

# 光电成像系统激光干扰效果定量评估研究综述

邵立, 吴云龙, 汪亚夫, 孙晓泉

(脉冲功率激光技术国家重点实验室, 电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

**摘要:**光电成像系统作为现代战争中人类的“眼睛”而被广泛地应用于目标侦查、火控观瞄、精确制导等领域。另一方面,光电成像系统很容易受到激光的干扰,如何进行定量、准确和客观地评估激光干扰光电成像系统的效果是干扰技术研究的一个重要环节。同时,利用所研究的激光干扰效果评估方法建立相应的仿真评估系统对于缩短干扰装备研制和鉴定的周期,降低研发的成本具有十分重要的意义。对国内外研究进展情况进行了综述,总结并展望了该领域未来的研究方向。

**关键词:**光电成像系统;激光;干扰;定量评估

**中图分类号:**TN977 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.003

## Quantitative evaluation of laser jamming effect on photoelectronic imaging system

SHAO Li, WU Yun-long, WANG Ya-fu, SUN Xiao-quan

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** Photoelectronic imaging system is regarded as the eyes of human being in the modern warfare, so it has been widely used in the military fields of target detection, fire control and precision guidance, et al. But photoelectronic imaging system is easy to be jammed by laser, thus the precise and quantitative evaluation of interference effect is a significant procedure for the research of interference techniques. A comprehensive simulation evaluation system can be established by utilizing the corresponding evaluation methods, which can shorten the lead time of interference equipments and reduce the development cost. The evaluation methods of laser interference effect at home and abroad are summarized, and the future research directions are discussed and outlooked.

**Key words:** photoelectronic imaging system; laser; interference; quantitative evaluation

### 1 引言

掌握战场态势的实时发展和情报信息的瞬时变化成为获取未来信息战争胜利的关键,而光电成像侦察设备作为现代武器的“眼睛”,其作用主要是采集特定区域的图像信息并对图像中可能存在的目标进行探测和识别,为跟踪系统进行目标跟踪和火力系统进行火力打击等过程提供准确的目标信息。随

着现代科学技术的不断发展,光电成像系统已广泛地应用在战斗机、无人机、坦克等军事装备的侦察、预警、制导、观瞄、火控系统中,光电成像系统中的光电探测器的探测波段也由传统的可见光、红外等多光谱向高光谱甚至是超光谱方向拓展。与此同时,各种干扰技术的研究和反侦察手段的使用都对装备中光电成像系统的技术性能提出了越来越高的要

**基金项目:**重点实验室基金(No. 13J1003);光电信息控制和安全技术重点实验室基金(No. 20100713-003)项目资助。

**作者简介:**邵立(1977-),男,博士,主要从事激光技术应用及光电仿真方面的研究。E-mail:jackwu1225@126.com

**收稿日期:**2016-01-06;**修订日期:**2016-03-10

求。为了满足这一现实需要,各主要军事发达国家均投入大量的人力和财力研发更先进地光电传感器用于准确、实时地采集情报信息。

另外一方面,在各种用于对抗光电成像侦察系统的技术中,激光武器因为具有射击速度快、命中目标精度高、反应快速、不受电磁干扰、高效费比、灵活可控等常规武器无法比拟的优点而引起了世界上主要军事发达国家的争先发展。2014年2月18日据美联社报道,美国海军将于2014夏天在“庞塞号”军舰上测试最新型激光武器原型,如图1所示。

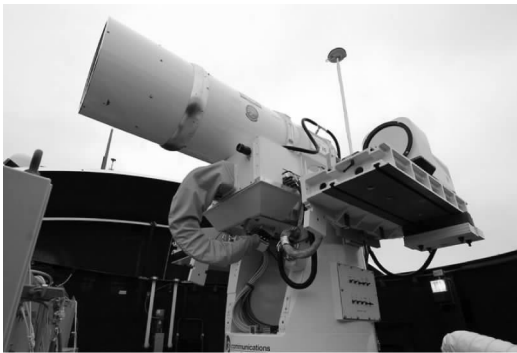


图1 美国海军研发的新型战术激光武器

Fig. 1 The new tactical laser weapon developed by U. S. Navy

据报道,装载在“庞塞号”上的激光武器属于高能固体激光器,该激光器所发射的激光处于红外波段,发射激光能量可调节。在激光发射能量较低条件下,该武器系统可以对所瞄准的目标实现致盲式干扰;在激光发射能量较高的条件下,该武器系统可以实现对所瞄准目标关键部位的烧毁损伤。不过虽然该新型激光武器具有许多其他常规武器无法比拟的优势,但用于研发该武器的成本却十分昂贵,另外还有许多技术难题如巨大的能源补充以及海上恶劣的作战环境等需要攻克。

鉴于高能激光武器的研发对经费和技术都有很高的要求,而低能激光武器干扰光电成像系统同样可以达到较好的效果并且利用现有的激光技术水平易于实现,因此备受各国的青睐。利用激光干扰以光电传感器为核心部件的光电成像系统,不仅可以造成传感器的破坏损伤、致盲、大面积像元饱和,还可以在传感器所成图像上叠加一层不规则的干扰光斑,从而使整个成像系统降低或丧失侦察能力。另一方面,激光干扰光电成像系统效果如何?激光干扰对成像系统的目标检测、目标识别和目标跟踪的

影响有多大?这些问题都是研究人员所关心的。掌握激光干扰光电成像系统的原理过程,定量、准确、客观地评估激光干扰成像系统的效果是干扰技术研究的重要环节,也是直观掌握激光干扰设备所具有的综合战术技术性能最有效的途径。

## 2 国内外研究现状

激光干扰效果是指在激光干扰的条件下对被干扰的对象所产生的破坏、损伤、扰乱效应,是激光干扰设备所具有的综合战技性能最直观的体现。而激光干扰效果评估则是定性或者定量地评价激光干扰对目标对象的作用效果。鉴于激光干扰效果评估对于激光干扰设备战术性能的测试和改进具有十分重要的意义,世界上各主要军事发达国家都非常重视激光干扰效果评估方法的研究以及应用<sup>[1-3]</sup>。对于激光干扰光电成像系统效果评估的研究,总的来说可以分为三个研究方向,一是激光干扰效果评估准则的建立;二是激光干扰效果评估方法的研究;三是激光干扰效果综合评估系统的建立。这三个研究方向研究的具体内容各不相同,但彼此之间联系紧密。评估准则的建立目的是为评估方法的研究提供依据,用于定量评估激光干扰效果的各种方法则是整个研究的核心,而综合评估系统的建立就是为了将相关理论研究成果转化为实践,并直接应用于干扰装备的研制和鉴定等过程中。下面将对这三个不同方向的国内外研究进展情况做一个简单的介绍。

### 2.1 评估准则

激光干扰光电成像系统效果评估准则一般指研究人员在进行评估时所选取的评估指标以及激光干扰效果等级的划分。评估指标是指所选取的能反映激光干扰对成像系统某一或某些性能参数影响的方法,而干扰效果等级的划分则是依据所提出的评估指标对成像系统受激光干扰影响的轻重程度进行量化区分。目前常用的激光干扰效果评估指标主要有5类,每一类都包含若干个典型评估指标<sup>[1]</sup>。第一类是搜索参数类指标,主要包括发现概率,截获概率,虚警概率,捕捉灵敏度等;第二类是制导精度类指标,主要包括发现概率,截获概率,虚警概率,捕捉灵敏度等;第三类是跟踪精度类指标,主要包括跟踪脱靶量,跟踪精度;第四类是图像特征类指标,主要

包括图像对比度,相关度,信噪比,作用距离,图像分形特征;第五类是压制系数类指标。

恰当地选择评估指标是进行激光干扰效果合理评估的关键。一般来说,光电成像侦察系统可以分为两类,一类是基于人眼视觉的光电成像系统,在这类系统中,由成像系统获取的图像信息最终会传递给受过专业训练的图像观测人员,并由他们对系统采集的图像进行最终的研判。第二类是基于机器视觉的光电成像系统,这类系统利用机器代替传统的人眼,通过内置的目标自动检测算法、目标自动跟踪算法等对系统采集的图像进行处理,整个过程不需要人的参与。高卫在光电成像系统的分类基础上根据成像系统的成像质量和成像功能受损害的程度将基于人眼视觉的光电成像系统激光干扰效果等级划分为4个等级,如表1所示。而对于基于机器视觉的光电成像系统激光干扰效果等级划分则需要根据具体计算所得跟踪精度误差以及实验所得干扰成功率进行判断<sup>[4]</sup>。

表1 激光干扰效果等级划分

Tab. 1 Grade classification of laser jamming performance

等级	干扰效果
0级	激光干扰后成像系统中探测器无像元饱和,为无效干扰
1级	在激光干扰后成像系统中探测器有少量像元饱和,在成像系统所采集的图像中出现小的明亮光斑,为轻度干扰
2级	在激光干扰后成像系统中探测器有大量像元饱和,在成像系统所采集的图像中出现大的明亮光斑,当激光干扰消失后,成像系统逐渐恢复正常工作,为中度干扰
3级	对成像系统中的探测器或其他光学器件已造成损伤,系统的成像功能丧失,当激光干扰消失后,成像系统无法恢复正常工作,为重度干扰

## 2.2 评估方法

### 2.2.1 国外研究现状

世界上主要军事发达国家都十分重视对激光干扰效果评估方法的研究,从而为各种仿真评估系统的建立奠定理论基础。具体来说,2007年,Anne Durècu等人利用倍频Nd:YAG激光器辐照CCD黑白摄像机的实验,并定量分析了激光干扰对CCD摄像机中目标自动识别算法的影响<sup>[5]</sup>。2009年,Anne Durècu等人在前期研究的基础上,系统分析了激光重频、目标大小以及目标相对于激光光斑位置等不

同实验条件对激光干扰CCD相机作用效果的影响,并通过计算不同实验条件下激光干扰对于目标边缘检测算法的影响实现对激光干扰效果的定量评估<sup>[6]</sup>。2010年,N. Hueber等人在Anne Durècu课题研究的基础上从四个评价指标即图像中饱和像元数、信噪比、对比度传递函数以及模式识别算法的角度去定量评价激光干扰的效果<sup>[7]</sup>。同年,D. H. Titterton分别就可见光、中红外、远红外波段的激光对光电探测器的干扰效果进行了讨论<sup>[8]</sup>。2011年,Anne Durècu等人利用4 μm的OPO激光器和10.6 μm CO<sub>2</sub>激光器开展了对HgCdTe焦平面阵列探测器辐照的实验,通过定量控制光斑位置、直径、激光功率及脉冲时序研究激光对中红外波段探测器的干扰效果<sup>[9]</sup>。

### 2.2.2 国内研究现状

国内的研究人员虽然开展激光干扰光电成像系统效果评估研究工作起步较晚,但鉴于其对于激光干扰技术发展的重要性,这项工作在近十年吸引了越来越多科研机构以及学者的关注和研究。具体来说,2010年,高巍巍围绕激光辐照CCD探测器产生的饱和串音效应和杂散光效应展开研究,从激光干扰图像的角度利用客观评价方法中的均方误差和峰值信噪比等指标对激光干扰红外成像系统效果的定量评估进行了初步的探讨<sup>[10]</sup>。2011年,曾凯等人将人眼的视觉特性引入到激光干扰效果评估中,依据干扰图像的结构特点,提出了一种基于结构相似度的图像尺度用于激光干扰光电成像系统效果的定量评估<sup>[11]</sup>。同年,车进喜等人开展了不同入射激光参数实验条件下CO<sub>2</sub>激光对红外焦平面热像仪的辐照实验,并从激光干扰图像质量的角度对不同参数下激光干扰效果进行分析<sup>[12]</sup>。阮江洋,张方芳等人在研究激光干扰红外成像系统作用机理的基础上改进了红外成像系统在激光干扰条件下的对比度阈值函数,并利用NVThermIP模型评估激光干扰对红外成像系统性能预测的影响<sup>[13-14]</sup>。张景阳等人则将模糊评估方法引入到激光干扰效果评估中,并确定了激光对准探测器程度、探测器材料质量、入射激光功率等参数作为评估因素<sup>[15]</sup>。2012年,刘严严等人从激光干扰图像的角度出发利用小波变换的方法提取了图像中的细节分量用于定量分析参考图像

和干扰图像之间的差值图像,实现了对干扰图像质量的客观评价<sup>[16]</sup>。同年,种琳从激光干扰图像饱和光斑、成像跟踪系统的跟踪精度、成像跟踪系统自动增益控制的角度对激光干扰红外成像跟踪系统的效果进行分析<sup>[17]</sup>。邵立等人则根据导弹在激光干扰前后命中概率的变化情况对激光干扰光电成像系统的作用效果进行定量评估<sup>[18]</sup>。2013年,邵俊峰等人从激光干扰图像的角度出发,将光学传递函数与图像对比度结合起来提出一种综合评价方法用于评估激光对 TDI 相机干扰的效果<sup>[19]</sup>。同年,钱方等人对激光干扰图像进行小波变换后利用加权的方法计算参考图像和干扰图像之间的结构相似度从而实现激光干扰效果的定量评估<sup>[20]</sup>。车进喜等人提出通过计算参考图像和激光干扰图像之间的相关系数来衡量激光干扰红外成像系统的效果,并开展了激光干扰实验用于验证方法的有效性<sup>[21]</sup>。2014年,李刚等人以干扰成功率作为评价指标,分别就距离欺骗干扰和致盲干扰这两种干扰方式定量分析了高重频激光对脉冲激光测距机的干扰效果<sup>[22]</sup>。

### 2.3 评估系统

为了缩短光电对抗装备的研制、测试和鉴定周期,降低研发成本,全面合理地评估对抗装备的战技性能,世界上各主要军事发达国家都十分重视仿真技术在光电对抗装备研发中的作用,相应地建立一些光电仿真评估系统。根据收集的公开文献资料,现将各国部分仿真评估系统的建立情况列举如表2所示<sup>[1,23-27]</sup>。

表2 各国光电对抗仿真系统建立情况

Tab.2 The development of opto-electronic countermeasure simulation system for each country

国家	光电仿真系统
美国	德克萨斯州空军电子战评估系统(AFEWES)
	亚拉巴马州陆军导弹指挥部先进仿真中心(ASC)
	加州海军半实物光电仿真实验室(SIMLAB)
荷兰	TNO 研究所研制的反舰导弹红外诱饵评估系统
加拿大	海军威胁和干扰模拟器(NTCS)
瑞典	红外导弹\寻的器干扰效果评估系统(TACSI)
英国	便携式红外防空导弹红外诱饵评估系统(MANPAD)

国内的许多学者就仿真系统的建立也开展了一定的研究,但处于保密的原因,在公开文献资料

上未见到对于已测试定型的光电对抗仿真测试系统的相关报道。所搜集到的公开文献多是对仿真测试系统的总体框架、分块组成、功能、关键技术等进行讨论,或是建立简单的模型用于模拟仿真测试过程<sup>[23-24,28-30]</sup>。

### 3 总结与展望

从国内外学者所开展的关于激光干扰光电成像系统效果评估方法研究的进展情况来看,研究人员将越来越多的关注放在了对激光干扰图像本身特性的分析上,并依据这些特性提出激光干扰效果的评估方法。这一点不难理解,因为无论是基于人眼视觉的光电成像系统还是基于机器视觉的光电成像系统,系统最终向图像观测人员或者机器传递的是一幅图像,然后由观测人员或机器内置自动算法对得到的图像信息进行分析和判断。所以,在激光尚未造成光电成像系统硬件损伤之前,激光干扰对于光电成像系统的作用效果主要体现在对系统成像质量的影响上。激光干扰效果越好,成像系统所成图像的质量就越差,导致观测人员通过图像进行目标的探测和辨别的难度越大,系统内置算法根据图像进行目标自动识别和跟踪的工作性能越低。因此,从干扰图像的角度对激光干扰光电成像系统效果进行评估是一条方便、有效的途径。

### 参考文献:

- [1] LIU Songtao, WANG Henan. Research on evaluation methods for electro-optic countermeasure effectiveness [J]. Electro-optic Technology Application, 2012, 27(6): 1-7. (in Chinese)  
刘松涛,王赫男. 光电对抗效果评估方法研究[J]. 光电技术应用, 2012, 27(6): 1-7.
- [2] LIU Songtao, GAO Donghua. Opto-electronic countermeasure technologies and their development [J]. Electro-optic Technology Application, 2012, 27(3): 1-9. (in Chinese)  
刘松涛,高东华. 光电对抗技术及其发展[J]. 光电技术应用, 2012, 27(3): 1-9.
- [3] Sergei A VAKIN, Lev N SHUSTOV, Robert H DUNWELL. Fundamentals of electronic warfare [M]. Norwood: Artech House, 2001.
- [4] GAO Wei. Evaluation method for jamming effectiveness on electro-optical imaging systems [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(2): 5-8. (in Chinese)

- 高卫. 对光电成像系统干扰效果的评估方法[J]. 光电工程, 2006, 33(2): 5-8.
- [5] A Durécu, O Vasseur, P Bourdon. Assessment of laser-dazzling effects on TV-cameras by means of pattern recognition algorithms[C]. Proc. of SPIE, 2007, 6738: 0J-1-0J-9.
- [6] A Durécu, O Vasseur, P Bourdon. Quantitative assessment of laser-dazzling effects on a CCD-camera through pattern-recognition-algorithms performance measurements [C]. Proc. of SPIE, 2009, 7483: 0N-1-0N-11.
- [7] N Hueber, D Vincent, A Morinb. Analysis and quantification of laser-dazzling effects on IR focal plane arrays[C]. Proc. of SPIE, 2010, 7660, 42-1-42-12.
- [8] D H Titterton. Application of laser technology to optical countermeasures[J]. The Imaging Science Journal, 2010, 58: 286-295.
- [9] A Durécu, P Bourdon, D Fleury. Infrared laser irradiation breadboard; dazzling sensitivity analysis of a HgCdTe focal plane array[C]. Proc. of SPIE, 2011, 8187: 0K1-0K10.
- [10] GAO Weiwei. Assessment and simulation of the interference effects of laser on infrared imaging system[D]. Xi'an; Xidian University, 2010. (in Chinese)  
高巍巍. 红外成像系统激光干扰的图像仿真与效果评估[D]. 西安, 西安电子科技大学, 2010.
- [11] ZENG Kai, YANG Hua, ZHAI Yue, et al. Quality assessment of photoelectric image interference [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(9): 2164-2168. (in Chinese)  
曾凯, 杨华, 翟月, 等. 光电成像干扰图像质量评估[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(9): 2164-2168.
- [12] CHE Jinxi, WANG Dong, ZHANG Hengwei, et al. Influence of laser parameters on jamming effectiveness of IR imaging system [J]. Journal of Applied Optic, 2011, 32(5): 992-997. (in Chinese)  
车进喜, 王东, 张恒伟, 等. 激光参数对红外成像系统干扰效果影响的实验研究[J]. 应用光学, 2011, 32(5): 992-997.
- [13] RUAN Jiayang. Research on the performance prediction of infrared imaging system based on laser interference [D]. Xi'an; Xidian University, 2011. (in Chinese)  
阮江洋. 激光干扰下红外成像系统性能预测研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [14] ZHANG Fangfang, RUAN Jiayang, WANG Xiaorui. Research on the performance prediction of infrared imaging system based on laser interference [J]. Electronic Sci. & Tech, 2011, 24(9): 149-153. (in Chinese)  
张方芳, 阮江洋, 王晓蕊. 激光干扰下红外成像系统性能预测研究[J]. 电子科技, 2011, 24(9): 149-153.
- [15] ZHANG Jingyang, WANG Haiyan, LEI Wei. Fuzzy evaluation of jamming effect of pulse laser on CCD array detector [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(4): 421-425. (in Chinese)  
张景阳, 王海晏, 雷威. 脉冲激光干扰面阵 CCD 实验的模糊评估[J]. 激光与红外, 2011, 41(4): 421-425.
- [16] LIU Yanyan, ZHAO Yingchao, HU Tao. Quality assessment of laser disturbing images based on wavelet transform [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49: 111001-1-111001-7. (in Chinese)  
刘严严, 赵英超, 胡涛. 基于小波变换的激光干扰图像质量评价[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49: 111001-1-111001-7.
- [17] ZHONG Lin. Simulation research on the interference effects of laser on infrared imaging tracking system [D]. Xi'an; Xidian University, 2012. (in Chinese)  
种琳. 激光干扰红外成像跟踪系统的仿真研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [18] SHAO Li, WANG Yafu, SONG Wei. Research on CW laser jamming CCD imaging [J]. Laser Journal, 2012, 33(2): 38-40. (in Chinese)  
邵立, 汪亚夫, 宋伟. 连续激光干扰 CCD 成像研究[J]. 激光杂志, 2012, 33(2): 38-40.
- [19] SHAO Junfeng, JI Tongbo, CUI Shuang. Assessment of the jamming effect of 532 nm continuum laser dazzling TDI push-broom camera [J]. Journal of Spacecraft TT & C Technology, 2013, 32(5): 458-462. (in Chinese)  
邵俊峰, 吉桐伯, 崔爽. 532 nm 激光对 TDI 线阵推扫相机干扰效果评估[J]. 飞行器控制学报, 2013, 32(5): 458-462.
- [20] QIAN Fang, GUO Jin, SUN Tao, et al. Assessment of laser-dazzling effect based on weighted wavelet transforms [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays [J], 2013, 28(5): 781-787. (in Chinese)  
钱方, 郭劲, 孙涛, 等. 基于小波加权的激光干扰效果评估[J]. 液晶与显示, 2013, 28(5): 781-787.
- [21] Che Jinxi, Li Zhongmin, Gao Bo. Evaluation method based on the image correlation for laser jamming image [C]. Proc. of SPIE, 2013, 8907: 0U-1-0U-9.
- [22] Li Gang, Li Li, Shen Hongbin, et al. Quantitative evaluation of high repetition rate laser jamming effect on the pulsed laser angefinder [J]. Optik, 2014, IJLEO -

- 54184:4.
- [23] YU Ning, LI Junshan, WANG Xinzeng, et al. Research on electro-optical countermeasure of simulation evaluation system[J]. Si Chuang Ordnance Journal, 2011, 32(5): 5-10. (in Chinese)  
余宁, 李俊山, 王新增, 等. 光电对抗仿真技术研究[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(5): 5-10.
- [24] WANG Zhongwei, SHEN Hao. Overview of laser warfare simulation test system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(S): 344-349. (in Chinese)  
王忠巍, 申浩. 激光对抗仿真测试系统综述[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 344-349.
- [25] Jan Berggren, Ralf Kihlén. Model for simulation of IR countermeasure effect on IR-seeker/missile[C]. Proc. of SPIE, 2004, 5615: 72-83.
- [26] Wim de Jong, Frans A M Dam, Gerard J Kunz, et al. IR seeker simulator and IR scene generation to evaluate IR decoy effectiveness [C]. Proc. of SPIE, 2004, 5615: 100-111.
- [27] James Jackman, Mark Richardson, Brian Butters. Modeling a man-portable air-defence (MANPAD) system with a conical scan two-colour infrared (IR) seeker [C]. 2011, 8187: 0S-1-0S-8.
- [28] ZHANG Jiyong. Photoelectric countermeasure simulation test system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(6): 1124-1128. (in Chinese)  
张继勇. 光电对抗装备仿真测试系统[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1124-1128.
- [29] LIU Zhijing. Electro-optical jamming technology and jamming effects stimulation [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)  
刘志敬. 光电干扰技术及干扰效果评估[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [30] SHI Kuang. Simulation methods of shipborne electro-optic countermeasure combat[J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(10): 135-136. (in Chinese)  
史匡. 舰载光电对抗系统作战仿真方法研究[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(10): 135-136.