

文章编号:1001-5078(2007)05-0405-03

基于“猫眼”效应的激光主动成像探测系统性能分析

张 曦¹, 孙华燕²

(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)

摘 要:通过对调制对比度限制下的作用距离建模, 文中分析了激光主动成像探测系统的性能。首先描述了系统组成, 然后通过调制对比度的表达式导出了作用距离模型, 最后根据“猫眼”目标和漫反射目标不同的特性分别进行了仿真计算。结果表明: 激光主动成像探测系统基于“猫眼”效应探测时性能大大提高。

关键词:主动成像; 激光雷达散射截面; “猫眼”效应; 作用距离; 调制对比度

中图分类号: TN249

文献标识码: A

Performance Analysis of Laser Active Imaging Detection System Based on “cat-eye” Effect

ZHANG Xi¹, SUN Hua-yan²

(1. Postgraduate, the Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China;

2. Department of Optonics Equipment, the Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)

Abstract: This presentation analyzes the performance of laser active imaging detection system by giving a model of operation range based on limited modulation contrast ratio. Firstly, the structure of this system is described. The model of operation range is deduced according to the expression of modulation contrast ratio. The simulation for system performance is carried on with “cat-eye” target and diffuse target respectively. The result shows that the system performance are greatly improved when “cat-eye” target is detected.

Key words: active imaging; laser radar cross section; “cat-eye” effect; operation range; modulation contrast ratio

1 引 言

自20世纪90年代以来, 激光主动成像探测作为激光应用的重要领域, 在对小、暗、远、隐蔽目标的成像识别方面受到人们的广泛关注。激光主动成像探测是采用激光光源瞬间照明目标所处空间, 同时利用高增益成像器件和距离选通技术对目标成像, 使由被观察目标反射回来的辐射脉冲刚好在成像器件的选通工作时间内成像。与被动探测方式相比, 具有探测性能对背景特性依赖小, 成像清晰、对比度与角分辨力高, 能同时获取目标图像与距离信息等突出优势, 可提高对小、暗、远、隐蔽威胁目标的成像识别能力。但由于大气通道的影响, 激光回波强度将发生严重衰减、光束发散和漂移, 致使成像器件的

微弱激光信号探测成为远距离激光主动成像探测的难点问题。考虑到制导导弹、无人侦察机、光电跟踪系统和光电测距系统等一些军事上使用的目标上携带的光电传感系统存在“猫眼”效应, 即这些光电系统的光学窗口对入射光有很强的按原路返回的特性(通常比漫反射目标的回波强度高 $10^2 \sim 10^4$ 倍)。本文提出了基于“猫眼”效应的激光主动成像探测系统设想, 利用光电设备的“猫眼”效应对现代战场使用的大量光电武器装备进行成像探测, 有望进一步提高激光主动成像探测系统的探测性能。

作者简介: 张 曦(1984-), 女, 硕士, 研究方向为光电信息处理。E-mail: nicolezhangxi@yahoo.com.cn

收稿日期: 2006-10-23; **修订日期:** 2006-11-28

2 系统组成

激光主动成像探测系统是一个应用了激光技术、距离选通技术和微弱信号检测处理技术的综合系统。它一般包含3个部分:激光照明系统、信号处理与控制系统和主动成像系统。其系统组成如图1所示。激光照明系统由小型脉冲激光器和发射光学系统组成,为整个系统提供大视场同步均匀性照明,保证在一定距离深度范围内,将目标的全部或关键特征部位照亮,使其满足系统成像探测要求。信号处理与控制系统和主动成像系统完成高增益距离选通成像和目标检测、特征提取和图像信息处理,输出目标距离、位置、照度强弱(目标大小)等信息给设备平台的伺服系统,进行实时跟踪探测。

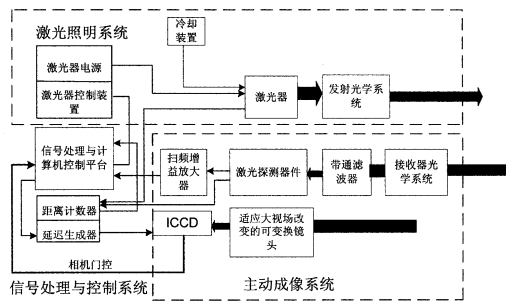


图1 激光主动成像探测系统组成

3 系统探测性能分析

3.1 调制对比度限制下的作用距离模型

激光主动成像系统的探测、发现目标能力与多种因素有关,它依赖于系统的MTF、系统的SNR、目标与背景的对比度以及目标相对于显示的张角。在SNR限制情况下,目标的调制对比度是决定系统作用距离的一个关键因素。

设 $E_{\text{target} \cdot \text{pix}}$ 、 $E_{\text{bac} \cdot \text{pix}}$ 分别为成像探测器上每个像素上接收到目标反射的激光能量和背景能量,将目标调制对比度定义为:

$$C_r = \frac{E_{\text{target} \cdot \text{pix}} - E_{\text{bac} \cdot \text{pix}}}{E_{\text{target} \cdot \text{pix}} + E_{\text{bac} \cdot \text{pix}}} \quad (1)$$

这里 $-1 \leq C_r \leq 1$ 。当目标反射信号为零时,照明情况下,也可能探测到目标,此时目标表现为亮背景下的暗目标。对比度阈值主要与信号处理器的处理能力有关。对跟踪测量系统,实际工程中要求目标和背景在靶面的调制对比度 $|C_r| \geq 0.1$ 。

设激光发射强度的空间分布为 $E(x, y)$,时间分布为 $s(t) = (\frac{t}{\tau})^2 e^{-\frac{t}{\tau}}$,式中 t 为时间, τ 为脉冲宽度,则激光发射强度写成 $I(x, y, t) = I_0 \cdot E(x, y) \cdot s(t)$,

光学系统透过率为 T_{optics} ,激光效率为 η_i ,距离门函数为 $g(t)$,当门全打开时, $g = 1$;脉冲重复频率为 PRF ,目标的激光雷达散射截面积为 σ ,接收器面积为 A_r ,接收光学系统焦距为 f ,成像探测器的空间分辨力为 N_p (lp/mm),发射光束立体角为 Ω_{laser} ,考虑大气衰减,设衰减系数为 τ ,则在测量时间 T 内,距目标距离为 R 处的成像探测器,每个像素上接收到目标反射的激光能量可以表示如下:

$$E_{\text{target} \cdot \text{pix}} = \tau^2 \cdot PRF \cdot T_{\text{optics}} \cdot \eta_i \cdot \frac{I_0 \int_{\text{target}} E(x, y) \cdot \rho(x, y) dx dy}{f^2 N_p^2 \cdot \Omega_{\text{laser}} R^2} \cdot \frac{A_r}{R^2} \cdot \int_0^T [g(t + 2R/c) + s(t + 2R/c)] dt \quad (2)$$

当脉冲个数为1, $g = 1$,激光发射的平均能量为 E_p ,目标的激光散射截面 $\sigma = 4\pi \int_{\text{target}} \rho(x, y) dx dy = 4\pi \rho A_{\text{target}} \cos \theta$, A_{target} 为空间目标有效面积。设激光束发散角为 θ_i ,接收光学系统口径为 D_r ,由立体角定义 $\Omega_{\text{laser}} = \frac{\pi}{4} \theta_i^2$ 和 $A_r = \frac{\pi}{4} D_r^2$,代入式(2)可得:

$$E_{\text{target} \cdot \text{pix}} = \frac{E_p T_{\text{optics}} \eta_i \sigma D_r^2}{4\pi f^2 N_p^2 \theta_i^2 R^4} \quad (3)$$

设背景在波长 λ 处的发光亮度为 L_λ ,滤光片的光谱范围为 $\Delta\lambda$,照明背景区的平均反射系数为 ρ_{bac} ,接收器的立体角为 Ω_r ,则太阳或漫反射背景光在成像探测器上引起的背景功率 P_{bac} 为:

$$P_{\text{bac}} = L_\lambda \cdot \Delta\lambda \cdot T_{\text{optics}} \cdot \frac{\rho_{\text{bac}}}{\pi} \cdot \Omega_r \cdot A_r \quad (4)$$

设接收视场角为 θ_r ,有接收器的立体角 $\Omega_r = \frac{\pi}{4} \theta_r^2$,

$A_r = \frac{\pi}{4} D_r^2$,代入式(4)可求得:在门控时间 $\Delta\tau$ 内,每个像素上,成像探测器接收到的背景能量 E_{bac} 为:

$$E_{\text{bac} \cdot \text{pix}} = \frac{\pi L_\lambda \Delta\lambda T_{\text{optics}} \rho_{\text{bac}} \theta_r^2 D_r^2 \Delta\tau}{16f^2 N_p^2} \quad (5)$$

根据调制对比度的定义式(1),由式(3)和式(5)求得调制对比度 C_r 为:

$$C_r = \frac{4E_p \eta_i \sigma - \pi^2 L_\lambda \Delta\lambda \rho_{\text{bac}} \Delta\tau \theta_r^2 \theta_i^2 R^4}{4E_p \eta_i \sigma + \pi^2 L_\lambda \Delta\lambda \rho_{\text{bac}} \Delta\tau \theta_r^2 \theta_i^2 R^4} \quad (6)$$

因此当调制对比度限制时,最大作用距离为:

$$R^4 = \frac{4E_p \eta_i \sigma (1 - C_r)}{\pi^2 L_\lambda \Delta\lambda \rho_{\text{bac}} \Delta\tau \theta_r^2 \theta_i^2 (1 + C_r)} \quad (7)$$

由式(7)看出,当系统的发射系统性能和 C_r 一定时, R 与接收系统的滤光片光谱范围 $\Delta\lambda$ 、曝光时

间(距离选通时间)、接收视场角 θ_r 和目标的 LRCS 有关。在统一的调制对比度要求情况下,曝光时间短,系统的视场角可以相对增大,从另一个角度说明激光主动成像探测系统由于选用距离选通技术,曝光时间可以比常规成像系统缩短几个数量级,因此具有很好的发现探测目标能力。另外,把“猫眼”目标作为镜面目标,相对于漫反射目标的 LRCS 有成倍增加,因此,基于“猫眼”效应的激光主动成像探测系统将有更强的远距离目标探测能力。

3.2 目标的激光雷达散射截面计算公式

3.2.1 “猫眼”目标

具有“猫眼”效应的光电设备称为“猫眼”目标。根据“猫眼”目标特性,可将其认为是镜面目标。下面根据镜面目标雷达散射截面的公式来估算“猫眼”目标的激光雷达散射截面。

假设激光垂直入射,接收光学系统直径为 D_s , 焦距为 f , 考虑到光电探测器与焦平面之间存在离焦量 ΔX , 来自远处并平行于光轴的光束经光敏面反射后有一部分被溢出孔径外,因此设对反射截面有贡献的猫眼有效孔径 D'_s 为:

$$D'_s = \frac{fD_s}{f+2\Delta X} \quad (8)$$

设 θ_i 为探测激光的光束发散角,则利用光路图和几何光学理论推得猫眼目标后向反射激光的发散角 $\theta_s = \theta_i + \frac{2\Delta XD_s}{f^2}$; 设目标有效照射面积为 A_s , 反射光束发散立体角为 Ω_s , 镜面目标反射率为 ρ , 根据镜面目标的激光雷达散射截面定义有:

$$\sigma = 4\pi\rho A_s / \Omega_s \quad (9)$$

将 $A_s = \frac{\pi}{4}D_s'^2$, $\Omega_s = \pi\theta_s^2/4$ 和 $\rho = \rho_s\tau_s$ (τ_s 为“猫眼”目标的光学系统透过率; ρ_s 为焦平面的表面反射率)代入式(9)可得:

$$\sigma = 4\pi\rho_s\tau_s^2 \frac{f^6 D_s^2}{(f+2\Delta X)^2 (f^2\theta_i + 2\Delta XD_s)^2} \quad (10)$$

3.2.2 漫反射目标

若不考虑“猫眼”效应,照明激光在目标表面发生漫反射,认为激光强度在目标表面的分布是均匀的,则将目标当作朗伯体考虑。对朗伯体而言有: $f_r = \rho_{2\pi}/\pi$, f_r 为目标的双向反射函数; $\rho_{2\pi}$ 为半球反射率。因此激光雷达散射截面 σ 为 (θ 为激光入射方向与 z 轴的夹角)^[1]:

$$\sigma = \int_A 4\rho_{2\pi} \cos^2 \theta dA \quad (11)$$

对朗伯圆柱体任意角度入射的激光雷达散射截面公式(θ 为激光入射方向与 z 轴的夹角):

$$\sigma = \pi\rho_{2\pi} A \sin^2 \theta + 4\rho_{2\pi} S_d \cos^2 \theta \quad (12)$$

式中, A 为照射面投影面积; S_d 为圆柱底面积。

3.3 仿真计算

3.3.1 目标特性分析

以假设的激光制导武器为目标例进行系统探测能力的仿真计算,将目标简化为高 10m, 底面半径为 1m 的圆柱体, 半球反射率为 $\rho_{2\pi} = 0.6$ 。目标上所携带的光电设备参数如下: 取光电探测器的焦平面反射率 ρ_s 为 0.3, 光学系统透过率 τ_s 为 0.7, 焦距 f 为 200mm, 接收孔径直径 D_s 为 50mm, 离焦量 ΔX 为 0.1mm, 系统发射激光光束发散角 θ_i 为 2.5mrad。

考虑目标携带有光学设备,符合“猫眼”目标的特性,根据式(10)求得“猫眼”目标的激光雷达散射截面 $\sigma = 609.44\text{m}^2$; 若认为目标是漫反射目标,按式(12)估算漫反射目标的激光雷达截面,其任意角度入射的激光雷达散射截面极坐标图如图 2 所示。估算时取最大值($\theta = 90^\circ$ 时),则漫反射目标的激光雷达散射截面 $\sigma' = 37.70\text{m}^2$ 。

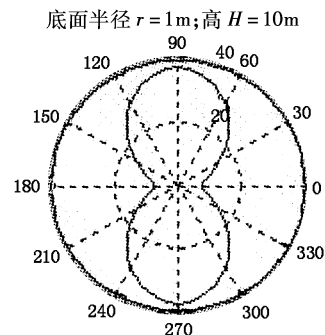


图2 漫反射目标 LRCS 极坐标图

3.3.2 数值计算与结果分析

取系统和背景参数如下: 单脉冲平均能量 E_p 为 100J, 选通门宽度 $\Delta\tau$ 为 50ns, 效率因子 η_i 为 1, 接收视场角 θ_r 为 22mrad, 光学滤波片波段 $\Delta\lambda$ 为 10nm, 光束发散角 θ_i 为 2.5mrad, 照明背景区的平均反射系数 ρ_{bac} 为 0.01, 背景在波长 λ 处的发光亮度 L_λ 依不同的天气条件而不同, 取一般情况下的值 $3\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。将系统的调制对比度 C_r 限制在临界值 0.1。将上述参数和“猫眼”目标的激光雷达散射截面值代入式(7)求得系统探测“猫眼”目标时的最大作用距离 $R = 816.92\text{km}$; 同理可求得系统探测漫反射目标时的最大作用距离 $R' = 407.41\text{km}$, 则

(下转第 411 页)

主激光分离,可以通过开关进行隔离,严重的笔形光束形成的自激振荡,由于其指向性好,会在主光束近场上带来局部强区,而且会一直伴随主激光传输,因此笔形光束形成的自激振荡的抑制成为重点,在其他文章中有详细的分析。

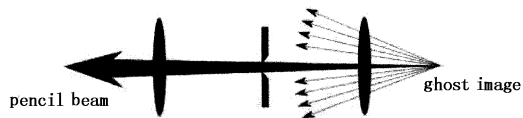


图4 笔形光束的形成

Fig.4 illustration of the pencil-beam

2.4 反激光分析

如图5所示,若鬼光束的鬼点在滤波器小孔板上,而且刚好通过小孔,就会形成方向性很好的反激光,当然系统中都有一定的隔离措施,但由于放大器的再次放大,一旦隔离不住,后果将是灾难性的,因此必须做好反激光的处理,在实验中小心每个元件,务必使其偏离滤波器小孔,截止其传输。其形成的另一个重要危害是形成自激振荡,在其他文章中有详细分析。

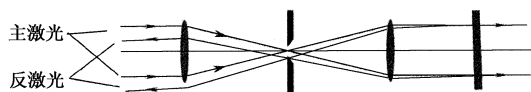


图5 反激光的形成

Fig.5 illustration of the back laser

(上接第407页)

当系统参数一定时,探测“猫眼”目标时的最大作用距离与探测漫反射目标的最大作用距离的比值 $\frac{R}{R'} = 2.0052$ 。图3表示的是系统最大作用距离与 LRCS 的关系。

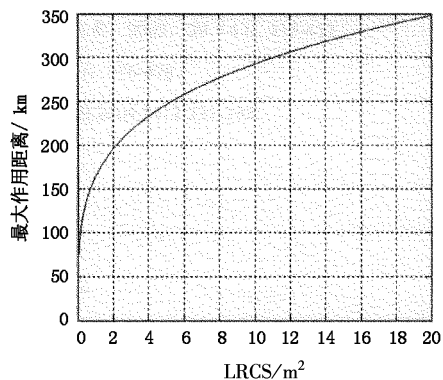


图3 最大作用距离与 LRCS 的关系曲线

4 结论

- (1)与普通漫反射目标相比,激光主动成像探测系统用于探测“猫眼”目标时作用距离会成倍增加;
- (2)目标的激光雷达散射截面越大,系统的作

3 总结与讨论

通过以上理论分析与实验研究,基本明晰了复杂高功率系统中鬼光束的产生、传输与造成的危害,并探索了规避危害的措施。鬼光束在传输过程中,由于透镜的介入形成鬼点、笔形光束以及反激光等现象对系统带来很大危害,解决的基本措施是膜层质量的提高,另外根据具体境况,进行纵向规避和横向规避是鬼光束规避中现实而有效的手段。总而言之,鬼光束的规避需要在理论上详细分析,在实验上小心处理,二者缺一不可。

参考文献:

- [1] W 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 华光,译. 北京:科学出版社,1983.
- [2] R E English, C W Laumann, J L Miller, et al. Optical system Design of the National Ignition Facility[C]. 1998 International Optical Design Conference, paper LFB1.
- [3] R E English, J L Miller, J Schweyen. Ghost reflection analysis for the main laser of the National Ignition Facility [C]. 1998 International Optical Design Conference, paper LFB2.
- [4] 谭吉春,景峰,朱启华,等. 多通放大器腔内杂散光[J]. 强激光与粒子束,2000,12(2),159-163.
- [5] 李银柱,李良钰,戴亚萍,等. 光装置中的鬼点反射分析[J]. 中国激光,2001,28(8),677-680.

用距离越远,目标越容易被探测到,因此在战争中减小我方目标的激光雷达截面有利于实现“隐身”;

(3)本文给出的调制对比度限制下的作用距离模型可估算系统的最大作用距离,通过模型可得:发射激光平均能量,系统的调制对比度以及目标的激光雷达散射截面等都是影响系统探测性能的重要因素。综合考虑所有因素来最大程度地优化系统性能是今后工作的重点。

参考文献:

- [1] 杨洋. 激光雷达标准目标散射截面的研究[J]. 光学技术,2000,26(4):344-347.
- [2] Ove Steinvall, et al. Gated viewing for target detection and target recognition[C]//Proc SPIE,1999,3707:432-448.
- [3] Lena Klasen, et al. Aided target recognition from 3-D laser radar data[C]//Proc SPIE,2004,5412:321-331.
- [4] 赵勋杰,等. 基于“猫眼”效应的激光侦察技术及其在军事上的应用[J]. 光学技术,2003,29(4):415-417.
- [5] 谷锁林,孙华燕,等. 空中目标的激光主动探测[J]. 激光与红外,2005,35(7):476-478.
- [6] 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.