

文章编号: 1002-1582(2023)05-0568-05

一种直升机光电系统激光照射精度定量评估方法

张宏刚¹, 张继超^{2*}, 王亚莉¹, 王睿¹, 张晓娜¹

(1. 中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089)

(2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130000)

摘 要: 针对直升机光电系统激光照射精度评估问题, 提出一种利用短波红外相机监测激光照射光斑实现计算照射精度的方法。利用合适像元尺寸、波段和灵敏度的红外探测器, 合适焦距、视场角的镜头, 3m×3m 十字靶标和摄像机搭建测试环境, 实现机载光电系统激光照射光斑摄像监测与数据记录。根据该监测设备摄取的激光光斑监测视频图像, 应用数据处理方法解算出机载光电系统的激光照射精度, 并在飞行试验中进行了应用, 切实可行。

关 键 词: 机载光电系统; 激光照射精度; 激光光斑监测设备

中图分类号: TH745; V248.1 文献标识码: A

DOI:10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2023.05.010

A quantitative evaluation method for laser irradiation accuracy of helicopter photoelectric system

ZHANG Honggang¹, ZHANG Jichao^{2*}, WANG Yali¹, WANG Rin¹, ZHANG Xiaona¹

(1. Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

(2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: A method is proposed to evaluate the laser irradiation accuracy of helicopter optoelectronic systems by using a shortwave infrared camera to monitor the laser irradiation spot and calculate the irradiation accuracy. Infrared detector with appropriate pixel size, band and sensitivity, lens with appropriate focal length and field angle, 3m × 3m cross target and camera set up the test environment to realize the laser spot camera monitoring and data recording of the airborne photoelectric system. According to the laser spot monitoring video image captured by the monitoring equipment, the laser irradiation accuracy of the airborne photoelectric system is calculated by using the data processing method, and is applied in the flight test, which is feasible.

Key words: airborne optoelectronic system; laser irradiation accuracy; laser spot monitoring equipment

0 引 言

现代先进武装直升机均装备有优良的光电探测瞄准系统^[1,2], 可以在昼夜和其他低能见度条件下, 使用光电系统对地面/海面目标进行搜索、识别和跟

踪, 为武装直升机火控系统实时提供精确的目标指示信息, 用于火控解算^[3-5], 提高命中精度。如美国的 AH-64A“阿帕奇”与 RAH-66“科曼奇”、俄罗斯的卡-60、法国和德国合作研制的“虎式”等武装直升机无一例外都配装有先进的光电探测瞄准系统。光

收稿日期: 2022-11-09; 收到修改稿日期: 2023-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61675202)

作者简介: 张宏刚(1976—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事机载光电系统鉴定试验方面的研究。zhanghg007@avic.com

张继超(1981—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事光学仪器总体技术研究。

* 通讯作者: 10403425@qq.com

电系统内部装有可见光、前视热像仪、激光指示器以及稳定机构等部件,相应的性能指标比较复杂而先进,其中激光照射精度是关键性能指标之一,利用其激光照射能力,能够实时对目标进行激光测距、照射与定位^[5-8],精确引导激光制导导弹命中目标,提高直升机对地攻击能力。在飞行试验中,如何客观、定量、准确地验证与评估武装直升机光电探测瞄准系统激光照射能力成为当务之急。

1 激光光斑监测系统搭建与分析

1.1 系统组成及工作原理

为实现对激光照射光斑的监测与记录,搭建一套激光光斑监测系统,该系统的基本组成由红外相机(包含近红外探测器和镜头)、视频记录器、显示器、三脚架、电源(DC 12V)等组成。该系统工作原理如图 1 所示,激光光斑监测系统架设于靶标正前方一定距离处,接收直升机光电系统激光照射反射能量,经红外镜头滤波,投射到近红外探测器上,将不可见激光波段光斑转换成可见影像,通过接口转换器件,传输给视频记录器与监视器,从而实现激光光斑的监测与记录。

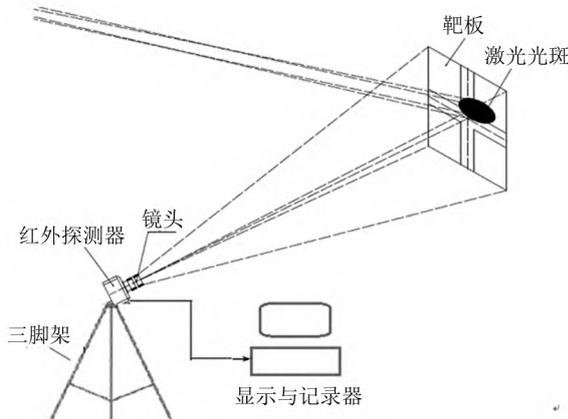


图 1 激光光斑测量系统工作原理图

1.1.1 近红外探测器

近红外探测器是基于高灵敏度、低噪音的硅传感器,其近红外的灵敏度得到了很大提升,相机的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 红外探测器的主要技术参数

探测器参数	技术指标
芯片尺寸	1/3 英寸(对角线 6mm)
光谱波段/nm	900~1800
灵敏度	0.2lx
像元数	752×528
数据格式	CCIR(25fps)

相机的光谱响应曲线如图 2 所示。

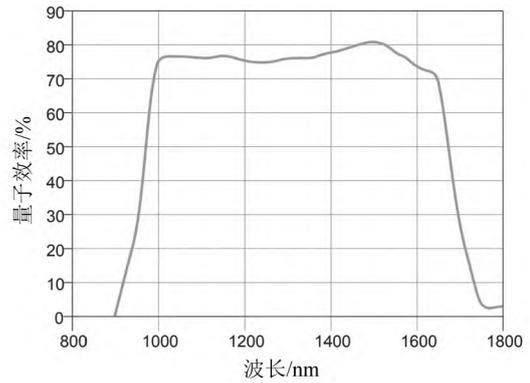


图 2 探测器光谱响应曲线

1.1.2 红外镜头

在光电探测系统对靶标进行成像的过程中,选定目标为 3m×3m 靶板,监测距离为 20m。为使整个靶板都在监视系统的视场范围内,取视场面积为 4m×3m,则视场区域对角线长 D 为 5m,得到相机镜头视场角 2ω 为

$$2\omega = 2\arctan \frac{D}{2l} = 2\arctan \frac{5}{2 \times 20} \approx 14.25^\circ \quad (1)$$

式中, l 为监测距离,那么观察整个靶板所需的视场角为 14.25° 。相机镜头角视场与系统焦距的关系式为

$$2\omega_0 = 2\arctan \frac{d}{2f_0} \quad (2)$$

式中, ω_0 为相机镜头视场角的 1/2; $2\omega_0$ 为相机镜头视场角; d 为红外探测器靶面对角线长; f_0 为系统的焦距。

由此可得

$$f_0 = \frac{d}{2\tan\omega_0} \quad (3)$$

当角视场为 $2\omega_{\max} = 14.25^\circ$ 时,可得系统焦距 f_0 为

$$f_0 = \frac{6}{2\tan 7.125^\circ} \approx 24\text{mm}$$

经以上分析,红外镜头选择焦距为 26mm 的货架产品, F 数为 1.4,能够满足视场角要求,可实现 20m 处监视需求。

为提高红外波段信噪比和增加红外成像的对比度,在镜头前加装红外截止滤光片,对可见光波段进行衰减。红外截止滤光片的透过率曲线如图 3 所示。

1.2 监测系统探测性能分析

目标能被探测到的基本条件为:目标成在探测器靶面上的像必须满足可靠提取信号所要求的最小尺寸;目标成在探测器靶面上像的照度应满足探测器所要求的最低照度。为了分析激光光斑监测与记

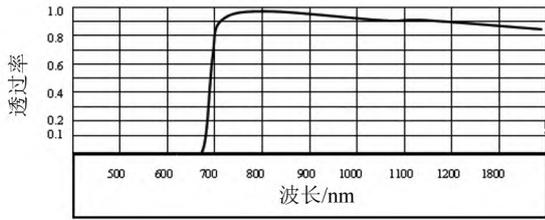


图 3 红外截止滤光片的透过率

录系统的探测性能,从目标成像尺寸和像面照度两个方面论述。

1.2.1 目标在探测器靶面上的成像尺寸

激光光斑直径约为 0.2~0.5m,经计算可知激光光斑占 35~88 个像元,对监视系统成面目标,可被探测。

1.2.2 探测器焦平面照度

根据技术指标,取激光器距靶板距离 5km,激光光斑直径 0.3m,激光能量 50mJ,照射时间 0.05s,在大气能见度 ≥20km 时,大气衰减系数 $\rho = 0.81$ 。计算激光照射到目标靶面上的照度为

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (4)$$

式中, Φ 为光通量,需要考虑大气透过率和照射时间; A 为激光光斑的面积。计算得出

$$E = 11.51lx$$

考虑靶面反射率(0.3)和系统透过率(0.75),则像面实际的照度为 2.58lx。当目标的照度值大于探测器的灵敏度,目标可被探测。所选探测器在波长 1064nm 处,灵敏度为 0.2lx,像面实际的照度高于探测器的灵敏度。因此,目标可被探测。

2 激光照射精度测试试飞方法

2.1 架设靶标与光斑监测系统

选择地势平坦、地面水平、视野开阔区域架设 3m×3m 十字靶标,如图 4 所示。根据直升机飞行高度、激光照射距离确定靶标架设倾斜角度,确保直升机正对靶面进行激光照射。在靶标正前方 20~50m 处架设激光光斑监测系统,尽量使靶面充满监控系统视场,确保激光照射计算精度。



图 4 3m×3m 十字靶标

2.2 飞行试验

直升机以选定高度与速度从最大激光照射距离 150%处进入,向靶标稳定平飞。光电系统探测并发现靶标目标后,采用光电系统电视或热像小视场稳定跟踪靶标,瞄准靶标十字线对靶标进行激光照射。同时,地面激光监测系统实时监测与记录激光光斑视频图像。飞行试验如图 5 所示。

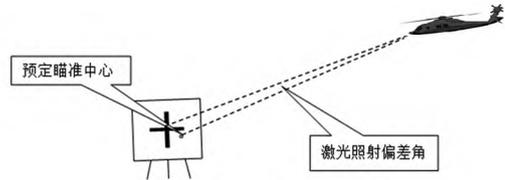


图 5 激光照射精度飞行试验示意图

事后依据激光光斑监测视频图像,进行图像分析处理,对每个航次激光开始照射到照射结束稳定跟踪时间段进行分析,给出激光光斑相对靶面十字中心的激光照射标准偏差,即激光照射精度。

3 数据处理与试验结果

3.1 数据处理

在实际工程中,依据激光光斑监测设备记录的激光照射光斑图像,对激光照射精度进行计算。如图 6 所示,以激光光斑监测图像上靶标十字线中心为原点 O ,水平方向为 X 轴,垂直方向为 Y 轴,建立直角坐标系 XOY 。激光光斑中心坐标为 $P(X_i, Y_i)$ 。

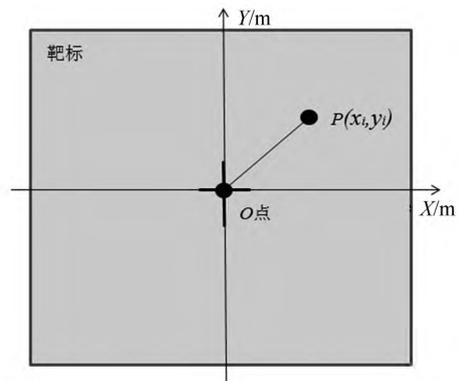


图 6 激光照射精度计算示意图

激光照射偏差角可表示为

$$\theta \approx \arctan \frac{\sqrt{x_i^2(t) + y_i^2(t)}}{L(t)} \quad (5)$$

式中, $L(t)$ 为 t 时刻机载光电系统与靶标的距离; $x_i(t)$ 为第 i 个激光脉冲照射时水平方向激光光斑中心偏离靶标中心的距离; $y_i(t)$ 为第 i 个激光脉冲照射时垂直方向激光光斑中心偏离靶标中心的距离; t 为第 i 个激光脉冲照射时刻。

第 k 个航次激光照射精度可表示为

$$\delta_k = \sqrt{\frac{\sum \theta_i^2}{m}} \quad (6)$$

式中, δ_k 为第 k 个航次的激光照射精度; θ_i 为该航次第 i 个激光脉冲的照射偏差角; m 为该航次的激光光斑等间隔抽样数。

一种航路的激光照射精度的计算表达式为

$$\bar{\delta} = \sqrt{\frac{\sum \delta_k^2}{n}} \quad (7)$$

式中, $\bar{\delta}$ 为一种航路的激光照射精度; n 为激光照射进入航次数。

3.2 试验结果

在某型直升机光电系统激光照射精度测试飞行试验中, 选用 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 十字靶标, 直升机对靶标进行了多次激光照射, 该套激光光斑监测系统架设于靶标前方 20m 处, 实时采集与记录了激光照射光斑视频数据, 画面清晰稳定, 光斑明显可见, 监测画面

如图 7 所示。按照上述的数据处理方法, 对激光照射视频数据进行了逐帧处理与分析, 获取了每航次 X 轴与 Y 轴激光光斑照射偏差量, 某航次处理结果如图 8 以及图 9 所示。从图中可以看出, 在该航次激光照射中, 激光光斑基本位于靶心左下位置, 在 X 轴和 Y 轴方向上激光光斑偏离靶心偏差量均不大于 0.05mrad。经过所有航次统计与计算, 激光照射精度为 0.045mrad, 能够满足武器火控系统目标指示需求。



图 7 激光光斑监测视频画面

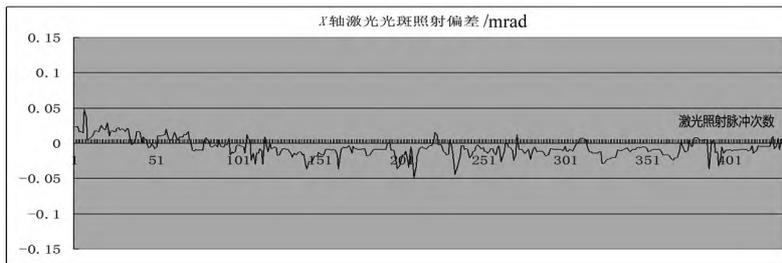


图 8 X 轴方向激光光斑照射偏差量

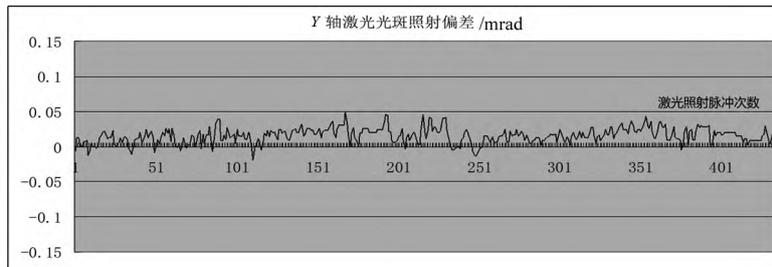


图 9 Y 轴方向激光光斑照射偏差量

4 小 结

本文提出了一种机载光电系统激光照射能力试验评估方法, 通过搭建激光照射光斑监测系统, 将不可见的激光光斑画面转换成可显示光斑的可视视频画面, 实现了对激光照射过程的监控与记录。同时, 应用图像处理技术, 给出了具体激光照射精度计算与分析过程, 并在实际飞行试验中进行了应用。经过实际工程应用, 说明通过该方法, 能够对机载光电系统的激光照射能力进行定量、准确、客观评估。

参考文献:

[1] 李文魁, 王俊璞, 金志华, 等. 直升机机载光电吊舱的发展现状及对策[J]. 中国惯性技术学报, 2004, 32(5): 75—80.
Li Wenkui, Wang Junpu, Yin Zhihua, et al. Development and countermeasure of airborne optoelectronic pods[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2004, 32(5): 75—80.

[2] 梁卫清, 魏志强, 袁红伟, 等. 小型高性能无人机载光电吊舱的发展现状与方向[J]. 电视技术, 2022, 32(7): 65—68.
Liang Weiqing, Wei Zhiqiang, Yuan Hongwei, et al. Development status and direction of small-scale high-performance uav on-board optoelectronic pod[J]. Video Engineering, 2022, 32(7): 65—68.

[3] 李美红, 尹健, 徐劲祥. 基于 EKF 的机载光电吊舱目标定位研究[J]. 弹箭与制导学报, 2016, 32(6): 157—161.
Li Meihong, Yin Jian, Xu Jinxiang. Analysis of target geoloca-

- tion of airborne electro-optical pod based on extended kalman filter[J].Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2016,32(6):157—161.
- [4] 秦谊, 王建民, 王丽丽, 等. 卫星激光通信跟瞄精度测试方法及其实验研究[J].光学技术, 2007, 32(4):557—563.
Qin Yi, Wang Jianmin, Wang Lili, et al. Tracking target simulator and measuring techniques for the free-space laser communication[J].Optical Technique, 2007, 32(4):557—563.
- [5] 鞠有论, 常泽洲, 于欣, 等. 运动目标激光跟踪瞄准中的闭环研究[J].激光与光电子学进展, 2001, 32(9):61—62.
Ju Youlun, Chang Zhezhou, Yu Xin, et al. Research on closed loop in laser tracking and aiming of moving target[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2001, 32(9):61—62.
- [6] 刘立人. 卫星激光通信 II 地面检测和验证技术[J].中国激光, 2007, 32(2):147—155.
Liu Liren. Laser Communications in space II test and verification techniques on the ground[J].Chinese Journal of Lasers, 2007, 32(2):147—155.
- [7] 王建, 陈剑, 赵树言, 等. 基于图像灰度的光电吊舱视轴稳定精度检测方法[J]. 电光与控制, 2021, 32(4):102—105.
Wang Jian, Chen Jian, Zhao Shuyan, et al. A method for detecting LOS stabilization accuracy of electro-optical pod based on grayscale of image[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 32(4):102—105.
- [8] 黄亮, 张建强, 刘忠. 空中机动平台光电吊舱对目标定位方法分析[J].武汉理工大学学报, 2013, 32(1):02—105.
Huang Liang, Zhang Jianqiang, Liu Zhong. Analysis on target location methods using photoelectric payload of aerial mobile platform[J].Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 32(1):102—105.
- [9] 张旋, 燕莎, 刘强辉. 机载光电吊舱外引导下目标捕获技术分析[J].微型机与应用, 2017, 32(12):68—70.
Zhang Xuan, Yan Sha, Liu Qianghui. Analysis on target capture technology under guidance outside airborne photoelectric pod[J]. Microcomputer & Its Applications, 2017, 32(12):68—70.
- [10] 刘蕴华. 光电吊舱测角精度分析[J]. 现代电子技术, 2012, 32(17):33—35.
Liu Yunhua. Study on angle measuring precision of optoelectronic pods[J]. Modern Electronics Technique, 2012, 32(17):33—35.