

入射角对“猫眼”目标特性的影响

张 瑜¹, 刘秉琦¹, 周 斌^{1,2}, 武东生^{1,3}

(1. 军械工程学院光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003; 2. 解放军 71192 部队, 山东 文登 264400;
3. 北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘 要:激光雷达截面(LRCS)能够综合表征目标激光散射特性,在激光主动探测系统论证设计、探测性能估算中有广泛的应用。从LRCS定义出发,建立了正入射与斜入射条件下离焦“猫眼”目标的LRCS模型,得到了正入射与斜入射条件下离焦“猫眼”目标的探测距离计算公式,讨论了目标LRCS及主动探测距离随入射角和离焦量变化的规律,对入射角和离焦量对目标LRCS和主动探测距离的影响进行了数值模拟,结果表明:入射角和离焦量的增大会引起“猫眼”目标有效照射面积和回波发散角变小,进而引起LRCS和激光主动探测距离变小。这为激光主动探测系统的设计和性能评价提供了必要的依据。

关键词:“猫眼”效应;激光雷达截面;入射角;离焦量;探测距离

中图分类号: TN977

文献标识码: A

Impact of incidence angle on characteristics of “cat eye” target

ZHANG Yu¹, LIU Bing-qi¹, ZHOU Bin^{1,2}, WU Dong-sheng^{1,3}

(1. Department of Optics and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;
2. Army Unit 71192, Wendeng 264400, China;
3. Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Laser radar cross section (LRCS) which represents the laser scattering characteristics of a target, is applied widely in the design and evaluation of the active laser detection systems. Based on the definition of laser radar cross section, a perfect laser radar cross section model of a cat eye target with focal shift is built under the conditions of normal and oblique incidence. The computation formulas of detection distance had also been derived. The rule of LRCS and active detection distance as a function of incidence angle and focal shift had been discussed. Then the impact of incidence angle and focal shift on LRCS and active detection distance is simulated through numerical computation. The results demonstrate that the effective received area of a “cat eye” target and reflected wave divergent angle will attenuate as the incidence angle and focal shift increase which consequently result in decreasing the LRCS and active laser detection distance. The study will lay the foundation for the design and performance evaluation of various laser detection systems.

Key words: “cat eye” effect; laser radar cross section; incidence angle; focal shift; detection distance

1 引 言

包括光学观瞄系统、光电侦察系统、光电跟踪系统、光电搜索系统、光电火控系统^[1]以及光电测距系统在内的绝大多数军用光电装备,其所用光学镜头的焦平面处都安装有反射或半反射元件(光敏面或分划板),在受到激光束照射时能产生原路返回

的准直反射光,反射光回波能量通常比漫反射目标的回波强 $10^2 \sim 10^4$ 倍,这种特性俗称“猫眼”效应^[2]。激光主动探测技术就是利用“猫眼”效应原

作者简介:张 瑜(1987-),男,硕士生,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail: sjzhangyu@yahoo.cn

收稿日期:2010-12-08;修订日期:2010-12-19

理,通过发射激光束实现对这些光学目标的扫描侦察和识别。但在不同的入射角情况下,“猫眼”效应的反射特性有很大不同,因此很有必要深入了解入射角对“猫眼”目标探测距离的影响。目前对于“猫眼”目标探测主要侧重在“猫眼”系统参数及发射激光参数对回波功率的影响上^[3],而激光雷达截面(LRCS)^[4]能够综合反映激光波长、目标表面材料及其粗糙度、目标几何结构形状等各种因素对激光散射特性及主动探测距离的影响,是重要的目标特性指标^[5],由 LRCS 表征的激光测量方程在激光主动探测系统的论证设计和性能评价中有着重要的应用。

本文通过建立正入射与斜入射条件下离焦“猫眼”目标的 LRCS 数学模型,进而推导了激光主动探测距离与入射角的关系模型,讨论了入射角和离焦量对 LRCS 及探测距离的影响,为激光主动探测系统的指标论证和性能评价提供了必要的理论依据。

2 “猫眼”目标的 LRCS 模型

激光与微波同属电磁波,将微波雷达截面(RCS)的概念推广到光波段得到 LRCS,理论上,目标的 LRCS 定义为^[3,5-6]:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left| \frac{E_s}{E_i} \right|^2 \quad (1)$$

式中, E_i 为目标处入射光波电场强度振幅; E_s 为远场观测点处来自目标的散射光波电场强度振幅; R 为目标到观测点的距离。推广到光波段,由于光通量密度(单位面积内的光功率)正比于光波电场强度振幅的模平方,光学目标的 LRCS 可以表示为:

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{\phi_s}{\phi_i} \quad (2)$$

式中, ϕ_i 为目标处入射光通量密度; ϕ_s 为观测点处散射光通量密度。

若目标有效照射面积为 A_e ,则照射到目标上的总功率 $P_i = \phi_i A_e$,设目标反射比为 ρ ,则可得到目标散射总功率为: $P_s = \rho P_i = \rho \phi_i A_e$ 。由于散射光功率主要集中在入射后向一个很小的角度 θ_s (即回波发散角)范围内,对于“猫眼”目标,约在几个毫弧度范围内集中了绝大部分散射光功率。因此可以近似认为,散射功率全部集中在回波发散角内,该角度之外的散射功率忽略不计。于是,可得观测点处散射光通量密度为:

$$\phi_s = \frac{P_s}{\Omega_s R^2} = \frac{\rho \phi_i A_e}{\Omega_s R^2} \quad (3)$$

式中, Ω_s 为反射光束发散角。在小角度条件下, $\Omega_s = \pi \theta_s^2 / 4$,将式(3)代入式(2),可得“猫眼”目标的 LRCS 为:

$$\sigma = 16\rho A_e / \theta_s^2 \quad (4)$$

式中, θ_s 为反射光束发散角。

因此,对于离焦“猫眼”目标,首先引入光学系统有效接收面积 A_s ^[2,7],当激光正入射时,光学系统有效接收面积 A_s 即为目标的有效照射面积 A_e ;当激光以 α 角度斜入射时,有效照射面积 $A_e = A_s \cdot \cos\alpha$ 。同时由于装配误差等原因,“猫眼”目标的反射面(光敏面或分划板)不一定正好位于焦平面上,即存在离焦量 d ,离焦量会影响“猫眼”目标的有效接收孔径面积和回波发散角,利用激光有效照射面积、反射光束的发散角及目标后向反射比,就可以得到“猫眼”目标的 LRCS。

2.1 正入射条件下离焦“猫眼”目标的 LRCS 模型

正入射时离焦量的存在使得目标的有效照射面积和回波发散角更为复杂,首先建立正入射条件下离焦“猫眼”目标的 LRCS 模型,如图 1 所示。

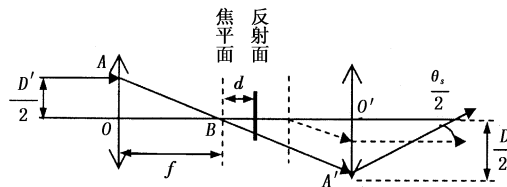


图 1 正入射条件下离焦“猫眼”目标模型

Fig.1 equivalent model of focal shift “cat eye” target in the condition of vertica

设“猫眼”目标透镜直径为 D ,焦距为 f ,反射面的离焦量为 d ,离焦情况下的有效入射直径为 D' ,回波发散角为 θ_s ,激光发散角为 θ_i 。在如图 1 所示的正离焦情况下,根据三角形 AOB 与三角形 $A'O'B$ 的

相似性可得: $\frac{D'}{f} = \frac{D}{f+2d}$,由此得到激光垂直入射时“猫眼”目标有效孔径直径:

$$D' = \frac{Df}{f+2d} \quad (5)$$

对于一般的光学系统,考虑到 $d=f$,故 $D' \approx D$,“猫眼”目标有效照射面积可以表示为:

$$A_e = A_s = \frac{1}{4}\pi D^2 \quad (6)$$

对于处于离焦状态的“猫眼”目标,回波发散角为:

$$\tan \frac{\theta_s}{2} = \frac{\frac{D}{2} - \frac{fD}{2}}{f} = \frac{Dd}{f(f+2d)} \approx \frac{Dd}{f^2} \quad (7)$$

则有 $\tan \frac{\theta_s}{2} \approx \frac{\theta_s}{2}$, 于是回波发散角可以表示为:

$$\theta_s \approx 2dD/f^2 \quad (8)$$

将式(6)和式(8)代入式(4), 可得正入射离焦“猫眼”目标的 LRCS:

$$\sigma = \frac{\pi \rho f^4}{d^2} \quad (9)$$

同样可以得到负离焦情况下, “猫眼”目标有效照射面积为:

$$A_e = A_s = \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (10)$$

回波发散角为:

$$\theta_s \approx 2dD/f^2 \quad (11)$$

对于负离焦情况下式(9)同样适用, “猫眼”目标的 LRCS 与反射面离焦量的平方近似成反比。

2.2 斜入射条件下离焦“猫眼”目标的 LRCS 模型

在斜入射条件下, 由于入射到“猫眼”目标的激光与光轴存在一定的夹角, 为了分析光束入射到“猫眼”目标的传输特性以及目标的有效照射面积和回波发散角, 建立斜入射条件下“猫眼”目标的 LRCS 模型, 如图2所示。

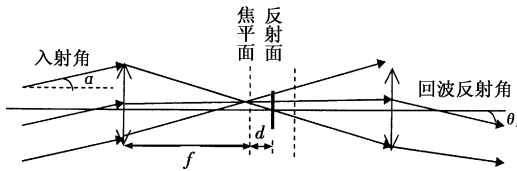


图2 斜入射条件下离焦“猫眼”目标模型

Fig.2 equivalent model of focal shift “cat eye” target in the condition of oblique incidence

由于入射光的倾斜, 经过透镜后光束聚焦点可能会落在反射面之外, 进而造成反射光无法出射, 故

$$\sigma = \frac{16\rho \cos\alpha \left(\xi - f \tan\alpha \sqrt{\frac{D^2}{4} - f^2 \tan^2\alpha} + \frac{D^2}{4} \cdot \arccos \frac{2\psi}{D} - \psi \sqrt{\frac{D^2}{4} - \psi^2} \right)}{\left(\theta_i + 4|d| \zeta \left(\frac{D}{2} - f \tan\alpha \right) \right)^2} \quad (19)$$

其中, $\zeta = \frac{f+d}{f^2(f+2d)}$, 正离焦情况下 $d > 0$, 负离焦情况下 $d < 0$ 。

3 “猫眼”目标的探测距离模型

激光雷达作用距离方程的推导过程与微波雷达

存在最大入射角, 这里设理想情况下反射面孔径等于透镜孔径 D , 根据几何分析可知入射角 α 应近似满足:

$$\alpha < \arctan\left(\frac{D}{2f}\right) \quad (12)$$

正离焦条件下, 有效接收面积为:

$$A_s = \xi - f \tan\alpha \sqrt{\frac{D^2}{4} - f^2 \tan^2\alpha} + \frac{D^2}{4} \arccos \frac{2\psi}{D} - \psi \sqrt{\frac{D^2}{4} - \psi^2} \quad (13)$$

式中, $\xi = \frac{D^2 \arccos \frac{2f \tan\alpha}{D}}{4}$, $\psi = \frac{f^2 \tan\alpha + Dd}{f+2d}$ 。

故有效照射面积为:

$$A_e = A_s \cos\alpha \quad (14)$$

设离焦引起的回波发散角为 θ , 目标反射光线的回波发散角 θ_s 为:

$$\theta_s = \theta + \theta_i = \theta_i + \frac{4d \left(\frac{D}{2} - f \tan\alpha \right) (f+d)}{f^2 (f+2d)} \quad (15)$$

同样, 负离焦条件下, 有效接收面积为:

$$A_s = \xi - f \tan\alpha \sqrt{\frac{D^2}{4} - f^2 \tan^2\alpha} + \frac{D^2}{4} \cdot \arccos \frac{2\psi'}{D} - \psi' \sqrt{\frac{D^2}{4} - \psi'^2} \quad (16)$$

式中, $\psi' = \frac{f^2 \tan\alpha - Dd}{f-2d}$ 。

故负离焦时有效照射面积为:

$$A_e = A_s \cos\alpha \quad (17)$$

目标反射光线的回波发散角 θ_s 为:

$$\theta_s = \theta_i + \theta = \theta_i + \frac{4d \left(\frac{D}{2} - f \tan\alpha \right) (f-d)}{f^2 (f-2d)} \quad (18)$$

由式(4)可得斜入射条件下“猫眼”目标的 LRCS 为:

$$\sigma = \frac{16\rho \cos\alpha \left(\xi - f \tan\alpha \sqrt{\frac{D^2}{4} - f^2 \tan^2\alpha} + \frac{D^2}{4} \cdot \arccos \frac{2\psi}{D} - \psi \sqrt{\frac{D^2}{4} - \psi^2} \right)}{\left(\theta_i + 4|d| \zeta \left(\frac{D}{2} - f \tan\alpha \right) \right)^2} \quad (19)$$

的推导是相似的, 从微波雷达作用距离方程可以导出激光雷达作用距离方程^[8]:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \times \frac{\sigma}{4\pi R^2} \times \frac{\pi D^2}{4} \times \eta_1 \eta_2 \quad (20)$$

其中, P_r 为接收激光功率; P_t 为发射激光功率; σ 为

目标的 LRCS; D 为接收孔径; η_1 为大气传输系数; η_2 为光学系统传输系数; $G_i = \frac{4\pi D^2}{K^2 \lambda^2}$; K 为孔径透光常数; λ 为发射激光的波长。

经整理式(20), 激光雷达作用距离方程可表示为:

$$P_r = \frac{P_t \sigma D^4}{16\lambda^2 K^2 R^4} \eta_1 \eta_2 \quad (21)$$

3.1 正入射条件下离焦“猫眼”目标的探测距离模型
由公式(11)和公式(21)可得正入射条件下“猫

眼”目标的探测距离 R 和离焦量 d 的关系:

$$R = \left(\frac{\pi P_t f^4 D^4 \eta_1 \eta_2}{16 P_r \lambda^2 K^2 d^2} \right)^{1/4} \quad (22)$$

从式中可以看出探测距离的四次方与离焦量的平方近似成反比。

3.2 斜入射条件下离焦“猫眼”目标的探测距离模型

由公式(19)和公式(21)可得斜入射条件下“猫眼”目标的探测距离 R 与入射角 α 和离焦量 d 的关系:

$$R = \left(\frac{P_t \rho D^4 \eta_1 \eta_2 \cos \alpha \left(\xi - f \tan \alpha \sqrt{\frac{D^2}{4} - f^2 \tan^2 \alpha} + \frac{D^2}{4} \cdot \arccos \frac{2\psi}{D} - \psi \sqrt{\frac{D^2}{4} - \psi^2} \right)}{\lambda^2 K^2 P_r \left(\theta_i + 4 |d| \zeta \left(\frac{D}{2} - f \tan \alpha \right) \right)^2} \right)^{1/4} \quad (23)$$

其中, $\zeta = \frac{f+d}{f^2(f+2d)}$, 正离焦情况下 $d > 0$, 负离焦情况下 $d < 0$ 。

4 仿真分析

由以上的分析可以看出:“猫眼”目标的 LRCS 和激光探测距离主要取决于目标的有效照射面积和回波发散角, 而有效照射面积和回波发散角又取决于反射面离焦量和激光入射角。为进一步分析离焦量和入射角对“猫眼”目标激光雷达散射截面和探测距离的影响, 将发射激光参数和“猫眼”目标系统参数定为常量, 取值如下:

$P_t = 1 \text{ W}$, $\theta_i = 2 \text{ mrad}$, $\lambda = 1.064 \text{ }\mu\text{m}$, $\eta_1 = 1$, $\eta_2 = 0.8$, $D = 40 \text{ mm}$, $f = 100 \text{ mm}$, $\rho = 0.3$, $\theta_r = 2 \text{ mrad}$, 对于 AD500-10 TO5i 型雪崩光电二极管探测器, 其最小可探测功率 $P_r = 4 \text{ nW}$ 。

用 Matlab 对正入射及斜入射条件下“猫眼”目标的 LRCS 和激光主动探测距离模型进行数值仿真计算, 计算结果如图 3 ~ 图 6 所示。

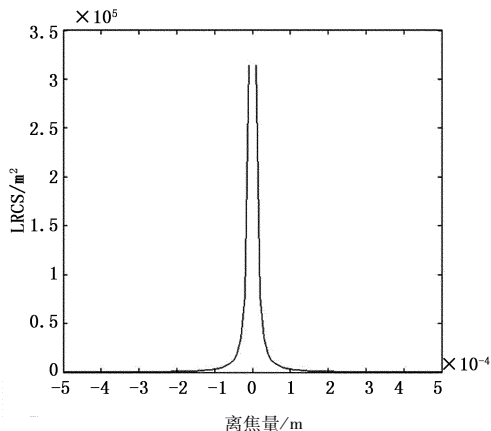


图3 离焦量对“猫眼”目标 LRCS 的影响
Fig.3 LRCS of “cat eye” target vs focal shift

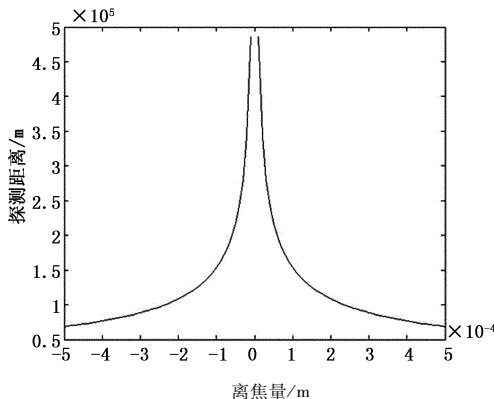


图4 离焦量对探测距离的影响
Fig.4 detection distance vs focal shift

图3反映了正入射条件下“猫眼”目标反射面的离焦量对 LRCS 产生的重要影响: 反射面的正负离焦都会引起“猫眼”目标 LRCS 的衰减。这是因为在反射面正离焦情况下, 离焦量的增大引起“猫眼”目标有效接收孔径的减小以及回波发散角的增大。

图4反映了正入射条件下激光探测距离与“猫眼”目标离焦量之间的关系曲线。从图中可以看出, “猫眼”目标离焦量对激光主动探测距离的影响很大, 探测距离随着离焦量的增大而降低。

图5反映了“猫眼”目标随入射角和离焦量 LRCS 的变化曲线, 限于篇幅, 仅给出正离焦情况下的曲线。其中入射角的变化范围由式(12)可确定为(0 ~ 0.19 rad), 离焦量的变化范围选为(0.1 ~ 0.5 mm)。从图中可以看出: 当离焦量为一定值时, 目标 LRCS 随激光入射角的增大而减小, 这是因为入射角增大时, “猫眼”目标的有效照射面积和回波发散角均变小, 但入射角对有效照射面积的影响远大于对回波发散角的影响, 进而导致“猫眼”目标的 LRCS 变小。

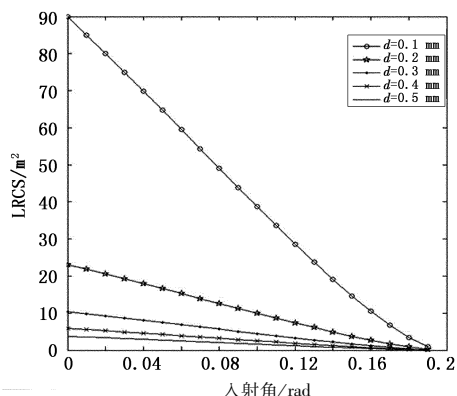


图5 入射角对“猫眼”目标的LRCS的影响

Fig. 5 LRCS of “cat eye” target vs incidence angle

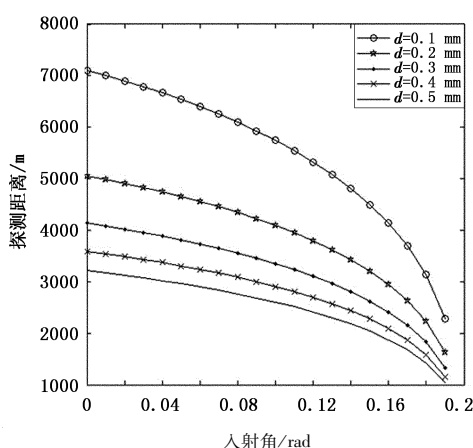


图6 入射角对探测距离的影响

Fig. 6 detection distance vs incidence angle

图6反映了离焦量为某一特定值时激光主动探测距离随入射角增大的变化趋势,可以看出:随着入射角的增大,主动探测距离逐渐减小。原因也是由于入射角增大引起有效照射面积和回波发射角变小。从图5和图6还可以看出:在同一入射角下,离焦量的变化对目标LRCS的影响要大于入射角的影响。

5 结论

本文利用几何光学方法,从LRCS的定义出发,推导了正入射和斜入射条件下离焦“猫眼”目标的LRCS方程及探测距离方程,通过数值分析的方法研究了激光入射角和“猫眼”目标离焦量对目标LRCS及激光主动探测距离的影响,结果表明:只有入射角满足一定条件的情况下才能产生回波,正入射时离焦量的变化将引起回波发散角及“猫眼”目标有效孔径的变化进而影响LRCS及激光主动探测的作用距离;斜入射情况下离焦量一定时入射角增大将引起“猫眼”目标LRCS及探测距离的减小;相对于入射角的影响来说,离焦量的变化对LRCS及探测距离的影响显著。

探测距离是表征激光主动探测系统探测能力的

重要性能指标,将LRCS引入“猫眼”目标探测对于激光主动探测系统的设计、性能评价将有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua. Effect of incidence angle on reflecting characteristics of cat eye effect [J]. High Power Laser and Participle Beams, 2007, 9 (3): 364 - 368. (in Chinese)
赵延仲,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, 9(3): 364 - 368.
- [2] Qiao Ya. A study of the laser active reconnaissance [J]. Electro-optic Technology Application, 2005, 20 (3): 22 - 24. (in Chinese)
乔亚. 激光主动侦查技术研究[J]. 光电技术应用, 2005, 20(3): 22 - 24.
- [3] Zhang Bo, Niu Yanxiong, Zhang Chu. Analysis of factors for reflected wave power of “cat-eye” target [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(3): 420 - 423. (in Chinese)
张博,牛燕雄,张雏,等. “猫眼”目标回波功率的影响因素分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 420 - 423.
- [4] Wyman P W. Definition of laser radar cross section [J]. Appl Opt, 1968, 7(1): 207.
- [5] Gao Wei. Calculation of laser radar cross section for direct reflection targets [J]. Acta Armamentaria, 2004, 25 (5): 694 - 696. (in Chinese)
高卫. 镜面反射目标激光雷达截面的估算方法[J]. 兵工学报, 2004, 25(6): 694 - 696.
- [6] Sun Pengju, Gao Wei, Wang Yuefeng. Calculation and application of laser radar cross section for targets [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35 (5): 597 - 599. (in Chinese)
孙鹏举,高卫,汪岳峰. 目标激光雷达截面的计算方法及应用研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 597 - 599.
- [7] Zhang Bo, Zhang Chu, Wu Dongsheng. Analysis of oblique incident angle on retro-reflected wave power in “cat-eye” target [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(10): 1046 - 1050. (in Chinese)
张博,张雏,武东生,等. 斜入射条件下“猫眼”目标回波功率分析[J]. 激光与红外, 2009, 39(10): 1046 - 1050.
- [8] Dai Yongjiang. The principle of laser radar [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 6 - 11. (in Chinese)
戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 6 - 11.