

几何截断定距激光引信系统参数优化

袁海璐, 查冰婷*, 张 合

(南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

摘 要: 几何截断定距激光引信因其结构简单、定距精度高、抗干扰能力较好, 在低成本弹药中有较大的应用需求, 其定距距离和精度与系统参数设计密切相关。为设计满足要求的几何截断定距激光引信系统参数, 建立几何截断定距回波功率模型, 分析系统参数的变化对工作距离的影响, 揭示工作距离与系统参数的关系, 并计算得到满足条件的系统参数取值区间, 对比分析后得到理论上的最优系统参数 $d=63\text{ mm}$ 、 $\theta_r=35\text{ mrad}$ 、 $\theta_t=10\text{ mrad}$ 、 $\alpha_r=0.5\pi\text{ rad}$ 、 $\alpha_t=0.45\pi\text{ rad}$, 设计激光定距模拟实验平台验证设计结果, 实验结果与理论一致, 表明设计参数能够满足系统要求, 该研究可为几何截断定距激光引信的参数设计提供参考。

关键词: 激光近炸引信; 几何截断定距; 回波功率; 参数优化

中图分类号: TJ430 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0806001

Parameter optimization of laser fuze system with geometry intercepting ranging

Yuan Hailu, Zha Bingting*, Zhang He

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

Abstract: Because of its simple structure, high precision ranging and good anti-interference ability, the laser fuze system with geometric intercepting ranging has a larger requirement in low-cost ammunition, as well as the ranging of the point of explosion and accuracy are all closely related to the system parameter design. In order to meet the requirements for the design of the parameters of the laser geometry intercepting ranging system, the geometric intercepting interval echo power model was established and the influence of the change of these parameters on the distance of work was analyzed, and the relation between work distance and system parameter was revealed. Then the value domain of parameter meeting these conditions was calculated. Through comparison and analysis, the optimal parameters of the system in theory obtained were $d=63\text{ mm}$, $\theta_r=35\text{ mrad}$, $\theta_t=10\text{ mrad}$, $\alpha_r=0.5\pi\text{ rad}$, $\alpha_t=0.45\pi\text{ rad}$. The experiment platform of the laser ranging simulation was designed to verify design results. Then the experimental results were consistent with theory. So it indicates that the design parameters can meet the system requirements. This research can provide reference to the laser geometry intercepting ranging system's parameters.

Key words: laser proximity fuze; geometry intercepting ranging; echo power; parameter optimization

收稿日期: 2018-03-05; 修订日期: 2018-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(51709147)

作者简介: 袁海璐(1995-), 女, 博士生, 主要从事水下激光扫描成像技术方面的研究。Email: 1852685016@qq.com

通讯作者: 查冰婷(1990-), 女, 讲师, 博士, 主要从事激光近程探测方面的研究。Email: zhabingting@163.com

0 引 言

激光近炸引信通过处理光电探测器接收的由特定激光光束照射产生的目标反射回波对目标进行定距^[1]。激光引信波束极窄、接收视场有限、发射峰值功率较大、方向性好,因此激光探测系统在定距精度、定距距离、角分辨率、抵抗电磁干扰能力等许多方面都有非常好的特性^[2]。

几何截断体制作为一种定距体制在激光近炸引信中得到了广泛使用^[3-5]。几何截断定距系统对目标表面材质和涂覆物的散射特性不敏感,定距精度高,抗干扰性能较好^[6]。几何截断定距系统的结构参数、光学系统参数对其定距能力有直接影响,为了在最佳炸点探测到目标信号,需要对安装角度、光学系统参数等进行调节。文中以具体要求的激光近炸引信设计为背景,通过建立几何截断定距体制的数学模型,分析系统参数变化对定距距离的影响,结合极限思想对系统参数进行选择得到最优方案。最后设计激光定距模拟实验平台,通过实验对理论方案进行验证。

1 几何截断定距距离模型建立

几何截断定距系统原理如图 1 所示,在垂直弹轴的方向上,当目标进入激光发散角和接收视场角重叠区域时,接收机才能探测到目标反射的激光回波,经光电转换、放大、输出一系列脉冲。重叠区域的范围对应着引信最大和最小作用距离^[2]。

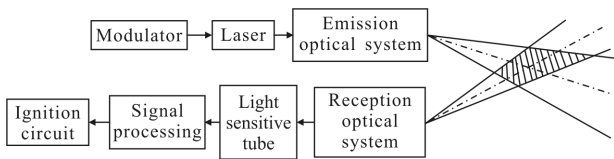


图 1 几何截断定距体制系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of geometric intercepting ranging system

激光探测系统发射光束和接收视场如图 2 所示。 O_t 为激光束发射中心, O_r 为接收中心, d 表示发射中心和接收中心之间的距离。设 O_t 指向 O_r 为正方向, α_t 为发射偏角, α_r 为接收偏角。激光束发射角称为 θ_t , 接收角称为 θ_r 。发射光束和接收视场相交于 $ABDC$, 过各点做目标平面的平行线。

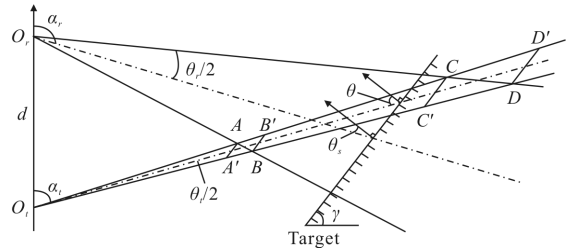


图 2 发射光束与接收视场示意图

Fig.2 Schematic diagram of transmitting beam and receiving field

如图 2 所示,工作区 $BB'CC'$ 内,照射在目标平面上的激光束完全处于接收域,能得到最好的探测效果。 A 、 B' 、 C 和 D' 点到 O_tO_r 的距离分别称为近端盲距 R_n ,最近工作距离 R_s ,最远工作距离 R_d 和远端盲距 R_f 。要求发射光束和接收视场存在有限的相交区域需要满足条件 B 点和 C 点都存在^[7],即:

$$\alpha_t + \theta_t/2 < \alpha_r + \theta_r/2 \tag{1}$$

$$\alpha_t - \theta_t/2 < \alpha_r - \theta_r/2 \tag{2}$$

根据三角函数 $\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B}$, 得到近端盲距 R_n 表达式:

$$R_n = \frac{d \sin(\alpha_r + \theta_r/2) \sin(\alpha_t - \theta_t/2)}{\sin(\alpha_r + \theta_r/2 - \alpha_t + \theta_t/2)} \tag{3}$$

同样的方法,可得到远端盲距 R_f 、最近工作距离 R_s 、最远工作距离 R_d 的表达式,公式(3)~(6)中 d 均表示 O_tO_r 之间的距离:

$$R_f \approx \frac{d \sin(\alpha_r - \theta_r/2) \sin(\alpha_t + \theta_t/2)}{\sin(\alpha_r - \theta_r/2 - \alpha_t - \theta_t/2)} \tag{4}$$

$$R_s \approx \frac{d \sin(\alpha_r + \theta_r/2) \sin(\alpha_t + \theta_t/2)}{\sin(\alpha_r + \theta_r/2 - \alpha_t - \theta_t/2)} \tag{5}$$

$$R_d \approx \frac{d \sin(\alpha_r - \theta_r/2) \sin(\alpha_t - \theta_t/2)}{\sin(\alpha_r - \theta_r/2 - \alpha_t + \theta_t/2)} \tag{6}$$

根据激光探测距离的方程,接收系统回波功率为:

$$P_r = \frac{P_t \eta_t \eta_r k(R) e^{-2\mu R} \rho A_r}{\pi R^2} \tag{7}$$

式中: P_r 为激光接收功率; P_t 为激光发射功率; η_t 为发射光学系统的效率; η_r 为接收光学系统的效率; $k(R)$ 为视场重合造成的衰减率; ρ 为目标反射率; μ 为大气衰减系数; R 为发射系统距目标的距离; A_r 为接收机光学系统孔径面积。从公式(7)中可以看出影响接收系统回波功率的主要因素是发射系统与目标的距离 R 及视场重合衰减率 $k(R)$ 。在盲区 $k(R)=0$, 在工作区内 $k(R)=1$, 在半工作区有 $0 < k(R) < 1$ ^[7]。

$$k(R) = \frac{S_1(R)}{S(R)} \quad (8)$$

式中： $S(R)$ 为发射光束的截面积； $S_1(R)$ 为发射光束与接收视场重叠区域的截面积。

2 系统参数分析

设计发射系统中心与接收系统中心之间的距离 $d=60\pm 6\text{ mm}$, 发射角 α_t 和接收角 α_r 的范围在 $0\sim 180^\circ$, 发射散角 $\theta_t=10\text{ mrad}$, 接收视场角 $\theta_r=35\pm 5\text{ mrad}$, 要求系统设计满足定距距离 0.4 m , 定距精度 $\pm 0.1\text{ m}$ 。为满足设计要求, 近端盲距 R_n 、远端盲距 R_f 、最近工作距离 R_s 以及最远工作距离 R_d 需要满足不等式组:

$$\begin{cases} 0.3\text{ m} < R_n < 0.4\text{ m} \\ 0.4\text{ m} < R_f < 0.5\text{ m} \\ 0.3\text{ m} < R_s < 0.4\text{ m} \\ 0.4\text{ m} < R_d < 0.5\text{ m} \end{cases} \quad (9)$$

设初始参数 $d=60\text{ mm}$, $\theta_r=35\text{ mrad}$, $\theta_t=10\text{ mrad}$, $\alpha_t=0.45\pi\text{ rad}$, $\alpha_r=0.5\pi\text{ rad}$ 。取以上四个变量 θ_r 、 θ_t 、 α_t 及 α_r 中三个为固定值, 一个为变量作函数变化曲线。如图 3 所示。

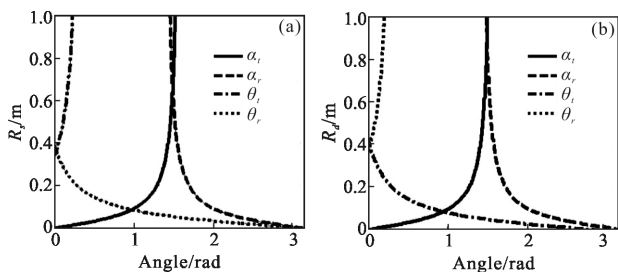


图 3 α_t 、 α_r 和 θ_t 及 θ_r 的变化对 R_s 及 R_d 的影响曲线

Fig.3 Curve of the influence on R_s , R_d with the changes in α_t , α_r and θ_t , θ_r

如图 3(a)、3(b)所示分别为发射角 α_t 、接收角 α_r 和接收视场角 θ_r 以及发散角 θ_t 对 R_s 和 R_d 的影响。 R_s 和 R_d 都随发射角 α_t 的增加而急剧上升, 随着接收角 α_r 的增加急剧下降, 近端工作距离 R_s 随着 θ_t 的增加明显上升, 且对 θ_t 的一些微弱变化很敏感。远端工作距离 R_d 随接收视场夹角 θ_r 增大而增大, 且 R_d 对 θ_r 的变化更为敏感。

3 系统参数最优方案求解

取 α_t 、 α_r 为自变量, 对不等式组(9)进行数学计

算。得到如图 4 所示图像。

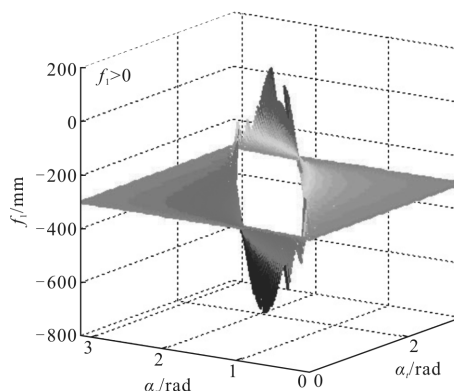


图 4 函数 $R_n-300>0(\text{mm})$ 的三维图像

Fig.4 Three-dimensional image of $R_n-300>0(\text{mm})$ function

如图 4 所示, 函数 $f_1=R_n-300>0$, 从图中截取 $f_1>0$ 时, 接收角 α_r 满足不等式 f_1 时的取值范围 $[1.012, 2.236]$ 。在此区间内 f_1 可能大于 0, 也可能小于 0, 这将由发射角 α_t 的取值决定, 但是 α_r 不在此区间时, f_1 绝对小于 0。对其他不等式做同样的分析, 得到结果见表 1。

表 1 满足不等式组的接收角 α_r 的取值范围

Tab.1 Data range of receiving angle α_r which is satisfied with the system of inequalities

	α_r/rad
f_1	$[1.012, 2.236]$
f_2	$(0, 1.225] \cup [1.483, 1.81] \cup [2.023, \pi)$
f_3	$(0, \pi)$
f_4	$[1.384, 1.597] \cup [1.757, 1.917]$
f_5	$(0, 1.118] \cup [1.278, 1.917] \cup [2.13, \pi)$
f_6	$[0.9585, 2.29]$
f_7	$[1.544, 1.757]$
f_8	$(0, \pi)$

如表 1 所示, 当 $\alpha_r \in [1.544, 1.597]$ 时, f_2 、 f_3 、 f_5 、 f_8 不等式成立, 为满足 f_1 、 f_4 、 f_6 、 f_7 的要求, 需要寻找 α_t 的范围, 如表 2 所示。

在实际生产中, 为降低加工难度, 在 $\alpha_r \in [1.544, 1.597]$ 内取 $\alpha_r=1.570\text{ rad}=90^\circ$ 。为更好地满足定距距离 0.4 m 的设计要求, 取满足条件的 α_t 的值使最近、最远工作距离的中点尽量靠近 0.4 m , 即 $(R_s+R_d)/2 \approx 400$, 取 $\alpha_t=81^\circ$, 之后通过调节 d 或 θ_t 的

值对定距距离和定距精度的要求给予补偿。由于发射中心和接收中心之间的距离 d 在试验中更容易调节,所以优先选择 d 作为可调节对象。

表 2 α_r 区间内 α_t 满足不等式组的取值

Tab.2 Data range of α_t which is satisfied with the system of inequalities in the data range of α_r

α_r/rad	α_t/rad	
	Satisfying the value interval of inequality (9)	$(R_s+R_d)/2 \approx 400$
1.562	[1.401,1.420]	1.410
1.568	[1.407,1.426]	1.416
1.570	[1.410,1.429]	1.421
1.574	[1.413,1.432]	1.422
1.580	[1.419,1.438]	1.428

如表 3 所示,最终优化方案系统参数设计为 $d=63\text{ mm}$ 、 $\theta_r=35\text{ mrad}$ 、 $\theta_t=10\text{ mrad}$ 、 $\alpha_r=0.5\pi\text{ rad}$ 、 $\alpha_t=0.45\pi\text{ rad}$ 。将最优方案设计的系统参数代入接收回波功率方程(7)中,取 $P_t=75\text{ W}$ 、 $\eta_t=\eta_r=0.95$ 、 $\rho=0.3$ 、 $\mu=0.2$ 、 $A_r=9\times 10^{-4}\pi\text{ m}^2$,对于 $S(R)$ 和 $S_1(R)$ 的值可以通过尺寸绘图获得。结果绘制成图 5。

表 3 系统参数

Tab.3 System parameters

Parameters	Pre-adjustment value	Adjusted value
$\alpha_t/(\text{°})$		81
$\alpha_r/(\text{°})$		90
θ_t/mrad		10
θ_r/mrad		35
d/mm	60	63
R_s/mm	351.36	368.93
R_d/mm	410.92	431.47
R_r/mm	331.46	348.04
R_t/mm	441.85	464.05
$(R_s+R_d)/2/\text{mm}$	381.14	400.20

从图 5 中可以看出接收回波功率信号最强的距离点靠近近端工作距离点,若在设计中设置此点尽量靠近定距距离 400 mm ,可实现在定距距离处接收回波功率最强。

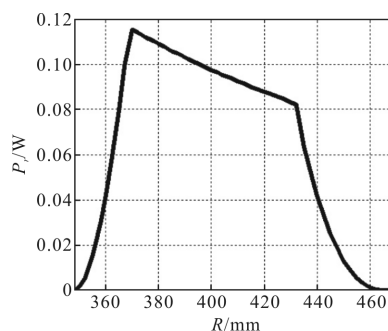


图 5 接收回波功率 P_r 与目标距离 R 之间的相关曲线

Fig.5 Curve of receiving echo power P_r and object distance R

仍取 $\alpha_r=0.5\pi$,为满足定距距离处回波信号最强取 α_t 可取区间 $[1.410\text{ rad}, 1.429\text{ rad}]$ 内的最大值 1.429 rad ,之后调节 d 使 R_s 靠近 400 mm 。最终参数设定为 $d=61\text{ mm}$ 、 $\theta_r=30\text{ mrad}$ 、 $\theta_t=10\text{ mrad}$ 、 $\alpha_r=0.5\pi\text{ rad}$ 、 $\alpha_t=1.429\text{ rad}$,此时 $R_n=374.55\text{ mm}$ 、 $R_t=497.33\text{ mm}$ 、 $R_s=399.59\text{ mm}$ 、 $R_d=459.13\text{ mm}$,绘制回波功率 P_r 与目标距离 R 的相关曲线,如图 6 所示,可以实现在 400 mm 处探测弱目标的可能。

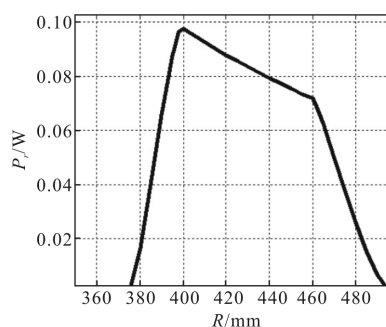


图 6 探测弱目标时激光探测接收功率 P_r 与目标距离 R 之间的相关曲线

Fig.6 Curve of laser receiving power P_r and object distance R when detecting weak targets

4 激光定距实验

激光定距模拟实验台的搭建是为了在测试激光探测系统的性能时可以调整激光发射系统和接收系统的位置和角度^[8]。

图 7 所示为激光定距模拟实验台^[9-11],A 为接收器。C 为激光发射器,轨道 E 上的滑块只能沿导轨进行单方向滑动。安装在旋转台 D2 和 D1 上的两面反射镜 B2 和 B1 反射发射激光束和目标回波。两套反射镜安装在各自的滑块上,通过调整滑块在标有刻

度的滑轨上的位置从而确定两面反射镜之间的距离 d 。发射角 α_t 和接收角 α_r 由反射镜的偏转角度来控制。

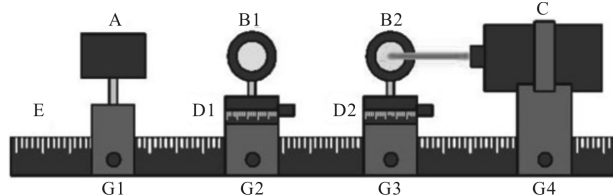


图 7 激光定距模拟实验平台

Fig.7 Laser distance simulation experiment

安装实验仪器,对反射镜进行校验,设镜子与滑轨之间所夹的锐角为偏转角,反射镜 B2、B1 的偏转角分别为为 β_1 、 β_2 。根据设计要求 $\beta_1=\alpha_t/2$, $\beta_2=90^\circ-\alpha_r/2$,代入 α_t 和 α_r 的设计值得到 $\beta_1=40.5^\circ$ 、 $\beta_2=45^\circ$,其原理如图 8 所示。

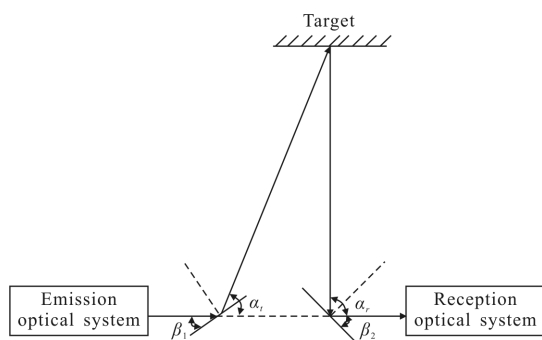


图 8 激光探测实验原理图

Fig.8 Schematic diagram of laser detection experiment

调整反射镜偏转角度,满足发射角和接收角的要求。将目标放置在不同距离,记录示波器上接收器的输出信号。系统参数 $\theta_t=10\text{ mrad}$ 、 $\theta_r=35\text{ mrad}$ 、 $d=63\text{ mm}$ 、 $\alpha_t=81^\circ$ 、 $\alpha_r=90^\circ$ 、 $\beta_1=40.5^\circ$ 、 $\beta_2=45^\circ$ 。如图 9 为盲区的回波信号、半工作区的回波信号以及工作区的回波信号。

进行多次试验,当目标处于 338.5~341.5 mm 时,回波信号从图 9(a)变化为图 9(b)所示波形,即实际测量得到近端盲距 R_n 的位置。当目标距离越来越远时,波形幅值逐渐增加如图 9(c)所示,当目标处于 395.5~413.5 mm 时出现最大幅值的波形,而目标处于 466.5~472.5 mm 时波形幅值逐渐减小到如图 9(b)所示。

由此可见,实际 R_n 、 R_i 、 R_s 、 R_d 与理论计算值相

近,理论结果与实际测试结果一致。出现数值偏差的原因可能是以下几方面:偏移量角的调整误差、实际光束发散角和视场角与额定参数有偏差。

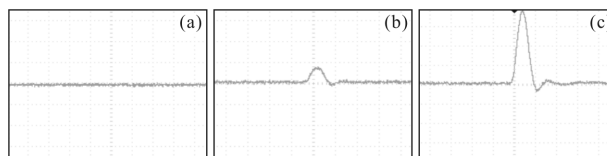


图 9 回波信号示意图

Fig.9 Schematic diagram of echo signal

5 结论

文中针对激光定距体制中的几何截断定距体制开展研究。通过理论分析、具体方案设计、构建实验平台、进行验证试验,完成对几何截断定距激光引信的参数设计和优化。针对系统参数建立数学模型,通过数学计算并结合函数图像,得到了理论最优方案系统参数 $\theta_t=10\text{ mrad}$ 、 $\theta_r=35\text{ mrad}$ 、 $d=63\text{ mm}$ 、 $\alpha_t=81^\circ$ 、 $\alpha_r=90^\circ$ 。搭建几何截断定距系统的模拟实验平台,经验证理论设计方案能够满足设计要求。

参考文献:

- [1] Wang Bing. Evaluation method of anti-jamming ability of laser proximity fuze fuze [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2012. (in Chinese)
王冰. 激光近炸引信抗干扰能力评估方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [2] Shi Chunbo, Ma Xianhua. Analysis of the influence of the detection field on the distance of laser fuze influence [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(S1): 368-371. (in Chinese)
史春波, 马献华. 探测视场对激光引信作用距离影响分析 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S1): 368-371.
- [3] Fu Qiang, Jiang Huilin, Wang Xiaoman, et al. Research on space laser communication research and development trends [J]. Chinese Optics, 2015, 5(2): 116-125. (in Chinese)
付强, 姜会林, 王晓曼, 等. 空间激光通信研究现状及发展趋势 [J]. 中国光学, 2015, 5(2): 116-125.
- [4] Sun Zhihui, Deng Jiahao, Sang Huiping, et al. Design and signal processing of digital pulse laser fuze detection system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38 (6): 1003-1007. (in Chinese)
孙志慧, 邓甲昊, 桑会平, 等. 数字化脉冲激光引信探测系

- 统设计与信号处理 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 1003-1007.
- [5] Jin Guang, Li Yanjie, Zhong Xing, et al. Design of space imaging and laser communication collector-based optical system[J]. Optical Precision Engineering, 2014, 22(8): 2067-2074. (in Chinese)
金光, 李艳杰, 钟兴, 等. 空间成像与激光通信共口径光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2067-2074.
- [6] Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang Jun. Progress of high-power semiconductor laser beams [J]. Chinese Optics, 2015, 8(4): 517-534. (in Chinese)
王立军, 彭航宇, 张俊. 大功率半导体激光合束进展[J]. 中国光学, 2015, 8(4): 517-534.
- [7] Yu Xiaonan, Tong Shoufeng, Dong Yan, et al. Single beam tracking subsystem of spatial laser communication system [J]. Optical Precision Engineering, 2014, 22(12): 3348-3353. (in Chinese)
于笑楠, 佟首峰, 董岩, 等. 空间激光通信组网单光束跟踪子系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3348-3353.
- [8] Zha B, Zhang H. Study on the test system of non-coaxial laser detecting field [C]//2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2015: 300-304.
- [9] Zha Binting, Zhang He, Tan Yayun. The study of the echo power of underwater laser fuze [J]. Sensor and Microsystem, 2013, 32(1): 69-72, 75. (in Chinese)
查冰婷, 张合, 谭亚运. 水下激光引信回波功率研究[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(1): 69-72, 75.
- [10] Zha Binting, Zhang He, Zhang Xiangjin, et al. The optimal design of an underwater single-beam pulse laser azimuth recognition system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(4): 895-899. (in Chinese)
查冰婷, 张合, 张祥金, 等. 水下单光束脉冲激光方位识别系统角度参数优化设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 895-899.
- [11] Huang Yong. Geometric truncation of anti-interference design and its realization [D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
黄勇. 增强抗干扰设计的几何截断型定距方案及其实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.