

激光压制干扰评估研究现状

贺 宣¹, 周 冰¹, 刘贺雄¹, 刘晓帅²

(1. 陆军工程大学电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003;

2. 中国人民解放军 66046 部队, 河北 石家庄 050000)

摘 要:在信息化战争中,光电成像侦察设备和光电成像制导设备在现代作战中发挥了极其重要的效能,而激光压制干扰是对抗光电成像侦察和光电成像制导的有效手段,对激光武器压制干扰效果的研究具有重要意义。文章首先介绍了当前激光武器的现状,然后从 CCD 成像、红外成像两方面对激光压制干扰评估的研究现状进行了分类梳理,简要评述了重要意义,分析了当前尚未解决的问题,为后续研究启发思路,并提供一定的参考。

关键词:激光;压制干扰;评估

中图分类号:TN977 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.07.001

Research status of laser suppression interference assessment

HE Xuan¹, ZHOU Bing¹, LIU He-xiong¹, LIU Xiao-shuai²

(1. Electronic & Optical Engineering Department, Army Engineering University of PLA,

Shijiazhuang 050003, China; 2. Unit 66046 PLA, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: In the information warfare, optoelectronic imaging reconnaissance equipment and photoelectric imaging guidance equipment have played an extremely important role in modern combat, and laser suppression interference is an effective means to counteract photoelectric imaging reconnaissance and photoelectric imaging guidance, and it is of great significance to study the effect of laser weapon suppression interference. The article introduces the current status of laser weapons, and classifies and studies the research status of laser suppression interference assessment in two parts: CCD imaging and infrared imaging. The important significance is reviewed briefly, and the current unresolved issues are analyzed, which inspires the follow-up research and provides some reference.

Key words: laser; suppression interference; assessment

1 引 言

伴随着现代战争信息化的日趋成熟,实时掌握战场态势和情报信息已成为当今时代军事对抗制胜的关键,于是光电成像设备作为主要的情报获取工具而得以广泛的应用。光电成像设备在战争中的作用,一方面在于实时获得并记录战场图像信息,对目标区域实时侦察,从而获取最新的战争情报并对态势进行精准判断;另一方面在于,通过成像制导为武

器指示目标,利用图像解算处理得到火控数据进而为导弹攻击目标指示方向。鉴于光电成像侦察、制导技术的诸多优势,世界各国在研发精确制导武器时都普遍装配了光电成像设备。相对应地,为了保护己方核心指挥机构和关键作战装备等重要目标,逐步发展出了烟幕遮蔽、伪装和欺骗等光电对抗技术,其中激光压制干扰技术因其具有较高的效费比而成为了研究的热点。

作者简介:贺 宣(1989-),男,硕士研究生,助理工程师,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail:546391639@qq.com

通讯作者:周 冰(1976-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail:zhbgxgc@163.com

收稿日期:2018-10-09; **修订日期:**2018-11-09

激光压制干扰是采用高能激光对敌方光电图像采集设备进行精准辐照,使其一定时间内功能失效甚至永久损伤的技术。该技术因其具有定向精度高、响应速度快、应用范围广的优点而倍受重视。随着激光技术发展的突飞猛进,激光武器不断更新换代,其辐照的频谱宽度和能级不断提升,使得压制干扰几乎所有光电成像设备成为可能。军事应用最广泛的光电成像设备主要为可见光和红外成像设备,相应的激光压制干扰评估即为对 CCD 成像设备和对红外成像设备的研究。对其开展压制干扰评估的研究,一方面可以对激光压制干扰技术的后续研究提供方向性引导,另一方面为对激光武器的定型试验提供理论依据,对降低激光武器的设计、调试和鉴定的时间成本,以及改进相关战法起到十分关键的推动作用。因此,开展激光压制干扰评估的研究,具有非常重要的意义。

2 激光武器现状

激光武器是实施激光压制干扰的主体,自二战后激光技术发明以来,各类激光发射装备层出不穷,为执行不同种类的任务,发展出了各式各样的激光武器。它主要分为软杀伤和硬杀伤两大类^[1-5]。

2.1 软杀伤的激光武器

这一类激光武器大部分为激光技术早期发展的产物,一般为百瓦能级以下,由于功率较低,多用于近距离作战行动中,在舰载、车载、手持、机载和地基等方面均有应用。

(1)用于人眼致炫的激光武器。在作用距离内,对敌方作战人员辐照功率可调的激光,破坏其眼球内部结构,使其丧失作战能力,但要避免永久失明。这一类的武器一般发射的激光在几瓦以下的能级范围,由于其攻击目标是人,它主要应用在了对恐怖分子的拒止。

(2)用于主动干扰的激光武器。主动干扰主要有欺骗干扰和压制干扰。其需要在考虑大气影响的前提下,激光到达目标时能量密度超过所需阈值,因此对能级的要求略高,达到数十甚至数百瓦。其中欺骗干扰对能量要求较低,仅需能让对方探测器发生响应即可。压制干扰对敌方光电成像侦察和制导设备的成像面辐照较大能量的激光,使其成像元件接受能量密度超过其饱和阈值,从而失去成像的功能。随着激光技术的迅猛发展

和精密跟踪瞄准、光束控制发射、自适应光学等技术的不断成熟,压制干扰逐步成为了光电对抗领域的主流。

2.2 硬杀伤的激光武器

一般认为,达到千瓦量级即为高能激光武器。它利用高能激光辐照至攻击目标的关键位置处,使之因热效应被破坏乃至摧毁,对发射激光能级要求较高,但研发耗资巨大。此类激光武器中,能量最高的当属美国的 DF 化学激光器,可达 2.2 MW;俄国也曾研发出单脉冲能量高达 2000 焦耳的钕玻璃固体激光器。从最新的情况来看,2014 年美国海军在 Ponce 运输登陆舰上成功测试并装备 LaWs,其辐照激光功率可达数十千瓦,主要用于反无人机。自此,高能激光武器进入了由技术突破向实战应用蜕变的转折期^[6]。据报道^[7],美国空军计划于 2020 年前,在 AC-130J“幽灵骑士”武装运输机上加装激光武器。如图 1 所示。

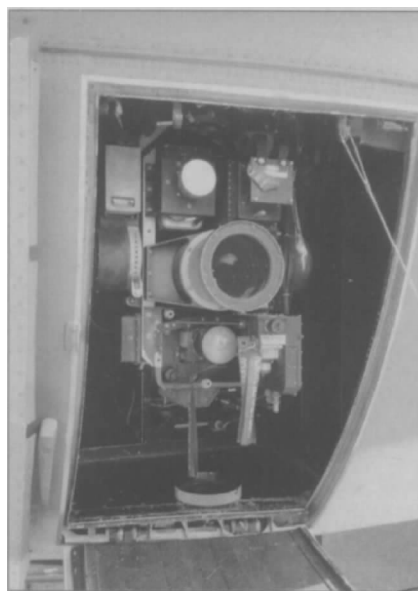


图1 安装在 AC-130J 上的激光器阵列及定位相机

Fig. 1 Laser array and positioning camera mounted on AC-130J

这款激光武器是由美国通用原子公司研发的高能液体激光器区域防空系统,即 HELLADS 激光器(如图 2 所示)。在引入美国空军后进行了一系列 150kW 级的电驱激光器的地面验证试验,能够毁伤一般意义上的轻装甲,这使得 AC-130J 的炮艇机兼具攻击性武器和防御地空导弹的双重能力。尽管激光武器具备诸多常规武器不可比拟的优点,但其研发成本十分高昂。

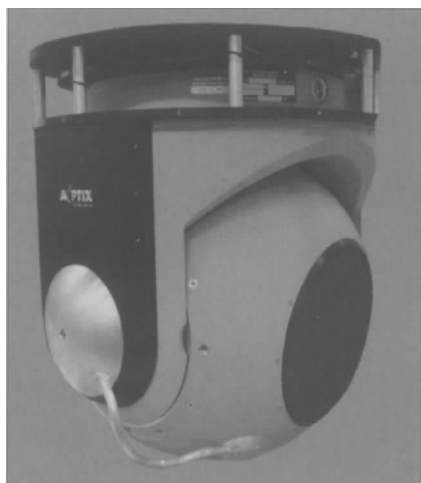


图2 HELLADS 激光器光电设备舱

Fig. 2 Photoelectric equipment compartment of HELLADS laser

综合现状来看,低能激光武器可以在充分利用现有经济支持的同时,实现对光电成像侦察制导设备的有效干扰,因而受到了各方的广泛关注。由于光电成像侦察制导方式的不同,对其进行激光压制干扰的手段也不尽相同,关于这方面的评估,应当按照可见光和红外两个波段进行。

3 对 CCD 成像系统的压制干扰评估研究

在武器系统中,CCD 作为应用最广泛的成像元件,通过将接收到的光信号转换为相应的电信号,以此作为像素值拼组而成一幅完整的图像信息。对 CCD 的压制干扰,就是使用超过其饱和和阈值的高能激光辐照光学镜头,使之饱和、迷盲。一般而言,对 CCD 成像元件进行压制干扰辐照的过程中,随着激光能量密度的逐步提高,CCD 元件经历三个过程:局部饱和-饱和串音-点损伤。局部饱和,就是使辐照到 CCD 探测元件表面的激光能量初步达到或略高于 CCD 元件的饱和阈值,使得被辐照部分元件的像素值达到最大;饱和串音,是当辐照激光能量较大程度地高于 CCD 元件饱和阈值时发生的一种现象,表现为除了被辐照部分的像素值为最高以外,与其处于同一纵轴上的元件,也受到影响而饱和;而发生点损伤时,被辐照局部区域已不具备采集图像信号的能力。在这一方面,从现有的研究来看,大体上可以分为如下几类:

第一类,以某些关键的特征参数为指标,评估激光压制干扰效果水平。如,李晓龙以像素灰度值为判据,经过实验最终得到 TDI-CCD 的饱和阈值^[8]。邵俊峰基于光学传递函数、成像对比度建立了一种

干扰评估准则^[9]。二者共同填补了脉冲激光对 TDI-CCD 致炫效应研究的空缺,丰富了激光对 TDI-CCD 的干扰理论与成果。张景阳将激光干扰对准程度、干扰功率、大气环境影响以及探测器表面材料质量作为评估主要因素进行了模糊评估^[10]。钱方从目标识别特征的失效程度出发,先后提出特征点相似度(FPSIM)评估算法^[11]、基于光斑特征和图像特征的无参考动态激光干扰图像评估算法(DFM)^[12]和基于连续多帧图像动态特征变化的无参考激光干扰评估算法(FPD)^[13]。罗晓琳提出了一种基于压缩感知的激光干扰效果评价方法^[14]。樊勇提出一种基于梯度特征的图像质量评价算法(GSIM)^[15]。相比之下,钱方提出的三种算法能够更加客观的评估激光干扰效果的优劣,特别是无参考的评估算法,在实际应用中更加快捷、高效;而其他评估方法,更为基础,可操作性强。这一类的研究选取重要的 CCD 成像指标为依据,抓住了对可见光 CCD 干扰的关键点,从不同侧面对激光干扰进行了分析与评估。

第二类,建立某种模型,用来评价激光压制干扰效果。如,宋冬生结合多色 CCD 信号传递转换机理和超连续谱激光器光谱辐照特性,建立了激光干扰多色 CCD 成像仿真模型,仿真实验表明,激光功率密度是激光干扰效果的重要影响因子^[16];高润从半导体内部的物理机制出发,通过建立有限元仿真模型解释了激光对 CCD 探测器的干扰机理,并以仿真实验验证了其可行性^[17];康文运针对大型推扫相机干扰评估难的问题提出了激光干扰等效缩比模型^[18],将大面阵高分辨 CCD 干扰的复杂问题转化为等比例小面阵低分辨 CCD 干扰的简单问题,并通过实验对模型进行了验证;张恒伟针对 Binning 模式的 CCD 建立了相应的干扰模型,并进行了软件仿真实验^[19],但由于没有实际设备而无法验证。这一类的研究本质上是复杂的系统转化为简单的系统,并通过一般的方式进行干扰评估,以此推断原系统的干扰质量。

第三类,变换条件的对比研究,定性地判别激光干扰效果的优劣。如,王磊用 0.53 μm 和 1.06 μm 双波长复合激光和单波分别对可见光成像相机进行了干扰实验,结果显示,在正常有防护措施下,复合激光的干扰效果更加显著^[20];张超利用 532 nm、

808 nm、1064 nm 三种脉冲激光对同一 CCD 干扰实验,发现 532 nm 激光具有更低的光饱和阈值^[21]。通过对比,其实验结论更突出鲜明,有力地证明了道理,为激光干扰技术的进一步研发起到了一定的启示作用。

另外,还有其他的相关研究也是这一领域重要的补充内容,为完善科学、客观的激光压制干扰 CCD 成像系统效果评价体系发挥了不可或缺的作用。如,陈前荣运用光的传输理论推断出激光干扰 CCD 会得到周期性亮点分布^[22],并通过软件仿真得证实;刘延武实验证明了视场内外激光干扰均有效^[23],进一步突出了激光压制干扰的优越性;张超对激光干扰 CCD 的漂移光斑进行了研究,分析认为这与 CCD 器件受强光照饱和串音现象有关^[24];王彦斌以实验证实一个常理:CCD 增益增加,会增强激光的干扰效果^[25];张强估算了脉冲激光在大气环境下对典型 CCD 探测器的有效干扰距离,为提高激光干扰系统空间布局的合理性提供依据^[26]。

在以上研究中,第一类的针对性很强,其关注点主要放在了由激光干扰引起的关键指标变化;而第二类侧重于提出方法,对某一类型 CCD 均具有其通用性;其余均为对这一方向的有效补充。可以看出,CCD 设备作为成熟应用的侦察制导系统,基于不同角度的干扰研究已有了充分而广泛的实践,但仍未有人提出普遍适用的评估系统理论,这一方面值得关注。

4 对红外成像系统的压制干扰评估研究

为满足不断提高的全天候作战需求,红外成像技术在光电侦察制导领域的发展也日渐升温,它通过红外敏感材料收集并形成基于能量分布差异的目标区域热辐照图像,然后通过软件采集图像并依靠一定的算法对目标进行识别、匹配,从而获取战场情报,特别是打击目标所需的火控信息。集隐蔽性、高灵敏、高分辨率和昼夜工作的优点,红外成像技术依托精确制导武器的发展平台得以长足的进步。常见的红外成像材料有:碲镉汞(HgCdTe)、多晶硅、碲化铟(InSb)、砷化镓(GaAs)、硅化铂(PtSi)、量子阱(QWIP)、铁电体和微热辐射计等。当前各国的红外武器系统中,目前应用最广泛的是第三代红外成像系统。它采用了先进的凝视成像技术,侦察设备多采用分辨率较高的制冷型红外成像系统,而制导设备多采用体积小的非制冷型红外系统。近年来发

展出了最新的红外偏振成像探测技术,可以在红外成像的基础上获得每一点的偏振信息,从而增强了目标识别与探测能力^[27-28]。

对红外成像系统的激光压制干扰与对 CCD 成像系统的激光压制干扰类似,但略有不同。基于热损伤原理,其经历四个过程:局部饱和-中度饱和-重度饱和-点损伤。其中,中度饱和是指辐照激光能量已在一定程度上超过成像元件的饱和阈值,所成图像中干扰光斑开始向周围弥散,由于部分探测元件内部结构不同,成像机理的差异导致没有串扰现象;重度饱和时激光能量已远大于成像元件的饱和阈值,但其局部产生的热量还不足以将元件烧毁,元件内部的结构变化仍在可逆范围,在激光撤去后,随着热量逐渐散去,十余分钟可恢复初始状态;其余两种状态与 CCD 相同。红外波段分为近、中、远三个波段,不同材料的探测器应用的波段范围各异,于是在这一方面的评估研究因选取的探测材料和角度不同而呈现多种样式。

第一类,在一定条件下,对常用的红外探测材料饱和阈值的探讨。王东用脉冲激光和连续激光分别对多晶硅探测器进行了干扰损伤实验,得到了探测器达到四个状态的阈值^[29-30]。罗威将激光干扰系统作为一个整体,通过分析计算得到了远距离干扰某型碲化铟探测器所需最低激光功率^[31]。在这一实验中,对于探测材料的干扰研究不仅仅局限在了激光和材料本身,还综合考虑了激光传输的因素,较为全面地进行了钻研。赵建君通过理论计算和实验验证得到了 GaAs 的连续激光辐照损伤阈值,随后研究了重复脉冲激光辐照探测器引起的热力损伤理论^[32]。此文从特定的红外材料出发,然后上升到具有普遍适用性的理论。虽然各种红外探测材料的成像机理相同,但因其内部分子结构的差异,于是所得材料的各个状态激光能量阈值也不尽相同。这一类的研究,作为激光压制干扰红外设备评估的核心部分,为后续系统性的研究奠定了基础。

第二类,以建立模型、开发技术等方式对干扰效果进行评估。钮赛赛以激光干扰的物理模型与全链路传输特性为基础,兼顾其他因素建立了激光干扰耀斑理论模型,并将实际实验与软件仿真对比,验证了其有效性^[33]。赵建军利用建立的高斯型激光辐照碲化铟(PV)型探测器物理模型分析得出了 InSb

(PV)探测器受激光辐照时温升与时间的关系并得出了相应的损伤阈值,对此类干扰评估的指标给出了较为全面的概括,并为增加其激光对抗能力提出了建议^[34]。徐强在实验的基础上开发出一个方法:基于刃边法计算出激光干扰红外图像的调制传递函数曲线,以此来定量评估干扰效果^[35]。这是经典理论与前沿问题的有机结合,为激光压制干扰的评估问题提供了一个新的思路。亓凤杰对不同能量密度的激光辐照下 HgCdTe 探测器的图像仿真,以此来对干扰效果进行评估,并为分析同类探测器件的干扰问题提供了参考^[36]。这些研究都抓住了关键指标,将复杂的问题简单化,以更直观的方式解决激光干扰红外图像的评估问题。

由于红外成像技术发展的相对较晚,其激光压制干扰评估方面的研究也较为迟缓。纵观以上研究,第一类研究积累了不同红外探测器的饱和阈值,夯实了根基;第二类研究提供了不同的方法和思路,建立了框架;而成体系的评估研究并未出现,这是一个值得探讨的问题。另外,各类红外探测器抗干扰能力的强弱对比也仍未得到关注。

5 总 结

在信息化条件下的战争中,光电侦察制导设备获得的图像能否及时提取关键目标图像等有效信息是其能否发挥作用的关键所在,因此激光压制干扰评估终究归结于被干扰的光电设备能否提取有效信息的问题。从现状来看,研究主要集中在了不同能量激光辐照作用下探测器元件成像的分析,而关于光电侦察制导设备的激光压制干扰评估并未形成完整的研究理论。

同时需要注意的是,如果将激光压制干扰视作一个整体,其包含激光器辐照、激光传输和光电成像设备接收三部分。当前的研究主要集中在了第三部分,且激光在大气中的传输已有诸多成熟的理论,而激光武器作为一个独立的系统,其压制干扰效能评估也是一个十分关键的问题,值得探讨。进一步地,将三个部分的研究整合起来,考虑已有的不同激光武器在战场复杂环境下,对各式光电成像设备的压制干扰效能评估也是一个亟待解决的问题,应当得到关注。

参考文献:

[1] REN Guoguang. Current status and development trend of

high energy laser weapons [J]. *Advances in Laser and Optoelectronics*, 2008, 45(9): 62-69. (in Chinese)

任国光. 高能激光武器的现状与发展趋势 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(9): 62-69.

[2] LI Wei. New laser attack and confrontation weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1944-1948. (in Chinese)

李伟. 新型激光攻击与对抗武器 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 1944-1948.

[3] ZHOU Bingzhuo, ZHOU Daqing. Dynamic analysis of laser weapons development in the united states [J]. *China Market*, 2017(6): 212-213. (in Chinese)

周炳卓, 周大庆. 美国激光武器发展动态分析 [J]. *中国市场*, 2017(6): 212-213.

[4] Ming Di. Modern "Like Mirror" high-energy laser weapons new progress [J]. *Tank and Armored Vehicles*, 2018, (3): 28-31. (in Chinese)

鸣镝. 现代“照妖镜”高能激光武器新进展 [J]. *坦克装甲车辆*, 2018, (3): 28-31.

[5] YE Xiaoying. Overview of the Development of typical high energy solid tactical laser weapons in the united states [J]. *Knowledge Window: Teacher Edition*, 2018, (1): 76-80. (in Chinese)

叶肖甬. 美国典型高能固体战术激光武器发展概况 [J]. *知识窗: 教师版*, 2018, (1): 76-80.

[6] LI Yiyong, WANG Jianhua, LI Zhi. Development trend of high energy laser weapons [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(6): 1-6. (in Chinese)

李怡勇, 王建华, 李智. 高能激光武器发展态势 [J]. *兵器装备工程学报*, 2017, 38(6): 1-6.

[7] WANG Haifeng. A major breakthrough in laser weapons-AC-130J "Ghost Knight" equipped with laser cannons for armed transport aircraft [J]. *Weapons*, 2016, (5): 15-17. (in Chinese)

王海风. 激光武器的重大突破——AC-130J“幽灵骑士”武装运输机装备激光炮 [J]. *兵器*, 2016, (5): 15-17.

[8] LI Xiaolong, ZHAO Wei, ZHANG Leilei, et al. Experimental study on interference of 1.06 μm pulsed laser on TDI-CCD [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(3): 416-418. (in Chinese)

李晓龙, 赵威, 张雷雷, 等. 1.06 μm 脉冲激光对 TDI-CCD 的干扰实验研究 [J]. *激光技术*, 2015, 39(3): 416-418.

[9] SHAO Junfeng, JI Tongbo, CUI Shuang, et al. Evaluation of interference effect of 532 nm laser on TDI line array scanning camera [J]. *Journal of Aircraft Measurement and Control*, 2013, 32(5): 458-462. (in Chinese)

邵俊峰, 吉桐伯, 崔爽, 等. 532 nm 激光对 TDI 线阵推扫相机干扰效果评估 [J]. *飞行器测控学报*, 2013, 32(5): 458-462.

- [10] ZHANG Jingyang, WANG Haizhen, LEI Wei. Fuzzy evaluation of pulsed laser interference array CCD experiment [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.
- [11] QIAN Fang, SUN Tao, GUO Jin, et al. Laser interference effect evaluation algorithm based on feature point distribution characteristics [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41 (5): 221 - 228. (in Chinese)
钱方, 孙涛, 郭劲, 等. 基于特征点分布特性的激光干扰效果评估算法 [J]. *中国激光*, 2014, 41 (5): 221 - 228.
- [12] QIAN Fang, SUN Tao, GUO Jin, et al. Evaluation of dynamic laser interference effects based on spot and image features [J]. *Chinese Laser*, 2014, (6): 199 - 208. (in Chinese)
钱方, 孙涛, 郭劲, 等. 基于光斑与图像特征的动态激光干扰效果评估 [J]. *中国激光*, 2014, (6): 199 - 208.
- [13] QIAN Fang, SUN Tao, GUO Jin, et al. Evaluation of multi-frame dynamic interference effects combined with laser power and spot position [J]. *Chinese Laser*, 2014, (11): 1 - 9. (in Chinese)
钱方, 孙涛, 郭劲, 等. 结合激光功率和光斑位置的多帧动态干扰效果评估 [J]. *中国激光*, 2014, (11): 1 - 9.
- [14] LUO Xiaolin, TANG Jianfeng, ZENG Xianfang. Evaluation method of laser interference effect based on compressed sensing [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46 (9): 1133 - 1138. (in Chinese)
罗晓琳, 唐建凤, 曾献芳. 基于压缩感知的激光干扰效果评价方法 [J]. *激光与红外*, 2016, 46 (9): 1133 - 1138.
- [15] FAN Yong, LIU Xueyu, QIAN Fang. Evaluation of laser interference image using gradient similarity [J]. *Electro-optical and Control*, 2014, (8): 20 - 23. (in Chinese)
樊勇, 刘学雨, 钱方. 使用梯度相似度的激光干扰图像评估 [J]. *电光与控制*, 2014, (8): 20 - 23.
- [16] SONG Dongsheng, GUO Liang, GUO Bingtao, et al. Modeling and simulation of supercontinuum laser interference multicolor CCD detector [J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38 (6): 1018 - 1024. (in Chinese)
宋冬生, 郭亮, 郭冰涛, 等. 超连续谱激光干扰多色 CCD 探测器建模仿真研究 [J]. *应用光学*, 2017, 38 (6): 1018 - 1024.
- [17] GAO Run, Niu Chunhui, Li Xiaoying, et al. Simulation and experimental study of 632 nm laser on CCD interference [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46 (5): 552 - 557. (in Chinese)
高润, 牛春晖, 李晓英, 等. 632 nm 激光对 CCD 干扰效果仿真与实验研究 [J]. *激光与红外*, 2016, 46 (5): 552 - 557.
- [18] KANG Wenyun, SONG Xiaoquan, ZHANG Yingxin, et al. Research and experimental verification of laser interference equivalent scaling model for push-scan cameras [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (9): 2649 - 2654. (in Chinese)
康文运, 宋小全, 张颖新, 等. 推扫相机激光干扰等效缩比模型研究及实验验证 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44 (9): 2649 - 2654.
- [19] ZHANG Hengwei, LI Xiaolong, FAN Renjie, et al. Simulation study of saturation interference effect of laser on CCD camera Binning mode [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46 (9): 1045 - 1048. (in Chinese)
张恒伟, 李晓龙, 樊仁杰, 等. 激光对 CCD 相机 Binning 模式下饱和干扰效果仿真研究 [J]. *激光与红外*, 2016, 46 (9): 1045 - 1048.
- [20] WANG Lei, ZHAO Minghui, NIE Jinsong, et al. Experimental study of 0.53 μm and 1.06 μm dual-wavelength composite laser interference optoelectronic devices [J]. *Optoelectronics · Laser*, 2017, (3): 256 - 262. (in Chinese)
王磊, 赵明辉, 聂劲松, 等. 0.53 μm 和 1.06 μm 双波长复合激光干扰光电器件的实验研究 [J]. *光电子 · 激光*, 2017, (3): 256 - 262.
- [21] ZHANG Chao, ZHANG Wei, WANG Bin, et al. Experimental study on the interference of different wavelength lasers on CCD [J]. *Laser Technology*, 2014, 38 (6): 826 - 829. (in Chinese)
张超, 张伟, 王滨, 等. 不同波长激光对 CCD 的干扰性实验研究 [J]. *激光技术*, 2014, 38 (6): 826 - 829.
- [22] CHEN Qianrong, QI Fengjie, WANG Yanbin, et al. Research on the principle of laser interference CCD rule highlight distribution [C] // 2015 Photovoltaic Defense Technology Symposium Summary, 2015. (in Chinese)
陈前荣, 亓凤杰, 王彦斌, 等. 激光干扰 CCD 规则亮点分布原理研究 [C] // 2015 光电防御技术学术研讨会摘要集, 2015.
- [23] LI Haiyan, ZHU Min, LU Junwei, et al. Experimental study and theoretical analysis of laser interference CCD detection system outside the field of view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (5): 840 - 843. (in Chinese)
李海燕, 朱敏, 吕俊伟, 等. 视场外激光干扰 CCD 探测系统实验研究与理论分析 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40 (5): 840 - 843.
- [24] ZHANG Chao, WANG Bin, LIAO Zhiye, et al. Experimental study of pulsed laser interference array CCD imaging system [J]. *Laser Technology*, 2014, 38 (5): 619 - 622. (in Chinese)
张超, 王滨, 廖志烨, 等. 脉冲激光干扰面阵 CCD 成像系统的实验研究 [J]. *激光技术*, 2014, 38 (5): 619 - 622.
- [25] WANG Yanbin, WANG Guoliang, CHEN Qianrong, et al.

- Study on the effect of detector gain on laser interference effect[J]. *China Laser*, 2015, 42(b09): 90-96. (in Chinese)
- 王彦斌, 王国良, 陈前荣, 等. 探测器增益对激光干扰效果的影响研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(b09): 90-96.
- [26] ZHANG Qiang, WANG Yuefeng, JIANG Nan, et al. Study on the effective interference distance of pulsed laser to CCD detector[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(7): 729-735. (in Chinese)
- 张强, 汪岳峰, 姜楠, 等. 脉冲激光对 CCD 探测器有效干扰距离的研究[J]. *激光与红外*, 2010, 40(7): 729-735.
- [27] WANG Xia, XIA Runqiu, JIN Weiqi, et al. Progress in infrared polarization imaging detection technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3175-3182. (in Chinese)
- 王霞, 夏润秋, 金伟其, 等. 红外偏振成像探测技术进展[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(10): 3175-3182.
- [28] JIANG Huilin, FU Qiang, DUAN Jin, et al. Infrared polarization imaging detection technology and application research[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(5): 345-349. (in Chinese)
- 姜会林, 付强, 段锦, 等. 红外偏振成像探测技术及应用研究[J]. *红外技术*, 2014, 36(5): 345-349.
- [29] WANG Dong, WANG Fei, BAI Bing, et al. Interference damage experiment of 10.6 μm pulsed laser on polysilicon detector[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(9): 1084-1087. (in Chinese)
- 王东, 王非, 白冰, 等. 10.6 μm 脉冲激光对多晶硅探测器干扰损伤实验[J]. *激光与红外*, 2015, 45(9): 1084-1087.
- [30] WANG Dong, ZHANG Hengwei, YAN Xiaohu, et al. Experimental study on interference damage of polysilicon detector by continuous wave CO₂ laser[J]. *Applied Optics*, 2015, 36(3): 475-479. (in Chinese)
- 王东, 张恒伟, 覃小虎, 等. 连续波 CO₂ 激光对多晶硅探测器干扰损伤实验研究[J]. *应用光学*, 2015, 36(3): 475-479.
- [31] LUO Wei, DONG Wenfeng, XU Pengcheng, et al. Research on long-range laser interference of indium telluride photodetectors[J]. *Laser & Infrared*, 2015(3): 287-291. (in Chinese)
- 罗威, 董文锋, 许鹏程, 等. 碲化铟光电探测器的远距离激光干扰研究[J]. *激光与红外*, 2015(3): 287-291.
- [32] ZHAO Jianjun, SONG Chunrong, LIU Jin. Theoretical study of 1.06 μm continuous laser irradiation GaAs detector[J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2005, 17(6): 21-24. (in Chinese)
- 赵建君, 宋春荣, 刘进. 1.06 μm 连续激光辐照 GaAs 探测器的理论研究[J]. *军械工程学院学报*, 2005, 17(6): 21-24.
- [33] NIU Saisai, YIN Jianfei, CAO Weiwei, et al. Simulation of laser interference flare simulation in infrared imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(B12): 13-17. (in Chinese)
- 钮赛赛, 印剑飞, 曹卫卫, 等. 红外成像系统激光干扰耀斑仿真建模[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(B12): 13-17.
- [34] ZHAO Jianjun, LIU Jin, SONG Chunrong, et al. Thermal damage of InSb(PV) detector irradiated by repetitive pulsed laser[J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2006, 18(5): 23-26. (in Chinese)
- 赵建君, 刘进, 宋春荣, 等. 重复脉冲激光辐照 InSb(PV)型探测器的热损伤[J]. *军械工程学院学报*, 2006, 18(5): 23-26.
- [35] XU Qiang, PAN Feng, HUANG Li, et al. Modulation transfer function based on laser interference infrared imaging system[J]. *Aviation Weapon*, 2017, (3): 59-64. (in Chinese)
- 徐强, 潘丰, 黄莉, 等. 基于激光干扰红外成像系统的调制传递函数研究[J]. *航空兵器*, 2017, (3): 59-64.
- [36] QI Fengjie, LI Hua, WANG Min, et al. Interference image simulation of laser interfering infrared focal plane devices[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, 36(2): 213-215. (in Chinese)
- 齐凤杰, 李华, 王敏, 等. 激光干扰红外焦平面器件的干扰图像仿真[J]. *半导体光电*, 2015, 36(2): 213-215.