文章编号:1001-5078(2023)07-1081-06

· 光电对抗 ·

阳光反射对空地成像设备干扰影响分析

邹前进,陆 静,陆洪涛,刘胜利,耿志辉,路亚旭 (63891部队,河南洛阳471003)

摘 要:分析了强反射源阳光反射干扰效应,并利用精密转台、镜面反射装置和空地成像设备 实测了干扰效应。实测显示:阳光反射干扰效应像素数可达镜面理想成像像素数 20 倍;较强 的干扰效应及闪烁,对空地成像设备稳定跟踪造成较大影响。全流程的外场阳光反射干扰实 验实现难度较大;本文提出和实现了基于实测阳光干扰效应,仿真包含背景、目标和干扰的场 景图像注入空地成像设备获取跟踪制导数据,将数据代入弹道计算模型的实验方法。最后分 析了阳光反射对空地成像设备最终干扰效果。当 10 km 干扰有效,落点误差大于 450 m;5 km 干扰有效,落点误差大于 25 m,被保护目标需采取一定的措施;若干扰距离不小于 10 km,即使 人在回路重新锁定目标,落点误差大于 110 m。本文对空地成像设备抗阳光干扰算法改进和 抗干扰能力评估具有一定的借鉴意义。

关键词:空地成像设备;阳光反射;干扰效应;落点误差 中图分类号:TN97 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2023.07.015

Analysis of effect of sunlight reflection on interfence of air-ground imaging equipment

ZOU Qian-jin, LU Jing, LU Hong-tao, LIU Sheng-li, GENG Zhi-hui, LU Ya-xu (No. 63891 Troops of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: In this paper, the jamming effects of sunlight reflections from strong reflective sources are analyzed and measured empirically using a precision turntable, a specular reflection device and open-field images equipment. Measurement show: sunlight reflection interference effects pixels can be up to 20 times of ideal imaging pixels; stronger interference effect and flicker, the air-to-ground imaging equipment stable tracking caused by the larger impact. The full process of external sunlight reflection interference effect, simulating the scene image containing background, target and interference injected into the air-ground imaging equipment to obtain tracking guidance data, and bringing the data into the ballistic calculation model. The final jamming effects of sunlight reflection on the air-to-ground imaging equipment are analyzed. When 10 km interference is effective, the landing error is greater than 25 m, the protected target needs to take certain measures; if the interference distance is not less than 10 km, even if the person in the loop to relock the target, the fall point error is greater than 110 m. This paper has certain significance for the improvement of anti-sunlight interference algorithm and the evaluation of anti-interference ability of air-to-ground imaging equipment.

Keywords: air-to-ground imaging equipment; sunlight reflection; jamming effect; landing error

作者简介:邹前进(1982 -),男,硕士,高级工程师,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail:zouqianjin1982@163.com 收稿日期:2022-08-25;修订日期:2022-10-10

1 引 言

目前国内外大多数空地成像设备一般依据的俯 仰、偏航视线角速度或角度信号实现设备位置或姿 态控制^[1]。视线角速度或角度一般基于跟踪后的 图像输出,因此设备对目标的稳定跟踪结果对空地 成像设备最终的落点分布情况影响巨大^[1-2]。随着 对抗技术发展,空地成像设备不但要考虑目标三维 投影变化,还需要考虑外部干扰因素对跟踪的影 响^[3-5]。目前,国内外在干扰效应或效果方面开展 了大量研究,当前多集中在主动的激光辐照、诱饵和 烟幕等对红外跟踪效果影响评估^[3,6-7]。太阳作为 自然界常见的自然干扰,在空地成像设备实际使用 中很难完全规避,太阳干扰包括直射阳光干扰、阳光 反射干扰等。对于直射阳光干扰目前可通过航迹规 划进行规避^[8],但对于目标上或目标附近的人为阳 光反射干扰则很难规避^[4,9]。由于太阳反射干扰辐 射亮度远大于目标辐射亮度,且存在闪烁,给目标稳 定跟踪带来较大困难^[7-8]。当前多数空地成像设备 并未考虑太阳反射干扰在内容的抗干扰能力,当目 标上或目标附近出现较强阳光反射干扰时,易出现 目标丢失,甚至无法命中的情形。

目前多采用挂飞或实弹的方法考核空地成像设 备抗阳光等干扰能力^[4],外场动态测量无论是在人 力资源方面,还是在经费方面,代价都较大。因此, 开展阳光反射干扰对空地成像设备最终落点偏差的 影响研究,对空地成像设备跟踪算法的改进、抗干扰 效果评估等具有重要意义。鉴于全流程的外场阳光 反射干扰实验实现难度较大,本文通过将实测阳光 反射干扰效应注入空地成像设备获取跟踪制导数 据,进而将跟踪制导数据带入弹道仿真模型的实验 方法,获得了阳光反射干扰下空地成像设备最终落 点偏差变化情况。可为空地成像设备抗阳光反射干 扰评估支撑,也可为空地成像设备其他干扰因素抗 干扰评估提供借鉴。

2 阳光反射干扰效应分析及测试

目标表面一般符合漫反射特性,但当目标周围 出现反射率较高的物体或人为布设高反射率物体 时,将会出现远比目标辐射亮度大的阳光反射干 扰^[9-10]。太阳辐射较强,且波段范围较宽,覆盖了 可见至长波红外波段,其中可见和短波红外的辐射 占有显著地位;太阳辐射虽在中波比例不高,但其绝 对值仍相当大^[11]。因此阳光反射干扰一旦入射到 空地成像设备的入瞳,甚至只要部分进入光学系统, 就会影响目标的最终成像质量。当入射的阳光反射 超出空地成像设备的线性工作范围,甚至可能产生 饱和等一系列非线性光学效应,影响空地成像设备 的最终成像效果,从而影响空地成像设备对目标的 跟踪;而跟踪不稳定将导致阳光反射干扰闪烁,进一 步影响跟踪稳定。到达地球表面的太阳辐射并不是 严格的平行光,一般可以等效为 0.5°的无穷远 目标^[9]。

太阳距地球平均距离为 1. 49985 × 10⁸ km,太阳 在地球大气层外产生的总辐射照度约为 1353 W/m² (日地距离 1AU),可以采用理论计算到达地球表面 的太阳辐射照度^[10-12]。本文采用中国科学院安徽 光学精密机械研究所开发的通用大气辐射传输软件 (CART)计算到达某一地面处的太阳辐射照度,计 算时采用分辨率为 1 cm⁻¹逐线积分的精确辐射传 输计算模式。采用该软件,结合实测气象条件可以 计算洛阳地区 2021 年 1 月 1 日和 6 月 30 日地面处 中波 3.7~4.8 μm 太阳辐射照度,如表 1 所示。

表1 洛阳不同时刻太阳中波辐照度结果表

Tab. 1 The solar irradiance of mid-wave

at different time in Luoyang area

时刻	1月1日中波辐照度/ (W・m ⁻²)	6月30日中波辐照度/ (W・m ⁻²)	
8 时	0. 03	2. 6	
10 时	1.96	3. 77	
12 时	2. 77	4. 14	
14 时	2. 31	4.00	
16 时	0. 40	3. 29	

到达空地成像设备处反射太阳辐射照度可由下 式表示。

$$E_{mr} = \frac{E_{mi} \cdot S_m \cdot f_r}{d_{me}^2} \tag{1}$$

式中, E_{mr} 为到达空地成像设备入瞳处反射太阳辐射 照度; E_{mi} 为到镜面处太阳辐射照度; S_m 为镜面等反 射面大小; f_r 为镜面反射特性; d_{me} 为镜面和空地成像 设备之间距离。

由式(1),结合空地成像设备入瞳面积、透过 率、瞬时视场角、探测器面积和干扰效应分布可以计 算到达空地成像设备靶面辐射亮度分布,如式:

$$L_{d} = \frac{E_{mr} \cdot S_{e} \cdot \tau_{\text{path}} \cdot \tau_{opt} \cdot \gamma}{A_{d} \cdot \Omega_{d}}$$
(2)

式中, L_a 为空地成像设备探测器面辐射亮度; S_e 为 空地成像设备入瞳面积; τ_{path} 为路径透过率; τ_{opt} 为 光学系统透过率; γ 为干扰效应分布系数; A_a 为探测 器面积; Ω_a 为探测器瞬时视场角。

根据图像仿真可知,只要获得背景、目标或干扰 到达探测器处的辐射亮度,结合定标获得的空地成 像设备响应参数,即可以获得所需仿真场景灰度图 像。式(2)中,阳光反射干扰辐射亮度除干扰效应 分布外,其他参数均可由仿真计算获得。虽然理论 上可利用杂散光分析软件(TRACEPRO 或 LIGHT-TOOLS)仿真获得干扰效应分布,但实际工作中多利 用实测的干扰效应统计获得对应分布。本文采用空 地成像设备对阳光反射干扰效应进行了测试,进而 统计获得干扰效应分布。

将成像设备置于某一高处精密二维转台上, 成像设备工作波段为3.7~4.8 μm,像元尺寸为 25 μm×25 μm,量化位数为14 bit。将镜面反射源 固定于2 km外地面。调整镜面反射源方位、俯 仰,并同步调整高处精密二维转台方位、俯仰瞄准 镜面反射源区域,使得镜面反射干扰效应最强。 以5′间隔调整转台方位,测量不同太阳夹角下反 射效应,结果如图1所示。当出现镜面反射时,干 扰光斑的像素高达900多个,干扰效应光斑面积 远大于镜面理想成像面积,掩盖了镜面本身成像; 干扰效应光斑中心区域近300个像素点等效辐射 温度饱和。随着精密二维转台旋转,干扰效应光 斑减小;当旋转角度约15′时,镜面成像大小约为 46 个像素。



Fig. 1 The measurement results of interference effect of reflected sunlight 由图 1 镜面反射的全角约为 0.5°,与分析结果 一致;实际阳光反射干扰需要较高的瞄准精度,干扰 容易出现起伏。一般情况下对于玻璃等强反射源的 反射特性可以使用下述模型来表示^[13]。

$$f_r(\theta_i, \theta_r) = \frac{a \exp[-b \cdot (\theta_i - \theta_r)^2]}{(\cos\theta_i)^c \cos\theta_r}$$
(3)

式中, θ_i 为太阳入射角; θ_r 为太阳反射角; a_xb_xc 为相 关参数。

由式(1)和图1可以看出:镜面强反射源及空 地成像设备构成镜面反射关系时,镜面反射干扰效 应最强,并随太阳入射角和反射角变化而变化。反 射阳光辐射大小与入射太阳方向、红外跟踪设备视 轴方向夹角等密切相关,其中入射太阳方向主要由 时间和地理位置等决定。

空地成像设备如果一直跟踪某一目标,0.5°大 于多数激光器干扰源约3 mrad 的束散角,则镜面反 射源较为很容易跟踪空地成像设备光轴,则空地成 像设备将面临阳光反干扰,对空地成像设备稳定造 成影响^[9]。空地成像设备在对目标跟踪过程中由 于设备震动等,不可避免出现光轴抖动,干扰效将出 现闪烁,对设备的目标提取和稳定跟踪造成较大 影响。

3 空地成像设备阳光反射干扰影响分析

从干扰效应测试可见:阳光反射干扰效应测试 相对较为容易,但空地成像设备全流程的外场干扰 实验实现难度较大。因此本文考虑将阳光干扰效应 图像注入空地成像设备,并将跟踪制导数据带入弹 道计算模型的方法,分步仿真计算阳光反射对最终 落点的影响。

3.1 阳光反射干扰下设备跟踪实验结果分析

将阳光干扰效应图像注入空地成像设备实验原 理为:在实验前根据实际可能的跟踪位置想定不同 的气象条件、航迹、干扰介入时间和位置等战情参 数,仿真生成大场景下地面、目标和干扰图像序列。 太阳反射辐射亮度的大气和光学系统衰减,由想定 的气象条件、航迹、时间和设备参数等决定,可提前 计算或输入。认为距离主要影响反射阳光到达探测 器处的辐射亮度;太阳干扰效应采用实测数据构建 干扰效应数据库,提前对不同夹角下和辐射照度下 阳光反射干扰效应分布进行插值处理。阳光反射干 扰战情想定为空地成像设备已瞄准目标,目标上出 现阳光反射干扰;由于空地成像设备光轴抖动,阳光 反射干扰效应存在闪烁,实验中根据光轴夹角读取 对应的阳光反射效应数据和场景图像数据进行叠 加,当夹角大于 0.25°时仅叠加镜面的理想成像 数据。

空地成像设备跟踪抗干扰仿真实验过程为: (1)加载全航迹的大场景数字图像序列和干扰图 像序列;(2)由空地成像设备俯仰、偏航信号计算 光轴指向,在大场景中截取对应的场景,并进行稳 定跟踪,记录跟踪制导数据;(3)根据光轴指向和 想定的镜面法向计算太阳夹角并调用相关干扰效 应图像,合成阳光反射干扰后红外图像;(4)记录 跟踪制导数据和图像数据,当出现跟踪丢失时,人 工操作并尽可能再次锁定目标,记录再次锁定时 间。空地成像设备跟踪、受干扰和失锁结果如图 2 所示。



图 2 跟踪仿真试验结果

Fig. 2 The test results of tracing simulation

仿真实验结果显示,在目标跟踪区域或附近 出现阳光反射闪烁干扰时,空地成像设备跟踪点 出现抖动,易出现丢失目标的情况。当空地成像 设备目标丢失后,通人工过单杆搜索后可再次锁 定跟踪目标,但实际中极易出现无法再次锁定目 标或仿真试验已结束的情况,一般再次锁定目标 需要时间较长。

3.2 空地成像设备受干扰影响分析

导弹制导控制是导弹的核心之一,通过计算位 置偏差,形成导引指令,并操纵导弹改变飞行方向, 使其沿预定的弹道或根据目标的运动情况随时修正 自己的弹道,直至飞向目标。将上文的跟踪制导数 据带入导弹比例制导弹道模型,可以查看其落点变 化情况。 空地导弹常用制导律为比例导引制导律与弹道 成型制导律。比例导引制导律是空地导弹最为广泛 使用的制导律,其弹道前段弯曲,能充分利用导弹的 机动能力;弹道后段较为平直,使导弹具有较充裕的 机动能力,且实现容易,对发射初始条件要求不严。 AGM-65D 空地导弹广泛装备美国海/空军的各种作 战飞机,如F-16、A-10 等其他盟国的作战飞机,该弹 为空地红外成像制导武器的典型代表,不失一般性 可模拟该弹弹道模型计算阳光反射干扰对导弹落点 影响程度。

AGM-65D 弹长为 2.49 m、弹径为 0.305 m、翼展 为 0.719 m、弹重为 220 kg、发射高度为 60~9150 m、 发射速度为 0.5~1.2 Ma、最大速度为 2.1 Ma、巡航 速度为 1~2 Ma。AGM-65D 空地导弹典型工作流程 为机载设备搜索目标,并将载机组合导航系统信息 以及目标信息装订给导弹惯导及导引头;导弹脱离 弹射装置,启动火箭发动机,导弹进入惯性导航阶 段,距离目标 15 km 左右红外导引头开机搜索目标; 搜索目标后导引头锁定目标,进入末制导段。综上 为分析一般性,本文取 AGM-65D 导弹为通用的比 例制导模型,计算干扰后落点。比例制导表达式一 般为^[1,14]:

 $a_c = Nv_c q + g\cos(\theta) \tag{4}$

4; v_e 为弹目接近速度; \dot{q} 为视线相对惯性系旋转角速度;g为重力加速度; θ 为弹道倾角。

式中,a。为驾驶仪加速度指令;N为导航比,一般取

根据多个非线性常微分方程与普通方程可构成 弹体六自由度方程组,用数值积分法可以解得导弹 弹道。根据典型红外成像导引头的作用距离假定确 定最大干扰距离为10 km。一般情况下导引头在受 到有效干扰后,当目标丢失、无法锁定目标是,导引 头输出制导信息会失效,飞控系统保持失锁前一刻 控制指令;当导引头重新锁定目标,飞控系统重新接 收到制导指令,从而发出新的控制指令。将10 km 起始干扰跟踪制导数据、5 km 起始干扰跟踪数据及 想定 10 km 能再次跟踪目标,分别仿真了不同状态 下落点变化情况。

表2给出发射高度3km、5km和7km条件下, 无干扰、10km持续干扰、5km起始持续干扰和10km 起始10秒重新捕获目标等条件下导弹落点变化情 况。仿真计算结果显示:通过对 AGM-65D 多种发射 条件下的弹道仿真可以看出,在导引头无干扰的情况 下落点偏差一般在2m以内,能够较为精准地命中目 标。在10 km 起始对 AGM-65D 导引头持续有效干 扰情况下,落点误差为几百米,能够有效保护重要目 标;在5 km 起始对 AGM-65D 导引头持续有效干扰 情况下,导弹落点误差在25 m以上,目标需要采取 一定的措施。导引头在受到干扰后,平均10 s 左右 能够重新锁定目标,则落点误差在百米以上,可有效 保护目标。

表2 不同状态下落点偏差表

Tab. 2 The impact point deviation of

发射高/km 干扰状态及落点偏差	3	5	7
无干扰/m	0.6	1.2	2.0
10km 起始持续干扰/m	780	659	573
5km 起始持续干扰/m	49	34	26
10km 起始 10 秒重新捕获目标/m	142	121	110

different interference state

4 结 论

阳光反射作为自然界较为常见的自然环境干 扰,空地成像设备在实际使用时无法完全规避。特 别是人为的阳光反射干扰对空地成像设备的目标跟 踪影响巨大。本文通过实测阳光反射干扰效应,并 将阳光干扰效应图像合成注入空地成像设备,进而 获取跟踪制导数据,最后将跟踪制导数据带入弹道 计算模型的方法,分析了阳光反射对空地成像设备 干扰最终影响情况。干扰效应测试结果、注入试验 结果和落点计算结果表明,人为的阳光反射干扰不 但影响设备成像质量,破坏目标稳定跟踪状态,还可 能导致跟踪失锁及无法命中目标;即使人在回路介 入再次捕获跟踪,受再次搜索锁定时间限制,空地成 像设备仍有较大可能性无法命中目标。本文对空地 成像设备抗阳光干扰算法改进和抗干扰能力评估具 有一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] Deng Chuanjia, Bao Shan. Testing research on anti-smoke jamming of certain type infrared imaging aim-to-land guidance missile [J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41 (12),16 – 19. (in Chinese)

邓传加,鲍珊.某型对陆攻击红外成像制导武器抗烟 幕干扰试验研究[J]. 舰船电子工程,2021,41(12), 16-19.

[2] Zou Ruping, Chen Shichao, Chen Yun, et al. A guidance control method for imaging air-to-ground missiles [J]. Tactical Missile Technology, 2021, 1:93 - 98 (in Chinese)
 (I) J. J. Hart A. J. Robbert M. C. LER M. J. LER M. J. LER M. (1998)

邹汝平,陈士超,陈韵等.一种图像寻的空地导弹的制导控制方法[J].战术导弹技术,2021,1:93-98.

- [3] Li Nan. Impact of smoke jamming on the probability of seeker hit by infrared imaging [J]. Laser & Infrared, 2021,51(3):358-362. (in Chinese)
 李楠. 烟幕干扰对红外成像导引头命中概率影响[J]. 激光与红外,2021,51(3):358-362.
- [4] Xu Qian, Chen Xianzhi, Bai Zhigang, et al. Adaptive infrared warship target segmentation in strong sun-glint environment[J]. Infrared Technology, 2015, 37(9): 358 362. (in Chinese)
 徐倩,陈咸志,白志刚,等.强阳光反射背景下红外舰船目标自适应分割[J]. 红外技术, 2015, 37(9): 358 362.
- [5] Liu Jianyong, Shen Junping, Hu Jianghua, et al. Camon-flage way of countering infrared imaging guided anti-tank missile [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34 (2):184-187. (in Chinese)
 刘建永,沈均平,胡江华,等. 对抗红外成像制导反坦克导弹的一种伪装方法[J]. 红外与激光工程,2005, 34(2):184-187.
- [6] Li Yi. Modeling and simulation of infrared seeker imaging system with aero-dynamic and laser jamming effects[D]. Xi'an:Xidian University,2017:73 76. (in Chinese) 李奕. 气动效应及激光干扰红外导引头成像建模仿真 研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2017:73 76.
- Zhou Weiwen, Kang Meiling, Zhou Zeqiang. Research of infrared flares influence mechanism on the imaging guidance missile[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48 (12):1204004. (in Chinese)

周卫文,康美玲,周泽强. 红外诱饵对成像制导导弹影 响规 律 研 究 [J].. 红 外 与 激 光 工 程, 2019, 48

(12):1204004.

- [8] Wnag Qi. Test design of infrared detector anti-jamming of shine and sea surface shine[J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(8):164 168. (in Chinese)
 王琦. 红外探测设备抗阳光和海面亮带干扰试验设计
 [J]. 舰船电子工程, 2021, 41(8):164 168.
- [9] Zhang Xiaohu, Wang Jie, Guo Guisong, et al. An anti reconnaissance jamming method based on sunlight reflection: China, CN202010540113. 6: [P] 2020-09-22. (in Chinese) 张小虎,王杰,郭贵松,等. 一种基于太阳光反射的反

侦察干扰方法:中国, CN202010540113.6[P]:2020-09-22.

[10] Zhu Xiaohong, Yan Suzhen, Liu Zhen, et al. Characteristics analysis of solar short-wave infrared radiation reflected by point target[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2015,36(2):16-20. (in Chinese)
朱小红,蔺素珍,刘震等. 点目标反射太阳短波红外辐

射特性分析[J].火炮发射与控制学报,2015,36(2):

16 – 20.

- [11] Zhao Zhijun. Research on background radiation characteristics of ground-based infrared solar observation [D]. Kunming: Yunnan Observatories Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
 赵志军. 地基红外太阳观测的背景辐射特性研究[D]. 昆明:中国科学院云南天文台, 2017.
- [12] Li Wenjie, Song Zezheng, LI Guangbo, et al. Radiation characteristics analysis of space false alarm sources for infrared early warning satellite[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(3)0304002. (in Chinese)
 李文杰,宋泽正,李广波,等. 红外预警文星空间虚警 源辐射特性分析[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(3)0304002.
- [13] Tu Haifeng. Research on modeling, navigation and control technologies for loitering munition [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015:15-25. (in Chinese) 涂海峰. 巡飞弹药系统建模与导航控制技术研究[D]. 北京:北京理工大学, 2015:15-25.