

新型光电探测技术在精确制导武器上的应用研究(特约)

宋 闯¹, 姜 鹏¹, 段 磊², 孙剑峰³, 范之国⁴

- (1. 北京机电工程研究所 复杂系统控制与智能协同技术重点实验室, 北京 100074;
2. 天津津航技术物理研究所, 天津 300300;
3. 哈尔滨工业大学 可调谐(气体)激光技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
4. 合肥工业大学 大数据知识工程教育部重点实验室, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 精确制导武器是现代战争中的主战武器,采用光电制导的精导武器具有分辨能力强、命中精度高的优势,在对地对海、防空反导、空间攻防等领域得到广泛应用。随着光电制导武器在现代战争中的作用愈发突出,其相应的对抗手段也在不断发展,使其面临的作战环境日趋复杂,光电制导系统需不断增强对复杂作战环境的适应能力。在对红外、可见光、激光半主动等光电探测技术在制导武器中的应用现状总结基础上,分析了当前技术对抗恶劣自然天气、复杂背景、人为干扰等作战环境能力的不足。针对当前发展的多光谱探测、偏振成像、激光三维成像、量子探测等新型技术,介绍目前研究进展和成果,主要包括多光谱/多谱段成像对抗真假目标和识别伪装、偏振成像对抗雨雾等恶劣自然天气、激光三维成像在对抗复杂背景和穿透遮蔽等方面的应用优势和研究进展。最后,系统分析了当前新型探测技术应用存在的问题和需要突破的关键技术,并建议从基础器件研发、信息处理和目标特性研究等方面着力,通过基础技术和应用技术的联合攻关,推进新型探测技术的制导应用取得突破。

关键词: 精确制导; 新型光电; 光学成像

中图分类号: TJ765.3 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20201015

Application research of new photoelectric detection technology on precision guided weapons(*Invited*)

Song Chuang¹, Jiang Peng¹, Duan Lei², Sun Jianfeng³, Fan Zhiguo⁴

- (1. Science and Technology on Complex System Control and Intelligent Agent Cooperation Laboratory, Beijing Electro-Mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China;
2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300300, China;
3. National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
4. Technology Key Laboratory of Knowledge Engineering with Big Data, Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: Precision guided weapon is the main weapon in modern warfare. The precision guided weapon with photoelectric guidance has the advantages of strong resolution and high accuracy. It is widely used in the fields of sea-to-sea, air defense, anti-missile, space attack and defense. As optoelectronic guided weapons play an increasingly prominent role in modern warfare, their corresponding countermeasures are also constantly developing, which makes the combat environment more complex and requires them to continuously enhance

收稿日期:2020-03-10; 修订日期:2020-04-15

作者简介:宋闯(1977-),男,研究员,博士,主要从事先进制导与控制理论研究与工程实践方面的研究。Email: easebell@sohu.com

adaptability to the increasingly complex battlefield environment. Based on the summary of the application of existing optical detection technologies such as infrared, visible light and laser semi-active in guided weapons, the shortcomings of the current technology in complex combat environments are analyzed, such as harsh natural weather, complex background and human interference. In view of the current development of multi-spectral detection, polarization imaging, laser three-dimensional imaging, quantum detection and other new technologies, the current research progress and results are introduced. It mainly includes multi-spectral multi-segment segmentation against true and false target camouflage recognition, polarization imaging against rain and fog, bad natural weather, laser three-dimensional imaging in the application of anti-complex background and penetration shielding and other research advantages and research progress. Finally, the problems in the application of the new detection technology and the key technologies that need to be broken through are systematically analyzed, and it is suggested that the guidance application of the new detection technology should be promoted through the joint attack of the basic technology and the application technology.

Key words: precision guided; new photoelectric; optical imaging

0 引言

精确制导武器是现代战争中的主战武器,在军事打击行动中的使用比重越来越大^[1-3]。光电探测制导是精确制导武器采用的主要制导方式之一,主要包括电视制导、红外成像制导、激光制导等。采用光电探测制导的精确制导武器具有分辨能力强、命中精度高的优势,在对地对海、防空反导、空间攻防等领域得到广泛应用。与此同时,光电探测制导武器所面对的自然天气、复杂背景乃至人为干扰等作战环境,对其作战效能发挥起到极大影响。随着光电探测制导武器在现代战争中的作用愈发突出,其相应的对抗手段也在不断发展,使其面临的作战环境更为复杂,需加大对光电探测技术及其应用的研究力度,使得光电探测制导系统不断增强对日趋复杂的战场环境的适应能力,发挥精确打击效能。

文中围绕光电探测技术在精确制导武器中的应用,对现有技术路线进行总结,分析当前作战所面临的环境,并对新型光电探测技术发展需求进行论述。总结了当前发展的多/高光谱探测、偏振成像、激光三维成像、量子探测等新型光电探测技术,分析其在各类作战环境中的应用优势和进展,对技术应用存在的问题和需要突破的关键技术进行了论述。

1 发展现状

当前应用于精确制导武器中的光电探测制导方式主要包括电视制导、红外成像制导、激光制导、复合制导等^[4-7],以下分别进行介绍。

(1) 电视制导

电视制导探测器面阵规模较大,系统角分辨率高,制导精度高,在精确制导武器中应用广泛,如 AGM-62 制导炸弹、幼畜空地导弹、长钉导弹等。但电视制导只能在白天或微光下使用的缺点日显突出,有逐渐被红外制导代替的趋势,但其具有成本低,体积小、图像质量好、效费比高等突出优点,在光电制导领域仍占据重要地位。

(2) 红外成像制导

红外成像制导包括中、长波制冷和长波非制冷等体制,可实现人在回路和自动识别等多种工作模式,随着器件工艺和技术水平的迅速发展,已广泛应用于对地、对海、对空末制导,以及侦察、毁伤效果评估和目标指示等领域。当前国际上采用该体制的制导武器代表有 AAWS-M 反坦克导弹、ATAM 空空弹、鱼叉 AGM-84 反舰导弹、战斧 Block4 巡航导弹、LRASM 反舰导弹等。

红外成像制导系统初代采用光机扫描成像方案,随后升级为采用扫描焦平面器件、电子自扫描焦平面(凝视)红外成像系统,当前正朝向大面阵、多光谱、偏振等技术加持的下一代先进焦平面进行发展。

(3) 激光制导

激光制导技术主要包括激光半主动制导、激光驾束制导和激光主动成像制导等。其中激光半主动、驾束制导在低成本弹药领域已大量装备。激光主动成像是当前研究发展的新一代技术,美国洛马公司和雷神公司分别通过 LOCAAS 项目和 DASSL 项目研发

了激光成像雷达导引头,并完成了飞行试验。

(4) 复合制导

近年来,以红外成像与激光、毫米波雷达复合为代表的双模和多模复合探测技术获得较大发展,增强了探测系统目标辨识、全天候作战和抗干扰能力。应用代表有电视/红外复合 SPICE 新型制导炸弹、毫米波/红外复合萨达姆 SADARM 反坦克导弹、红外/宽带微波被动雷达复合 ARMIGER 反辐射导弹、被动雷达/红外复合 RIM-116 防空导弹等。

2 发展需求分析

随着现代战争形势的变化,战术需求愈发注重打击的精准性、灵活性和智能性。在任务需求方面,往往需要进行精准打击、定点清除、斩首行动,将精确制导武器应用于山地、城区、丛林等复杂背景环境,并在此环境下对打击效果进行评估。这对光电探测制导系统提出了以下能力需求:目标分类识别、打击点选择、战场态势侦察评估、强抗干扰、自主式任务

管控等。综合分析这些需求,对于新型光电探测技术的发展路线,可归纳为提升探测维度、拓展可用特征、发展抗干扰技术和智能探测识别等。

提升探测精度与识别能力是新型探测技术发展需求之一,为了减少打击成本、提升打击效率,对目标的高精度探测和分类识别十分必要,更进一步,对目标打击点进行选择,实现精准点打击,可提升毁伤效果。在海湾战争中,美空军在距离 100 km 外向伊拉克某水电站连续发射两枚“斯拉姆”空地导弹,由前者先打洞,后者随后从该洞穿入摧毁了目标。最新研发的 LRASM 反舰导弹可在复杂环境下准确摧毁众多舰船中的特定目标,并可选择要害打击点。精准的探测识别能力是保障导弹实现精确打击的核心能力。

在实际应用当中,如图 1 所示,海面反射阳光产生的亮带,以及高温高湿、降雨、雾霾、云层遮挡和干扰等,都会对目标的精准探测和识别产生影响。为了能够全天时乃至全天候执行任务,精导武器对复杂自然天气和环境的适应性需要提高。



图 1 复杂天气与环境的影响

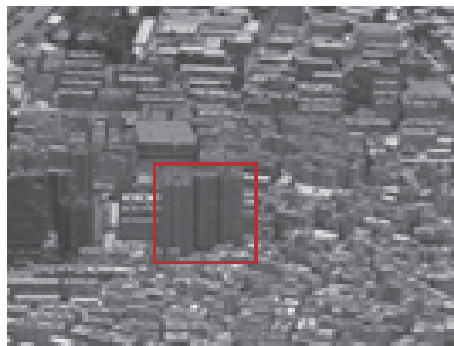
Fig.1 Influences of complex weather and environment

同时,对于复杂地形、地貌和背景,如岛岸背景、复杂城区背景等,进一步增大了光电探测制导武器的目标有效提取和识别难度,如图 2 所示。

此外,一些针对当前光电探测精确制导武器发展的对抗技术,包括烟幕烟尘、激光干扰、红外诱饵、伪装目标等,如图 3 所示,也对探测技术提出了相应的挑战。



(a) 岛岸背景
(a) Target with offshore background



(b) 复杂城区背景
(b) Target with complex urban background

图 2 复杂背景的影响

Fig.2 Influences of complex background



(a) 烟幕烟尘
(a) Smoke pall



(b) 激光干扰
(b) Laser beam disturb



(c) 红外诱饵
(c) Infrared bait



(d) 伪装目标
(d) Camouflage target

图 3 人为干扰

Fig.3 Influences of man-made factors

3 技术进展及应用前景

下面对当前新兴发展的多/高光谱探测技术、偏

振成像技术、激光三维成像技术、光量子雷达探测技术,以及相关复合探测技术和智能探测识别技术分别进行论述。

(1) 多/高光谱探测技术

物体光谱可反映其材料的内在特性,对于可见光、红外成像,不同谱段的反射/辐射强度存在差异,利用物体的光谱身份特征属性,可实现目标与背景、干扰以及各种目标间的区分,提升抗干扰能力。传统红外成像是宽谱段内辐射强度的累积成像,在一些光谱上本来可以区分的两个目标,因为累积成像变得特征差异不明显,难以区分。多/高光谱成像可以在谱段内对光谱进行细分,将信息维度从空间维的辐射强度特性拓展至“空间维+光谱维”,从而增强目标与背

景、干扰的可区分性,提升抗干扰和识别能力。多光谱成像的光谱分辨一般为 3 到 10 个谱段,高光谱的分辨能力更强可以达到数百个谱段,超光谱则可达到 1 000 个以上谱段。通过多光谱探测进行谱段细分,能够获得不同的目标特征对比度,增强目标与背景环境、干扰的可区分性。

图 4 中将传统中波谱段红外成像(图 4(a))分为前后两个谱段,3.4~4.1 μm 的图像(图 4(b))和 4.2~5.0 μm 的图像(图 4(c)),可以看出:不同谱段的明显差异。而图 4(d)~(f) 则分别显示了在某些特定光谱上的成像差异。

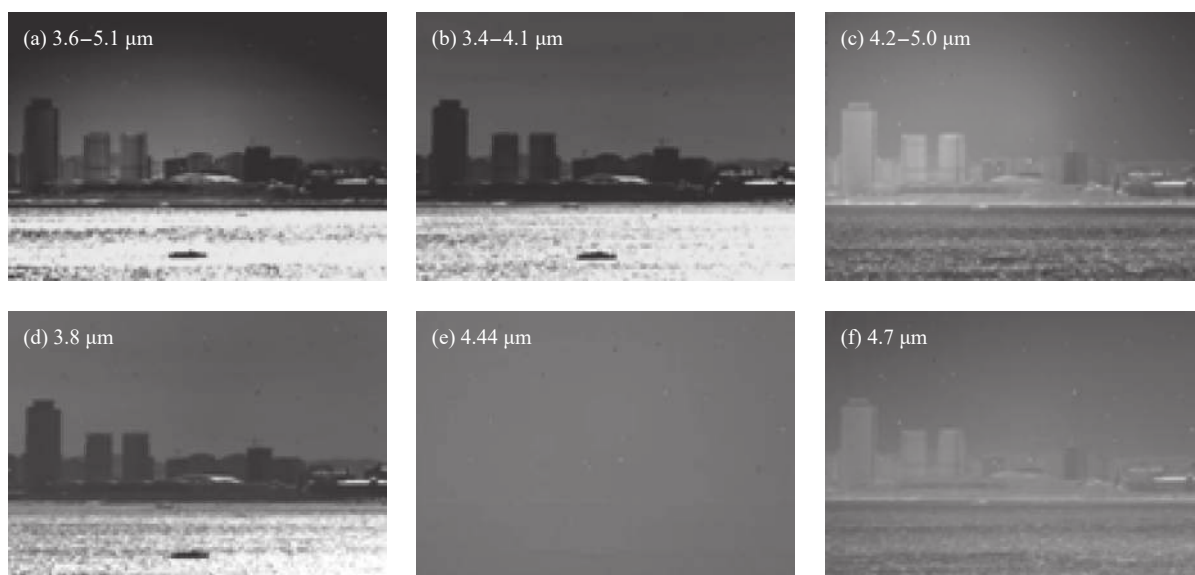


图 4 不同谱段成像结果

Fig.4 Imaging result of different spectrums

多/高光谱探测中的关键技术是自适应谱段选择和光谱特征大气传输校正。前者实现系统自主的谱段选择,以利用最佳的探测谱段,实现目标与背景、干扰的区分,该技术的研究需要以大量的光谱特性研究基础作为支撑。在多/高光谱探测中,目标是否可正确识别,需要找到目标的本征光谱特征,但由于大气传输,目标光谱特征发生退化,并且与背景变化程度有差异,如何还原出目标光谱特征以实现准确识别,需要研究大气传输特性及校正方法。

(2) 偏振成像技术

偏振成像技术利用不同偏振态下的目标图像,一方面增强了目标的区分能力,另一方面,通过对大气、目标等偏振状态的解算和复原,可以实现一定的穿透雾霾、雨雪、烟幕的能力,提升光学探测性能。

相较于常规成像对二维空间光振幅及波长(光谱)两维度的敏感,偏振成像在此基础上加入偏振维度,可以获取偏振度、偏振角等信息,提升了探测信息的维度。自然环境与人造物体的偏振特性差异明显:自然环境的地物背景偏振度一般小于 1.5%,而如坦克飞机类人造目标偏振度一般达到 2%~7%,因而,偏振成像可以将复杂自然景物背景与军事目标区分,对于光电制导武器实现复杂背景下作战具有重要应用价值。

此外,通过大气偏振成像特性可以获取大气退偏模型,国内合肥工业大学等单位已经开发了有效算法^[8],可通过偏振成像结合大气偏振模型估计算法,一定程度上去除大气影响,增强光电成像透雾透雨能力,提升图像信息对比度。

偏振测量原理包括时分法、空分法等方法,不同

方法有各自优势劣势。时分法各个偏振方向无法同时成像,不利于动平台应用。而空分法的好处是可以同时成像,从高速动平台应用角度考虑,宜采用分振幅、分焦平面等空分法。

偏振成像所获取的偏振度可以反映物体表面粗糙度、材料特性,偏振角反映空间信息。圆偏振光则在雾中、水中传输时具有优良的保偏性和持久性,为

解决雾的影响、水下远距离传输提供了一种途径。通过传输路径的偏振特性建模和处理,也可提升对恶劣气象环境的适应能力。图 5(a)~(c) 依次为偏振方向 0° 、 60° 、 120° 获取的图像,图 5(d) 为结合三个偏振方向图像以及偏振度、偏振角等信息,利用大气偏振模型去除雾的影响,解算得到的去雾图像。可以看出:采用偏振成像技术显著增强了雾天成像能力。

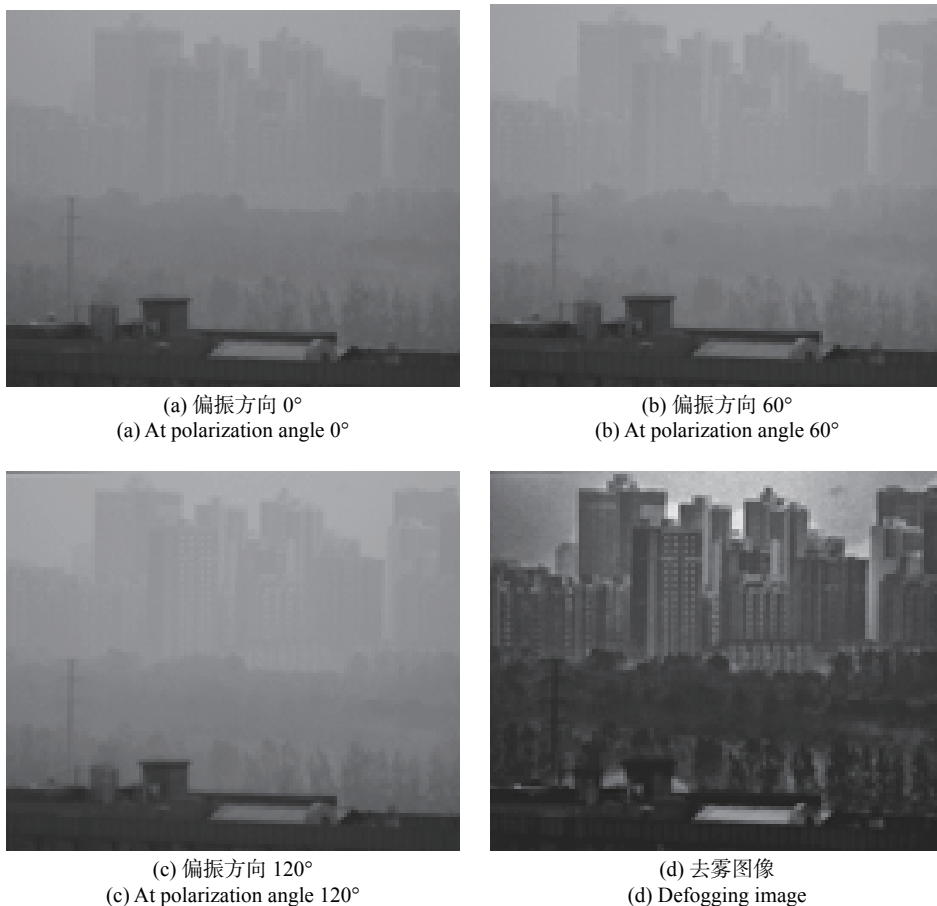


图 5 偏振探测去雾效果

Fig.5 Defogging result with polarization detection

在精确制导领域应用偏振成像技术,目标偏振特性的获取、恶劣大气模型的建立和去雾增强方法的设计都是其关键技术。

(3) 激光三维成像技术

激光三维成像利用平台上的激光器主动发射激光照射目标,平台上接收机接收目标散射回波,通过光的飞行时间高精度计时,可以对目标测距。利用面阵探测器就可以获得阵列测距信息,并且信息中包含目标反射强度信息,因此,利用激光三维成像可以同时获取二维空间、目标距离和反射强度,即三维空间

上目标强度图像。

该技术应用于制导武器中具有以下优势:一方面,激光成像反映了目标三维轮廓和表面材料反射率信息,不易受光照、温度等影响,很好地解决红外辐射弱、昼夜反转、时段影响、光照阴影影响、目标与背景辐射温差低导致对比度差等问题,也能够解决电视成像无法夜间工作的问题;另一方面,激光发射光谱很窄,可达纳米以下,其他谱段对其探测无影响,如果不知道激光谱段,难以形成干扰。同时,激光可通过距离选通,抑制复杂背景干扰、不同距离上的重复模

式影响,容易实现目标的分割提取。激光具有的穿透稀疏物质能力,可以穿透伪装网和叶簇成像,发现隐蔽目标。这些优势使激光成像具有较强的抗干扰能力;再有,激光成像获取的是三维信息,更容易获取目标的实际大小、形状、姿态,从而为精确制导武器进行目标分类辨识和打击点选择提供更大的能力提升

空间。

针对叶簇遮蔽下的隐蔽目标,通过三维像的地面曲面拟合,可以消除地面的影响,同时也可通过高程先验知识,对数据继续滤波,滤除如高于目标的树冠、树叶等背景,可解决丛林背景下目标检测问题,过程如图 6 所示。

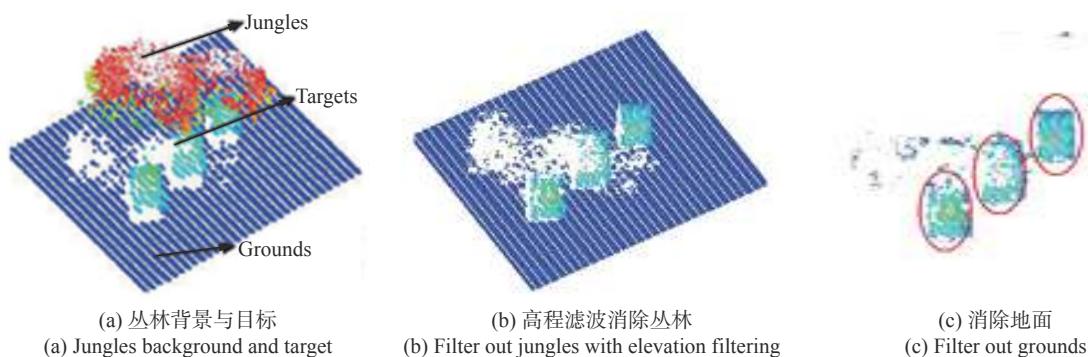


图 6 丛林背景下的目标探测

Fig.6 Target detection under jungles background

同时,在复杂城区背景环境下进行目标分割,也是该技术的一大优势。激光成像可利用距离像信息,将其转换为水平投影图,并通过距离聚类获取不同的

平面,实现简单的目标分割。此外,还可以通过距离选通门的改变,使复杂场景图像得到简化,从而分割出不同距离处的目标,过程如图 7 所示。

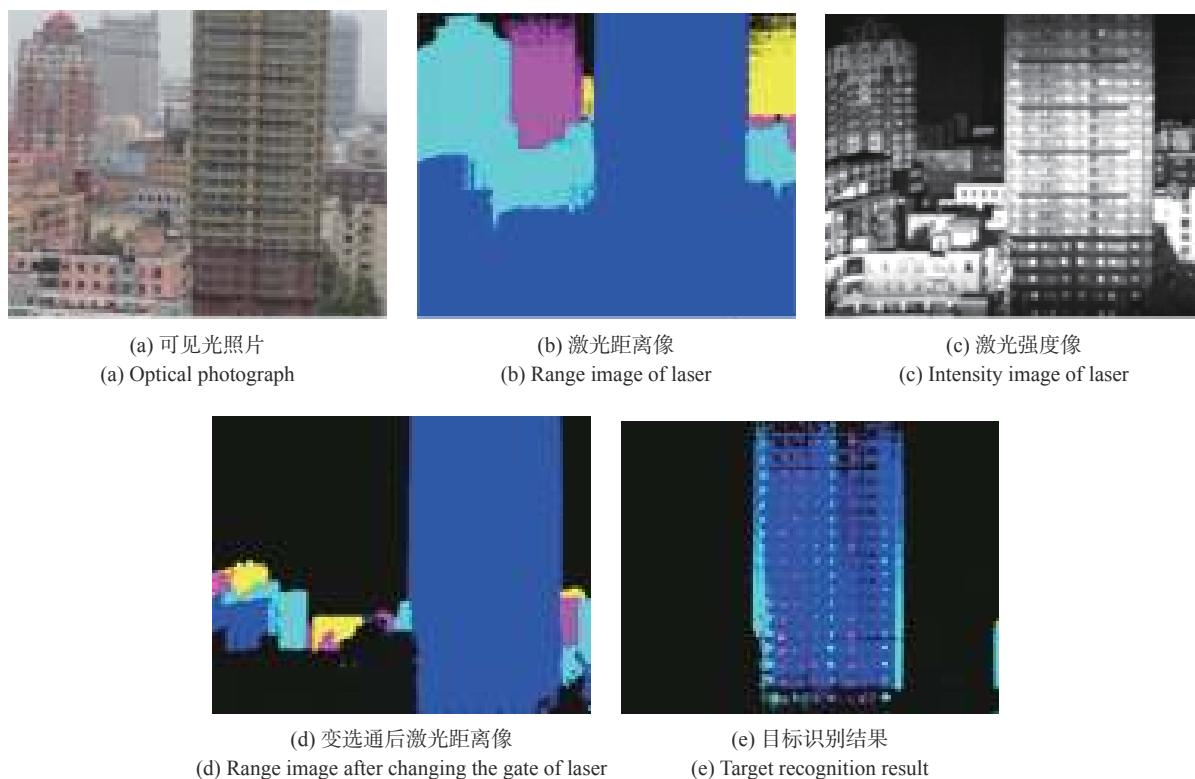


图 7 复杂城区背景下的目标探测

Fig.7 Target detection in complex urban background

激光三维成像制导当前亟需发展的关键技术,一是激光焦平面的工艺提升,发展 256×256 更大像素规模的焦平面器件。另一方面,需要发展三维图像处理 and 识别技术,三维信息的利用,以及实现更高级的目标分类识别,是当前仍未很好解决的问题。

(4) 光量子雷达探测技术

光量子雷达探测技术应用光子的量子关联特性,受障碍物、烟尘雾霾、大气湍流等环境因素影响较小,具有超高灵敏度,成像分辨率可突破衍射分辨率极限、抗干扰能力大幅增强、获取信息能力更加精准与反隐身能力提升等特点,在军事领域具有巨大的潜在应用价值。

光量子雷达基于光场的量子特性,利用双光子之间存在的量子关联现象实现目标探测。系统工作时,光子分为两路,其中一路经过目标,另一路没有通过目标的光子也有目标的信息,通过两光子关联符合检测可以得到目标的信息。目前的量子探测系统主要包括非纠缠态的量子关联雷达、纠缠态光子量子雷达等。

光子的量子特性可用隐身目标探测。2012年,美国罗切斯特大学光学研究所研发了一种抗干扰的量子雷达^[9],利用偏振光子的量子特性对目标探测和成像,并且由于任何物体在收到光子信号后都会改变其量子特性,这种雷达可探测隐身飞机。该方案借鉴了量子保密通信的绝对安全性原理,如果一架隐身飞机试图拦截这些光子,并以某种方式重新发送虚假信号以伪装自己形状或伪装自己的方位,雷达回波可能仅相当于一只鸟的面积,但量子雷达在这一欺骗过程中可发现对方的干扰行为,并可确定目标飞机的踪迹。

光量子雷达探测技术还处于发展阶段,距离工程应用仍有较大差距,特别是产生纠缠光子的激光光源技术仍是当前的难点,实现稳定的、真正的量子探测和成像还需要突破。2008年,美国洛克希德·马丁公司申请了量子雷达专利,他们利用纠缠态光子测量方案,既可以保证光量子信号在空间中的传播距离,又可以提高探测的分辨率,宣称可以同时测量目标的“位置、速度、运行轨迹、距离、图像、大小、面积、体积、维度、RCS、表面粗糙度和表面材料”,而且可以

“穿透任何障碍”。洛克·马丁公司的专利在申请后的若干年,都没有后续的跟踪报道,主要原因是纠缠光子波形发生器以及超导单光子探测器等关键器件尚未有大的突破性进展。

(5) 复合探测技术

以红外和其它模式复合为推动,如红外/毫米波复合、红外/激光复合、红外/雷达复合、红外/毫米波/激光三模复合等体制,是当前光电探测技术应用领域的重点发展方向之一^[10]。

红外/毫米波复合制导方式比其他多模制导方式具有更好的抗干扰性能,是目前公认的最有前途的复合制导技术之一。通过毫米波和红外复合,可使系统具有目标成像和高分辨能力,并提升全天候和对烟、雾的良好穿透性能。该方向的关键技术是实现紧凑、小型的复合集能设计。

激光三维成像与红外成像双模复合,结合了激光成像、距离选通和红外高分辨、大视场成像能力优势,提升了信息获取维度,可在复杂地物背景、岛岸背景、红外弱特征、阴影遮挡、昼夜反转等条件下实施目标精确打击,并提升目标识别和命中点选择能力,图 8 为一组激光红外复合成像结果。

复合探测的关键技术为光学特征及数据信息的融合技术,以及系统共孔径紧凑集成小型化设计技术。

(6) 智能探测与识别技术

发展智能光电探测与识别技术,包括宽谱/多维光学智能感知与运用、基于人工智能方法的目标图像分类、云层和烟幕识别抗干扰等技术,可从智能化信息获取、智能化信息融合和智能化识别跟踪三个方面,增加对干扰的辨识能力^[11-12]。

智能光电探测重在研究先进可重构的光电传感器,如传统的复合型传感器、高度集成的宽光谱可重构传感器,以及当前正在发展中的光谱和偏振共用的集成型微阵列传感器等,通过环境认知自主改变工作状态,实现探测模式的重构,进而增强对战场环境变化的适应能力。同时,发展智能光电探测信息处理技术,如利用神经网络、基于人工智能深度学习等自动目标识别方法,可提升光电探测系统的智能化水平,提升抗干扰和自主选择能力。小样本条件下的数据增广和机器学习是该领域的重要关键技术。

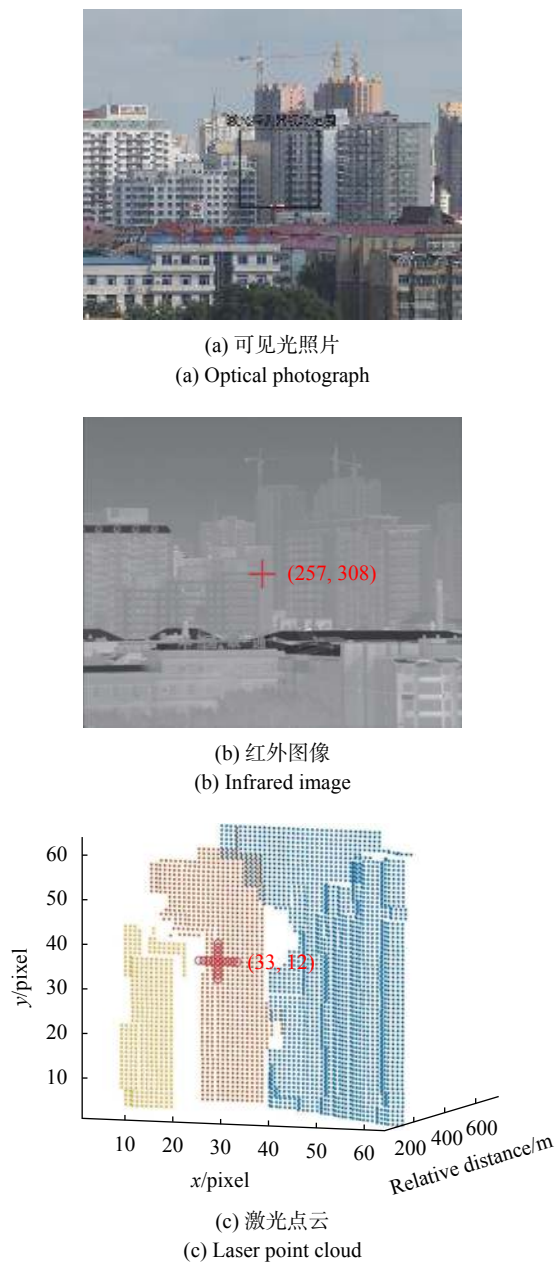


图 8 激光红外复合成像结果

Fig.8 Composite results of laser and infrared camera

4 结论

新型光电探测技术研究已取得多项重要进展,但在精确制导武器中应用还面临一些关键问题:如先进探测器等核心基础器件的支撑能力、目标光谱段/偏振方向等特性选择基础能力、小样本条件下人工智能技术应用的有效性等。

未来战争中,精确制导武器所面临的战场环境将越来越复杂,光电探测技术在复杂环境适应能力、多功能、智能化、高效费比等方面面临极大挑战,迫切

需要我们寻找新的制胜机理、发展新型探测技术,解决当前应用中的瓶颈问题,谋求光电精确制导武器的跨代发展。

参考文献:

- [1] Luo Chenggao, Deng Bin, Cheng Yongqiang, et al. Advanced imaging and detecting technology for precision guidance [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2019, 41(5): 174-184. (in Chinese)
罗成高, 邓彬, 程永强, 等. 精确制导前沿成像探测技术[J]. *国防科技大学学报*, 2019, 41(5): 174-184.
- [2] Shen Yuheng, Liu Xin, Zhang Di. Status and development trends of precision guidance technology for air-defense missile [J]. *Aerospace Control*, 2019, 37(3): 67-72. (in Chinese)
沈昱恒, 刘鑫, 张迪. 防空导弹精确制导技术发展的几点思考[J]. *航天控制*, 2019, 37(3): 67-72.
- [3] Cheng Jin, Lu Hao, Song Chuang. Research on the development of swarm operation technology for Precision-Strike Weapons [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2019, 6(5): 10-17. (in Chinese)
程进, 卢昊, 宋闯. 精确打击武器集群作战技术发展研究[J]. *导航定位与授时*, 2019, 6(5): 10-17.
- [4] Keller J. Raytheon to upgrade TV-guided Maverick air-to-ground missiles with laser guidance [J]. *Military & Aerospace Electronics*, 2014, 25(10): 31.
- [5] Adamy D. IR guided missile threats [J]. *Journal of Electronic Defense*, 2013, 36(1): 40-41.
- [6] Stary V, Krivanek V, Stefek A. Optical detection methods for laser guided unmanned devices [J]. *Journal of Communications and Networks*, 2018, 20(5): 464-472.
- [7] Mouada T, Pavic M V, Zivkovic S Z, et al. Application of optimal control law to laser guided bomb [J]. *Aeronautical Journal*, 2018, 122(1251): 785-797.
- [8] Zhang Qiang, Gao Jun, Fan Zhiguo, et al. Fog image reconstruction using target and atmospheric polarization information [J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(5): 829-837. (in Chinese)
张强, 高隽, 范之国, 等. 利用目标和大气偏振信息的雾天图像重构方法[J]. *应用光学*, 2019, 40(5): 829-837.
- [9] Malik M, Magana-Loaiza O S, Boyd R W. Quantum-secured imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(24): 1-4.
- [10] Zuo Wei, Zhou Bohua, Li Wenzhu. Analysis of development of multi-mode and compound precision guidance technology [J]. *Air & Space Defense*, 2019, 2(3): 44-52. (in Chinese)

- 左卫, 周波华, 李文柱. 多模及复合精确制导技术的研究进展与发展分析[J]. *空天防御*, 2019, 2(3): 44–52.
- [11] Fan Jinxiang, Liu Jia. Challenges and thinking for the precision guidance ATR intelligentization [J]. *Aero Weaponry*, 2019, 26(1): 30–38. (in Chinese)
- 范晋祥, 刘嘉. 精确制导自动目标识别智能化的挑战与思考[J]. *航空兵器*, 2019, 26(1): 30–38.
- [12] Cheng Jin, Qi Hang, Yuan Jianquan, et al. Discussion on the development of intelligent missile technology [J]. *Aero Weaponry*, 2019, 26(1): 20–24. (in Chinese)
- 程进, 齐航, 袁健全, 等. 关于导弹武器智能化发展的思考[J]. *航空兵器*, 2019, 26(1): 20–24.