

doi:10.3788/gzxb20134212.1514

激光引信新型光学大视场接收技术研究

甘霖, 张合, 张祥金

(南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

摘要:受常规弹药空间及功耗限制,无法采用多个激光接收器实现大视场探测,且系统结构应简单易实现,故传统的四种大视场光束布局方式无法直接应用.为此,本文设计了一种新型的激光引信光学大视场旋转扫描接收方案,根据激光引信光学接收系统结构特点,应用 Zemax 光学软件,在非球面光学设计理论基础上,设计出多级光学聚焦整形接收透镜组.仿真结果显示相对于传统单级聚焦透镜,多级接收透镜组将光斑中心辐照亮度提高了近 8 倍,使光斑能量集中,尺寸减小.加工了非球面透镜组并进行了实验.结果表明该接收光学系统可有效汇聚激光回波能量,提高系统探测距离,实现目标周向 360°大视场探测.

关键词:激光引信;新型接收技术;光学设计;单光束

中图分类号:TJ43

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)12-1514-5

New Optical Large Field Receiving Technology in Laser Fuze

GAN Lin, ZHANG He, ZHANG Xiang-jin

(ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: As the limit of fuze space in conventional ammunition, it is impossible to arrange a number of laser receivers. Meanwhile, the system structure should be as simple as possible, so the traditional beam layout cannot be directly applied. Therefore, a new receiving system utilizing the technology of optical large field rotary scanning was proposed. Based on the optical structure of laser fuze and the aspherical optical design theory, a set of multi-level optical focusing plastic lens were devised by using the application software called Zemax. Compared with the traditional single-stage focusing lens, the brightness of center irradiation was enhanced by nearly 8 times, the size of spot was decreased and the energy was centralized, which were shown by the simulation results. Then, a set of aspherical lens were developed as well as the related experiments. The results show that the echo energy of pulsed laser can be effectively converged and the detection range can be enhanced in the system described above. Finally, the large field detection whose circumferential view angle of the target is 360° is well realized.

Key words: Laser fuze; New receiving technology; Optical design; Single beam

0 引言

激光引信是一种利用激光束主动探测目标的光学引信.相对于传统的光电引信,激光引信具有主动性好、方向性强和不易受电子干扰等优点.1980年以来,美国 AGM-88 型高速反雷达导弹、美国和瑞士联合研制的 ADATS 防空-反坦克导弹、美国 M16

步枪发射的枪榴弹、瑞典 RDS-70 导弹、法国“马特拉导弹”、南非的 RAKI 反辐射无人机都采用了激光引信^[1-2].现代战争要求引信具备全向探测、快速识别、准确定位、精确控制炸点的功能.激光引信要实现上述功能,须采用大探测场体制,提高光束对目标的覆盖范围,以保证接收机有足够大的接收功率和信噪比^[3].

基金项目:国家自然科学基金(No. 60908037)和江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(No. CXZZ12_0213)资助

第一作者:甘霖(1987-),男,博士研究生,主要研究方向为激光探测与目标识别. Email:kg568605@163.com

导师:张合(1957-),男,教授,博士,主要研究方向为探测制导与控制. Email:hezhang@mail.njust.edu.cn

收稿日期:2013-05-06;录用日期:2013-10-11

激光引信大视场方位探测系统主要有多辐射方案、分区方案、分区扫描方案和同步扫描方案四种常用的光束布局方案^[2,4]。其中:多辐射方案、分区方案、分区扫描方案均需要多个激光器和激光接收器;同步扫描方案要求接收场与发射场同步匹配,结构复杂,均无法在常规弹药激光引信中直接应用^[5]。本文提出了一种新型的光学大视场接收方案,系统只有一个激光接收器,同时充分利用激光引信光学组成,采用多级非球面光学聚焦透镜组,在简化了系统结构的同时,提高了系统探测距离,实现了激光引信周向 360°大视场探测。

1 激光引信常用大视场光束空间布局方式分析

国外关于近炸引信大视场方位探测已有人涉足,日本的前岛德之等人在 1992 年发表的《近炸引信制御装置》中提出了一种光引信的定位方法,这种光引信目标方位探测准确度能达到 90°的水平^[6]。

国内对具有目标方位探测引信的研究起步较晚,目前主要集中在对无线电体制的目标方位探测上,尚未有十分成熟的技术,北京理工大学针对微波体制的无线电引信做过利用微带天线进行目标方位探测的研究,目标方位识别准确度大约为 90°水平^[7]。21 世纪初,北京理工大学、8358 所、014 中心等对激光引信的目标方位探测进行了研究,通过多个激光器与接收器实现目标方位探测,可以将目标方位中心确定在 22.5°的范围之内^[7-8]。

激光引信常用大视场光束布局方式主要包括多辐射方案、分区方案、分区扫描方案和同步扫描方案,分别如图 1。

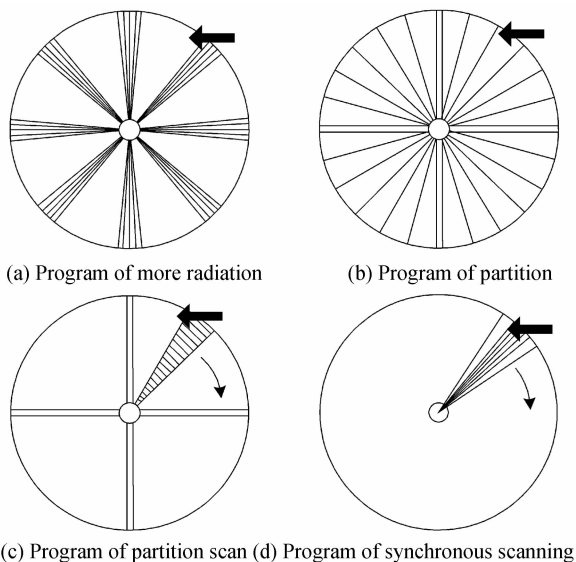


图 1 光束空间布局方式
Fig. 1 Spatial layout of beam

多辐射方案中接收器与激光器数量相等且视场匹配,发射、接收窗口在弹体周围均匀分布,多个辐射状窄光束共同形成探测场,具有多个激光接收器。该方式对激光器发射功率要求不高,因而在小型空空导弹中应用的较多,如 Python4-2(怪蛇)型空空导弹激光引信,Matra Bae Dynamics 公司的便携式防空导弹激光引信。

分区方案由几个扇形光束组成探测场,接收器与激光器数量相等且视场匹配。与多辐射方案相比该方案可探测的最小目标尺寸较小,但大接收视场导致背景噪音增加、发射功率利用率降低,此方案对激光器平均功率要求较高。英国 Rapier Mark2 导弹激光引信、2010 年美国引信年会上公布的 Thales 导弹激光近炸引信^[9]均采用该方案。

分区扫描方案在分区视场内,激光器扫描形成探测场,多个探测器分区接收,有效利用激光器发射的所有功率,扩大作用距离。如英国 Thomson-Thorn 公司的激光引信^[10]。

同步扫描方案的发射、接收系统同步扫描探测接收。该方案将激光器全部功率集中为窄射束,因接收视场减小降低了背景噪音。同步扫描的重点是要求接收场与发射场同步匹配,结构复杂,需制作专门的高速旋转扫描系统和小型大功率激光器,可以实现较远的作用距离和较高的距离分辨率,如直升机激光防撞告警装置^[3]。

因上述常用的光束布局方式无法满足于常规弹药激光引信结构小型化易实现的要求,现提出一种新型光学大视场接收方案,仅采用一个激光接收器实现激光回波光束 360°周向扫描接收,将激光接收器的数量减至最少,相对于传统的四种方案,大大减小了激光引信的空间占有率,减小了系统功耗与内部噪音,增加了系统的稳定性。同时,将传统的透光窗口和反射镜设计成具有光学聚焦功能,可大大提高接收系统回波信号汇聚整形能力,增加目标探测距离。

2 新型光学大视场接收技术及光学整形系统设计

本系统由脉冲激光接收系统(接收处理电路,光敏管 PIN/APD,激光聚焦透镜,接收透光/聚焦一体化窗口,窄带滤波片)和高速反射式扫描转镜系统(涡轮或者电机等旋转机构,涡轮或电机转子,全反/聚焦一体化透镜)组成,系统组成原理图如图 2。

该系统工作过程为:弹丸发射一定距离后,高速电机 a 上电工作高速旋转,由电机转子 b 带动全反/

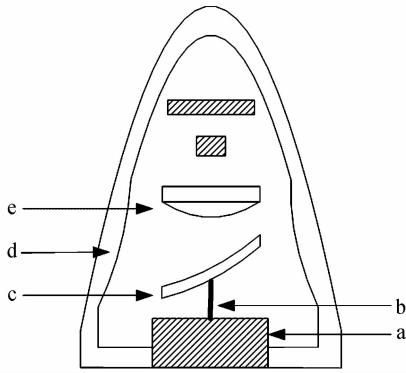


图2 系统组成原理图
Fig. 2 System components diagram

聚焦一体化透镜 c 全向动态扫描, 激光探测到目标后, 漫反射回波信号经接收透光/聚焦一体化窗口 d 第一次聚焦接收, 照射在全反/聚焦一体化透镜 c 上, 经二次聚焦并反射, 到达接收聚焦透镜, 由接收聚焦透镜 e 将回波信号第三次汇聚, 通过窄带滤波片滤除近红外波长范围以外的杂波, 最后到达光敏探测器上, 由光敏探测器将光信号转变为电信号, 送至处理电路处理. 系统工作流程图如图 3.

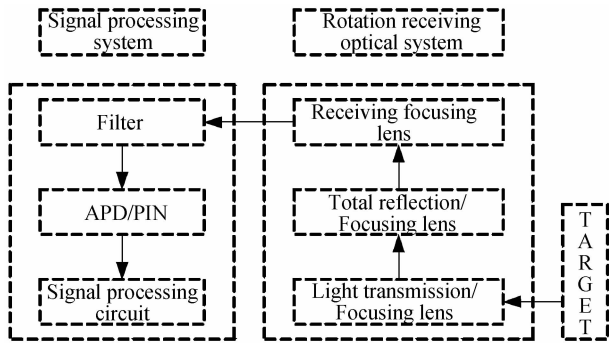


图3 系统工作流程图
Fig. 3 Work flowchart system

本方案采用旋转扫描装置, 旋转扫描装置主体为高速旋转电机, 接收透镜安装在高电机转子上, 随转子高速旋转, 完成空间 360°大视场探测, 仅仅采用一个激光探测器, 便可实现空间 360°激光回波探测, 激光探测器数量被减至最少. 在激光引信中, 为了减小引信的体积, 降低引信成本, 激光引信半导体激光器的光学准直系统一般都不采用二级或多级光学准直系统, 而是采用单级单透镜光学系统. 本文根据大视场激光引信光学透镜结构组成, 将全反平面镜和接收透光窗口设计成和带有聚焦功能的光学透镜, 实现回波激光束的多级整形, 从而增加回波激光束能量, 提高激光探测距离.

3 大视场多级光学接收系统设计及 ZEMAX 仿真

非球面光学比球面光学有更大的优势, 可以提高系统相对口径比, 扩大视场角, 在提高光束质量的

同时可减小透镜数量, 有利于激光近炸引信的小型化. 采用非球面光学透镜, 在提高激光近炸引信光束质量的同时, 又能使结构相对简单, 重量减轻, 这对整个系统具有重要的意义.

非球面曲面方程为

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + a_2r^2 + a_4r^4 + a_6r^6 + \dots \quad (1)$$

式中: Z 为镜面凹陷度; c 为非球面的基准面或者辅助球面的曲率; r 为镜面的孔径半径; k 为锥面度; a_2 、 a_4 、 a_6 为多项式系数^[11]. Z 与 r 关系示意图如图 4.

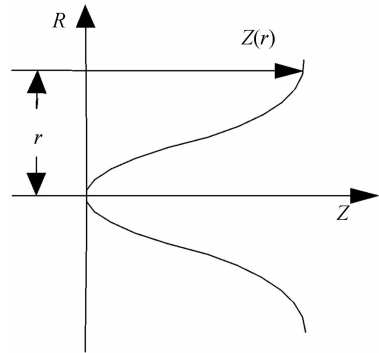


图4 Z 与 r 关系示意图
Fig. 4 Relationship diagram of Z and r

当 a_2 、 a_4 、 a_6 等系数等于 0 时, 方程变为二次曲面方程为^[12-14]

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}}$$

本文采取的半导体激光器波长为 905 nm, 发散角为 35°(⊥) × 10°(∥).

用 ZEMAX 软件进行半导体激光器接收聚焦透镜设计, 接收光学模块焦距设计为 20.5 mm, 通光孔径为 16 mm, 入瞳直径为 15 mm, 接收视场角为 4.2°, 透过率为 0.70. 接收模块结构如图 5.

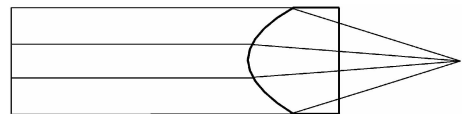


图5 非球面接收透镜结构图
Fig. 5 Aspheric focusing lens structure

非球面聚焦透镜像差如表 1 所示, 结果显示系统像质得到有效改善.

表 1 非球面接收透镜像差

Table 1 Aberration of the aspheric receiving lens

Surf	SPHA S ₁	COMA S ₂	ASTI S ₃	FCUR S ₄	DIST S ₅
1	-0.081 640	0.003 965	-0.000 022	0.000 198	0.000 007
STO	0.063 282	-0.002 147	0.000 216	0.000 098	-0.000 334
IMA	0.000 000	0.000 000	0.000 000	0.000000	0.000 000
TOT	0.036 971	-0.001 479	0.000 305	0.000 401	-0.000 008

传统激光引信中, 全反平面镜只有反射功能, 接

收透光窗口的功能也是单一的透光,现考虑将两者均设计为具有光学聚焦功能的光学镜片,与上述步骤一致,进行全反平面镜和接收透光窗口设计;采用 ZEMAX 光学软件,对比分析初始远场光斑、经单级透镜聚焦后的远场光斑以及多级聚焦透镜组聚焦后的远场光斑样图,分别如图 6(a)、(b)、(c)所示,可见,初始光斑较大且能量发散,中心亮度微弱;经传

统单级透镜聚焦整形后,光斑尺寸相对减小,能量集中,中心辐照亮度提高到 0.6308 W/cm^2 ;经多级光学聚焦透镜汇聚后,光斑尺寸显著减小且光斑均匀,光束能量高度汇聚且分布更集中,中心辐照亮度达到 5.0469 W/cm^2 ,与单级非球面聚焦透镜相比,将近增加了 8 倍,大大提高了光束汇聚效率,有效提高了系统探测距离。

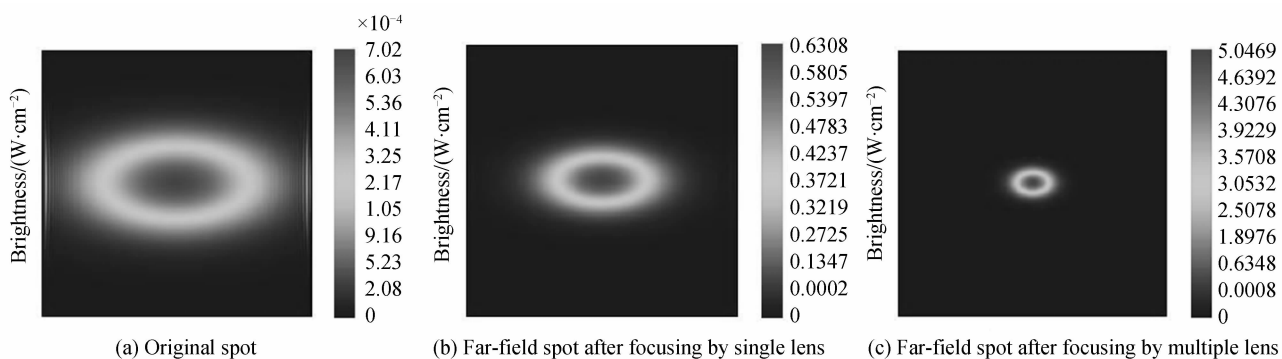


图 6 远场光斑截面图

Fig. 6 Far-field spot drawing

4 实验

首先进行不同距离目标探测实验,根据前文设计加工多级非球面准直透镜组,将目标放置于不同距离,测得目标回波信号分别如图 7 所示.由实验结

果知,在目标距离为 10 m 时,回波信号幅值约为 6 V 左右,当目标位于 15 m 处时,回波幅值约为 1 V,当目标处于 20 m 处时,回波幅值达到 0.05 V 左右,且脉宽略有展宽,可见该大视场接收系统可有效实现激光近炸引信目标 360° 周向探测。

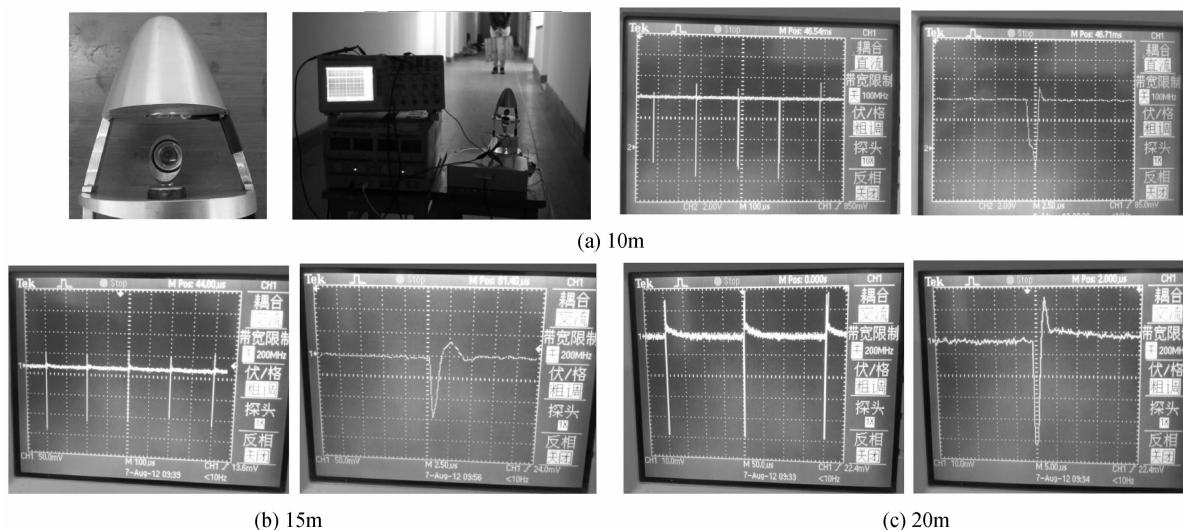


图 7 不同距离时的目标回波信号

Fig. 7 The echo signal when detection range is different

采用传统非球面接收聚焦透镜和本文设计的聚焦整形透镜组,进行不同聚焦条件下光斑聚焦整形对比试验,图 8(a)为半导体脉冲激光器出射的未经任何聚焦整形的远场光斑,经过常规单级非球面聚焦透镜整形后的光斑如图 8(b)所示,图 8(c)为经聚焦整形透镜组聚焦后的远场光斑.可见,半导体激光

器出射的初始光斑能量发散,尺寸巨大且不均匀,经过单级非球面聚焦透镜整形后的光斑尺寸有所减小,光斑能量集中,经聚焦整形透镜组汇聚后的光斑尺寸明显减小,光斑呈现规则圆形,中心辐照亮度得到显著提高.与 ZEMAX 软件仿真结果吻合,验证了多级聚焦整形光学透镜组的优越性。

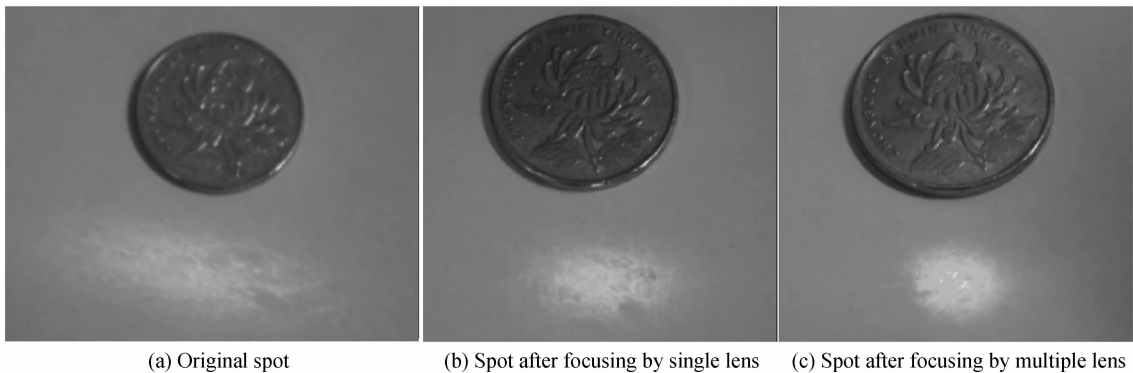


图8 光学汇聚实验光斑

Fig. 8 Experimental spot of optical focusing

5 结论

针对常规弹药激光近炸引信空间和系统功耗的限制,本文提出了一种新型的光学大视场接收方案,采用单接收器旋转扫描方式实现目标全向探测,同时采用多级光学聚焦透镜组,将传统的接收全反平面镜设计成全反、聚焦功能复合式一体化透镜,将传统光学接收透光窗口设计成同时具有光学聚焦和透光功能的一体化整流罩,实现目标回波的三级聚焦整形,充分利用了激光引信光学结构,提高了光斑聚焦整形能力和目标探测可靠性,增加了系统有效探测距离,实现了目标周向 360° 大视场探测,使激光方位探测系统在常规弹药中的应用成为可能。

参考文献

- [1] GUO Jing, ZHANG He, ZHANG Xiang-jin, *et al.* Avalanche photodiode detecting technology for laser fuze[J]. *Journal of Detection and Control*, 2010, **32**(1): 77-79.
郭靖, 张河, 张祥金, 等. 激光引信雪崩二极管光电探测[J]. *探测与控制学报*, 2010, **32**(1): 77-79.
- [2] DING Zhi-zhong, WANG Ke-yi, ZHAN Zhen-xian. Application of aspherical liquid lens in laser diode beam shaping [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(4): 623-626.
丁志忠, 王克逸, 詹珍贤. 非球面液滴透镜在LD光束整形中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(4): 623-626.
- [3] CHEN Hong-jun, ZHANG Zheng-hui. Comment on the laser proximity fuze [J]. *Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute*, 2002, **17**(3): 310-312.
陈洪钧, 张正辉. 激光近炸引信发展评述[J]. *海军航空工程学院学报*, 2002, **17**(3): 310-312.
- [4] ZHANG Zheng-hui, YANG Ming, XU Shi-wen. Analysis of FOV configuration in laser proximity fuze[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(6): 700-704.
张正辉, 杨明, 许士文. 激光引信光束布局方式的选择与分析[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(6): 700-704.
- [5] WANG De, LI Xue-qian. New progress in semiconductor lasers and their applications [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(3): 279-283.
王德, 李学千. 半导体激光器的最新进展及其应用现状[J]. *光学精密工程*, 2001, **9**(3): 279-283.
- [6] LUO Wei, DENG Jia-hao, ZHANG Tong, *et al.* Research and design of laser fuze target azimuth detection system[C]. The tenth symposium of Chinese Society of Astronautics Special Equipment Professional Committee, 2000.
罗伟, 邓甲昊, 张彤, 等. 激光引信目标方位探测系统研究与设计[C]. 中国宇航学会特种装备专业委员会第十次学术交流会, 2000.
- [7] GAN Lin, ZHANG He, ZHANG Xiang-jin, *et al.* Study on single-beam pulse circumferential detection technology of laser proximity fuze[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(1): 85-89.
甘霖, 张合, 张祥金, 等. 激光近炸引信单光束脉冲周向探测技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(1): 85-89.
- [8] LE Yi-chang. Directional Detection Technology-Directional antenna probe and feedback technology [D]. Master degree thesis of Beijing Institute of Technology, 1996.
乐以长. 定向探测技术研究-定向探测天线及反馈技术[D]. 北京理工大学硕士论文, 1996.
- [9] FENG Ying. Research on key technology of short-range pulse laser-magnetism compound orientation detection in conventional ammunition fuze [D]. Doctoral dissertation of Nanjing University of Science and Technology, 2011.
冯颖. 常规弹药引信脉冲激光与磁复合近程方位探测系统关键技术研究[D]. 南京理工大学博士论文, 2011.
- [10] BUZZARD G. Modeling the interaction of a laser target detection device with the sea surface[C]. 54th Annual Fuze Conference, 2010, **4**: 67-69.
- [11] BUZZARD G. Development in laser target detection device technology[C]. *Second Annual International Missile and Rocket Symposium*, 2002, **18**(2): 103-106.
- [12] YU Xiu-ying, WANG Jiang, JIANG Yong. Aspheric collimating and shaping element design for diode laser range finders[J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, **16**(5): 71-73.
喻秀英, 王江, 姜勇. 半导体激光测距机非球面准直整形原件的设计[J]. *电光与控制*, 2009, **16**(5): 71-73.
- [13] GAN Lin, ZHANG He, ZHANG Xiang-jin. Research on multi-level aspheric collimating lens of laser proximity fuze [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(7): 0702009. 1-4.
甘霖, 张合, 张祥金. 激光近炸引信多级光学准直整形透镜研究[J]. *中国激光*, 2013, **40**(7): 0702009. 1-4.
- [14] GAN Lin, ZHANG He, ZHANG Xiang-jin. Spot image processing and simulation of the laser proximity fuze [C]. 2011 International Conference on Image Analysis and Signal Processing, 2011, 159-162.
- [15] GAN Lin, ZHANG He, ZHANG Xiang-jin. Study of receive focusing aspheric optical lens of laser fuze [C]. 2012 International Symposium on Photonics and Optoelectronics, 2012, 73-76.