

大气条件下距离选通激光主动成像技术发展现状

郭惠超¹ 孙华燕² 范有臣¹

(¹ 装备学院研究生管理大队, 北京 101416)
(² 装备学院光电装备系, 北京 101416)

摘要 距离选通激光主动成像技术兼具作用距离远、不依赖环境光照、可抑制大气后向散射、可进行三维成像等优势,是目前国内外研究的热点。介绍了距离选通激光主动成像技术的原理,分析了国内外将该技术用于大气条件下远距离成像监视和三维成像的典型系统、技术特点和应用等方面具有代表性的研究成果,并对该技术的发展趋势进行了展望。

关键词 成像系统;距离选通;激光成像;主动照明;三维成像

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.100004

Development Status of Range-Gated Laser Active Imaging Technology Under Atmospheric Condition

Guo Huichao¹ Sun Huayan² Fan Youchen¹

(¹ Department of Postgraduate Management, the Academy of Equipment, Beijing 101416, China)
(² Department of Optical and Electrical Equipment, the Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract The range-gated laser active imaging technology is a research focus because it has many advantages such as long range, independent of environment illumination, suppressing the backscattering, and capable of three-dimensional (3D) imaging. We introduce the principle of the gated-viewing technology, and analyze the representative researches in China and abroad on application the technology of long-range surveillance and 3D imaging, including typical systems, technical characteristics and application status. Finally, several future research trends of the range-gated viewing technology are given.

Key words imaging systems; range gating; laser imaging; active illumination; three-dimensional imaging

OCIS codes 110.2970; 110.1080; 280.3640

1 引言

基于距离选通的激光主动成像技术(GVT)是目前国内外研究的热点。GVT在20世纪90年代兴起于国外,其应用研究已日臻成熟,已经有型号产品或装备出售,国内的研究也于近几年陆续展开,多家单位相继推出了样机系统。目前GVT主要应用于夜间远距离监视、近距离夜视成像、隐蔽目标探测、水下探雷、三维(3D)成像等领域,具有非常广阔的应用前景。本文对GVT的技术发展状况和大气条件下的GVT发展成果进行总结。

2 原理简介

GVT原理如图1所示。距离选通激光主动成像系统(GVS)利用高峰值功率的脉冲激光器瞬间照射目标,同时利用高精度门控电路延时触发窄快门面阵成像探测器(一般为像增强型CCD,即ICCD)接收目标反

收稿日期: 2013-04-05; **收到修改稿日期**: 2013-06-15; **网络出版日期**: 2013-08-26

作者简介: 郭惠超(1983—),男,博士研究生,主要从事激光主动照明成像技术方面的研究。

E-mail: gyxthinking@sina.cn

导师简介: 孙华燕(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事激光主动探测技术方面的研究。

E-mail: shy221528@vip.sina.com

射光并成像,由于在激光往返目标过程中探测器快门关闭,可以有效地抑制背景噪声和杂波干扰,因而能显著提高对小、暗、远目标的成像识别能力^[1-2]。另外,由于所得图像对应了一定的距离切片,可以通过图像处理获得目标的三维信息^[3],并具有距离远、分辨率高的优点。

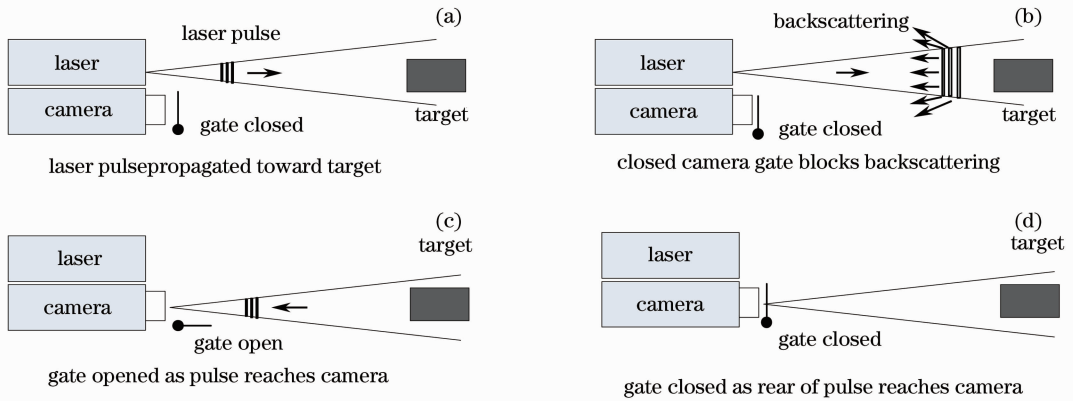


图1 激光主动照明距离选通成像系统工作原理示意图

Fig. 1 Principle of laser illuminating range-gated imaging system

GVS在实际构成上不尽相同,照明光源多种多样,主要有532 nm波长YAG激光器、人眼安全的1.57 μm 激光器和半导体阵列激光器,在近距离应用时有的系统还采用脉冲式LED阵列;成像器件也不尽相同,主要有超二代ICCD、三代ICCD、电子轰击(EBCCD)等;其门控电路的控制精度也不同,并根据应用场合选用不同的同步时序控制方法。随着技术的发展,传统GVT系统在不断改进,比如采用多接收孔径成像以提高分辨率,增加激光旋光模块并进行多帧累积提高成像清晰度,增加偏振模块实现偏振主动成像以提高特定目标识别能力,采用两套探测器并对其中一个ICCD的增益进行线性调制以实现三维成像等。通过观察这些系统并结合GVT原理,可以归纳出GVS的四个基本特征:采用脉冲光泛光照明;采用窄快门面阵成像器件;由门控电路实现高精度延时控制;所得图像对应一定的距离切片。本文正是以此为依据来界定GVS并主要针对大气条件下GVT的研究情况加以综述的。

3 国外技术发展现状

3.1 美国

早在1996年,美军就开展了采用GVS进行靶场导弹跟踪成像测量的研究^[4],将高能激光武器配备的“海石”光束定向器加以改造,加装激光器、主动跟踪摄像机和视频处理器后用于主动跟踪助推段黑雁导弹。使用波长为755 nm的绿宝石激光器,单脉冲能量为0.4 J,脉冲宽度为100 μs ,重复频率为60 Hz;该系统选用的探测器为第二代ICCD,选通门宽为7 μs ,最远成像距离达49 km。美军在2000年左右设计研发了采用EBCCD作为成像器件、1.5 μm 波长激光作为照明光源的短波红外距离选通激光主动成像系统^[5],美国夜视

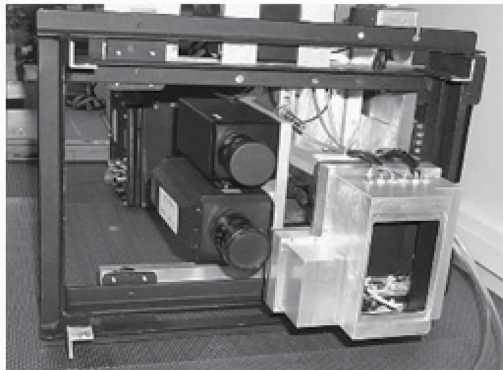


图2 ALRT激光主动成像样机

Fig. 2 ALRT laser active imaging prototype

与电子传感器管理局对其性能评价方法进行了深入研究,建立了考虑激光散斑^[6-7]、光束闪烁^[8]等多种因素影响的激光主动成像系统目标识别性能模型。美国巴拿马城海军水面站中心空基沿海侦查项目(ALRT)采用主动成像技术探测雷区^[9],其样机系统如图2所示。照明装置经历了三个原型样机阶段,ALDAI-P,ALDAI-C,ALDAI-W,条堆式激光二极管阵列输出光由微柱形镜准直后光束发散角为 $8^\circ \times 8^\circ$,峰值功率4000 W,脉冲宽度200 μs ,探测器为采用第三代像增强器的Xybion ISG-750 ICCD。各型号样机飞行实验表明,ALDAI-P可在1200 m的高空成像。该系统的照明系统设计可设计为多个波长激光照明器组束方式输出,可提高光照均匀性并有效抑制激光散斑对成像的影响。

美国INTEVAC公司致力于夜视成像器件的研究,从20世纪90年代初开始研制InGaAs选通型EBCCD相机,EBCCD具有高增益和低噪声的特点,被视为低照度成像的理想器件。目前该公司采用EBCCD作为成像器件的GVS已经开始在北约盟国侦察系统中应用^[10]。该公司生产了一系列的主动成像系统,比如LIVAR M500,LIVAR4000(图3)。其中LIVAR4000型便携式短波红外激光主动侦察系统,照明激光采用脉冲人眼安全1.57 μm 激光器,距离选通相机选通门宽最小可达150 ns。在实验中该公司采用200 mm口径接收系统获取了28 km远处目标主动成像的图像。该系统具有良好的便携性和人眼安全性,可明显提高美军夜视侦查能力。

美国BAE SYSTEM公司(现为SELEX S&AS子分公司)研发了一款低成本主动成像系统(LCTS)^[11],如图4所示。该系统集激光照明成像、激光测距、全球定位系统(GPS)定位于一体,其特点是可实现对运动目标的自动跟踪、定位和识别。其探测器采用INTEVAC公司的EPABS相机,采用1.5 μm 波长激光,3 km内选通深度为4 m。



图3 INTERVAC LIVAR4000 1.57 μm 红外激光
主动成像系统

Fig. 3 INTERVAC LIVAR4000 1.57 μm laser active
imaging system



图4 LCTS主动成像系统

Fig. 4 LCTS laser active imaging system

3.2 加拿大

在加拿大国防研究院以及国家救援和搜寻组织的支持下,加拿大在20世纪末已成功开发出两代机载GVS——ALBEDOS和ELVISS^[12-13]。加拿大OBZERV技术公司针对海上防御海盗的需求,先后设计制造了其舰载激光主动成像设备ATV-500、ATV-2000i、ARGC-750和ARGC-2400^[14],如图5(a)所示。后两个系统采用860 nm/808 nm半导体阵列激光器及选通型第三代ICCD。其中ARGC-2400成像距离最远,对车辆和人的识别距离分别达15 km和8 km。其照明光源的设计非常先进,是由OBZERV委托加拿大国防研究院设计的阵列式激光源,他们创新性地提出了一种用多模且均匀的激光源对目标进行照明的方法,并在大功率输出的情况下把对人眼的伤害降到最小。图5(b)为利用ARGC-2400对距离约8 km的空中飞行目标主动成像的结果^[15]。

3.3 俄罗斯

俄罗斯TURN LLC公司研发了基于距离选通的Lynx系列门控相机,该公司产品由瑞典Laseroptronix公司代理推广^[16]。Lynx系列主动相机有用于战场的手持式门控相机[MiniLynx,图6(a)]、用于安全监控的小型门控相机(NordLynx)、用于海边或海面预警的门控相机[SeaLynx,图6(b)]和 underwater 成像门控相机

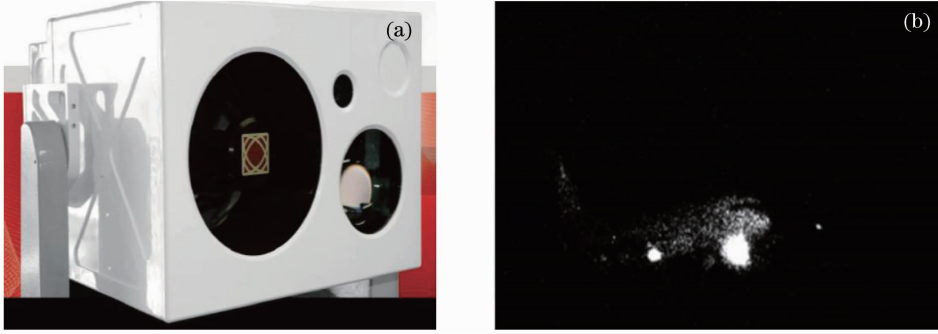


图 5 ARGC-2400 激光主动成像系统及其实验图像。(a) ARGC-2400; (b) 对飞机成像结果

Fig. 5 ARGC-2400 laser active imaging system and the imaging result. (a) ARGC-2400; (b) laser image of plane

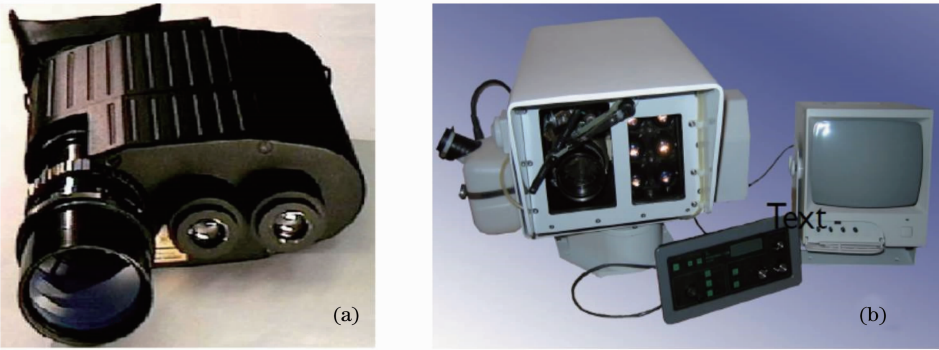


图 6 俄罗斯生产的 Lynx 系列门控相机。(a) MiniLynx 型; (b) SeaLynx 型

Fig. 6 Lynx series gated cameras made in Russia. (a) MiniLynx; (b) SeaLynx

(SubSeaLynx)^[17], 分别对应的作用距离为 35~500 m, 35~350 m, 35~1500 m 和 35~1500 m。这里仅就 SeaLynx 相机加以介绍。SeaLynx 相机使用近红外波段 810~870 nm 波长激光, 平均功率为 1200 mW, 在脉冲宽度为 60 ns 时激光峰值功率为 1500 W。它采用的 ICCD 相机配备第二代像增强器, 光阴极直径 25 mm, 亮度增益为 35000 cd/(m²·lx), 系统选通距离范围为 40~1000 m, 对于反射率较高的目标作用距离可达 1500 m, 距离分辨率为 1~2 m。

3.4 瑞典

瑞典国防研究中心(FOI)是最早开展激光主动照明距离选通成像技术研究的机构之一, 他们开发了两套实验用距离选通激光主动成像系统^[18], 如图 7 所示, 采用了 2000 mm 和 500 mm 两种焦距的接收镜头, 2000 mm 镜头对 10 km 远的目标分辨率可达 15 cm, 传感器采用 INTEVAC 公司生产的 EBCCD, 像素尺寸为 12 μm×12 μm, 光谱响应范围为 950~1650 nm, 选通门最小可达 150 ns, 上升和下降时间都为 75 ns。



图 7 FOI 距离选通成像系统

Fig. 7 FOI range-gated viewing system

FOI 开展了广泛的理论和应用研究,Steinvall 等^[18-19]系统介绍了 FOI 在 GVT 研究中的成果,主要包括其系统设计、隐蔽目标成像探测、透雾透火焰成像、运动目标成像、三维成像及其目标识别^[20]、系统性能评价等研究工作,创新性地提出了采用可读性作为激光图像质量评价的方法。图 8 给出了 FOI 进行距离选通三维成像的结果,其中图 8(a)、(b)、(c)为约 7.2 km 远汽车不同部位的选通切片图像,图 8(d)为经处理后得到的目标三维图像,其横向距离分辨率达 0.2 m/pixel。其三维成像方法是基于序列距离切片图像进行目标距离信息计算的原理。

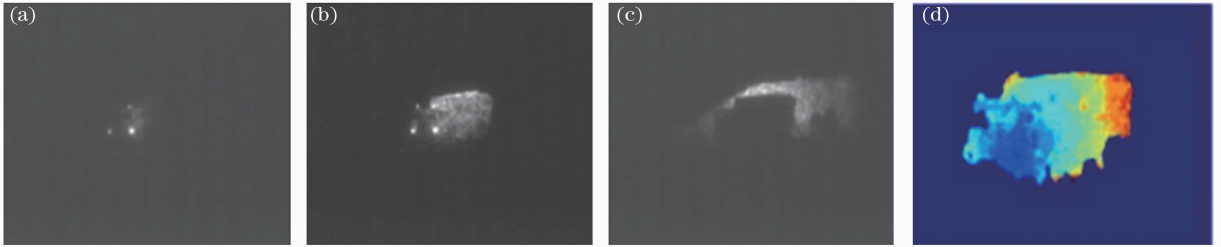


图 8 距离 7.2 km 处的车辆激光图像及三维成像结果。(a)~(c)不同距离切片图像;(d)多帧处理后三维图像

Fig. 8 Laser images and 3D image of a truck 7.2 km away. (a)~(c) Laser images of different "slices"; (d) 3D image after multi-frame processing

3.5 英国

英国 SELEX S&AS 公司研制了闪光照明激光雷达(BIL)^[21],如图 9 所示,系统采用 Nd:YAG 激光器,经光学参量振荡器(OPO)转换后波长为 1571 nm,脉宽 20 ns,重复频率为 15 Hz;采用的探测器为 320 pixel × 256 pixel HgCdTe 光电二极管阵列,提供的增益大于 100,采用的固体焦平面阵列技术提供了很高的空间频率,能够在适度的照明功率下对 10 km 远的目标成明亮的图像。距离选通相机的距离分辨率为 9 m,相机灵敏度可达 10 个光子。该公司进行了机载条件远距离目标成像实验和隐藏于森林中的隐蔽目标成像探测实验。

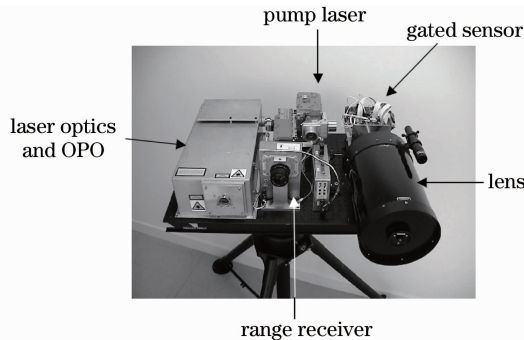


图 9 SELEX S&AS 公司研制的闪光照明成像系统

Fig. 9 Burst illumination lidar developed by SELEX S&AS

3.6 丹麦

丹麦国防研究局进行了 GVS 用于高精度三维成像技术的研究。该三维成像原理是在对目标成像时获取不同延迟时间的多帧切片图像,切片图像中各目标点灰度值为由小到大再到小的序列值,通过该序列值的加权平均计算目标点延迟时间,从而获得目标点的距离值^[22],这种方法也称为门控切片技术或时间切片技术。他们在 2004 年搭建的实验系统包括一个被动调 Q 的 YAG 激光器,其工作波长为 532 nm,输出频率为 32.4 kHz,单脉冲能量为 4.3 μJ,脉宽为 500 ps,采用的 ICCD 最小快门步进为 100 ps,延时时间步进为 100 ps,GVS 成像距离为 500 m,在距离为 10 m 时三维成像距离精度小于 1 mm,100 m 时距离精度为 1 cm。图 10 是其获得的 13.5 m 距离处 25 cm 高的玩偶三维图像。2006 年,他们又将系统延时最小步进改进为 20 ps,这样获得的距离精度在 100 m 处约为 5 mm^[23]。他们的研究成果是目前 GVS 三维成像研究实现的最高距离精度。

3.7 法国

法国的法德圣路易斯研究所(ISL)开展了激光主动成像系统应用于导弹导引头的研究^[24]。其开发的主

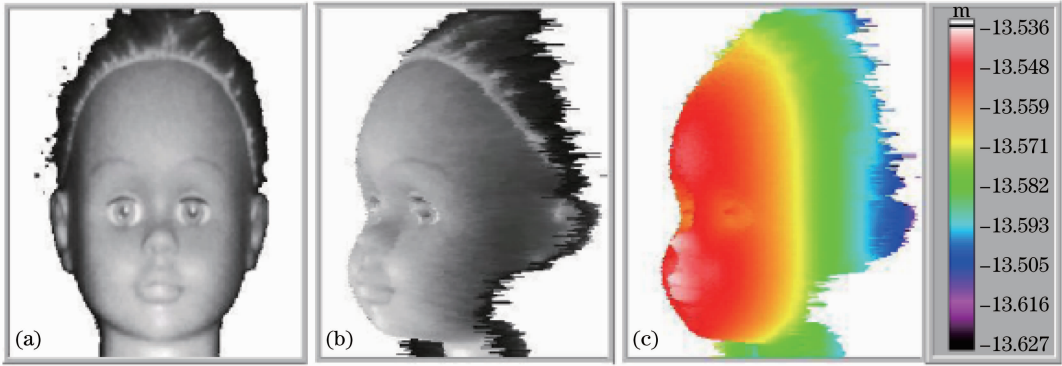


图 10 丹麦国防研究局三维激光主动成像结果

Fig. 10 3D imaging results of Danish Defense Research Establishment

动成像导引头原型样机如图 11 所示,成像器件选用超二代 ICCD,照明光源采用 800 nm 近红外半导体激光器,激光输出经光纤传输后由耦合在光纤端面的准直光学系统将光束发散角压缩为 10° ,导引头设计作用距离为 1 km,在导弹与目标距离小于等于 1 km 时开始工作。

该研究所 Monnin 等^[25]于 2006 年提出一种超分辨率距离精度的激光主动三维成像方法。该方法利用高质量矩形光脉冲和门选通,可获得梯形距离和光强关系,利用梯形的平顶区可以获得目标的反射率信息,然后利用梯形的斜坡就可以获得目标距离,从而只需要 2 幅图像即可得到三维图像,与传统的多帧图像处理相比速度显著提高。其实验系统中探测器为 ICCD 相机,激光器为 808 nm 半导体激光器,峰值功率 1000 W。图 12 为其获得的 500~2000 m 景深的三维场景图像,距离分辨率达 10 m。该技术为解决大视场大景深三维主动面阵成像问题提供了有效途径。2009 年,该所 Laurenzis 等^[26]又将原系统激光器升级为 $1.5 \mu\text{m}$ 人眼安全激光器,成像器件改为电子轰击 CMOS(EBCMOS)相机,并对激光和选通门不是严格矩形脉冲时的算法改进进行了研究。

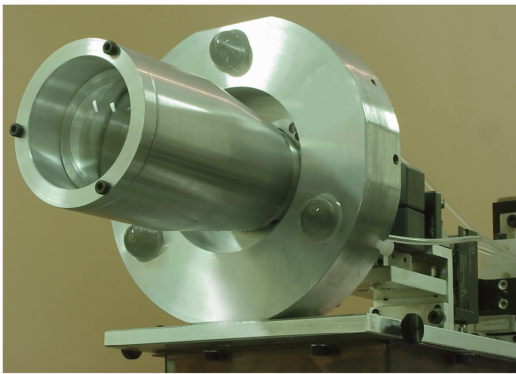


图 11 ISL 主动成像导引头原型样机

Fig. 11 Prototype of laser active imaging seeker in ISL

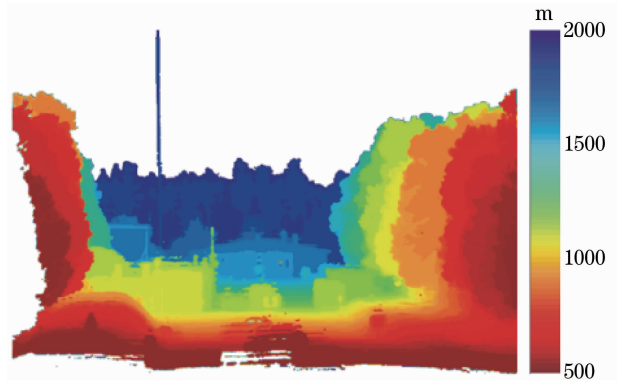


图 12 ISL 超距离分辨三维成像实验结果

Fig. 12 Super-resolution depth 3D imaging result of ISL

4 国内技术发展现状

4.1 哈尔滨工业大学

哈尔滨工业大学是国内较早开展激光主动照明成像研究的单位之一。张繁辉等^[27-28]研究了大气条件下的距离选通激光主动成像系统构建技术,获得了距离 700 m 远处楼体的夜间图像,并且分别在白天和夜晚进行了主动成像实验并对图像处理方法和成像性能进行了研究。图 13 为其获得的 700 m 距离处楼体激光图像。他们还研究了时间切片技术和增益调制技术两种三维成像方法。增益调制技术原理是首先获取探测器增益恒定情况下的目标选通图像,而后获得探测器增益线性调制情况下的选通图像,由于增益调制图像不仅包含了目标点反射率信息,而且包含了返回时间不同对应的增益也不同的信息,这样两次图像做除法使可以计算得到目标点的距离信息。他们对比了两种方法的性能,实验中 700 m 远目标三维成像距离精度为

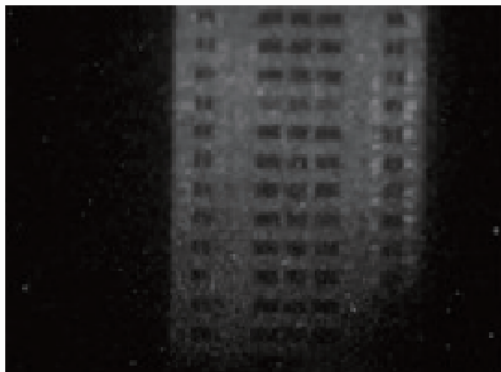


图 13 700 m 处楼房的激光主动成像实验结果

Fig. 13 Laser active imaging result of a building 700 m away

1 m,并得出了时间切片技术更适合远距离应用而增益调制技术适合近距离应用的结论。

王飞等^[29]设计了一种工作于多脉冲积累方式的小型化增益调制三维实时成像系统,采用的高重复频率小型激光器波长为 532 nm,单脉冲能量 5 μJ ,重复频率为 2.5 kHz,在能见度为 5 km 时作用距离超 100 m,这样缩小了系统体积,其室内测试的距离精度约 3 m。

4.2 浙江大学

浙江大学张秀达等^[30-31]研究了新型脉冲波形无关法激光主动三维成像技术,该方法原理与增益调制技术相似,采用两个 ICCD 接收器件作为成像探测器,可同时获得目标两种增益下的图像。他们在 600~900 m 门选通距离范围内获得了不同目标情况下距离分辨率为 1.6~13.5 m 的三维图像,图 14 所示为楼宇的三维图像。他们还提出了一种提高选通三维成像分辨率的指数增长分类法,使得成像距离精度随着图像帧数增加呈指数提高^[32]。

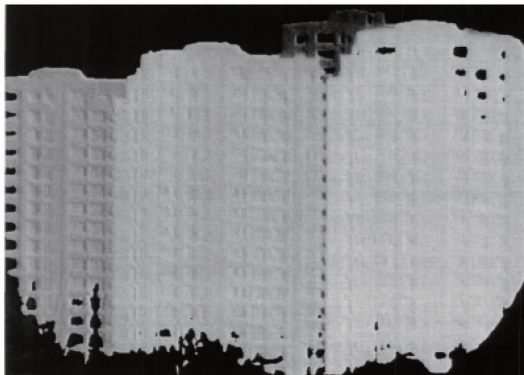


图 14 脉冲波形无关法激光三维成像实验结果

Fig. 14 3D imaging result of a building with pulse-shape-free method

4.3 装备学院

装备学院于 2006 年起开展了大气条件下的距离选通激光主动成像探测技术研究^[33],进行了 532 nm 和 860 nm 两个波长的激光主动成像系统设计与实验,获得了从距离 5 m 到约 20 km 范围目标的成像实验结果,验证了天气条件、系统参数等对成像性能的影响,在同步控制方法、半导体照明多光束并合^[34]、系统一体化设计、激光主动成像仿真^[35]和激光图像增强与目标识别技术^[36]、三维成像技术等方面均开展了研究。图 15 为其对距离 1.2 km 远凉亭进行三维成像的结果,距离精度约为 0.1 m。

4.4 昆明晨昊科技有限公司

昆明晨昊科技有限公司相继开发了多种远距离激光主动成像系统^[37],主要有水下选通成像相机以及远距离主动成像相机、距离亮度调制成像系统样机。远距离主动成像一代样机成像距离约为 1.5 km,其二代产品成像距离可达 3 km。该公司在阵列式半导体激光光源、像增强器增益调制成像技术、精度同步控制、图像后处理和系统集成等方面都达到了国内同领域较高水平。

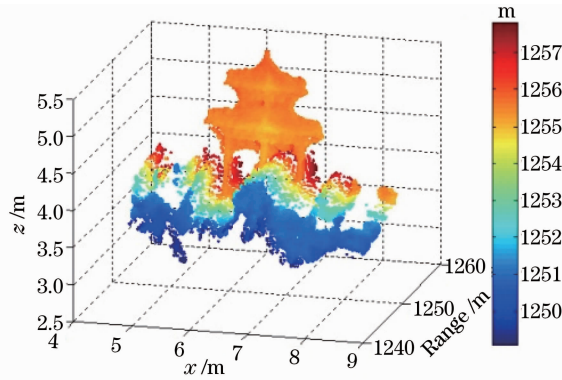


图 15 1.2 km 远处凉亭三维成像结果

Fig. 15 3D imaging result of an alcove 1.2 km away

国内中国科学院长春光学精密机械与物理研究所^[38-39]、中国科学院半导体研究所^[40-42]、国防科学技术大学^[43-44]、北京科技大学^[45]、大连海事大学^[46]、炮兵学院^[47]等多家单位都在开展大气条件下距离选通激光主动成像技术研究,还有北京理工大学^[48-49]、海军工程大学^[50]、南京理工大学^[51]、西南交通大学^[52]、燕山大学^[53]等多家单位都在开展水下成像的研究,在同步控制方法、照明光源设计、图像后处理方法、三维目标重构方法等方面取得很多成果,目前大多数单位处于理论研究和样机研发阶段。

5 结束语

从以上国内外研究机构对距离选通激光主动成像技术的研究情况来看,研究路线一般为:首先开展实验系统设计及验证研究,而后进行样机研发,最后进行性能评估方法的研究。国外研究机构依托其雄厚的制造工艺实力,在成像器件水平上具有突出优势,国内与国外还存在代差,高性能的成像器件比如 EBCCD 和第三、四代 ICCD 国内还不具备制造能力,因此国内系统总体性能较国外差距较大。目前,单纯用于远距离成像监视的应用已开始进入实用阶段,但是由于激光成像固有的散斑效应以及大气湍流对激光传输的影响使得 GVS 存在分辨率低、图像信噪比低等缺点,现阶段技术水平还有很大提升空间。

未来激光照明成像技术的发展趋势主要有:1)成像器件和激光器进一步升级,从而促进系统的小型化和可靠性提升,应用于单兵便携装备、无人机载装备等对体积功耗要求较高的场合;2)进一步提高三维主动成像的数据处理速度和精度,并扩展其应用领域,比如多弹头识别、三维地形测量、空中目标姿态识别、空间交会对接等;3)进行多光束、多波长激光照明成像技术研究,利用目标对不同波长激光反射率的差异,抑制散斑效应的影响;4)进行偏振激光照明成像探测技术研究,提高特定目标、隐蔽目标探测识别能力;5)进行复合探测技术研究,将微光成像、可见图像、红外图像进行图像融合以获得更有利于目标识别的图像;6)进行系统性能评价与预测技术的研究,为系统设计和应用提供依据;7)距离选通主动成像与其他技术相结合的研究,比如与分布式孔径成像技术、自适应光学等技术相结合的应用。

参 考 文 献

- 1 Ove Steinvall, Håkan Olsson, Göran Bolander. Gated viewing for target detection and target recognition [C]. SPIE, 1999, 3707: 432-448.
- 2 Yu Qianyang. Method of increasing the laser reconnaissance alarm range [J]. OME Information, 2001, (6): 14-18.
于前洋. 增大激光侦察告警系统作用距离的方法[J]. 光机电信息, 2001, (6): 14-18.
- 3 Pierre Andersson. Long-range three-dimensional imaging using range-gated laser radar images [J]. Opt Eng, 2006, 45(3): 034301.
- 4 Paul Merritt, Mark Kramer. Field test of active tracking of a ballistic missile in the boost phase [C]. SPIE, 1997, 3086: 2-9.
- 5 William T Cooley, Matthew L Gurnef, Patrick R Dodda. Overview of the Air Force Research Laboratory laser applications group active imaging programs [C]. SPIE, 1999, 3698: 202-209.

- 6 R Driggers, R H Vollmerhausen, N Devitt, *et al.*. Impact of speckle on laser ranged gated shortwave infrared imaging system target identification performance [J]. *Opt Eng*, 2003, 42(3): 738—746.
- 7 David Oxford, Richard L Espinola. Comparison of speckle reduction techniques on the identification of human activities in laser range-gated SWIR imaging [C]. *SPIE*, 2010, 7662: 766206.
- 8 Eddie Jacobs, Richard L Espinola. Beam scintillation effects on identification performance with active imaging systems [C]. *SPIE*, 2005, 5987: 598703.
- 9 John Holloway Jr., Frank Crosby, Danny Petee, *et al.*. Laser diode arrays for naval reconnaissance [C]. *SPIE*, 2003, 5089: 238—249.
- 10 INTEVAC. LIVAR Model 4000 Preliminary Specifications [M]. Santa Clara: INTEVAC, 2006.
- 11 Robert J Grasso, Jefferson E Odhner, John C Wikman, *et al.*. A novel low cost targeting system (LCTS) based upon a high-resolution 2D Imaging laser radar [C]. *SPIE*, 2005, 5988: 59880L.
- 12 Alan Weidemann, Georges R Fournier, L Forand, *et al.*. In harbor underwater threat detection/ identification using active imaging [C]. *SPIE*, 2005, 5780: 59—70.
- 13 Vincent Larochelle, Pierre Mathieu, Jean-Robert Simard. Two generations of Canadian active imaging systems: Albedos and Elviss [C]. *SPIE*, 1999, 3698: 229—243.
- 14 Deni Bonnier, Sylviane Lelièvre, Louis Demers. On the safe use of long-range laser active imager in the near-infrared for homeland security [C]. *SPIE*, 2006, 6206: 62060A.
- 15 <http://www.obzerv.com>.
- 16 Adam Andersson. Range Gated Viewing with Underwater Camera[D]. Linköping: Linköping University, 2005.
- 17 Laseroptronix. Range Gated Cameras [OL]. <http://www.laseroptronix.se>.
- 18 Ove Steinvall, Pierre Andersson, Magnus Elmqvist, *et al.*. Overview of range gated imaging at FOI [C]. *SPIE*, 2007, 6542: 654216.
- 19 Ove Steinvall. Laser radar work at FOI [C]. *SPIE*, 2009, 7382: 738202.
- 20 Pierre Andersson. Automatic Target Recognition from Laser Radar Data: Applications to Gated Viewing and Airborne 3D Laser Radar [R]. Stockholm: FOI-R-0000-SE, 2003.
- 21 Stuart Duncan, Jeremy Copley, Graeme Harvey, *et al.*. Advances in laser gated imaging in an airborne environment [C]. *SPIE*, 2006, 6206: 620607.
- 22 Jens Busck, Henning Heiselberg. High accuracy 3-D laser radar [C]. *SPIE*, 2004, 5412: 257—263.
- 23 Joachim F Andersen, Jens Busck, Henning Heiselberg. Pulsed Raman fiber laser and multispectral imaging in three dimensions [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(24): 6198—6204.
- 24 Y Lutz, F Christnacher. Laser diode illuminator for night vision on-board of a 155 mm artillery shell [C]. *SPIE*, 2003, 5087: 185—194.
- 25 David Monnin, Armin L Schneider, Frank Christnacher, *et al.*. A 3D outdoor scene scanner based on a night-vision range-gated active imaging system[C]. *Proceedings of the Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, 2006.
- 26 Martin Laurenzis, Frank Christnacher, Nicolas Metzger, *et al.*. Three-dimensional range-gated imaging at infrared wavelengths with super-resolution depth mapping [C]. *SPIE*, 2009, 7298: 729833.
- 27 Zhang Fanhui. Research on the Data Processing Method of Range-Gated Laser Imaging [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. 36—55.
张繁辉. 距离选通激光成像数据处理方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. 36—55.
- 28 Liu Yan. Experimental Study Based on the Range-Gated Laser Imaging [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. 39—47.
刘妍. 基于距离选通激光成像的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. 39—47.
- 29 Wang Fei, Zhao Yuan, Zhang Yong, *et al.*. Multi pulse gain-modulated three-dimensional imaging system [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(8): 1961—1966.
王飞, 赵远, 张勇, 等. 多脉冲增益调制三维实时成像系统[J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 1961—1966.
- 30 Zhang Xiuda. Studies on the New Three-Dimensional Active Optical Imaging Theory and System [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. 44—55.
张秀达. 新型三维主动光学成像理论与系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. 44—55.
- 31 Jiang Yanbing. Array Imaging Three Dimensional Ladar [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. 88—103.
姜燕冰. 面阵成像三维激光雷达[D]. 杭州: 浙江大学, 2009. 88—103.

- 32 Zhang Xiuda, Yan Huimin, Yao Jinliang, *et al.*. Exponential increased partitions method for three-dimensional active imaging [C]. SPIE, 2009, 7506: 75062Q.
- 33 Guo Huichao, Sun Huayan, Zhao Yun, *et al.*. Long-range range-gated laser active imaging experiments [C]. SPIE, 2011, 8192: 81923Y.
- 34 Wu Jianhua, Fan Guihua, Liang Danhua, *et al.*. Study on beam synthesis of pulsed diode laser [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(7): 700–705.
吴建华, 樊桂花, 梁丹华, 等. 脉冲半导体激光器光束合并技术研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(7): 700–705.
- 35 Li Yingchun, Du Yonghong, Guo Huichao. Laser active imaging simulation method based on the object model [J]. J Academy of Equipment Command & Technology, 2011, 22(5): 74–77.
李迎春, 杜永红, 郭惠超. 基于目标模型的激光主动成像仿真[J]. 装备指挥技术学院学报, 2011, 22(5): 74–77.
- 36 Li Yingchun, Fan Youchen, Du Yonghong, *et al.*. Novel laser active image-denoising method [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(9): 1036–1040.
李迎春, 范有臣, 杜永红, 等. 激光主动成像图像降噪方法[J]. 激光与红外, 2011, 41(9): 1036–1040.
- 37 Li Zhongli. Applications of Distance Brightness Gain Modulated 3-D Imaging System [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2008. 25–32
李众力. 距离亮度增益调制三维成像系统的应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008. 25–32.
- 38 Wang Zhi. Research on Multi-Frame Postprocessing Algorithm Based on Images of Laser Active Imaging [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006. 53–81.
王智. 基于激光主动成像图像的多帧后处理算法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2006. 53–81.
- 39 Pang Chunying, Zhang Tao. Signal-to-noise ratio model of laser active imaging system [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(2): 319–324.
庞春颖, 张涛. 激光主动成像系统信噪比模型的研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 319–324.
- 40 Wang Xinwei, Zhou Yan, Fan Songtao, *et al.*. Echo broadening effect in range-gated active imaging technique [C]. SPIE, 2009, 7382: 738211.
- 41 Wang Xinwei, Zhou Yan, Fan Songtao, *et al.*. Range-gated laser stroboscopic imaging for night remote surveillance [J]. Chin Phys Lett, 2010, 27(9): 094203.
- 42 Zhou Yan, Zeng Hualin, Fan Songtao, *et al.*. The research of range-gated laser night vision system on cars [C]. SPIE, 2007, 6835: 68351V.
- 43 Wang Xiangke. Research on Miniaturization Laser Active Imaging System [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. 21–37.
王祥科. 小型化激光主动成像系统研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006. 21–37.
- 44 Li Quan, Liu Zejin, Xu Xiaojun, *et al.*. A range-gated active imaging system using laser modulated by chopper [J]. Laser Journal, 2004, 25(6): 15–16.
黎全, 刘泽金, 许晓军, 等. 斩波器调制照明光源的距离选通主动成像系统[J]. 激光杂志, 2004, 25(6): 15–16.
- 45 Wu Jingang, Zuo Fang. Applications of laser range-gated technology in a low light level imaging [J]. Optical Technique, 2008, 34(4): 630–632.
武金刚, 左昉. 激光距离选通技术在微光成像系统中的应用[J]. 光学技术, 2008, 34(4): 630–632.
- 46 Jia Sinan. Research on Rang-Gated Imaging Technology of Detecting Objects on the Sea [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008. 6–18.
贾思楠. 海上搜救目标选通成像技术的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2008. 6–18.
- 47 Zhu Pingan, Hu chunsheng. Research on laser active imaging system based on range-gated technology [J]. Computer Knowledge and Technology, 2011, 7(11): 2645–2646.
朱平安, 胡春生. 一种基于距离选通方法的激光主动成像系统研究[J]. 电脑知识与技术, 2011, 7(11): 2645–2646.
- 48 Jin Weiqi, Cao Fengmei, Wang Xia, *et al.*. Range-gated underwater laser imaging system based on intensified gate imaging technology [C]. SPIE, 2008, 6621: 66210L.
- 49 Hailan Li, Xia Wang, Tingzhu Bai, *et al.*. Nonuniformly illuminated image enhancement based on range-gated underwater imaging system [C]. SPIE, 2009, 7156: 71563E.
- 50 Fan Fan, Kecheng Yang, Min Xia, *et al.*. Comparative study on several blind deconvolution algorithms applied to underwater image restoration [J]. Opt Rev, 2010, 17(3): 123–129.
- 51 Zhang Yi, Bai Lianfa, Chen Qian, *et al.*. Circular step advance delay gate-ranged underwater 3D imaging [J]. J Nanjing

University of Science and Technology, 2007, 31(6): 753–757.

张毅, 柏连发, 陈钱, 等. 循环步进延时距离选通水下微光三维成像[J]. 南京理工大学学报, 2007, 31(6): 753–757.

52 Jiang Fei. Study on Laser Under Water Target Detection [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008. 36–47.
江飞. 激光水下目标探测的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008. 36–47.

53 Jiang Jie. Study on the Noise of Laser Underwater Imaging System and Enhancement Technology [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2010. 38–52.

蒋洁. 激光水下成像噪声分析及图像处理方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010. 38–52.