

激光多档定距引信系统参数综合优化

查冰婷¹, 周 郁¹, 谭亚运²

(1. 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;
2. 中国电子科技集团公司第二十八研究所, 江苏南京 210007)

摘 要: 为配合多模战斗部的多位置点起爆要求, 激光近炸引信需实现在 1~25 m 之间的多档定距, 对于非同轴的激光引信, 其探测距离范围与系统参数的选取密切相关。基于系统探测距离要求, 建立非同轴系统工作距离计算模型, 分析激光引信系统参数变化对最近工作点和最远工作点的影响, 以接收偏角和发射接收中心距为变量, 在满足约束条件的情况下, 利用多岛遗传算法对变量进行优化。优化结果表明: 在满足约束条件的情况下, 接收偏角最小为 90.97°, 中心距为 0.03 m。搭建激光多档定距实验平台对优化的系统参数进行验证, 实验结果表明, 设计系统参数能够满足多档定距要求。研究可为激光多档定距引信系统参数设计提供参考。

关键词: 激光引信; 多档定距; 非同轴系统; 多参数优化

中图分类号: TJ430 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0403010

Comprehensive parameter optimization of laser fuze system with multi-ranging

Zha Bingting¹, Zhou Yu¹, Tan Yayun²

(1. ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China)

Abstract: In order to meet the multi position initiation requirements of multi-mode warhead, the laser fuze needs to simultaneously achieve multi-ranging distances from 1 m to 25 m. For the noncoaxial laser fuze, the range of the detection distance is closely related to the system parameters. Based on system detection distance requirements, the working distance calculation model of the noncoaxial system was established, the influence of the system parameter changes of the laser fuze on the nearest working point and the furthest working point was analyzed. The receiving deflection angle and the center distance between the transmitting and receiving system were variables. In the case of satisfying the constraints, the multi-island genetic algorithm was used to optimize the variables. The optimization result shows that, under the condition of satisfying the constraints, the minimum receiving deflection angle is 90.97°, and the center distance is 0.03 m. The experimental result shows that the designed system parameters can completely meet the requirements of multi-ranging distance. The research can provide reference for the parameter design of laser fuze system with multi-ranging.

Key words: laser fuze; multi-ranging; noncoaxial system; multi-parameter optimization

收稿日期: 2020-02-03; 修订日期: 2020-03-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51709147)

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

0 引言

多模战斗部具备高效毁伤多类目标的能力,是目前研究的热点,而其形成不同毁伤元时要求引信对应在不同目标距离位置起爆,即具备多档定距能力^[1]。激光近炸引信通过光脉冲的往返时间进行测距^[2],只需改变程序中设定的目标时间值,即可方便地改变引信的定距距离,易于实现多档定距。但激光引信受弹上体积限制,发射和接收系统通常存在一定距离间隔,即为非同轴光学系统。非同轴光学系统由于发射和接收系统不同轴,其前向探测区域中必然存在盲区^[3],应用于多档定距时难以保证各距离档均处于有效探测区。

现有研究中,中国空空导弹研究院李喆团队对发射光束束散角、发射光束倾角、接收系统光轴角度、接收系统视场角度的综合测试进行了深入研究^[4];燕山大学设计了一种周视激光引信准共轴分区探测光束布局方式,改善了非同轴激光引信的探测盲区^[5];黄勇针对几何截断定距激光引信开展研究并设计了系统参数^[6];陈晓宇提出了一种四象限连续视场激光引信光路,并对其光学发射视场与接收视场空间交叉区域进行了优化设计^[7]。南京理工大学针对激光引信非同轴光学系统的探测区分布进行了探讨,分析了激光引信不同系统参数对探测区分布位置的影响,并对远距离目标探测时的系统参数进行了优化设计,使激光引信的定距性能得到提升^[8]。但尚未有针对于激光多档定距的系统参数研究。

文中以特定要求下的激光多档定距引信为背景,通过建立其工作距离计算模型,分析引信定距距离与系统参数的变化关系,探讨系统参数变化对定距距离范围的影响,在尽可能使各档距离均属于充满区的前提下,采用多参数优化对此激光多档定距引信系统参数进行优化计算,以获得最优解,即满足接收偏角最小时的一组系统参数。最后,搭建激光定距实验台,对所优化数据进行验证。

1 工作距离计算模型

根据对地前视小视场激光近炸引信的工作特点,属非同轴激光探测系统,其发射光束和接收视场在横截面上的交会情况如图 1 所示。 O_t 为激光束发射中

心, O_r 为接收中心, d 为发射中心与接收中心的间距, α_t 为发射偏角, α_r 为接收偏角, θ_t 为激光束经光学镜片准直后在 O_t 和 O_r 连线方向的发散角, θ_r 为接收聚焦透镜组在 O_t 和 O_r 连线方向的视场角^[9]。

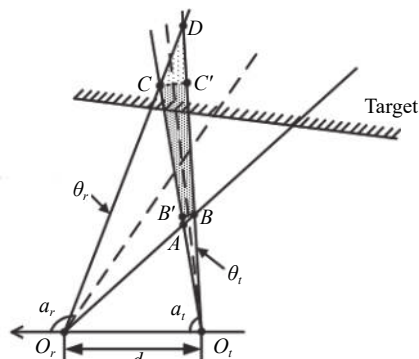


图 1 发射光束和接收视场在横截面上的交会情况示意图

Fig.1 Sketch of emitting beam and receiving field of view on the section

激光引信接收系统回波功率为:

$$P_r(R) = \frac{P_t \eta_t \eta_r k(R) e^{-2\mu R} \rho \cos \theta_s A_r}{\pi R^2} \quad (1)$$

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; θ_s 为目标平面法线与激光视场方向所夹角; A_r 为接收机光学系统孔径面积。在充满区内 $k(R)=1$, 在过渡区内 $0 < k(R) < 1$, 在盲区内 $k(R)=0$ ^[9]。

在充满区,发射光束全部在接收视场角内,发射激光的能量被最大限度地利用;在过渡区,发射光束仅有一部分在接收视场角内;在盲区,接收系统无回波信号。在图 1 中可见,发射光束与接收视场相交于 A、B、C、D 四点,这四个点将探测区分为充满区、过渡区和盲区。点 A 之前的区域均为近端探测盲区,由点 A 开始盲区结束进入过渡区,点 B 至点 C 之间为充满区,点 B' 与 $O_t O_r$ 的距离 R_s 称为最近工作距离,点 C 与 $O_t O_r$ 的距离 R_d 称为最远工作距离,点 D 以后的区域为远端探测盲区^[8]。

根据角度关系可知,点 B 存在即出现充满区的条件是:

$$\alpha_r + \frac{\theta_r}{2} > \alpha_t + \frac{\theta_t}{2} \quad (2)$$

点 C 存在即充满区截止的条件是:

$$\alpha_r - \frac{\theta_r}{2} > \alpha_t - \frac{\theta_t}{2} \quad (3)$$

根据正弦定理有:

$$\frac{|O_t O_r|}{\sin \angle O_t B O_r} = \frac{|O_t B|}{\sin \angle B O_r O_t} \quad (4)$$

$$\frac{|O_t B|}{\sin 90^\circ} = \frac{R_s}{\sin \angle B O_r O_t} \quad (5)$$

将公式 (3)、(4) 联立可求出最近工作距离 R_s :

$$R_s = \frac{d \sin\left(\alpha_r + \frac{\theta_r}{2}\right) \sin\left(\alpha_t + \frac{\theta_t}{2}\right)}{\sin\left(\alpha_r + \frac{\theta_r}{2} - \alpha_t - \frac{\theta_t}{2}\right)} \quad (6)$$

同理, 可求出最远工作距离 R_d :

$$R_d = \frac{d \sin\left(\alpha_r - \frac{\theta_r}{2}\right) \sin\left(\alpha_t - \frac{\theta_t}{2}\right)}{\sin\left(\alpha_r - \frac{\theta_r}{2} - \alpha_t + \frac{\theta_t}{2}\right)} \quad (7)$$

2 系统参数分析

系统中发射角 θ_t 和接收角 θ_r 均决定于光学透镜, 其数值不易改变, 按照工程经验分别设为定值 0.07° 和 2° 。发射偏角 α_t 与接收偏角 α_r 二者的变化对探测区分布影响效果相同, 为便于后续机械加工和安装, 设定系统的发射偏角 α_t 为定值 90° , 以接收偏角 α_r 为变量, 为防止造成体积要求过大, 设定接收偏角 α_r 的范围是 $90^\circ \sim 100^\circ$ 。同时以发射系统与接收系统的中心距 d 为另一变量, 考虑发射系统与接收系统均有一定的直径, 非同轴光学系统的发射接收中心距不能无限制地减小, 根据常规引信的体积限制, 设置 d 的范围为 $0.03 \sim 0.065$ m。按照设计要求, 激光引信需要满足 $1 \sim 25$ m 之间的多档定距, 最近工作距离 R_s 和最远工作距离 R_d 需满足以下不等式:

$$0 < R_s \leq 1 \text{ m} < 25 \text{ m} \leq R_d \quad (8)$$

由于 R_s 与 R_d 随 α_r 的变化规律无法直观看出来, 则取 d 为固定值 0.06 m, 分别绘制 R_s 、 R_d 关于 α_r 的函数图像, 如图 2、图 3 所示。

由图 2 和图 3 可知, R_s 、 R_d 都随接收偏角 α_r 的增加而下降, 在初始阶段, R_d 对于 α_r 的变化更为敏感, 几乎随 α_r 的增大呈急剧下降, 当 α_r 大于 1.65 rad 后, R_s 和 R_d 的下降则趋于平缓。

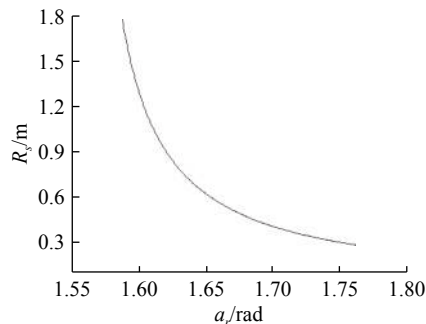


图 2 R_s 随 α_r 的变化曲线

Fig.2 Curve of R_s with the changes in α_r

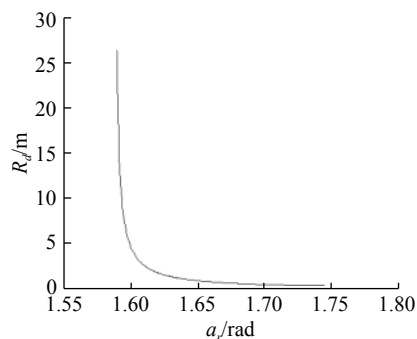


图 3 R_d 随 α_r 的变化曲线

Fig.3 Curve of R_d with the changes in α_r

3 系统参数最优方案求解

取接收偏角 α_r 和中心距 d 为自变量, 分别绘制 R_s 和 R_d 关于 α_r 、 d 的三维图像, 如图 4、图 5 所示。

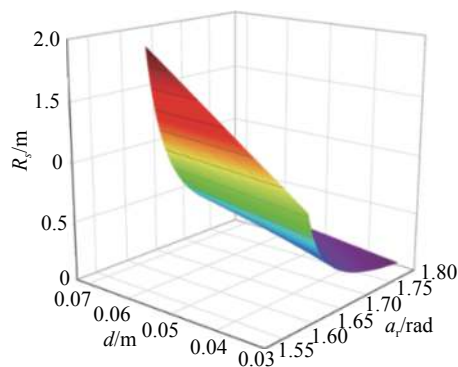


图 4 函数 R_s 的三维图像

Fig.4 Three-dimensional image of R_s

令 $0 < R_s \leq 1$, 从图像中可找出 α_r 的取值范围为 $[1.5877, 1.7627]$, 令 $R_d \geq 25$ m, 从图像中可找出 α_r 的取值范围为 $[1.5877, 1.5902]$, 则要满足 $R_s \leq 1 \text{ m} < 25 \text{ m} \leq R_d$, α_r 的取值范围必须为 $[1.5877, 1.5902]$ 。但是在这个区间内系统的定距距离是否一定能满足条件, 还决

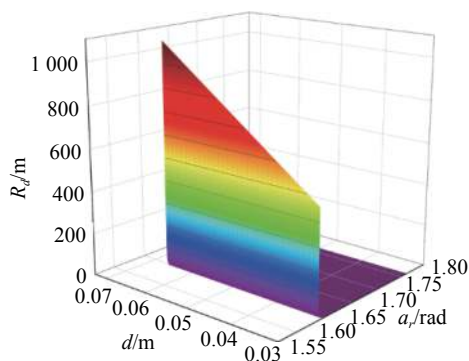


图 5 函数 R_d 的三维图像
Fig.5 Three-dimensional image of R_d

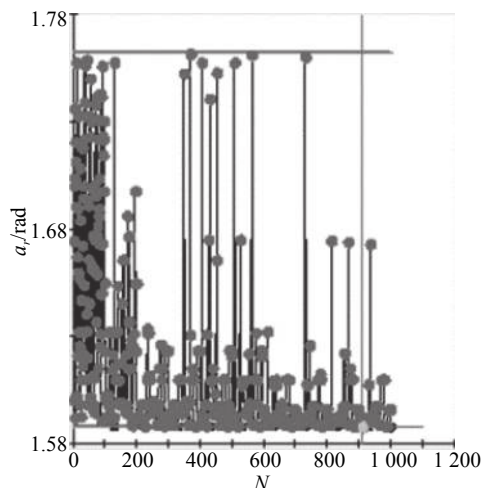


图 6 α_r 迭代过程
Fig.6 Iteration process of α_r

定于 d 的取值。

为了获得最优解,即满足接收偏角最小时的一组系统参数,需要对参数进行最优化处理。基于多岛遗传算法 (MIGA),在满足约束条件的情况下,对 α_r 和 d 的取值进行综合优化计算。将已确定的参数代入公式 (6)、(7) 中可得:

$$R_s = \frac{d \sin(\alpha_r + 0.01745) \sin(1.57141)}{\sin(\alpha_r - 1.55395)} \quad (9)$$

$$R_d = \frac{d \sin(\alpha_r - 0.01745) \sin(1.57019)}{\sin(\alpha_r - 1.58764)} \quad (10)$$

则可建立如下优化问题:

$$\begin{aligned} & \min \alpha_r \\ \text{s.t. } & 0 < R_s \leq 1 < 25 \leq R_d \\ & 1.5877 \leq \alpha_r \leq 1.7627 \\ & 0.03 \leq d \leq 0.065 \end{aligned}$$

优化结果列于表 1。

表 1 优化结果

Tab.1 Optimization results

Parameter	Optimization results
α_r/rad	1.59
d/m	0.03
R_s/m	0.89
R_d/m	218.47

优化过程如图 6 和图 7 所示,图中横坐标 N 表示迭代步数。

综上,可得满足 1~25 m 之间多档定距要求的最优系统参数如表 2 所示。

优化后,系统保证了 1~25 m 间的目标均能够处于充满区,此时,接收系统回波功率满足:

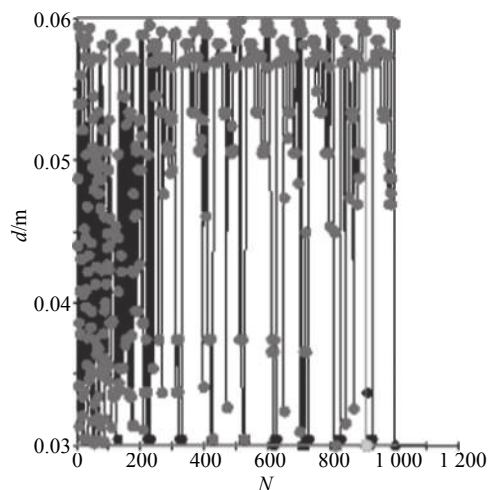


图 7 d 迭代过程
Fig.7 Iteration process of d

$$P_r = \frac{P_t \eta_r \eta_l e^{-2\mu R} \rho A_r}{\pi R^2} \quad (11)$$

将表 2 中优化后的系统参数代入公式 (11) 中,取

表 2 系统参数

Tab.2 System parameters

Parameter	Value
$\alpha_l/^\circ$	90
$\alpha_r/^\circ$	90.97
$\theta_l/^\circ$	0.07
$\theta_r/^\circ$	2
d/m	0.03
R_s/m	0.89
R_d/m	218.47

$P_i=75\text{ W}$ 、 $\eta_r=\eta_t=0.95$ 、 $\rho=0.3$ 、 $\mu=0.02$ 以及 $A_r=9\times 10^{-4}\pi\text{ m}^2$ ，分别求出目标处于 1 m、15 m 和 25 m 时的回波功率为 17.6 mW、44.6 μW 和 10.8 μW ，根据通常采用的激光接收器灵敏度，上述距离的目标均能被系统有效探测。

4 激光定距实验

为了验证优化后的系统参数是否能够满足多档定距要求，在光学平台上搭建激光定距实验台进行验证。激光定距实验台是一种可以灵活调整激光发射系统和接收系统的位置和角度的专用平台，如图 8 所示。多档激光定距实验如图 9 所示，激光发射器和激光接收器分别固定在可调角度的支座上，两个支座按照发射中心与接收中心的间距要求固定在导轨上，导轨与光学平台相连接。根据非同轴光学系统工作原理，发射器发出激光束，当目标物进入发射光束与接收视场的重叠区，接收器能够检测到目标回波，经光电转换、放大，在示波器上输出相应回波的脉冲信号^[6-7]。

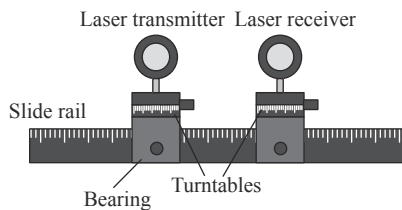


图 8 激光定距实验台

Fig.8 Laser distance experiment bench



图 9 激光多档定距实验

Fig.9 Laser multi-ranging experiment

根据优化后的系统参数，调整激光发射器和接收器的偏转角度并固定整个实验平台，以 1 m 为间隔分别将目标物置于 1~25 m 的各距离位置，实验中各目标处于 1~25 m 之间的各处距离位置，接收系统均能

收到目标反射的有效回波，其中，1 m、15 m 和 25 m 处的回波信号的波形如图 10 所示。

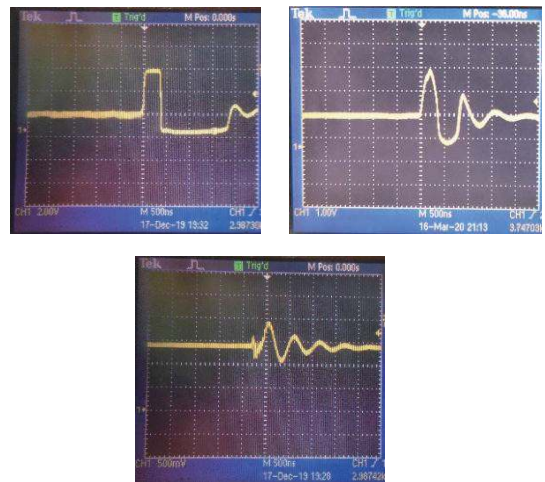


图 10 目标物分别处于 1 m、15 m 和 25 m 处时的回波信号

Fig.10 Echo signal when the target is at 1 m, 15 m and 25 m

根据图 10，1 m 处的目标回波信号峰值电压为 4 V，但信号波峰出现显著饱和，其真实峰值应远大于 4 V；15 m 和 25 m 处的回波信号峰值分别为 2 V 和 500 mV，根据实验所用接收电路的理论放大倍数为 60 mV/ μW ，可解算 15 m 和 25 m 处的回波峰值功率分别为 8.3 μW 和 33 μW ，与理论计算结果接近且偏差比例一致，表明 15 m 和 25 m 位置处于实验系统的充满区。上述回波信号峰值随探测距离增大逐渐降低，各距离处均有有效回波，实验表明优化后的系统参数能够满足对 1~25 m 距离处的目标物进行多档定距的要求。

5 结 论

文中针对激光引信的多档定距进行研究，通过建立工作距离计算模型、优化系统参数、设计实验平台验证，完成了对激光多档定距引信系统参数的综合优化。基于多岛遗传算法的综合优化结果为：在满足约束条件的前提下，接收偏角 α_r 最小值为 90.97°，与之对应的中心距 d 为 0.03 m。通过激光定距实验平台的实验验证，结果表明优化所得系统参数能够有效实现 1~25 m 之间的多档定距要求。

参考文献：

[1] Gao Wei, Zhou Baoping, Jiang Daojian, et al. Research on damage element conversion technology of multimode warhead

- [J]. *Tactical Missile Technology*, 2018(3): 116–122. (in Chinese)
高伟, 周宝平, 蒋道建, 等. 多模战斗部的毁伤元转换技术研究[J]. *战术导弹技术*, 2018(3): 116–122.
- [2] Chen Huimin, Li Ping, Yan Xiaopeng, et al. Laser fuze detection techniques using different methods [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(S1): 348–350. (in Chinese)
陈慧敏, 栗苹, 闫晓鹏, 等. 基于不同作用体制的激光引信探测技术[J]. *光学技术*, 2006, 32(S1): 348–350.
- [3] Zha Bingting, 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.
- [4] Li Zhe, Fan Weidong, Li Yuan. Research on the optical parameter testing technique of the semiconductor laser fuze [J]. *Guidance and Fuze*, 2013, 34(2): 13–17, 59. (in Chinese)
李喆, 范卫东, 李源. 半导体激光引信光学参数测试技术研究[J]. *制导与引信*, 2013, 34(2): 13–17, 59.
- [5] Lan Juan. Target detection and simulation for laser proximity fuze [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2009. (in Chinese)
蓝娟. 激光近炸引信的目标探测与仿真[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2009.
- [6] 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.
- [7] Chen Xiaoyu. The target identification and distinguish technology of the laser proximity fuze [D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
陈晓宇. 激光近炸引信目标探测与判别技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [8] Zha Bingting. Research on synchronous scanning underwater laser panoramic detection for short-range target [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
查冰婷. 水下同步扫描周视激光近程目标探测研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [9] Yuan Hailu, Zha Bingting, Zhang He. Parameter optimization of laser fuze system with geometry intercepting ranging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0806001. (in Chinese)
袁海璐, 查冰婷, 张合. 几何截断定距激光引信系统参数优化[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(8): 0806001.