

猫眼效应用于激光主动探测技术的研究现状与发展趋势

赵延仲¹ 孙华燕¹ 宋丰华¹ 谷锁林²

(¹ 装备指挥技术学院, 北京 101416; ² 中国酒泉卫星发射中心, 甘肃 酒泉 732750)

摘要 基于猫眼效应的激光主动探测技术是应用于激光武器系统中的一项新型技术, 其中最为关键的问题是如何准确描述被探测光学目标的猫眼效应反射特性。介绍了几种成功应用猫眼效应的车载、便携、舰载和机载激光武器系统, 综述了一些有代表意义的研究方法和结果。最后阐述了目前猫眼效应用于激光主动探测技术存在的主要问题, 并指出当前的发展趋势: 多体制探测、基于猫眼效应反射光的衍射干涉特性获取光学目标特征参数、基于猫眼系统对探测激光的调制作用建立闭合回路跟踪系统、随机大气对猫眼效应反射光的影响等。

关键词 探测器; 激光技术; 激光主动探测; 猫眼效应; 反射特性

中图分类号 TN249

OCIS 280.4788 140.3580

文献标识码 A

Research and Prospect of Cat-Eye Effect Used for Active Laser Detection Technique

Zhao Yanzhong¹ Sun Huayan¹ Song Fenghua¹ Gu Suolin²

(¹ Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)
(² China Jiu Quan Satellite Launch Center, Jiuquan, Gansu 732750, China)

Abstract Active laser detection based on cat-eye effect is a new type of technique used in laser weapons. The key technology is how to describe the reflection characteristics of cat-eye effect of optical targets exactly. Several vehicle-borne, portable, ship-borne and air-borne laser weapons using cat-eye effect are introduced. Representative research methods and results are reviewed. Finally, the existent problems of cat-eye effect used in active laser detection technique are presented, and the development prospects are also discussed including the multi-system detection, the optical target parameters acquiring technique based on diffraction and interference characteristics of cat-eye effect, the closed-loop active tracking system based on the modulation effect of cat-eye system on the detection laser, and the effect of stochastic atmosphere on cat-eye effect reflected light.

Key words detectors; laser technique; active laser detection; cat-eye effect; reflection characteristics

1 引言

猫眼效应原理在军事领域的首次应用是 20 世纪 80 年代激光致盲武器的瞄准定位系统。前苏联、美国、法国的科研人员提出激光武器可利用光学目标的猫眼效应原理, 搜索敌方目标的光学设备和光电传感器, 确定其位置, 并实施准确攻击^[1]。由于猫眼效应反射光的原路返回特性和准直特性, 相对于被动探测技术, 激光主动探测技术可以具有较高的探测回波强度: 一旦我方发射的激光进入了敌方光电设备的光学窗口, 产生的猫眼效应反射光强度将比一般漫反射强度高 2~4 个量级^[2]。此外, 激光主动探测系统可以具有更高的定

收稿日期: 2010-04-12; 收到修改稿日期: 2010-05-12

基金项目: 国防预研基金(TY7131008)和“十一五”国防预研基金(513210902)资助课题。

作者简介: 赵延仲(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事激光主动探测和光电信息处理等方面的研究。

E-mail: zhaoyan198@tom.com

导师简介: 孙华燕(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事激光主动探测和光电信息处理等方面的研究。

E-mail: shy221528@vip.sina.com

位精度和更快的探测速度,并可令敌方光学侦查设备对我方战略目标的侦查动作得到快速告警。

近年来,由于技术发展和应用需求牵引,在反恐、维和以及现代战争中,利用猫眼效应对光学目标进行探测定位的技术在国内外受到越来越多的重视^[3~15],尤其是被探测目标的猫眼效应特性研究逐渐成为热点^[16~31],其研究方法逐渐由传统的测距对比法^[2~6]、几何光学法^[17~20]向物理光学和矩阵光学等方向^[21~30]转变,应用研究方向也逐渐深入到对光学目标的特征参数识别方面^[30,31]。这些技术的发展可满足敌方目标动作特征侦察等现实军事需求,进一步丰富激光主动探测系统的信息获取能力,提高其智能性。但是,在技术迅速发展的同时,对光学目标猫眼效应的理论及应用研究重复性较多,方法创新较少,使得实用的武器系统和技术改进较为缓慢。因此,有必要对激光主动探测技术的主要基础——光学目标猫眼效应的研究现状与发展趋势进行综述,以便为进一步的技术发展理清思路、开拓方向。本文首先介绍猫眼效应的主要原理和几种典型武器系统,然后回顾近年来具有阶段性意义的研究方法及结果,理清其逐步发展过程,最后梳理存在问题和发展趋势。

2 猫眼效应原理

在猫眼的视网膜后面,有多达 15 层的特殊细胞,可像高效能镜子般收集四周光线,构成一个能保存光线的反射层。当黑夜中猫的瞳孔张得很开时,光线能从反射层按原路反射回来,发出特有的绿光或金光,就产生了典型的猫眼效应现象,如图 1 所示。

如同猫的眼睛一样,所有的成像或探测用光学镜头都是通过一定口径的光学系统将接收到的光信号汇聚到光电传感器上。光电传感器在对汇聚的光信号进行吸收、转换的同时,会反射一部分光信号。光电探测器在对光信号进行吸收、转换的同时,会将一部分光信号反射。所以,当激光束进入光学系统视场时,根据光路的可逆性,从探测器反射的光束会按原光路传递回去,这种原路返回性不受入射角的影响,仅是在斜入射时反射光束束宽受到限制,此即光学镜头的猫眼效应原理,光线传输过程如图 2 所示。另外,由于镜头对反射光的准直作用,反射光如同从激光腔发出的激光束一样,具有较小的发散角。

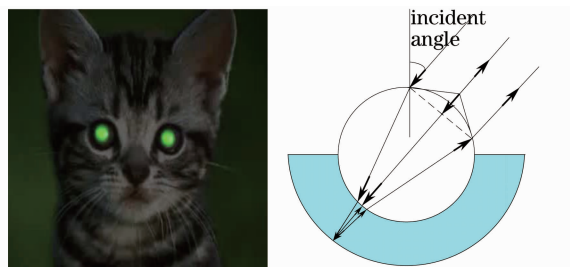


图 1 猫眼反光现象及其反射光线示意图

Fig.1 Reflection phenomena of cat-eye and the reflected light

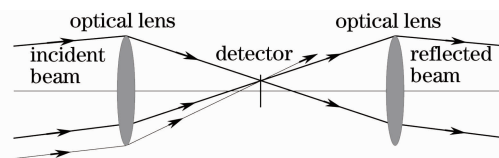


图 2 光学镜头的猫眼效应原理示意图

Fig.2 Cat-eye effect of optical lens

3 应用猫眼效应的典型武器系统

3.1 车载激光武器系统

最早应用猫眼效应的实用武器系统是美国 20 世纪 80 年代研制的“鲑鱼”激光武器系统和前苏联的“拉瑟”车载激光致盲武器系统^[7,8]。这两个系统均采用低能脉冲进行扫描,利用敌方军用光学设备的猫眼效应原路返回光来进行定位后进行攻击。

“鲑鱼”车载激光武器系统所用激光二极管抽运的板条形 Nd:YAG 激光器高功率短脉冲激光能量达 0.1 J 以上,可破坏 8 km 距离处的光电传感器,并能伤害更远处的人眼。该系统作为一个车载自卫激光武器系统安装到布雷德利战车上,如图 3 所示,用于攻击原苏制坦克的光电装置。由于应用了猫眼效应,射手能同时对几辆坦克或装甲运输车进行定位,发射激光使其光电传感器致盲,从而失去机动能力,然后向它们发射反坦克导弹,从而大大提高了命中率。由于 1991 年“沙漠风暴”行



图 3 “鲑鱼”激光武器系统

Fig.3 Stingray laser weapon system

动中地面战斗仅进行了 100 h,“鲑鱼”激光武器系统在作战中未执行发射激光致盲的主动攻击任务,但成功完成了利用猫眼效应为其他武器系统搜索和确定敌方坦克和战车位置的任务^[7]。

1988 年,俄罗斯用于野战试验的 FST-1 型坦克装上了称为“拉瑟”的激光致盲武器系统。该系统亦是应用猫眼效应搜索目标,然后用强激光致盲,毁伤敌方观测人员的眼睛或观测器材,作用距离 6~10 km^[8]。

3.2 激光反狙击手探测系统

最早的激光反狙击手探测系统是 1994 年法国激光工业公司研制的 SLD400 (surveillance and sniper detection laser system)。该系统利用狙击手的瞄准望远镜比周围背景反射能力强的特点,将猫眼效应成功应用。它使用功率 200 W 的近红外半导体激光器,波长 0.8~0.9 μm ,探测距离白天为 1 km,夜间为 4 km(雾天除外)。后来 CILAS 又推出的 SLD 500 白天探测距离大于 1 km,夜晚大于 3 km,可通过高分辨率可见光或红外摄像机来对目标成像,并提供实时、全景、类似于雷达的 PPI 显示、GPS 威胁位置信息,如图 4 所示^[9,10]。SLD 系统一经面世就发挥了强大作用,1992 年前驻萨拉热窝的法国维和部队短时间内就有 80 多人死于狙击手枪下,而在 SLD 系统应用于波黑战场的随后几年内没有因为狙击手损失一名士兵。

俄罗斯研制出类似 SLD 的激光反狙击手探测系统,名为 PAPV 便携式激光对抗系统,如图 5 所示。该系统重 56 kg,携带方便,不仅能探测、压制狙击手,还能对抗配备光电装置的作战系统如坦克、攻击直升机等。它使用一个 2 W 的小功率激光器探测光电系统,可发射大功率激光脉冲(波长 1.06 μm 为 1.5 J,波长 0.53 μm 为 0.2 J),作用距离约 0.3~1.5 km^[11]。

英国研制的名为 ELLIPSE 的反狙击手激光监视设备类似一个装在三脚架上的雷达测速仪,它用激光束监视受保护区域,一旦扫描到任何镜头,就可以产生原路返回的猫眼效应反射光。将几台 ELLIPSE 部署在政治集会地或体育场的重要人物周围,借助使用 GPS 卫星导航的三角测量法发现狙击手的瞄准具。而且其负责人表示,新闻记者镜头和双筒望远镜等无害反射可以被确认并剔除^[12]。

3.3 舰载后向激光扫描仪

加拿大近些年研制了舰载后向激光扫描仪(GLARES),用以监视海岸或海面光学威胁源,如图 6 所示。该系统可以监视大部分正在观察己方的望远镜、潜望镜、激光测距仪等各类光学威胁源,也可以用于地面平台。系统工作时,首先利用编码激光束扫描可疑区域,通过编码分析估计威胁源的大致范围,然后驱动门控相机对目标区域进行选通成像,进一步通过视频跟踪将威胁源锁定至中心区域,达到定位目的。GLARES 实际上是采用了猫眼效应原理的激光主动照明技术,通过选通成像有效抑制了大气散射和背景干扰,大大提高了探测和定位能力,但是其能否探测的关键仍取决于目标威胁源的猫眼效应反射率^[13]。

3.4 机载激光导弹防护系统

2006 年的第 6 届欧盟会议上,欧盟 7 国提出 CASAM 国际航空反恐安全计划^[14]。该计划的核心是 DIRCM 红外定向对抗系统,其中利用了猫眼效应原理的

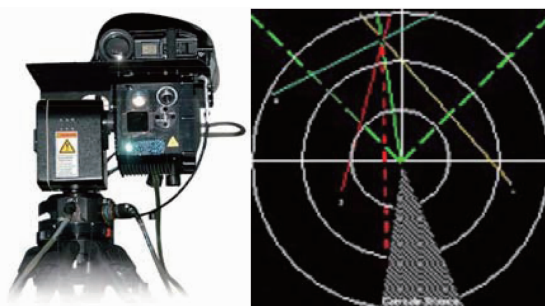


图 4 SLD500 及其 PPI 显示图像
Fig. 4 SLD500 and its radar screen view



图 5 PAPV 便携式激光对抗系统
Fig. 5 PAPV cellular laser countermeasure system

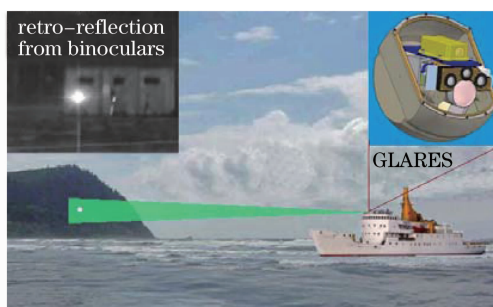


图 6 舰载后向激光扫描仪及其侦察过程
Fig. 6 GLARES and its reconnoitre process

机载激光防护系统(FLASH)主要由法国和德国联合研制,专门用于预警并攻击携带有红外导引头的导弹。其工作过程如图7所示,首先微波成像合成孔径雷达发现导弹来袭,然后红外相机进一步确认,再利用调制激光束跟踪来袭导弹红外导引头,解调出其猫眼效应反射光的调制特征,识别威胁目标并跟踪锁定,最后闭环驱动定向激光束攻击导弹导引头中的传感器。该系统在将猫眼效应成功应用到动目标探测的同时,能够达到识别目标威慑特质的功能^[15]。

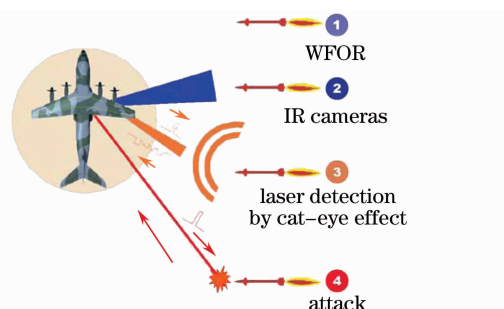


图7 机载激光导弹防护系统工作过程

Fig.7 Work process of FLASH system

4 猫眼效应研究方法 with 结果

基于猫眼效应的激光主动探测技术的发展特征是系统先行、技术跟进。该技术能够早在20世纪80年代就得到应用,一方面是国外的器件优势较国内突出,另一方面是因为初步的应用原理较为简单,即通过主动发射激光束照射目标,用探测器接收其猫眼效应反射光,由于其能量强度远远高于背景反射光,即可发现目标并锁定位置。但是进一步的需求要求准确判断猫眼效应反射光与背景辐射光的区别,以及通过猫眼效应反射光的性质来识别目标特征,因此对猫眼效应本身的原理研究才逐步成为热点。

4.1 猫眼效应应用可行性研究方法

基于猫眼效应的激光主动探测技术要解决的的首要问题,是利用猫眼效应原理从漫反射背景中识别出镜头目标,最早的探测可行性研究方法是激光测距对比法:通过比较对漫反射目标和猫眼目标的测距能力来确定探测可行性^[2~6]。测距机探测猫眼目标与漫反射背景的回波功率公式分别为^[3,4]

$$P_{As} = 16 \times 0.838 P_0 \frac{A_s A_r}{\pi^2 \theta_i^2 \theta_s^2 R^4} \rho_s \tau^2 \tau_i \tau_s \tau_r, \quad (1)$$

$$P_{Ad} = 4 \times 0.838 P_0 \frac{\rho A_r \tau^2 \tau_i \tau_r}{\pi \theta_i^2 R^2}, \quad (2)$$

式中0.838为艾里斑第一个暗条纹内的能量百分比, P_0 为发射激光功率, R 为探测距离, A_s 为猫眼目标光学镜头的有效接收面积, A_r 为接收系统的光学镜头的面积, θ_s 为反射光束发散角, θ_i 为发射激光发散角, ρ_s 为镜头目标的反射系数, ρ 为漫反射系数, τ_i, τ_s, τ_r 分别为发射光学系统、目标光学系统和接收光学系统的透射率, τ 为激光单程大气透射率。将(1)、(2)式相比,可得猫眼目标回波功率和漫反射大目标的回波功率比为

$$C = \frac{P_{As}}{P_{Ad}} = \frac{4 A_s \rho_s \tau_s^2}{\pi R^2 \theta_s^2 \rho}. \quad (3)$$

从(3)式可以看出,随着距离的增大,猫眼目标回波相对背景回波的对比如来越小。因此激光测距对比法有一定的局限性,而且不能直观地测量光斑的图像、强度分布,不易确定后向反射光的实际实用性。为此,袁永华等^[21]针对专门的某红外系统,对入射激光的后向反射光特性进行了形成机理和特性分析,得到了宽光束入射条件下该红外系统的光强分布。图8所示为从外到里依次为调制盘前后表面和锗滤光片表面的反射光分布。研究同时指出,只有焦平面的回射激光具有远距离传输特点,回射激光信号的包络频率就是调制盘扫描频率,利用这些优点在红外对抗技术中选择最佳的主激光参数,控制主激光发射,可实现激光对红外系统的探测、跟踪闭环和识别。图9所示为其利用 $0.53 \mu\text{m}$ 激光辐照红外系统产生回射激光信号,确认瞄准激光进入红外光学系统视场内,并触发 $1.06 \mu\text{m}$ 主激光对红外系统有效干扰的典型实验结果。

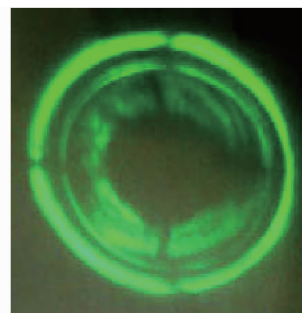


图8 某红外系统的反射光强分布

Fig.8 Distribution of the reflected light of a infrared system

C. Lecocq等^[1]则利用激光主动探测并成像的方法,

将存在猫眼目标的主动探测图像与没有猫眼目标的背景图像相减,可以方便的识别出猫眼目标。

随后的研究利用 $0.53\ \mu\text{m}$ 半导体激光,对一口径为 $100\ \text{mm}$ 的卡塞格伦式红外系统(未含调制盘)和一口径为 $36\ \text{mm}$ 的可见光摄像系统进行了猫眼效应反射光斑测试,如图 10 和 11 所示^[22,23],测试距离分别为 $60\ \text{m}$ 和 $30\ \text{m}$ 。实验鉴别了猫眼效应反射光与其他反射光的不同特点,表明了猫眼效应反射光不受入射角所影响的原路返回性,同时指出了入射角和焦距对反射光光强分布有较大影响,决定着猫眼效应反射光的衍射分布模式和畸变规律。实验结果表明光电装备所用的红外系统的猫眼效应反射特性远远优于普通的可见光摄像系统,距离越远这种优势越明显,原因归结于普通摄像镜头视场较大、内含透镜元件较多、成像距离较近。

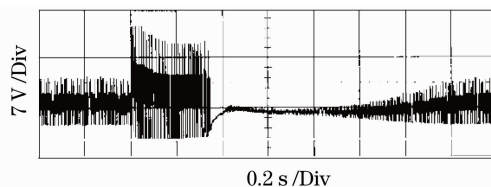


图 9 主激光干扰实验结果

Fig. 9 Interference experimental results of host laser

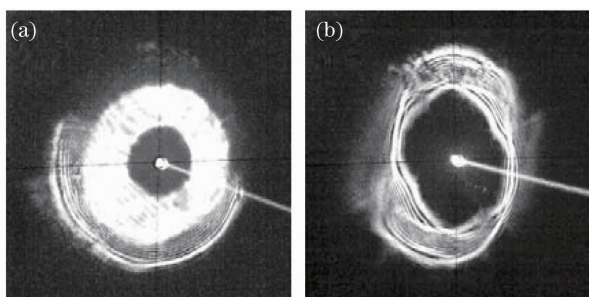


图 10 某卡塞格伦系统反射光斑,入射角为(a) 0° , (b) 0.1°
Fig. 10 Distribution of the reflected light of a Cassegrain lens when the incident angle is (a) 0° , (b) 0.1°

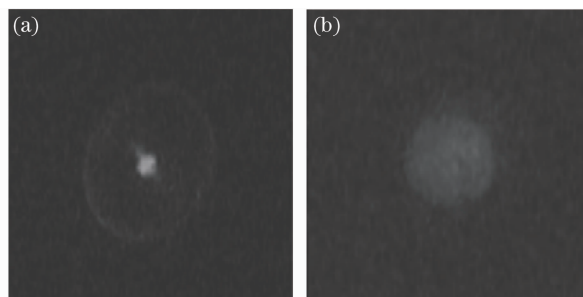


图 11 某摄像系统反射光斑,焦距为(a) $12\ \text{mm}$, (b) $72\ \text{mm}$
Fig. 11 Distribution of the reflected light of a vidicon lens when the focus is (a) $12\ \text{mm}$, (b) $72\ \text{mm}$

4.2 几何光学研究方法

为了进一步研究猫眼效应的反射特性规律性,蒋治国等^[18]提出了运用几何光线追迹方法对猫眼效应反射光进行研究,并对影响猫眼效应的离焦量、反射面倾斜、相对孔径等因素进行了分析。卞学丽等^[19]则进一步运用该方法深入分析了离焦量的影响,并指出了前向离焦和后向离焦的不同点。葛成良等^[17]的实验验证了部分规律,他们利用小功率 He-Ne 激光器对激光照射在 CCD 视场不同位置时的情况进行了实验,测得反射率约为 1% 。邵立等^[20]基于葛成良的实验方法进行改进,利用透镜+硅片来模拟猫眼系统,利用小功率 He-Ne 激光器实验验证了几何光学法^[18,19]得出的入射角、离焦量对猫眼效应反射率的影响规律,实验测得的反射率约为 0.5% 。本课题组利用百瓦级 $0.53\ \mu\text{m}$ 半导体激光器对一实际的普通可调焦摄像镜头进行了激光辐照实验^[24],得到了猫眼效应绝对反射率与入射角、焦距、相对孔径的关系,不同激光功率时反射率在 $17\% \sim 35\%$ 之间,这说明了猫眼效应反射率与探测激光功率具有较大关系,而不是几何光学法研究假设的定值。各个参数的影响规律如图 12 所示^[20,24]。

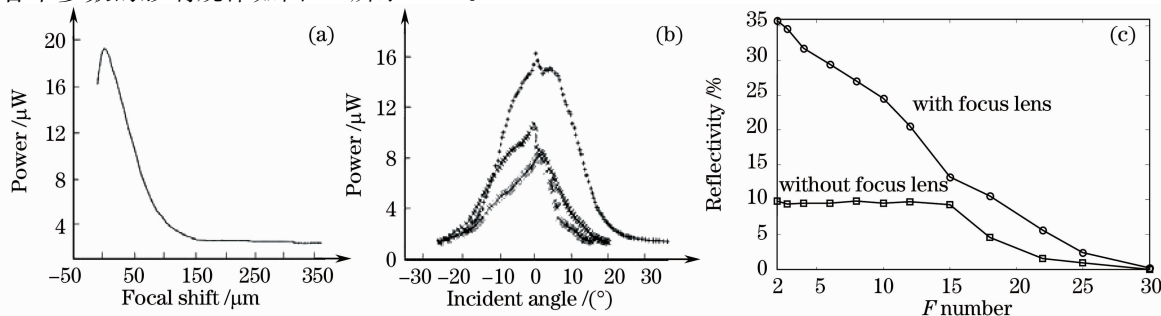


图 12 实验得到的(a)离焦量,(b)入射角和(c) F 数对猫眼效应反射效率的影响

Fig. 12 Reflection efficiency of cat-eye effect affected by the (a) focal shift, (b) incident angle and (c) F number in experiment

4.3 物理光学研究方法

几何光学方法可以较为直观地描述猫眼效应反射光的可探测范围和反射光回波功率比、发散角等特性,但只是一种近似的方法,无法得到远场条件下的确切描述。因此,借助更为准确的计算工具的仿真方法逐渐被引入到猫眼效应研究中。

本课题组采用 Zemax 建立了光学镜头模型和探测激光模型,按照高斯光束透镜变换及衍射的物理光学传输规律,仿真得到了远场条件下的反射光特征分布与入射角、离焦量、相对孔径、镜头结构等参数的关系^[25~26]。Zemax 利用衍射传输原理,首先使用数值阵列对入射高斯光束进行建模,然后建立的光束波前被分成点阵后,在 Zemax 镜头模型中依次穿过所有面,通过每一个面的传播都按照衍射来计算,并根据菲涅耳数来确定传播应符合菲涅耳衍射还是夫朗和费衍射规律^[27]。这种仿真分析方法可以得到较为准确的衍射分布,但是数值分析运算速度较慢,容易出错,且没有解析公式表达,所以不易描述各个参数对反射光特性影响的物理意义。

因此本课题组进一步提出了基于 Collins 积分公式和矩阵光学的物理光学传输分析方法^[28~31],得到了倾斜离轴高斯光束通过含有 $n-1$ 任意个等效光阑的猫眼光学系统的解析传输公式^[29]

$$E_n(y, z) = \sqrt{\frac{ik}{2\pi b_1}} \cdots \sqrt{\frac{ik}{2\pi b_n}} \frac{\sqrt{\pi}}{P_1} \exp\left(-ik \frac{d_n y_n^2}{2b_n}\right) \exp\left(\frac{\Delta y'^2}{\omega_0^2} - \frac{k^2 Q_1^2}{4b_1^2 P_1^2}\right) \sum_{j_2=1}^{10} F_{j_2} \frac{\sqrt{\pi}}{P_2} \exp\left(-\frac{k^2 Q_2^2}{4b_2^2 P_2^2}\right) \times \cdots \sum_{j_{(n-1)}=1}^{10} F_{j_{(n-1)}} \frac{\sqrt{\pi}}{P_{n-1}} \exp\left(-\frac{k^2 Q_{n-1}^2}{4b_{n-1}^2 P_{n-1}^2}\right) \sum_{j_n=1}^{10} F_{j_n} \frac{\sqrt{\pi}}{P_n} \exp\left(-\frac{k^2 (y_n - Q_n)^2}{4b_n^2 P_n^2}\right), \quad (6)$$

$$Q_n = \frac{ib_n k Q_{n-1}}{2^2 b_{n-1} P_{n-1}^2}, \quad P_n^2 = \frac{ika_n}{2b_n} + \frac{ikd_{n-1}}{2b_{n-1}} + \frac{k^2}{4b_{n-1}^2 P_{n-1}^2} + \frac{G_{j_{(n-1)}}}{q_{n-1}^2}, \quad (7)$$

$$Q_1 = CL + \frac{2i\Delta y' L}{\omega_0^2 k}, \quad P_1^2 = \frac{1}{\omega_0^2} + \frac{ik}{2L}, \quad (8)$$

式中 a_n, b_n, d_n 分别为第 n 个区间的传输矩阵元素, C 为倾斜系数, L 为探测距离, Δy 为探测激光束在猫眼系统处沿 y 方向的离轴量, $\Delta y' = \Delta y - CL$, ω_0 为输入激光束束腰半径, q_{n-1} 为第 $n-1$ 个等效光阑的半径, F_{j_n} 和 G_{j_n} 分别为将光阑窗口函数展开为有限个复高斯函数之和的展开系数和复高斯函数系数。

4.4 猫眼逆反射器的研究与应用

对于猫眼效应原理本身的研究而言,作为非合作目标的光学镜头与作为合作目标的猫眼逆反射器^[32,33]有共通性,两者的理论研究方法可以相互转换和支持。比如葛成良等^[34]研究的超视距对准,实际上类似于针对非合作光学镜头的斜入射条件下猫眼效应反射光特性研究。猫眼逆反射器与光学镜头的反射特性差别主要在于:

- 1) 猫眼逆反射器作为合作目标,已经设计好较大的接收角,因此其猫眼效应反射特性对入射角不敏感;
- 2) 光学镜头作为非合作目标,其猫眼效应反射特性则较差,原因在于其接收角较小,还有探测器反射、光学系统像差、孔径衍射、镜头构型、镜头内特殊光学元件等因素,使得非合作光学目标的猫眼效应反射特性远远复杂于猫眼逆反射器。

猫眼逆反射器作为逆向调制器在空间光通信中的应用^[35~37],与基于猫眼效应的激光主动探测技术应用具有相似性。W. S. Rabinovich 等^[37]一直致力于利用猫眼逆向调制器来实现空间光信息传输,目前他们利用多量子阱阵列猫眼逆向调制器可以成功实现 7 km 距离 45 Mb/s 的信号传输。该猫眼逆向调制器视场角由光学系统视场和调节器共同控制,最高可达 30° ,如图 13 所示^[35]。得到的信号返回率与入射角的关系如图 14 所示^[36],距离越远信号返回率越低,相应有效视场角越小,该规律与光学镜头猫眼效应反射率与入射角的关系相仿。这里的猫眼逆向调制器与光学镜头一样,主要由光学系统和反射镜组成,不同的仅仅是加入了调制器。由于其视场角远远大于光电设备用光学镜头,且反射镜反

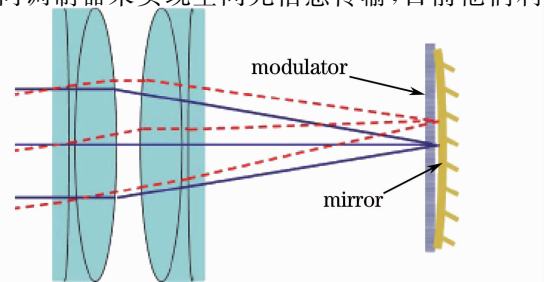


图 13 猫眼逆向调制器

Fig. 13 Cat's eye retro-reflector

射率较高,所以可覆盖范围较大,易对准,因此应用较为成熟。这种相似性进一步说明了普通光学镜头的猫眼效应反射光远距离应用的可行性。

5 存在问题及发展趋势

目前猫眼效应的应用研究主要面临的是理论转化应用的一系列实际问题。虽然国外的实用系统早在 20 世纪 80 年代就已经实现主动探测能力,但是进一步的目标敌我识别和参数信息获取能力不足。因此总结了下面存在的几个问题,并分析其解决方法和发展趋势。

首先,激光主动探测技术要得到较快发展,必须与其他多类探测体制相结合,使之作为已有探测技术的一种有效补充,使得在硬件系统最小的前提下达到最优资源整合。已有各种探测体制获得的多源信息与基于猫眼效应原理所获得的信息具有很多互补性,例如基于猫眼效应的激光主动探测系统可探测范围较小,但其探测精度较高,定位能力较强;被动探测技术探测精度不高,但是可探测范围较大;偏振探测技术可实现某些隐身目标探测;激光主动照明可实现图像识别等。这些体制协同动作,将可以得到更为有效的信息,并达到数据的相互支持和利用,实现最大程度的信息融合。随着现今各种激光主动探测技术的日益成熟,其信息融合技术研究亦将逐步深入。

其次,激光主动探测系统在获取到含有猫眼目标的图像或信号后,如何有效地判断是否含有猫眼目标,以及是否为威慑目标,是一个需要解决的关键问题。例如,SLD 系统就面临着如何判断狙击手目标与记者镜头的混淆问题,在战场上则只能依靠攻击手的经验来进行^[9,10]。如今,战场上出现的光电装备日益增多,如何更有效地分析目标光学镜头的类型和性质,直接决定着下一步攻击动作的正确性。研究表明,猫眼效应反射光的某些特性参数与目标特性参数具有对应的规律关系,例如光强分布模式、发散角、畸变特征、衍射效应等。因此研究猫眼效应反射光的干涉和衍射特性是可能达到目标识别的理论基础。文献[38]已进行了一些初步研究,这相似于目前已应用非常广泛的干涉衍射测量技术^[39~41]。进一步,通过建立目标特性与反射光特性之间的对应映射关系,通过数据库的积累和学习,可以实现对光学目标的分类,达到识别目标类型及威胁性质的目的。

另外,研究猫眼目标系统对探测激光的调制作用。将猫眼目标看作是整个激光主动探测回路的一个调制器件,相似于猫眼逆反射器应用于空间光通信。虽然猫眼逆反射器是可控的合作目标,其起到调制作用的是调制器,但是猫眼目标这种非合作目标的调制作用与其本质相同。猫眼逆向调制器主要靠其调制器来调制信号,本身对入射角不敏感,光学系统的影响作用不大。而猫眼目标系统本身会有倾斜、调焦、调制盘等因素的存在,使得其对猫眼效应反射光特性的调制作用更加复杂,通过发射信息和接收信息的对比处理,可以解调出猫眼目标系统所起到的调制作用。而且,猫眼目标系统的调制作用不仅是时间频谱上的,还可以是空间频谱上的,基于角谱衍射理论^[42]来研究猫眼目标系统对入射激光的滤波变换作用等,可以获得更多的有效信息。进一步,可以通过对入射激光加载信息,根据猫眼目标系统的调制作用建立闭合回路来调节加载信息,寻找其映射关系。

最后,对猫眼效应畸变反射光在回程传输中受到的大气湍流影响研究。探测激光在进入猫眼目标系统之前就已经受到大气湍流的影响,虽然这方面的研究工作已经很多,但由于猫眼效应反射光本射就是畸变光束,其回程传输过程中相位畸变特征的变化不能简单地认为是双程叠加的过程。由于猫眼效应反射光可以看做是由目标系统发射的激光束,其各种特征的定义和变化和激光器产生的各类光束有类似性,尤其是其畸变特征可能反映的是某类特殊光束所具有的特征。近年来,各类光束在湍流大气中的传输特性研究是一个较为热门的研究方向,包括厄米-高斯光束^[43]、不规则中空光束^[44]、相干合成光束^[45]、平顶光束^[46]等。这些研究主要基于广义惠更斯-菲涅耳原理、平均光强公式等,可以得出其在湍流大气传输过程中的光强分布变化、光束扩展、峰值下降、模式改变等特性。因此,可以通过类比这些光束与猫眼效应反射光束的产生机理,将其传输研究方法用于猫眼效应反射光在湍流大气中的回程传输研究。

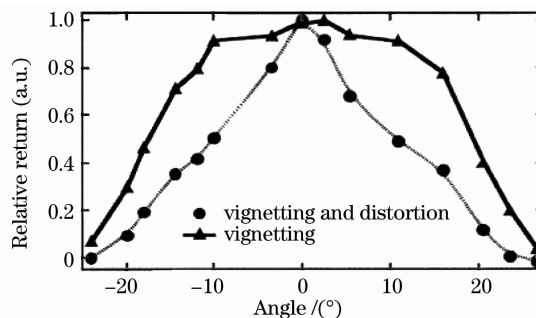


图 14 信号返回率与入射角的关系

Fig. 14 Relative return affected by the incident angle

6 结 论

综述了国内外近些年来利用猫眼效应原理对光学目标进行激光主动探测的研究进展,列出了几个典型的武器系统,然后着重于分析猫眼效应原理本身的研究方法,主要介绍了猫眼效应可行性研究方法、几何光学研究方法、物理光学研究方法、猫眼逆反射器的研究与应用等几个方面。通过对这些方法的适用性分析及其所得结论的探讨,指出了目前猫眼效应理论用于激光主动探测技术存在的主要问题,以及其发展趋势,包括多类探测体制结合、基于猫眼效应反射光的衍射干涉特性进行光学目标识别、基于猫眼目标系统对探测激光的调制作用建立闭合回路跟踪系统、随机大气对猫眼效应反射光的影响等。本文可为更好地描述和解决猫眼效应反射光特性及其应用问题提供思路。

参 考 文 献

- 1 C. Lecocq, G. Deshors, O. Lado-bordowsky *et al.*. Sight laser detection modeling[C]. *SPIE*, 2003, **5086**: 280~286
- 2 Zhao Xunjie, Gao Zhiyun, Zhang Yingyuan. Technique of active laser reconnaissance and the applications in the military[J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(4): 415~417
赵勋杰, 高雅允, 张英远. 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
- 3 H. Sun, S. Gu, G. Ni. The design of active laser detection system based on nonlinear optical effect[C]. *SPIE*, 2005, **6029**: 0602~43
- 4 H. Sun, F. Xiong, S. Gu. Ranging performance of active laser detection[C]. *SPIE*, 2006, **6344**: 63442P
- 5 H. Sun, Y. Zhao, L. Tang *et al.*. Performance analysis of active laser detection system [C]. Proc. 7 th International Symposium on Test and Measurement, 2007, **4**: 3024~3027
- 6 Ma Haozhou. Study on the reflective characteristics of the targets and the "cat's eye" effect[J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(6): 600~602
马浩洲. 目标反射特性与“猫眼”效应研究[J]. *激光技术*, 2003, **27**(6): 600~602
- 7 D. Hambling. New Sensor-Blasting Laser; Blinding Brilliance? [EB/OL]. <http://www.wired.com/dangerroom/2008/01/new-sensor-blas/>, 2008-01-14
- 8 Shi Jiaming, Wang Feng. Review on optoelectronic counter mwasure system of foreign array[J]. *Commilit*, 2005, (10): 40~42
时家明, 王 峰. 国外陆军光电对抗装备综述[J]. *现代军事*, 2005, (10): 40~42
- 9 SLD 400 laser sniper detector[EB/OL]. <http://www.cilas.com/defense-securite/fiche-produit-sld400.pdf>
- 10 SLD 500 surveillance and sniper detection laser system[EB/OL]. <http://www.cilas.com/defense-securite/sld500-angl.pdf>
- 11 N. Novichkov. Portable automatic device for optical and electronic countermeasures[J]. *Arms Show News*, 2005, **13**(1): 27
- 12 G. Bobolicu. Snipers Pinpointed by Ellipse Before They Shoot[EB/OL]. <http://gadgets.softpedia.com/news/Snipers-Pinpointed-Before-They-Shoot-by-Ellipse-752-01.html>
- 13 GLARES-Gated laser retro-reflection scanner[EB/OL]. <http://www.valcartier.drdc-rddc.gc.ca/sciences/glaires-eng.asp>, 2005-12
- 14 H. D. Tholl, J. Vergnolle. CASAM-An European R&T project for the protection of commercial aircrafts in flight[C]. *SPIE*, 2008, **7115**: 711509
- 15 Flying Laser Self-Defense System Against Seeker Head Missiles[EB/OL]. <http://www.thalesgroup.com/land-joint>
- 16 Qing Guangbi, Wang Xuekai, Guo Yong *et al.*. Physical model of "cat eye effect" and its certification [J]. *Laser Technology*, 1995, **19**(4): 244~247
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
- 17 Ge Chengliang, Huang Zhiwei, Ji Yunsong *et al.*. Target classification with "cat eye effect"[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(7): 632~634
葛成良, 黄志伟, 季云松 等. 基于“猫眼效应”的目标识别[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(7): 632~634
- 18 Jiang Zhiguo, Tan Jichun, Liang Jing *et al.*. Suitability of "cat's eye" effect for reconnaissance by the scanning laser[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(5): 549~551
蒋治国, 谭吉春, 梁 晶 等. “猫眼”效应用于主动式激光侦察的适用条件分析[J]. *激光技术*, 2005, **29**(5): 549~551
- 19 Bian Xueli. Influence of the reflected wave power in deviate focus "Cat-eye" system[J]. *China Measurement Technology*, 2007, **33**(2): 84~86
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

- 20 Shao Li, Jiao Yang, Sun Zhongtao *et al.*. An accurate positioning method for optical satellite[J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, **14**(2): 96~99
邵立, 焦洋, 孙中涛等. 一种对光学卫星精确定位的方法[J]. *光电与控制*, 2007, **14**(2): 96~99
- 21 Yuan Yonghua, Liu Songhao, Sun Chengwei *et al.*. Study on IR active tracking closed-loop for retrorreflection laser[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(1): 16~19
袁永华, 刘颂豪, 孙承伟等. 回射激光的红外主动跟踪闭环研究[J]. *光电工程*, 2003, **30**(1): 16~19
- 22 Zhao Yanzhong, Song Fenghua, Sun Huayan *et al.*. Laser reflection characteristics of cat eye effect of Cassegrain lens[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1149~1155
赵延仲, 宋丰华, 孙华燕等. 卡塞格伦镜头的猫眼效应激光反射特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1149~1155
- 23 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua *et al.*. Research on the mechanism of reflection characteristics of laser irradiation on the cat eye optical lens[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(4): 2284~2294
赵延仲, 孙华燕, 宋丰华等. 激光辐照猫眼光学镜头时的反射特性机理研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(4): 2284~2294
- 24 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua *et al.*. Reflectivity test of cat eye effect with laser irradiating on optical lens [J]. *High Power Laser and Particles*, 2008, **20**(10): 1620~1624
赵延仲, 孙华燕, 宋丰华等. 激光辐照光学镜头猫眼效应反射率测试[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(10): 1620~1624
- 25 Zhao Yanzhong, Song Fenghua, Sun Huayan *et al.*. Laser reflected character of "cat eye effect" by the Zemax[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(S1): 89~91, 94
赵延仲, 孙华燕, 宋丰华等. 利用 Zemax 分析“猫眼效应”的激光反射特性[J]. *光学技术*, 2007, **33**(S1): 89~91, 94
- 26 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua *et al.*. Laser reflection characteristics of "cat eye effect" of photoelectric equipment[C]. Proc. 7 th International symposium on test and measurement, 2007, **4**: 2991~2994
- 27 ZEMAX Development Corporation. ZEMAX Optical Design Program User's Guide[EB/OL]. <http://www.zemax.com>. 2005-2-3. 515~527
- 28 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua *et al.*. An analysis method named physical optics propagation for studying cat eye effect of optical lens[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command and Technology*, 2009, **20**(3): 80~84
赵延仲, 孙华燕, 宋丰华等. 研究光学镜头猫眼效应的物理光学传输分析方法[J]. *装备指挥技术学院学报*, 2009, **20**(3): 80~84
- 29 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua *et al.*. Propagation properties of oblique and off-axial Gaussian beams passing through cat-eye optical lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2252~2256
赵延仲, 孙华燕, 宋丰华等. 倾斜离轴高斯光束通过猫眼光学镜头的传输特性[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2252~2256
- 30 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Yu Xiqiong *et al.*. Three-dimensional analytical formula for oblique and off-axis Gaussian beams propagating through a cat-eye optical lens[J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, **27**(3): 034101
- 31 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua *et al.*. Propagation properties of Gaussian beams through cat eye optical lens with center shelter[J]. *Opt. Int. J. Light Electron. Opt.*, 2010, doi:10.1016/j.ijleo.2009.11.007
- 32 Gu Suolin, Zhao Yanzhong. Transformation properties of Gaussian beams passing through the cat eye retro-reflectors[J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(4): 320~323
谷锁林, 赵延仲. 高斯光束通过猫眼逆反射器的变换特性[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(4): 320~323
- 33 M. L. Biermann. Design and analysis of a diffraction-limited cat's eye retroreflector[J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(7): 1655~1660
- 34 Ge Chengliang, Zhang Kai, Ye Yidong *et al.*. Line-of-sight pointing over the horizon target with "cat eye effect"[J]. *High Power Laser and Particles*, 2005, **17**(11): 1635~1638
葛成良, 张凯, 叶一东等. 基于“猫眼效应”的超视距视轴对准可行性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(11): 1635~1638
- 35 P. G. Goetz, W. S. Rabinovich, S. C. Binari *et al.*. High-performance chirped electrode design for cat's eye retro-reflector modulators[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(21): 2278~2280
- 36 W. S. Rabinovich, P. G. Goetz, E. Waluschka *et al.*. A cat's eye multiple quantum-well modulating retro-reflector[J]. *IEEE Photon Technol Lett.*, 2003, **15**(3): 461~463
- 37 W. S. Rabinovich, R. Mahon, P. G. Goetz *et al.*. 45 Mbps cat's eye modulating retro-reflector link over 7 Km[C]. *SPIE*, 2006, **6304**: 0Q
- 38 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Zhao Linfeng *et al.*. Studies on interference characteristics of cat-eye effect reflected light of defocused optical lens[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, 37
赵延仲, 孙华燕, 赵琳峰等. 离焦光学镜头的猫眼效应反射光干涉特性研究[J]. *中国激光*, 2010, 37

- 39 Li Jianmin, Wang Yunfen, Feng Tianbao *et al.*. Measurement of bubble diameter in a flat glass based on far-field interference[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1508~1511
李建民, 王蕴芬, 冯天宝 等. 基于远场干涉测平板玻璃内的气泡直径[J]. 中国激光, 2009, **36**(6): 1508~1511
- 40 Xue Hui, Shen Weidong, Gu Peifu *et al.*. Thickness measurement of thin film based on white-light spectral interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1877~1880
薛 晖, 沈伟东, 顾培夫 等. 基于白光干涉的光学薄膜物理厚度测量方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(7): 1877~1880
- 41 Lei Baiping, Wu Fan, Zhou Chenbo. Application of ronchi grating to the quantitative measurement of large-aperture aspheric surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2441~2446
雷柏平, 伍 凡, 周晨波. 龙基光栅在大口径非球面定量测量中的应用[J]. 光学学报, 2009, **29**(9): 2441~2446
- 42 Li Junchang. FFT computation of angular spectrum diffraction formula and its application in wavefront reconstruction of digital holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1163~1167
李俊昌. 角谱衍射公式的快速傅里叶变换计算及在数字全息波面重建中的应用[J]. 光学学报, 2009, **29**(5): 1163~1167
- 43 Ji Xiaoling, Chen Senhui, Li Xiaoqing. Polarization properties of partially coherent electromagnetic Hermite-Gaussian beams in atmospheric turbulence[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 67~72
季小玲, 陈森会, 李晓庆. 部分相干电磁厄米-高斯光束通过湍流大气传输的偏振特性[J]. 中国激光, 2008, **35**(1): 67~72
- 44 Y. J. Cai, H. T. Eyyuboğlu, Y. Baykal. Propagation properties of anomalous hollow beams in a turbulent atmosphere [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(21): 5291~5297
- 45 Zhou Pu, Xu Xiaojun, Liu Zejin *et al.*. Propagation of coherently combined laser beam in turbulent atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2051~2056
周 朴, 许晓军, 刘泽金 等. 相干合成光束在湍流大气中的传输[J]. 光学学报, 2008, **28**(11): 2051~2056
- 46 Ji Xiaoling, Zhang Tao, Chen Xiaowen *et al.*. Spectral properties of flat-topped beams propagating through atmospheric turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 12~16
季小玲, 张 涛, 陈晓文 等. 平顶光束通过湍流大气传输的光谱特性[J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 12~16