, LIU Jie¹, CHEN Yan²

(1. Department of Optics and Electron Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Chinese People's Liberation Army military representatives in Room 247 Plant, Taiyuan 030009, China)

Abstract: In this paper, the model of oblique incident angle on reflected wave power of “cat-eye” target is built, moreover the geometrical reflect model of “cat eye” target when the reflected plane and the focal plane is coplanar or not. The scope of incident angle is deduced when the focal shift is positive and negative. The reflected wave angle and effective received area are deduced which are induced by the focal shift. The formula of the reflected wave power is deduced which is induced by the incident angle and focal shift. The effect of the incident angle and focal shift on the reflected wave power of “cat-eye” target is analyzed. The study reveals that: the change of incident angle and focal shift both result in the change of the reflected wave angle and effective received area “cat-eye” target, then induce the change of the reflected wave power. Only the incident angle which meets the limited condition can induce the reflected wave power, the argument of the incident angle and focal shift reduce the reflected wave power, and the change of focal shift has a prominent effect on the reflected power, when the incident angle and the focal shift become zero, the reflected wave power reaches the peak value.

Key words: “cat-eye” effect; reflected wave power; incident angle; focal shift; effective received area

1 引言

随着激光技术在军事领域的日益广泛应用,激光对抗成为光电对抗最活跃的一个领域,激光侦察是光电对抗的一个组成部分,包括对辐射激光能量的搜索、截获、定位及识别等行动,通过发射激光来

扫描战区,分析和提取回波能够在战场背景中发现敌方战术目标。利用所谓“猫眼”效应来探测敌光

作者简介:张博(1984-),男,硕士生,主要研究方向为激光主动侦察。E-mail: zhangbo_0305@yahoo.cn

收稿日期:2009-04-17;修订日期:2009-06-17

电装备上光学窗口的激光雷达可实现对目标的及时准确定位^[1-3],其工作原理主要是根据“猫眼”目标对入射激光的反射率大约是背景反射率的 $10^2 \sim 10^4$ 倍来实现的。在发射激光束扫描敌方的光学窗口过程中,存在着发射光学系统与“猫眼”目标光轴的非共轴问题,因此研究不同入射角条件下“猫眼”目标的反射特性具有重要的理论意义。

文中通过建立斜入射条件下“猫眼”目标回波功率的计算模型,计算得出入射角的变化范围,推导出入射角和正负离焦引起的“猫眼”目标回波发散角,通过引入有效接收面积的概念,得出斜入射和离焦共同影响的“猫眼”目标回波功率计算公式,最后分析了斜入射条件下“猫眼”目标回波反射特性。

2 计算模型的建立和分析

基于“猫眼”效应进行激光主动侦察时,照射到“猫眼”目标光学系统的入射光线与“猫眼”目标的光轴存在一定的夹角,为了分析光束能量的传输过程,首先建立了斜入射条件下“猫眼”目标的回波功率计算模型如图1所示:A处为发射激光光学镜头,B处为“猫眼”目标光学系统,光轴的夹角即照射到“猫眼”目标光学镜头的入射角为 α ,假设发射激光功率为 P_i ，“猫眼”目标回波功率为 P ,发射激光发散角为 θ_i ,回波发散角为 θ ,探测距离为 R ,发射光学系统的透过率为 τ_i ,接收光学系统的透过率为 τ_r ，“猫眼”目标光学系统透过率为 τ_s ，“猫眼”目标反射面反射率为 ρ ,物镜孔径为 D ,焦距为 f ,不考虑大气扰动只考虑大气衰减的影响大气的透过率为 τ 。假定激光在大气中传输符合几何光学定律,大气均匀且各向同性,则激光光束能量分布近似看作均匀;激

光能量接收系统与发射系统空间距离很近且光轴相互平行,则不难得到B处单位面积的激光功率为:

$$P_1 = \frac{4P_i \tau_i \tau_r}{\pi \theta_i^2 R^2} \tag{1}$$

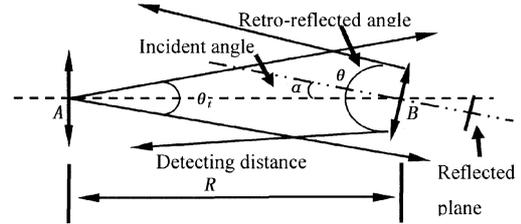


图1 斜入射条件下“猫眼”目标回波功率计算示意图

Fig.1 principle of calculation

由于入射到“猫眼”目标的激光与光轴存在一定夹角导致实际的接收面积不等于孔径面积,引入“猫眼”目标的有效接收面积 A_s (即只有入射到该面积内的光线才能经“猫眼”目标后全部出射),得到B处“猫眼”目标反射的激光功率为:

$$P_2 = \frac{4P_i \tau_i \tau_r \tau_s^2 A_s \cos \alpha \rho}{\pi \theta_i^2 R^2} \tag{2}$$

假设反射激光回A处的光斑面积为 S ,则被有效接收面积为 A_r 的光学系统光敏面接收得到的“猫眼”目标回波功率为:

$$P = \frac{4P_i \tau_i \tau_r^2 \tau_s^2 \tau_r \rho A_s A_r \cos \alpha}{\pi \theta_i^2 R^2 S} \tag{3}$$

在实际的应用过程中,由于装配误差等原因,军用光学仪器的反射面存在离焦的情况,使得“猫眼”目标的反射特性更为复杂,设反射面位于焦平面之后为正离焦,反之为负离焦,设离焦量为 d ,斜入射正离焦条件下“猫眼”目标的反射模型^[4]如图2所示。

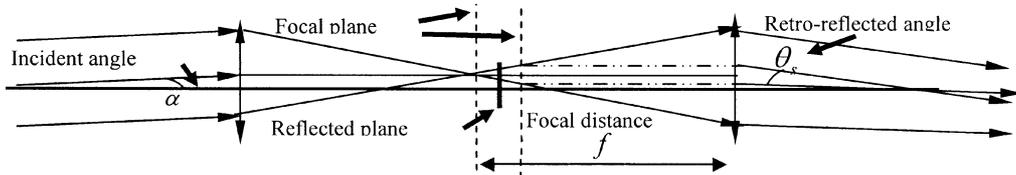


图2 斜入射正离焦“猫眼”目标反射模型

Fig.2 reflected model of gradient and positive focal shift

根据几何光学的方法首先求得斜入射正离焦条件下入射角的最大值 α_{MAX} 为:

$$\alpha_{MAX} = \arctan \frac{Dd + D'f}{2f(f + d)} \tag{4}$$

当任意满足 $0 < \alpha < \arctan \frac{Dd + D'f}{2f(f + d)}$ 的入射角 α 入射到正离焦的“猫眼”目标时利用几何分析可以

得到“猫眼”目标的有效接收面积^[5]如图3所示:图中阴影部分面积为有效接收面积,考虑到“猫眼”目标物镜孔径、反射面直径等对入射光线的限制以及入射角度、物镜焦距、离焦量等因素的影响只有阴影部分面积内的光线才能对回波功率产生影响,得到正离焦条件下“猫眼”目标有效接收面积 A_s 为:

$$A_s = \frac{D^2 \arccos \frac{2f \tan \alpha}{D}}{4} - f \tan \alpha \sqrt{\frac{D^2}{4} - f^2 \tan^2 \alpha} + \frac{D^2}{4} \arccos \frac{2(Dd + f^2 \tan \alpha)}{D(f+2d)} - \left(\frac{Dd + f^2 \tan \alpha}{f+2d} \right) \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{(Dd + f^2 \tan \alpha)^2}{(f+2d)^2}} \quad (5)$$

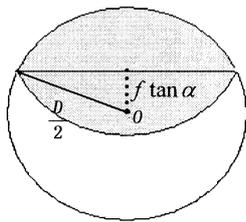


图3 “猫眼”目标有效接收面积
Fig.3 effective receiving area of target

假设离焦引起反射光线的发散角 θ_s , 则“猫眼”目标反射光线的回波发散角 θ 为:

$$\theta = \theta_i + \theta_s = \theta_i + \frac{4d \left(\frac{D}{2} - f \tan \alpha \right) (f+d)}{f^2 (f+2d)} \quad (6)$$

同理可得斜入射负离焦条件下入射角的最大值 α_{MAX} 为:

$$\alpha_{MAX} = \arctan \frac{D'f - 2D'd + Dd}{2f(f-d)} \quad (7)$$

当任意满足 $0 < \alpha < \frac{D'f - 2D'd + Dd}{2f(f-d)}$ 的入射角 α

入射到负离焦的“猫眼”目标时利用几何分析可以得到“猫眼”目标的有效接收面积 A_s 为:

$$A_s = \frac{D^2 \arccos \frac{2f \tan \alpha}{D}}{4} - f \tan \alpha \sqrt{\frac{D^2}{4} - f^2 \tan^2 \alpha} + \frac{D^2}{4} \arccos \frac{2(f^2 \tan \alpha - Dd)}{D(f-2d)} - \left(\frac{f^2 \tan \alpha - Dd}{f-2d} \right) \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{(f^2 \tan \alpha - Dd)^2}{(f-2d)^2}} \quad (8)$$

同理利用几何分析求得斜入射负离焦条件下“猫眼”目标的回波发散角 θ 为:

$$\theta = \theta_i + \frac{4d \left(\frac{D}{2} - f \tan \alpha \right) (f-d)}{f^2 (f-2d)} \quad (9)$$

综合正离焦和负离焦两种情况将式(5)、(6)、(8)、(9)分别代入回波功率计算公式(3)得到斜入射离焦共同影响下“猫眼”目标的回波功率计算公式为:

$$P = \frac{16P_i \tau_i \tau^2 \tau_r \rho A_s \cos \alpha \left(\frac{D^2 \arccos \frac{2f \tan \alpha}{D}}{4} - f \tan \alpha \sqrt{\frac{D^2}{4} - f^2 \tan^2 \alpha} + \frac{D^2}{4} \arccos \frac{2(Dd + f^2 \tan \alpha)}{D(f+2d)} - \left(\frac{Dd + f^2 \tan \alpha}{f+2d} \right) \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{(Dd + f^2 \tan \alpha)^2}{(f+2d)^2}} \right)}{\pi^2 R^4 \theta_i^2 \left(\theta_i + \frac{4|d| \left(\frac{D}{2} - f \tan \alpha \right) (f+d)}{f^2 (f+2d)} \right)^2} \quad (10)$$

其中,正离焦情况下 $d > 0$ 负离焦情况下 $d < 0$ 。

3 模拟结果分析

由以上分析可知:斜入射离焦条件下“猫眼”目标的回波功率取决于激光器的发射功率、大气和发射与接收光学系统的透过率、“猫眼”目标有效接收面积等因素的影响,为了分析入射角、“猫眼”目标结构参数对回波功率的影响,将发射激光参数(发射光功率,发射激光束散角,发射和接收光学系统透过率等)定为常量各参数的取值如下:

$P_i = 10^6 \text{ W}, \lambda = 532 \text{ nm}, \theta_i = 1 \text{ mrad}, \tau_r = \tau_i = \tau_s = 0.8, D = \phi = 40 \text{ mm}, D' = 10 \text{ mm}, f = 100 \text{ mm}, \rho = 0.1$

激光大气双向透过率^[6]为: $\tau^2 = \exp \{ -3.912 (\lambda/0.55)^{-q} 2R/V \}$ 。式中, V 为能见度,其单位为千米; λ 为波长; q 是与波长有关的常数^[7],对于红外波段的取值为:

$$q = \begin{cases} 1.6 & V > 20 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \text{ km} < V \leq 20 \text{ km} \\ 0.16V + 0.34 & 1 \text{ km} < V \leq 6 \text{ km} \\ V - 0.15 & 0.5 \text{ km} < V \leq 1 \text{ km} \\ 0 & V \leq 0.5 \text{ km} \end{cases}$$

数值分析结果如图4~图7所示。

图4反映了离焦量和入射角两个因素共同作用对“猫眼”目标回波功率的影响。其中假设作用距离为 $R = 11 \text{ km}$,大气具有较好的能见度 ($V = 22 \text{ km}$, $q = 1.6$),入射角的变化范围为 ($0 \text{ rad} \sim 0.05 \text{ rad}$),离焦量的变化范围为 ($-0.5 \text{ mm} \sim 0.5 \text{ mm}$)。可以看出:“猫眼”目标的回波功率是入射角和离焦量的函数,回波功率在入射角和离焦量同时为零时取得最大值,这是因为当入射角为零时,激光发射系统与“猫眼”目标光学系统的光轴共轴,同时反射面位于焦点处,“猫眼”目标的物镜孔径全部位于发射激光

光斑的分布范围之内,入射光线全部沿原路返回,“猫眼”目标的有效接收孔径达到最大值,反射光线的回波发散角达到最小值,因此到达接收系统时单位面积的光功率最大,两因素共同作用得到回波功率的最大值。当入射角增大时,发射光学系统光轴与“猫眼”目标光学系统的光轴产生夹角,由于“猫眼”目标物镜孔径以及反射面直径对入射光线的限制(如图2所示)以及反射面的离焦使得“猫眼”目标的有效接收面积减小,引起回射能量的减小,同时反射面的离焦使得反射光线产生发散,当离焦量大于 $400\ \mu\text{m}$ 时离焦引起的回波发散角与发射激光本身的发散角相当,此时离焦引起的回波发散角将不可忽略,入射角和离焦量的增大共同导致“猫眼”目标回波功率的降低。

和负离焦对“猫眼”目标回波功率的影响作用相同,回波功率随离焦量的增大而减小。

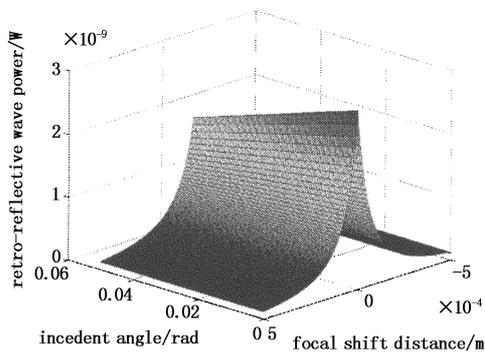


图4 回波功率随入射角和离焦量的变化

Fig. 4 retro-reflected wave power vs incident angle and focal shift

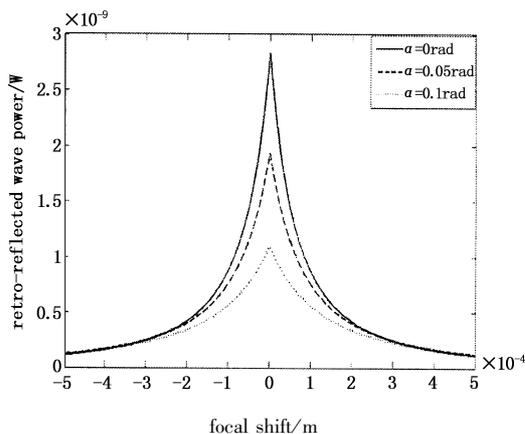


图5 离焦量对回波功率的影响

Fig. 5 retro-reflected wave power vs focal shift

图5为改变入射角的大小可以得到不同入射角条件下离焦量对“猫眼”目标的回波功率的影响:在离焦量相等的情况下入射角越小,回波功率越大,当入射角为零时即得到正入射条件下离焦量对回波功率的影响分布曲线;当入射角不为零时,离焦量对回波功率的变化规律与正入射情况相似,此外正离焦

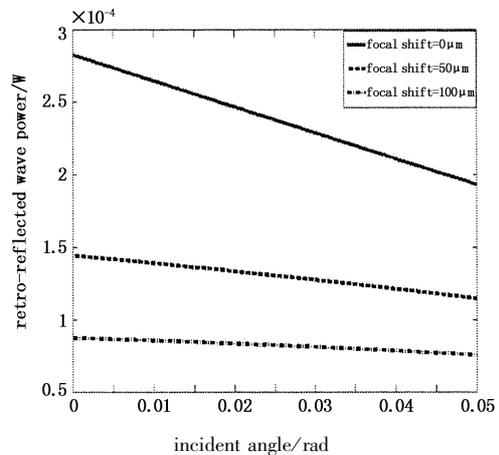


图6 入射角对回波功率的影响

Fig. 6 retro-reflected wave power vs incident angle

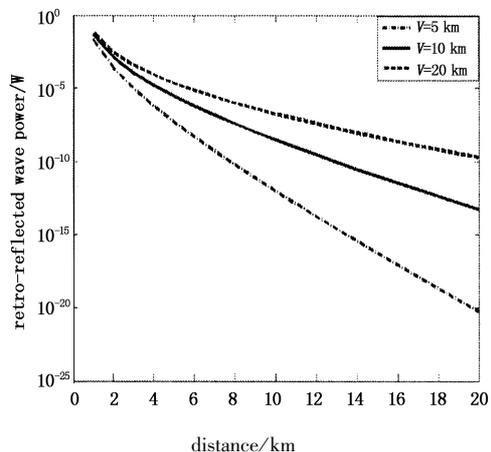


图7 大气能见度对回波功率的影响

Fig. 7 retro-reflected wave power vs atmospheric visibility

图6反映了离焦量恒定时入射角与回波功率的变化曲线,可以看出:当离焦量为某一定植时,回波功率随入射角的增大而减小,这是因为由于入射角的增大引起“猫眼”目标有效接收孔径的减小,最终导致“猫眼”目标反射回接收系统的能量降低。

比较图5和图6可知:与入射角相比离焦量的变化对回波功率的影响较大;这是因为回波功率的大小一方面受“猫眼”目标接收能量的影响,另一方面受“猫眼”目标回波的远场能量分布特性的影响,而回波发散角是远场能量分布的决定性因素,入射角的变化主要对“猫眼”目标的有效接收面积产生影响,对回波发散角的影响不大,而离焦量的变化对“猫眼”目标回波发散角影响显著,入射角引起的“猫眼”目标接受能量的变化量相对与回波发散角引起的远场能量分布变化较小,因此当满足入射条

件的入射角入射时,“猫眼”目标回波功率的大小主要决定于反射面离焦量的大小。

图7反映了不同大气衰减条件下,“猫眼”目标回波功率与作用距离的关系,其中假设“猫眼”目标为非离焦,入射激光正入射“猫眼”目标。可以看出:随着作用距离的增大,“猫眼”目标的回波功率逐渐减小。且能见度越低,回波功率的减小越明显。这是因为探测距离的增加引起“猫眼”目标处光场面积的增大,而激光发射功率恒定则“猫眼”目标处单位面积光功率减小,同时返回到接收处的单位面积光功率随作用距离的增加而减小,最终导致“猫眼”目标的回波功率减小。另外对“猫眼”目标的探测是在大气中进行的,大气中存在着各种气体和烟雾、灰尘构成的气溶胶等,使部分激光能量被吸收而转变成其他形式的能量,部分则被大气中的粒子反射和散射而改变原来的传播方向,吸收和散射的总效果使传输的激光在传输工程中受到衰减。工程上用大气能见度来估算大气气溶胶的衰减,能见度越低,大气的衰减作用越强,回波功率的减小越明显。

4 结论

运用几何光学的方法建立了斜入射条件下“猫眼”目标的反射模型,分析研究了入射角和离焦量共同作用对回波能量光场分布的影响以及不同入射角条件下离焦量对“猫眼”目标回波功率的影响。结果表明:只有满足一定条件的入射角才能产生回波功率,入射角和离焦量的变化共同引起“猫眼”目标的有效接收面积和回波发散角的变化,进而使回波能量发生变化,其中由仿真数据可知当离焦量大于 $400\ \mu\text{m}$ 时离焦量变化引起的回波发散角与发射激光光束本身的束散角相当,与入射角相比离焦量的变化对回波发散角的影响显著,主要决定了“猫眼”目标回波的远场能量分布,回波功率随离焦量的增大而减小;入射角的变化范围受离焦量和“猫眼”目标物镜孔径,反射面直径等结构参数的影响,不同入射角入射时,离焦量对回波功率的变化规律与正入射条件下相同;此外大气能见度对“猫眼”目标的回波功率有一定影响。

参考文献:

- [1] Wei Guang-hui, Yang Pei-gen. The application of laser technique in ordnance [M]. Beijing: Ordnance Publishing Company, 1995: 3-5. (in Chinese)
魏光辉, 杨培根. 激光技术在兵器工业中的应用[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 3-5.
- [2] Jiang Hai-lin, Zou Ji-wei, Nie Jin-song. Conception of detecting system for locating stealth aircraft based on cat eye effect [J]. Infrared and Laser engineering, 2007, 36(6): 846-848. (in Chinese)
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.
- [3] Guan Xiao-xian, Piao Xian-qing, Sun Jing, et al. Research on soft-killing tactical laser weapon and its mechanism [J]. Infrared and Laser engineering, 2004, 33(6): 118-120. (in Chinese)
关效贤, 朴贤卿, 孙晶, 等. 软杀伤战术激光武器及作用机理的研究[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(6): 118-120.
- [4] Zhao Yan-zhong, Sun Hua-yan, Song Fen-hua, et al. Effect of focal shift on reflecting character of “cat eye effect” [J]. Laser Technology, 2008, 32(1): 71-74. (in Chinese)
赵延仲, 孙华燕, 宋丰华, 等. “离焦量”对猫眼效应反射特性的影响[J]. 激光技术, 2008, 32(1): 71-74.
- [5] Qiao Ya. A study of the laser active reconnaissance [J]. Electro-Optical Technology Application, 2005, 20(3): 22-24. (in Chinese)
乔亚. 激光主动侦察技术研究[J]. 光电技术应用, 2005, 20(3): 22-24.
- [6] Li Zhong-jian, Cao Wei-gong, et al. A laser range finder for detection of optical apertures [J]. Laser & Infrared, 2001, 31(1): 22-24. (in Chinese)
李忠建, 曹卫公, 等. 一种探测光学窗口的激光测距机[J]. 激光与红外, 2001, 31(1): 22-24.
- [7] Nabouls Maher a L. Fog attenuation prediction for optical and infrared waves [J]. Opt Eng, 2004, 43(2): 319-329.