

光电跟踪系统激光测距变束散角应用分析

王 虎, 王 佳

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要:在针对机动目标跟踪的光电跟踪系统设计中,为了确保激光回波率,提出变束散角的激光测距方法。计算表明该方法可进一步提高光电跟踪系统跟踪机动目标时的动态测距性能,可为反导武器系统准确拦截高速机动目标提供重要保障。

关键词:变束散角;激光测距;机动目标;光电跟踪系统

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.08.005

Application analysis of variable beam divergence angle in laser ranging of photoelectric tracking system

WANG Hu, WANG Jia

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract:In order to ensure the laser echo rate, a laser ranging method with variable beam divergence angle is proposed in the design of photoelectric tracking system for tracking maneuvering targets. The calculation shows that this method can further improve the dynamic ranging performance of the photoelectric tracking system in tracking maneuvering targets, thus providing an important guarantee for the anti-missile weapon system to intercept high-speed maneuvering targets accurately.

Key words:variable beam divergence angle; laser ranging; maneuvering target; photoelectric tracking system

1 引 言

光电跟踪系统是采用光电传感器对目标实施高精度探测和跟踪的设备^[1]。经过现役反导武器系统使用证明,光电跟踪系统是实现对精确制导武器探测、识别、跟踪的一种有效的手段^[2]。作为光电跟踪系统目标距离测量通道,激光测距机可实时精确测量目标的斜程距离,为反导武器系统目标诸元解算提供重要支撑^[3]。

对于高超音速、超低空飞行的精确制导武器,尤其对具有跃升俯冲、蛇行、螺旋、摆式等机动能力的精确制导导弹,激光测距发射束散角的设计直接决定了精确获取目标距离量的可靠性和稳定性。为实

现高精度的激光测距,必须合理设计激光发射束散角、接收口径、发射功率、探测器灵敏度和窄带滤波等参数,其中激光发散束散角的大小,是系统设计时需要重点考虑的参数,也是必须明确的关键参数^[4]。

2 激光发射束散角对光电跟踪系统测距影响分析

激光发射束散角大小对测距主要有两方面影响,一方面是测距威力,另一方面是测距回波率。

2.1 测距威力影响

激光测距机的作用距离与激光发射功率、发射束散角、发射与接收光学系统的透过率、接收光学系统的有效面积、大气传输特性、目标反射面积、目标

作者简介:王 虎(1974-),男,硕士,研究员,研究方向是光电系统总体技术。E-mail:693255277@qq.com

通讯作者:王 佳(1989-),男,硕士,工程师,研究方向是光电系统总体技术。

收稿日期:2018-12-25

的反射特性、激光接收机的检测灵敏度等诸多因素有关,这些因素最终都反映在激光测距方程中。对小目标测距的脉冲激光测距方程^[5]为:

$$R = \left[\frac{4P_t \cdot \tau_t \cdot \tau_r \cdot A_r \cdot A_s \cdot \rho \cdot \tau^2}{\pi^2 \theta_t^2 P_r} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

式中, R 为目标距离; P_t 为发射峰值功率; τ_t 为发射光学系统透过率; τ_r 为接收光学系统透过率; A_r 为接收光学系统有效接收面积; A_s 为目标反射截面积; ρ 为目标反射率; τ 为大气双程透过率; θ_t 为发射束散角; P_r 为接收灵敏度。

由激光测距方程可知,当激光发射功率、发射与接收光学系统透过率、接收光学系统的有效面积、大气传输特性、目标反射面积、目标反射特性、激光接收检测灵敏度一定的情况下,发射束散角大小与作用距离的平方成反比。在防空反导作战中,期望在更远的距离发现目标,为拦截预警等预留足够多的反应时间,这就要求在激光测距威力尽可能的远,而要实现远距离测距,激光发射束散角就要尽可能的小。

2.2 测距回波率影响

对于高速飞行目标轨迹测量的脉冲激光测距机而言,除了作用距离和测距精度外,高激光回波率是精确给出目标飞行轨迹的必要条件^[6]。

(1) 增大激光束散角影响

对于导弹类小目标,由于光斑面积较大,目标反射面积相对光斑面积所占的比例很小,绝大部分光斑会照射到目标周围背景上,导致激光回波信号干扰严重,虚警率增大,测距稳定性降低。以瑞士“海上卫士”近程反导武器系统为例,其光电跟踪器模块激光测距束散角为2 mrad,对弹作用距离6 km,则激光光斑直径为12 m,而战斧巡航导弹的弹径为0.52 m,则导弹截面积相对于光斑面积的1.88‰。因此,为了获得高激光回波率应尽可能压缩激光发射束散角,在增大作用距离的同时提高抗干扰性^[7]。

(1) 减小激光束散角影响

当激光发射束散角较小时,能量相对集中,到达远区目标上的能量也较强,但是当目标机动时,由于光电跟踪精度的下降,目标距激光光斑中心的偏差增大,导致激光回波能量减弱,回波率减小,甚至会丢失数据。当测距机没有接受到激光回波时,其无

回波点所对应的距离必须用外推法估计,当无回波点较多时,由于外推误差过大,测距将被认为无效,而不得不中断航迹处理,将会造成跟踪失效,战机贻误^[8]。

综上所述,在激光测距机发射束散角设计时,必须同时确保远区目标的最大作用距离,又要确保目标近区机动时的测距回波率,从而保证对具有机动能力的精确制导导弹由远到近的全程测距精度和连续性。当目标距离较远时,相对光电跟踪系统的角速度、角加速度较小,伺服系统跟踪精度较高,采用小束散角有效提高最大作用距离,保证远区威力;当目标距离较近时,相对光电跟踪系统的角速度、角加速度较大,尤其当目标进行机动时,伺服系统跟踪精度降低较多,可以采用大束散角提高激光回波率,确保光电跟踪系统动态测距性能。

对远区目标测距的激光束散角可根据式(1)计算,不再赘述。以下重点对激光测距回波率分析。

3 激光回波率分析

(1) 不考虑光电跟踪系统误差

假设发射的激光束是一基模高斯光束,则目标和激光束中心夹角为 θ 时对应的接收功率^[9]:

$$P = \frac{4P_t \tau_t \tau_r A_r \rho A_s \tau^2}{\pi^2 \theta_t^2 R^4} e^{-\frac{8\theta^2}{\theta_t^2}} \quad (2)$$

当 P 取 P_r 时,通过公式(2)可得目标的最大偏离角度,即激光测距阈值角 θ_T ,所以当目标处在 θ_T 范围内时,测距机可以进行测距。

(2) 考虑光电跟踪系统误差

光电跟踪系统误差的存在导致目标偏移了激光光斑中心区域,当偏移量较大时,激光回波功率将小于激光可探测最小功率。如图1所示, OC 表示光电跟踪系统光轴,指向目标 C 。由于系统误差等原因,激光发射光轴实际指向为 OC' , $\angle COC'$ 为激光光轴与目标偏差(测距束散角大于总跟踪误差)。

目标与激光光斑中心偏差主要与平台扰动、大气传输、目标运动特性等外部因素;光轴稳定误差、探测器安装误差和伺服跟踪误差等内部因素有关。工程上一般只考虑内部因素,即光轴稳定误差、探测器安装误差和伺服跟踪误差。其中光轴稳定误差包含了成像探测器和激光发射轴各自的稳定性误差;探测器安装误差为成像探测器与激光发射轴之间的

静态安装误差;伺服跟踪误差为光电系统对目标的跟踪测量误差。

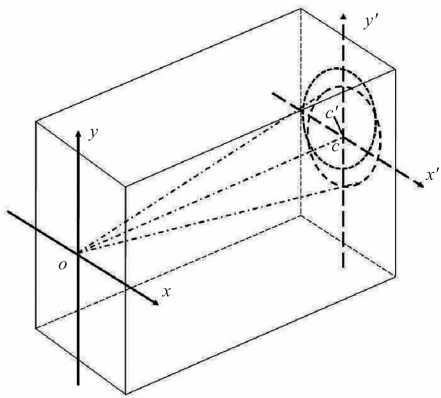


图1 激光光斑照射目标示意图

Fig. 1 Diagram of target irradiated by laser spot

测距阈值角对应的动态回波率^[10]:

$$P(\theta < \theta_T) = \Phi\left(\frac{\theta_T - m}{\sigma_R}\right) - \Phi\left(\frac{-\theta_T - m}{\sigma_R}\right) \quad (3)$$

式中, $\Phi(X)$ 为标准正态概率积分函数,可查表得到; m 为跟踪系统误差; σ_R 为随机误差(RMS)。由于激光测距机光学系统在结构设计和生产上已保证了激光发射和接收光轴的平行性,故不考虑其对回波率的影响^[11]。

4 计算验证

精确制导导弹一般情况在远区时采用亚音速或超音速匀速直线方式飞行,在攻击目标的末端,会通过跃升俯冲、蛇行、螺旋、摆式等机动方式提高自身的突防能力。对于光电跟踪系统而言,远区时的跟踪精度较高,当近区精确制导导弹进行机动时,跟踪精度会有不同程度的下降。

设计航路:目标以匀速直线逼近,距离 4 km 时开始跃升,之后以 10°的俯冲角俯冲。要求 6 km 远开始测距建立航迹,设计变束散角,激光测距机主要参数选择见表 1,计算结果见表 2 所示。

表 1 主要参数选择

Tab. 1 Selection of main parameters

发射功率/W	3×10^7	发射光学系统系统透过率	0.8
最小可探测功率/ μ W	0.008	接收光学系统系统透过率	0.5
目标反射率	0.2	接收口径/m	0.12
目标等效面积/ m^2	0.1	能见度/km	10

对比表 2 中第 1、2 组数据发现:虽然随着目标相对于光电跟踪系统距离变近,光电跟踪系统跟踪

角速度和角加速度变大,导致系统跟踪误差变大,但是由于激光探测极限角变大使得动态回波率提高;对比第 2、3 组数据发现:由于目标机动导致光电跟踪系统误差进一步增大,导致动态回波率降低;对比第 3、4 组数据发现:通过增大激光发射束散角可以提高激光测距动态回波率。

表 2 计算结果

Tab. 2 Calculation results

序号	机动状态	距离/km	跟踪误差/mrad	随机误差/mrad	激光束散角/mrad	激光探测极限角/mrad	动态回波率	理论测距威力/km
1	机动前	6	1	0.6	2	0.87	0.4154	7.32
2		4	1.1	0.6	2	1.3	0.6293	7.32
3	机动后	4	1.5	0.8	2	1.3	0.4013	5.85
4		4	1.5	0.8	4	1.9	0.6915	5.85

5 结论

激光测距发射束散角的设计,可以直接影响光电跟踪系统对具有机动能力的精确制导导弹由远到近全程的测距威力和精度,通过变束散角设计可以确保光电跟踪系统可靠、精确地获取目标距离量,有效发挥反导武器系统的作战效能。

参考文献:

[1] CHEN Kunfeng, SHI Xueshun. Research on testing method for laser range finder capability of photodectric tracker [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2008, 28(3): 45-47. (in Chinese)
陈坤峰, 史学舜. 光电跟踪仪激光测距器性能检测方法研究[J]. 宇航计测技术, 2008, 28(3): 45-47.

[2] WANG Hu, DU Ziliang, LIU Hanping, et al. Development demands of electro-optical tracking technology for the new precision guided weapons[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(5): 539-543. (in Chinese)
王虎, 杜子亮, 刘汉平, 等. 用于跟踪新型精导武器的光电技术发展需求[J]. 激光与红外, 2018, 48(5): 539-543.

[3] LUO Bing, FENG Yu, JIN Xiaoyu. Application and development of shipborne photoelectric tracker[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(10): 1171-1174. (in Chinese)
罗兵, 冯瑜, 金晓宇. 舰载光电跟踪仪应用及发展[J]. 激光与红外, 2015, 45(10): 1171-1174.

[4] ZHANG Jiming. Comprehensive consideration of the laser

- beam divergence angle on airborne electric-optical tracking system[J]. *Electronic Science & Technology*, 2015, 2(4): 406 - 411. (in Chinese)
- 张己明. 光电跟踪系统激光发散角宽度综合研究[J]. *电子科学技术*, 2015, 2(4): 406 - 411.
- [5] WU Hanping. Design foundation of electro-optical system [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- 吴晗平. 光电系统设计基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [6] HONG Mingjia. Three axis adjustment for high laser echo rate[J]. *Laser & Infrared*, 1979, 9(4): 1 - 5. (in Chinese)
- 洪名家. 获得高激光回波率的三轴调整[J]. *激光与红外*, 1979, 9(7): 1 - 5.
- [7] TAO Huacheng. Influence of adjustment precision and tracking error on laser ranging[J]. *Fire Control Technology*, 1982(4): 23 - 28. (in Chinese)
- 陶化成. 论调整精度和跟踪误差对激光测距的影响[J]. *火控技术*, 1982(4): 23 - 28.
- [8] XU Gang, GUO Zhi. Study on the distribution of leak points in laser ranging system[J]. *Fire Control & Command Control*, 1990, (2): 3 - 7, 81. (in Chinese)
- 徐刚, 郭治. 激光测距系统漏测点分布规律的研究[J]. *火力与指挥控制*, 1990, (2): 3 - 7, 81.
- [9] SUN Peng. Laser ranging truth probability in tracking system[J]. *Laser & Infrared*, 1998, 28(4): 235 - 237. (in Chinese)
- 孙鹏. 跟踪系统中激光测距的真值概率[J]. *激光与红外*, 1998, 28(4): 235 - 237.
- [10] WU Hanping. Collectivity design and analyzing for some high performance laser ranger[J]. *Modern Defence Technology*, 2005, 33(2): 66 - 68. (in Chinese)
- 吴晗平. 某高性能激光测距机总体设计与分析[J]. *现代防御技术*, 2005, 33(2): 66 - 68.
- [11] LUO Xinxin, LIU Bingqi, SUN Dongping, et al. Improvement of optical axis parallelism correction for laser rangefinder[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(3): 519 - 522. (in Chinese)
- 骆新新, 刘秉琦, 孙东平, 等. 关于激光测距机光轴平行性校正方法的改进[J]. *应用光学*, 2009, 30(3): 519 - 522.