

文章编号 1004-924X(2012)02-0241-06

双通道激光主动探测系统

刘秉琦¹, 周 斌^{1,2*}, 武东生^{1,3}, 张 瑜¹

(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 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: 为了有效探测“猫眼”目标的微弱回波信号并获得目标区域的直观图像信息, 设计了基于雪崩光电二极管(APD)单元探测器和电荷耦合器件(CCD)面阵探测器的双通道激光主动探测系统。介绍了硬件设计的基本思路, 包括各模块功能、组成和主要部件所采用的型号。针对双通道探测模式的关键技术, 阐述了 APD 探测模式下接收放大电路的设计方法, 并分析了 CCD 探测模式下响应波长的匹配问题。最后, 在外场条件下, 利用望远镜和激光测距机等典型“猫眼”目标对该双通道激光主动探测系统进行了实验验证。实验结果表明, 利用 APD 探测模式进行探测时, 550 m 距离处望远镜的回波能量响应是类镜面目标回波能量响应的 2.87 倍以上; 利用 CCD 探测模式进行探测时, 550 m 距离处望远镜的回波能量响应和 2 500 m 距离处激光测距机光学窗口的回波能量响应分别是背景目标回波能量响应的 2.72 倍和 2.31 倍以上。该双通道激光主动探测系统可将典型“猫眼”目标从背景及干扰目标中清晰检出, 验证了探测系统设计的合理性和有效性。

关键词: 激光主动探测; “猫眼”效应; 雪崩光电二极管(APD); 电荷耦合器件(CCD); 目标识别

中图分类号: TN977; TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122002.0241

Dual-channel active laser detection system

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

(1. Department of Optics and Electronic Engineering,

Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Army 71192 of the Chinese People's Liberation Army, Wendeng 264400, China;

3. Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: cuixfang@163.com

Abstract: A dual-channel active laser detection system based on an Avalanche Photo Diode(APD) and a Charge-couple Device(CCD) is designed to effectively detect weak echo signals of “cat-eye” targets and to acquire the intuitive image information of a target area. Firstly, the concept of hardware design is introduced, including the functions and constitution of some modules and the types of primary assemblies. Then, based on the key problems of designing receiving-magnifying circuit in the APD detection mode, the circuit constitution, working principle and the selection of main parts are discussed, and the match of response spectrum for the CCD and laser is analyzed. Finally, the detection experiments are performed by using typical “cat-eye” targets at different distances. The experimental results show that the echo signal power of the typical “cat-

收稿日期: 2011-09-20; 修订日期: 2011-10-28.

基金项目: 武器装备军内科研计划资助项目

eye” target is 2.87 times that of mirror-like surface at a distance of 550 m in the APD mode; and the echo signal power of a telescope and that of optical window for a laser finder are 2.72 times and 2.31 times those of background at distances of 550 m and 2 500 m in the CCD mode, respectively. The dual-channel active laser detection system can capture the “cat-eye” targets from background and jamming targets easily, which proves the rationality and validity of the proposed system.

Key words: active laser detection; “cat-eye” effect; Avalanche Photo Diode (APD); Charge Coupled Device (CCD); target recognition

1 引言

在光学观瞄系统、光电侦察系统、光电跟踪系统、光电搜索系统、光电火控系统以及光电测距系统等绝大多数军用光电装备中,所用的光学接收镜头的焦平面都安装有反射或半反射元件(如探测器或分划板)。当装备受到激光束照射时,元件能产生原路返回的准直反射光,且反射光通常比一般的漫反射目标回波强度高 2~4 个数量级,这种特性俗称“猫眼”效应^[1-3]。激光主动探测技术就是利用“猫眼”效应原理,通过发射激光束来实现对光学目标的扫描侦察和识别。

早在 20 世纪 80 年代,美欧等西方发达国家已将激光主动侦察技术应用于车载、便携、舰载和机载等激光侦察告警系统中,均取得了良好的应用效果,如美国的“鲑鱼”激光武器系统、前苏联的“拉瑟”车载激光致盲武器、法国激光工业公司的 SLD400 及 SLD500 激光反狙击手探测系统以及加拿大的舰载后向激光扫描仪等^[4]。与激光被动探测技术相比,激光主动探测技术有更高的定位精度和更快的探测速度,并可快速告警敌方光学侦察设备对我方目标的侦察行为。目前,国内的研究热点主要集中在“猫眼”目标特性等方面,而实用武器系统的实现和技术改进较为缓慢,主要成果有西安应用光学研究所研制的基于线阵 CCD 的反狙击手探测系统,它可提取 250 m 距离上的“猫眼”目标^[5-6]。

为了在实现“猫眼”目标微弱回波有效探测的同时获得目标区域直观图像信息,本文结合实际需要和雪崩光电二极管 (APD) 及电荷耦合器件 (CCD) 探测器各自的特点^[7-9],设计了基于 APD 和 CCD 的双通道激光主动探测系统;并在给出探测系统设计原理的基础上,对双通道探测模式的关键问题进行了讨论;最后通过具体的实验验证

了该系统的可行性。

2 双通道激光主动探测系统

2.1 系统硬件组成

激光主动探测系统如图 1 所示,该系统由激光发射系统、发射接收开关、二维扫描振镜、发射接收光学系统、APD 探测接收系统、CCD 探测接收系统组成。其中,激光器的选择主要考虑波长与 CCD 的匹配效果,以及激光在大气传输中的衰减因素,即大气窗口的影响。这里采用了 Coherent 公司的激光源,该激光器为结构紧凑的固体二极管泵浦调 Q 激光器,输出波长为 $1.06 \mu\text{m}$,最大输出功率为 3 W,光束发散角为 2 mrad。通过软件设置二维扫描振镜扫描频率,可外部控制激光器发射频率,保持二者同频耦合。该激光器发射的激光通过 2~6 倍扩束镜后到达发射接收开关,发射接收开关是以 45° 角方向钻孔(孔径为 3 mm)的单波长介质膜高反镜,在波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的激光以 45° 角入射该介质膜高反镜时,平均反射率 $>99.5\%$ 。出射激光在二维扫描振镜的作用下,可在一定的视场范围内进行逐行扫描。“猫眼”目标以及背景回波通过发射接收光学系统入

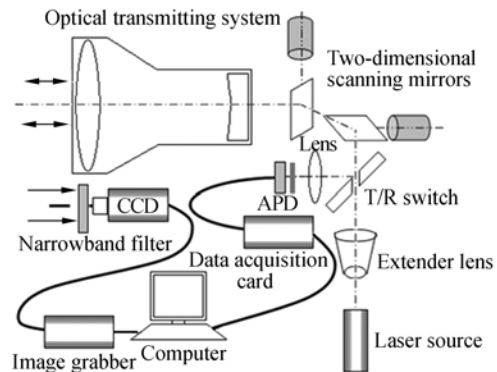


图 1 双通道激光主动探测系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of dual-channel active laser detection system

射到发射接收开关,由于回波光束直径远大于发射接收开关上所开的小孔孔径,因此大部分回波能量将反射到 APD 探测接收系统中,配合 $1.06 \mu\text{m}$ 的窄带滤光片,可进一步滤除杂散光并降低虚警率,实现对特定波长的响应。为了提高分辨率,采用具有 60 MS/s 采样速率、14 位转换精度的 PCI_9820 高速数据采集卡对回波信号进行采集。同时,与发射接收光学系统同轴系的 CCD 探测器配合窄带滤光片,接收来自目标视场范围内的图像信息,并将该信息通过图像采集卡送入计算机以完成后续的空间滤波去噪、图像增强等数字图像处理^[10-11]。

双通道激光主动探测系统实物如图 2 所示。

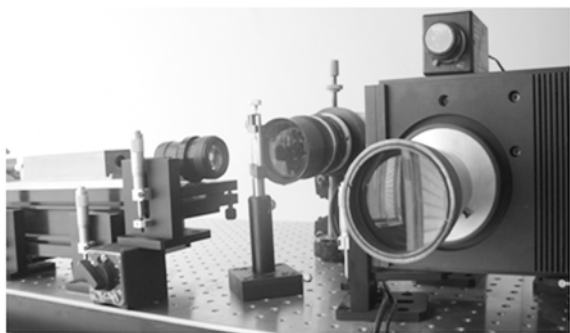


图 2 双通道激光主动探测系统实物图

Fig. 2 Picture of dual-channel active laser detection system

2.2 APD 探测模式

在“猫眼”目标回波探测时,激光在传输过程中会受到大气吸收和散射、温度、湿度等因素的影响,引起激光能量衰减,同时“猫眼”目标会受到非“猫眼”目标回波的干扰及激光近距离后向散射,致使回波信号携带很大的噪声。为解决回波信号的幅度变化,滤除干扰,设计了 APD 回波接收放大电路,并采用自动增益控制技术(Auto-matic Gain Control, AGC)控制放大器的增益,使“猫眼”目标和非“猫眼”目标的回波信号都受到抑制,同时抑制后向散射。

APD 探测接收模式原理如图 3 所示,它由接收放大部分和控制处理部分组成,主要功能是光电转换、信号放大、驱动控制、高速 ADC 采集、信号识别等。APD 电源模块为 APD 提供工作电压($300 \sim 600 \text{ V}$ 的高压直流电)。其主要工作原理为:目标的回波经接收光学系统汇聚到 APD 上,APD 将接收到的光信号转变成可响应的电信号,由视频放大电路放大后,作为高速数据采集卡的输入信号。

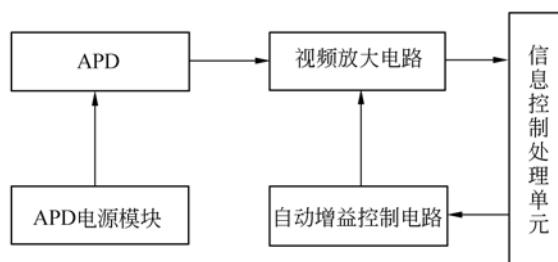


图 3 APD 回波信号接收系统原理图

Fig. 3 Diagram of echo receiver system in APD mode

信息控制处理单元提供激光发射和自动增益控制信号,抑制后向散射干扰并控制距离增益;同时根据系统探测要求设置门限,使高速数据采集卡读出“猫眼”目标的回波,滤除大部分噪声及干扰信号,增强系统的抗干扰能力,提高探测效率。

光电探测器组件采用美国 RCA 公司生产的 C30950 型雪崩管组件,它对 $1.06 \mu\text{m}$ 的光信号有较好的响应特性。APD 电源模块选用莱特公司的 ABC550-04 电源模块。视频放大器选用摩托罗拉公司生产的 MC1590G 型 AGC 宽带放大器,该放大器增益可达 40 dB ,外加补偿电容后频带宽可达 120 MHz ,自动增益控制范围 MAGC 为 60 dB ,且增益变化时,器件输入参数的变化很小。在探测过程中,大气会引起后向散射干扰,容易引起近距离误测事件,故系统采用了具有时间程序增益控制的放大器电路,即随着激光传输时间的增加,放大器增益逐渐增大。

2.3 CCD 探测模式

CCD 探测接收模式下的工作原理与激光成像雷达类似^[12-13]。CCD 探测器光谱响应在 $400 \sim 1100 \text{ nm}$,采用敏通公司的低照度黑白 CCD 摄像机,型号为 MTV-1881EX。所采用的 CCD 响应光谱不但包括近红外区域,还包括大量的可见光区域,虽然“猫眼”目标回波强度比漫反射目标高很多,但由于外界环境各种频率光波的存在及光的散射和大气损耗作用,在 CCD 探测模式下,“猫眼”目标回波更容易湮没在背景噪声中,因此需要使用 $1.06 \mu\text{m}$ 的窄带滤光片。该模式可实现对包含有“猫眼”效应目标场景的实时、快速主动成像及目标提取。

3 实验研究

在 550 m 的距离处,将某型 8 倍军用望远镜

作为典型的“猫眼”目标进行外场测试,在该距离处还存在光滑墙壁、窗户玻璃、未安装镜头的 CCD 面阵探测器等。图 4 给出了不同目标的测试结果。从回波波形中可以看出,对空探测时,相对回波的峰值基本处于 0.55 不变,即没有探测到回波变化;而对漫反射目标和典型“猫眼”目标进行探测时,均有回波峰值和能量的变化。其中,采集到的玻璃回波信号最少,回波能量最弱,这是因为激光入射到玻璃时,大部分光透射过去,仅有小部分光发生了镜面反射。其次为光滑墙壁和 CCD 光敏面,这是因为光滑墙壁为典型的漫反射目标,而 CCD 光敏面为类镜面反射目标,后者的回波能量要比前者大些,而望远镜这类“猫眼”目标的回波能量最强。对该距离多次探测结果表明,由于 APD 自动增益控制作用,“猫眼”目标能量响应是类镜面目标回波能量响应的 2.87 倍以上,这足以将“猫眼”目标从大量背景中分辨出来。图 5 给出了 1 350 m 距离处望远镜目标与墙面的回波波形。从图中可以看出,“猫眼”目标与漫反射目标在回波能量和回波峰值上仍有较大差异,进一步验证了该 APD 探测模式在中远程距离上仍然有效。

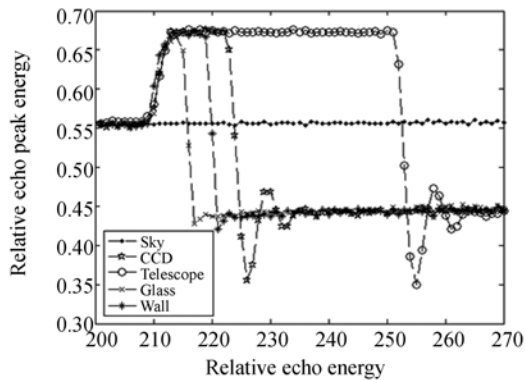


图 4 550 m 距离处 APD 探测模式下不同目标的回波信号
Fig. 4 Echo signal powers of different targets at 550 m distance in APD mode

利用该激光主动探测系统采集到 550 m 距离处望远镜左右镜筒回波图像及其强度分布(灰度值)如图 6 所示。实验中所采用的望远镜右镜筒不含十字分划,因而不可视为“猫眼”目标,但仍然会有回波亮斑。该亮斑是由于光源功率较大且探测距离较近时物镜镜头直接镜面反射所得。图 7 为架设在 2 500 m 距离处大楼内的某型激光测距机的回波图像及其光强分布。对多次探测图像

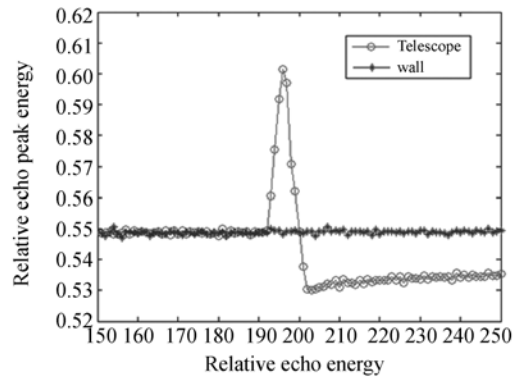


图 5 1 350 m 距离上 APD 探测模式下的不同目标回波信号
Fig. 5 Echo signal powers of different targets at 1 350 m distance in APD mode

结果进行分析可知,550 m 距离处望远镜光学窗口的回波能量响应是背景回波响应的 2.72 倍以上;2 500 m 距离处激光测距机光学窗口回波响应是背景回波响应的 2.31 倍以上。从图 6 及图 7 中均可十分容易地将望远镜及激光测距机这类典型“猫眼”目标从背景环境中分辨出来,且细节十分清晰,可见利用 CCD 探测器可实现典型“猫眼”目标的有效探测。

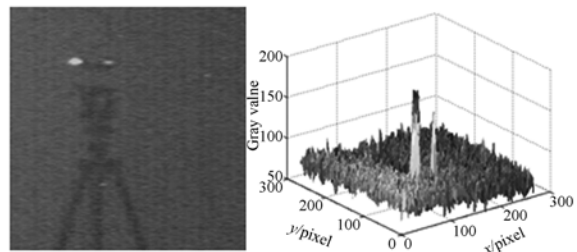


图 6 550 m 距离处 CCD 探测模式下“猫眼”目标的回波图像
Fig. 6 Echo image of “cat-eye” target at 550 m in CCD mode

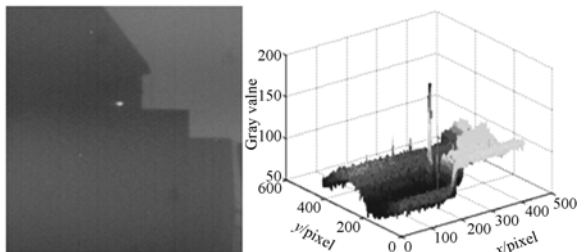


图 7 2 500 m 距离处 CCD 探测模式下“猫眼”目标的回波图像
Fig. 7 Echo image of “cat-eye” target at 2 500 m in CCD mode

进一步的实验研究表明,发射激光功率对回波图像质量的影响较大,这是因为在回波图像中存在着较强的后向散射噪声。在2 500 m甚至更远距离处,虽然通过增加激光功率可提高目标的回波功率,从而提高目标光斑亮度,但随之增加的后向散射噪声强度有可能湮没“猫眼”目标光斑。因此,一方面,可采用距离选通技术克服后向散射光的不利影响;另一方面,可在后续的数字图像处理中将后向散射噪声作为背景噪声滤除。本文采用的是较为简便易行的后一种方法。

4 结 论

利用绝大多数光电系统光学窗口所具有的“猫眼”效应特性,设计了基于 APD 单元探测器和 CCD 图像传感器的“猫眼”目标激光主动探测系统。实验研究表明,APD 探测模式下,在近程如 550 m 距离处,望远镜光学窗口的回波能量响

应是类镜面目标的 2.87 倍以上,在中远程如 1 350 m 距离处,APD 探测模式仍能分辨“猫眼”目标;CCD 探测模式下,在近程如 550 m 距离处,望远镜光学窗口回波能量响应是背景回波能量响应的 2.72 倍以上,在远程如 2 500 m 距离处,激光测距机光学窗口回波能量响应是背景能量响应的 2.31 倍以上,因此该激光主动探测系统可对一定距离上的典型“猫眼”目标实施有效探测,这对提高未来战场环境光电对抗中的作战能力具有重要意义。但通过实验也发现,后向散射对探测系统影响较大,通过图像滤噪处理,可有效改善探测效果。此外,仍有大量工作需要进一步深入研究,如适应战场环境的多波长激光光源研究,考虑目标反射面离焦、倾斜等结构特性,天气和大气吸收、散射等大气传输特性,以及探测器灵敏度等因素综合影响下^[14-15]的“猫眼”目标提取与识别算法等。

参考文献:

- [1] 张瑜,刘秉琦,周斌,等.入射角对“猫眼”目标特性的影响[J].激光与红外,2011,41(4):430-434.
ZHANG Y, LIU B Q, ZHOU B, *et al.*. Impact of incidence angle on characteristics of “cat eye” target [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(4): 430-434. (in Chinese)
- [2] 秦楷,韩绍坤,刘建虎.典型光学观瞄窗口的“猫眼”效应特性评价与分析[J].光学技术,2010,36(3):391-394.
QIN K, HAN SH K, LIU J H. Evaluation and analysis to the “cat's eye” effect in typical optical observation window [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(3): 391-394. (in Chinese)
- [3] 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.
ZHAO Y ZH, SUN H Y, SONG F H, *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. (in Chinese)
- [4] 赵延仲,孙华燕,宋丰华,等.猫眼效应用于激光主动探测技术的研究现状与发展趋势[J].激光与光电子学进展,2010(10):38-47.
ZHAO Y ZH, SUN H Y, SONG F H, *et al.*. Research and prospect of cat-eye effect used for active laser detection technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010(10): 38-47. (in Chinese)
- [5] 杨耿,安宝林,薛晋生,等.基于“猫眼效应”的狙击手光电探测仪[J].应用光学,2010,31(5):860-863.
YANG G, AN B L, XUE J SH, *et al.*. Sniper detector based on cat eye effect [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(5): 860-863. (in Chinese)
- [6] 毕博瑞,薛常佳,谷衡,等.基于线阵 CCD 反狙击探测仪的研制[J].应用光学,2010,31(2):203-206.
BI B R, XUE CH J, GU H, *et al.*. Anti-sniper detector based on linear array CCD [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(2): 203-206. (in Chinese)
- [7] 王明富,杨世洪,吴钦章.大面积 CCD 图像实时显示系统的设计[J].光学精密工程,2010,18(9):2053-2059.
WANG M F, YANG SH H, WU Q ZH. Design of large-array CCD real-time display system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2053-2059. (in Chinese)
- [8] 贾方秀,丁振良,袁锋.相位法激光测距接收系统[J].光学精密工程,2009,17(10):2377-2384.
JIA F X, DING ZH L, YUAN F. Phase-shift laser range finder receiver system [J]. *Opt. Precision*

- Eng., 2009, 17(10):2377-2384. (in Chinese)
- [9] 胡建人. 基于 APD 的远程激光测距系统光电匹配研究[J]. 光电工程, 2011, 38(1):1-5.
HU J R. Research of opto-electronic match in long-distance laser ranging system based on APD [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2011, 38(1):1-5. (in Chinese)
- [10] 徐毅珍, 徐军, 赵法林, 等. 基于小波变换的激光主动成像图像去噪方法[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(12):1786-1790.
XU Y F, XU J, ZHAO F L, et al.. Laser active image-denoising method based on wavelet transform [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(12):1786-1790. (in Chinese)
- [11] 李晓峰, 徐军, 罗积军, 等. 激光主动成像图像噪声分析与抑制[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2):332-337.
LI X F, XU J, LUO J J, et al.. Noise analyzing and denoising of intensity image for laser active imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2):332-337. (in Chinese)
- [12] 庞春颖, 张涛. 激光主动成像系统信噪比模型的研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2):319-324.
PANG CH Y, ZHANG T. Signal-to-noise ratio mode of laser active imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):319-324. (in Chinese)
- [13] 孙建锋, 闫爱民, 刘德安, 等. 远距离激光成像雷达进展[J]. 激光与光电子学进展, 2009(8):49-54.
SUN J F, YAN A M, LIU D A, et al.. Progress on long-range laser imaging lidar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009(8):49-54. (in Chinese)
- [14] 王兵学, 张启衡, 刘玉清, 等. CCD 探测器搜索跟踪系统的作用距离分析[J]. 光电工程, 2004, 31(11):12-15, 62.
WANG B X, ZHANG Q H, LIU Y Q, et al.. Analysis for operating distance of a searching and tracking system based on CCD detector [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(11):12-15, 62. (in Chinese)
- [15] 杨晓杰, 何永强, 周冰, 等. 简易估计激光探测系统作用距离[J]. 光电工程, 2009, 36(9):71-75.
YANG X J, HE Y Q, ZHOU B, et al.. A simple method for estimating the detection distance of laser detecting system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(9):71-75. (in Chinese)

作者简介:



刘秉琦(1962—),男,河北衡水人,教授,博士生导师,1983年于天津大学获得学士学位,1990年于军械工程学院获得硕士学位,2005年于北京理工大学获得博士学位,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail: whelmmail@sina.com



周 斌(1979—),男,河南焦作人,博士研究生,2001年、2005年于军械工程学院分别获得学士、硕士学位,主要从事激光对抗方面的研究。E-mail: cuixifang@163.com



武东生(1978—),男,河北承德人,讲师,博士研究生,2001年、2004年于军械工程学院分别获得学士、硕士学位,主要从事激光对抗方面的研究。E-mail: wds116@yahoo.cn



张 瑜(1987—),男,河北石家庄人,硕士研究生,2009年于军械工程学院获得学士学位,主要从事激光对抗方面的研究。E-mail: sjzhangyu@yahoo.com