

面向实际应用的 GISC Lidar 近期研究进展与思考

龚文林, 王成龙, 梅笑冬, 潘 龙, 王鹏威, 陈明亮, 薄遵望, 李 望, 高 昕, 韩中生

(中国科学院上海光学精密机械研究所 中国科学院量子光学重点实验室, 上海 201800)

摘 要: 基于稀疏限制的鬼成像雷达(Ghost Imaging Lidar via Sparsity Constraints, GISC Lidar)属于一种全新的凝视成像雷达体制, 具有探测灵敏度高、超分辨以及较好的抗干扰能力等特点。为了将 GISC Lidar 进行应用成果转化, 文中在简述 GISC Lidar 机理和近期国内外研究进展基础之上, 重点介绍了面向实际应用时 GISC Lidar 所需解决的核心问题以及该课题组在近期取得的主要研究成果, 进而对 GISC Lidar 的发展趋势进行了展望和探讨。

关键词: 鬼成像; 雷达成像; 可预置赝热光源; 运动模糊去除

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0302001

Recent research progress and thoughts on GISC Lidar with respect to practical applications

Gong Wenlin, Wang Chenglong, Mei Xiaodong, Pan Long, Wang Pengwei, Chen Mingliang,
Bo Zunwang, Li Wang, Gao Xin, Han Shensheng

(Key Laboratory for Quantum Optics of Chinese Academy of Sciences, Shanghai Institute of Optics
and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: Ghost Imaging Lidar via Sparsity Constraints (GISC Lidar), which belongs to a novel staring imaging Lidar mechanism, has been proven to be capable of high detective sensitivity, high resolution and high noise resistance. In order to promote GISC Lidar to practical application, the paper reviews the GISC Lidar mechanism and the recent research status of domestic and overseas, then highlights the core issues that GISC Lidar needs to solve in practical application and some recent achievements that the group has obtained. Finally, a simple outlook about the development trend of GISC Lidar has been prospected and discussed.

Key words: ghost imaging; lidar imaging; prebuilt pseudo-thermal source; motion deblurring

收稿日期: 2017-10-10; 修订日期: 2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(61571427); 中国科学院青年创新促进会(2013162)

作者简介: 龚文林(1982-), 男, 青年特聘研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事光学强度关联成像方面的研究。Email: gongwl@siom.ac.cn

0 引言

随着侦查监视和成像雷达探测技术的发展,集高分辨、全天时、环境适用性强以及多维信息为一体的信息获取模式成为激光成像雷达技术的发展主流。现有的激光成像雷达技术,均是建立在麦克斯韦经典电磁场理论和香农经典信息论基础之上,通过直接测量目标反射信号的强度而获取目标信息,在图像信息获取方面受成像机理、单元器件以及环境适应性等诸多限制,迫切需要探索并发展建立在现代物理学和信息论基础之上的新型激光成像雷达体制。

与传统的激光成像雷达技术完全不同,GISC Lidar 属于一种全新的凝视成像体制,它是建立在辐射场的高阶相干性理论基础之上,通过光子的涨落特性和计算重构的方式获取目标的图像信息。该技术具备探测灵敏度高、超分辨以及较好的抗干扰能力等优势特点。然而,面向实际应用转化,GISC Lidar 面临着诸多需要解决的关键技术问题,比如:快速成像、运动模糊去除、环境适应性及能力可扩展性等。中国科学院上海光学精密机械研究所自从 2009 年便确定了 GISC Lidar 的系统方案,面向实际应用需求,近两年来开展了针对性较强的关键技术攻关和演示验证,文中第一部分简要回顾了 GISC Lidar 的基本结构与近期国内外研究进展;第二部分介绍了 GISC Lidar 面向实际应用所需解决的核心问题以及笔者在该方面取得的主要研究成果;最后在第三部分对 GISC Lidar 的发展趋势进行了展望和探讨。

1 GISC Lidar 基本结构与近期国内外研究进展

1.1 GISC Lidar 基本结构

典型的 GISC Lidar 基本光学结构如图 1 所示。整个光学系统分为发射系统和接收系统两大部分,发射系统在赝热光源面处产生一个脉冲式时空二维随机散斑场,经分光板后分成两束,其中反射光束通过参考镜将赝热光源面处的散斑场成像于 CCD 上,由该 CCD 记录散斑场的空间强度分布;透射光束通过发射镜将赝热光源面处的散斑场成像于待测目标上。接收系统中的接收镜将目标散射回的光能信号汇聚于单像元的光电倍增管 PMT 上,通过高

速采集卡采集 PMT 检测到的一序列电压信号^[1-2]。结合高速采集卡记录的电压信号与 CCD 所记录的空间强度分布进行关联图像重建,在凝视的情况下便可以获得待测目标的表面三维强度分布图像。

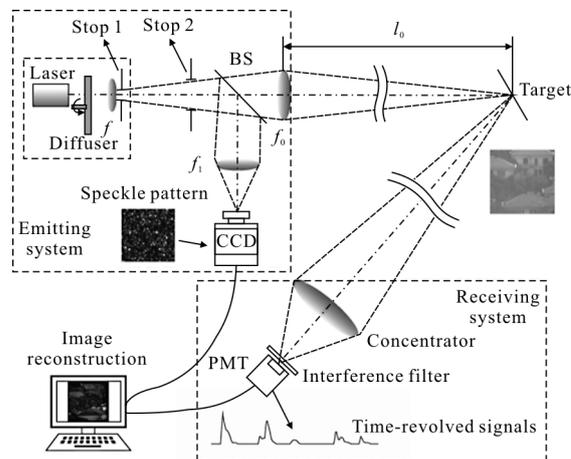


图 1 典型的 GISC Lidar 光学结构图

Fig.1 Typical optical schematic of GISC Lidar

1.2 GISC Lidar 技术优势

基于 GISC Lidar 的结构特点,其具备以下显著优点:

(1) 在凝视探测的工作模式下,利用低维探测器可以获得目标的高维信息。比如:采用脉冲式赝热光源和时间分辨率能力的单像元探测器可以获得目标的表面三维结构信息^[1-2];又如采用啁啾调幅赝热光源和相干探测的单像元探测模块可以获得目标的径向速度和表面三维结构信息,实现凝视四维成像^[3];

(2) 高的图像获取效率;图像获取效率可以超越奈奎斯特采样定理的限制。基于目标的三维结构特性和整体随机测量特点,一个 $N \times N \times M$ 的图像只需 $K \cdot \log(N^2/K)$ 量级 (K 为目标在稀疏表达基下的非零个数)的测量次数便可以平稳地重建^[4-7];

(3) 成像分辨率可以突破系统瑞利衍射极限的限制。基于时空二维涨落光场的随机分布特点和目标稀疏先验的普遍特性,采用稀疏重建技术可以实现远场超分辨成像,为星载高分辨遥感成像和显微成像提供了一条新的技术途径^[8-10];

(4) 一定程度上改善大气环境对成像质量的影响。辐照于目标上的光场和调制本征光场之间存在较强的涨落关联,从而可以减弱大气散射、湍流等对成像质量的影响^[11-13]。

1.3 GISC Lidar 近期国内外研究进展

自从 GISC Lidar 系统方案确定以来,国内外开展了较为系统性的研究工作。最近两年来,比较显著的研究进展有:2015 年,中国科学院上海光学精密机械研究所完成了基于随机相位板的可预置赝热光源的关键技术攻关,实现了可预置激光三维关联成像原理实验验证^[14-15]。2016 年,成功研制出机

载激光三维关联成像试验样机,并先后完成了探测距离 1 km 的系留气球、车载和机载三维成像演示试验^[16]。2017 年,上海交通大学开展了基于单光子探测模式下的首达光子激光关联成像研究^[17];2015 年,美国陆军实验室实现了 2.33 km 的激光关联成像^[18];英国格拉斯哥大学于 2016 年陆续完成了基于数字微镜器件的激光三维关联成像和 3D 视频演示试验^[19-20]。

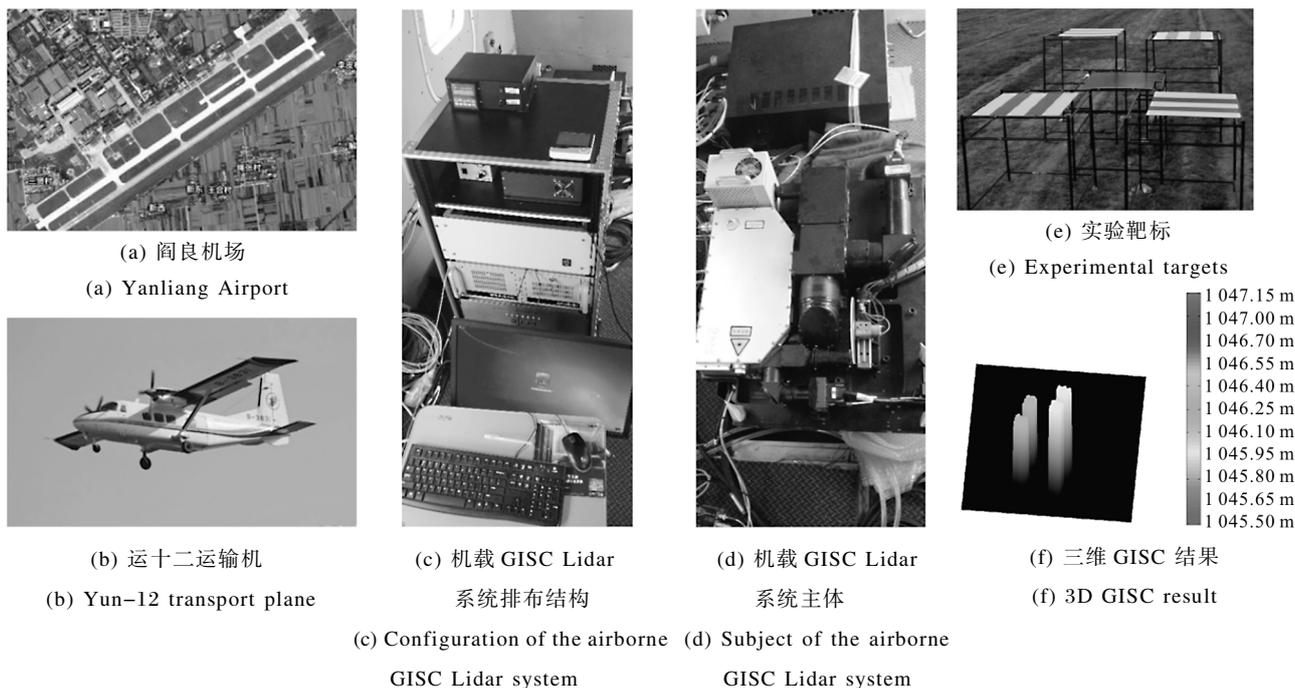


图 2 机载 GISC Lidar 实验结果
Fig.2 Experimental result of airborne GISC Lidar

2 面向实际应用 GISC Lidar 需解决的核心问题及该课题组主要研究进展

经过近年来的攻关,GISC Lidar 已经完成了真实大气环境下的相关原理演示实验,验证了其相关技术优势。然而,要将 GISC Lidar 技术面向实际应用并进行成果转化,需要重点解决以下几个关键技术问题:

(1) 快速成像。解决 GISC Lidar 数据采集时间较长无法实时成像的问题,通过快采样、少采样的方式达到快速成像的目的;

(2) 运动模糊去除。GISC Lidar 属于一种多次测量的凝视成像方法,目标与系统的相对运动会导致成像分辨率的退化,需结合关联成像的自身特点,解决高速运动目标高分辨成像问题;

(3) 较好的环境适应性及能力可拓展性。将关联成像技术与现有技术结合起来,提升 GISC Lidar 系统性能;与现有激光成像雷达技术相比,GISC Lidar 能够显著解决实际应用中的瓶颈问题。

2.1 快速成像

对于 GISC Lidar 而言,高速可预置赝热光源是解决快速采样的重要途径,而光场随机编码优化和高效图像重建算法是实现少采样的有效方法。笔者在该方面取得了如下所述的主要研究进展。

2.1.1 高速可预置赝热光源

对于图 1 所示的典型 GISC Lidar 系统,其成像速度主要受限于参考光路中 CCD 的帧频和相位板的调制速度。针对这一问题,笔者首先提出并验证了“随机相位板平移一个散斑大小便可实现独立采样”

新型运行方案的赝热光源^[14]。通过直径为 70 mm 的相位板和旋转运动便可产生 10 000 帧的独立样本数,与随机相位板移动一个激光光斑大小以保证采样独立的常规运行方式相比,该新型运行方案使得随机相位板的旋转速度降低了两个数量级,整个调制模块的体积减小了 70%,这对于赝热光源的预置是非常有利的(图 3)。在此基础上,按照相位板预先设定的运行轨迹,低速条件下事先采集并记录每个对应位置处的散斑场强度分布,成像过程中按照运行轨迹对相位板进行高速定位寻址,从而解决了参考光路 CCD 的图像采集速度对成像速度的限制,达到可预置赝热光源的目的^[15]。目前,笔者已经实现了 10 kHz 的可预置赝热光源,并完成了高精度和高重复性的实验验证。

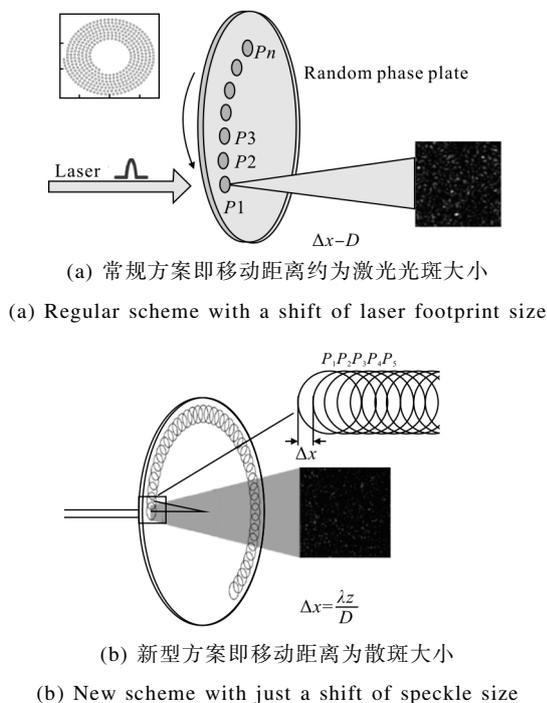


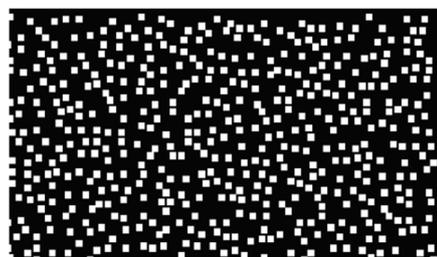
图 3 两种 GISC Lidar 随机相位板控制方案

Fig.3 Two types of controlling programs of random phase plane in GISC Lidar

2.1.2 光场编码优化及加工

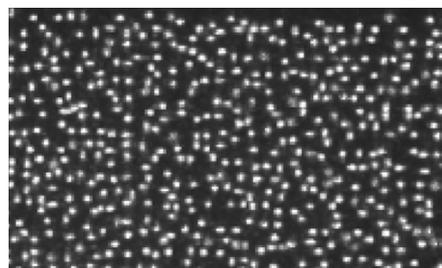
现有 GISC Lidar 的光场强度分布服从负指数统计特性,成像结果往往不佳。笔者分析了编码光场的统计特性与成像质量的关系,建立了基于光场统计特性的编码优化和评价模型,提出了评价光场编码好坏的几个特征参数,并通过数值模拟和实验验证了所提特征参数的有效性^[21]。在此基础上,针对优化设计好的编码散斑场,依据相位复原的方法获取

对应散斑场的相位分布信息,进而加工出相应的相位板(图 4),有效减少了成像所需的样本数,也为高能量利用率、高效的预置赝热光源研制提供了良好的技术支持。



(a) 设计好的单帧散斑图

(a) Designed single frame speckle patterns



(b) 加工出的对应单帧散斑图

(b) Manufactured corresponding single frame speckle patterns



(c) 加工好的相位板

(c) Manufactured phase plate

图 4 优化设计并加工好的相位板

Fig.4 Optimally designed and the manufactured phase plates

2.1.3 高效图像重建算法

以前的 GISC Lidar 系统通过对目标回波信号的每个距离切片并行重建而获取目标表面三维信息,并不考虑目标自身在空间上的结构关系,往往需要较多的采样数才能获取较高质量的图像。在图像重建过程中,除了利用目标自身稀疏先验特性之外,还利用了目标在空间结构上的正交特性,笔者提出并开发了一种基于目标稀疏特性和空间结构特性的

三维关联成像重建算法^[22]。相比于先前的重建算法,在样本数相同的条件下,成像质量得到了显著提升,达到了少采样提高成像速度的目的。

2.2 运动模糊去除方案

现有的 GISC Lidar 系统一般采用大视场的凝视成像模式捕捉运动目标,由于需要多次测量,雷达系统和目标间的相对运动会导致 GISC Lidar 成像分辨率的下降,也即运动模糊^[23-25]。针对上述情况,传统成像技术往往采用快速采样或者运动补偿的方式以消除运动模糊。对于 GISC Lidar 而言,快速采样或者少采样只能一定程度上改善运动模糊现象,需要结合关联成像自身特性开发有效的运动模糊去除方法。对于目标在垂直于雷达视线方向运动的情况,笔者开发了基于参考散斑场平移补偿和速度搜索的匀速运动目标去模糊图像重构方法^[23-24]。对于目标在沿雷达视线方向运动的情况,笔者提出了参考散斑场缩放补偿和速度搜索的匀速运动目标去模糊图像重构方法^[25]。在此基础上,针对目标在垂直于/沿雷达视线方向均存在运动的情况,中国科学院上海光学精密机械研究所开发了相应的去模糊图像关联成像重构方法,并实现了远距离高分辨成像实验验证(图 5)。

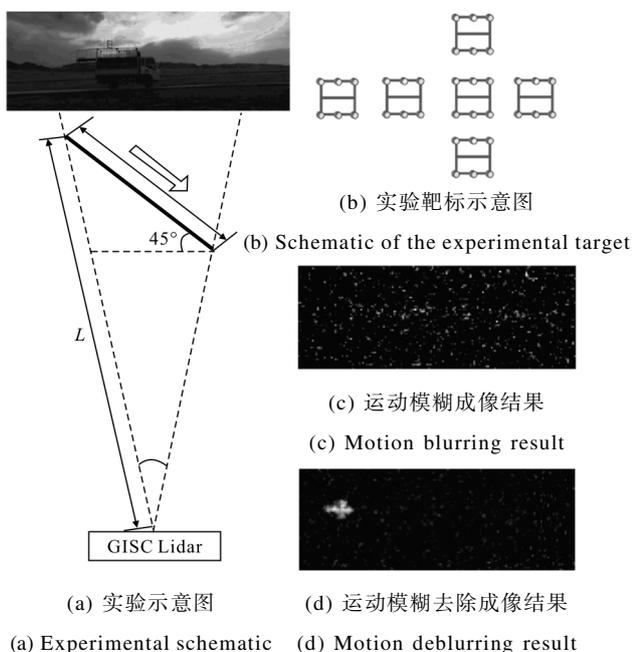


图 5 青海湖实验结果

Fig.5 Experimental results in Qinghai Lake

2.3 环境适用性及能力可拓展性

现有 GISC Lidar 系统一般采用窄脉冲探测工作模式获取目标的三维信息,在实际应用中存在着诸多限制。例如,为了保证较好的探测信噪比,要求辐照于目标上的激光单脉冲能量必须远大于背景光的强度,从而严重影响了探测距离;又如,距离分辨率受限于发射激光的脉冲宽度和探测器的带宽。另一方面,随着激光雷达探测技术的发展,具备更高探测灵敏度的单光子探测技术成为激光雷达的主要趋势。因此,发展低探测信噪比和单光子探测模式下的激光关联成像技术是提升系统环境适应性和探测威力的重要方向。将现有激光雷达技术和关联成像结合起来,中国科学院上海光学精密机械研究所在啁啾调幅激光关联成像和光子计数激光关联成像方面取得了一些原创性的研究成果。

将脉冲压缩、相干探测和关联成像结合起来,笔者提出了一种新型成像雷达,如图 6 所示,称为啁啾调幅脉冲压缩激光关联成像雷达。该雷达不但可以获取目标的表面三维结构信息,还可以获取目标的径向速度信息^[3]。此外,与现有的窄脉冲 GISC Lidar 相比,啁啾调幅脉冲压缩激光关联成像雷达不但可以克服背景光对成像质量的影响,实现隐秘探测,还可以有效解决传统相干探测激光雷达距离和速度的耦合问题^[26]。

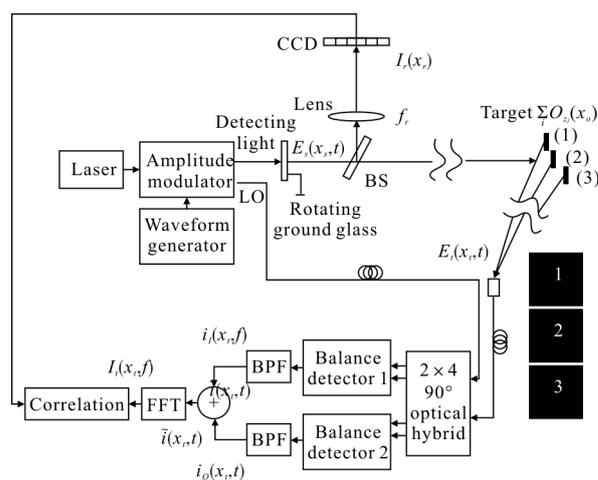


图 6 啁啾调幅脉冲压缩 GISC Lidar

Fig.6 Schematic of chirped amplitude modulation pulsed-squeezed GISC Lidar

目前的 GISC Lidar 系统大多数采用工作于线

性模式的探测器获取目标的回波强度涨落信息,与工作在盖革模式下的单光子探测相比,其探测灵敏度要低两个数量级。因此,为了提升 GISC Lidar 的探测威力,利用单光子探测器获取目标的回波光子的涨落信息并实现关联成像成为未来远距离探测主要方向之一。近期,上海交通大学的曾贵华小组开展了基于时间相关和首达光子实现光子计数的激光关联成像原理验证实验^[17,27];而笔者开展了基于时分复用(图 7)和多通道探测实现光子计数的激光关联成像室外验证实验^[28]。对于单光子探测模式下的激光关联成像而言,目标回波信号的特征和重建则是急需重点研究的核心问题。

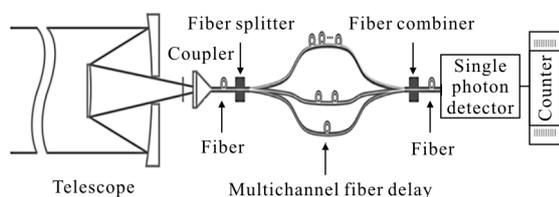


图 7 时分复用实现光子计数示意图

Fig.7 Schematic of time division multiplexing photon counting

3 GISC Lidar 发展趋势及若干思考

根据 GISC Lidar 结构特点,传统的扫描型激光成像雷达(Scanning Imaging Lidar, SI Lidar)和焦平面激光成像雷达(Focal Plane Imaging Lidar, FPI Lidar)可以看作其特例情形。例如,当图 1 中相位板(Diffuser)的相位相同时,则对应扫描激光成像雷达;当图 1 中相位板的相位相同且记录回波信号的探测器替换为面阵探测器时,则对应焦平面激光成像雷达。总的来说,在探测距离上, $SI\ Lidar \geq GISC\ Lidar \geq FPI\ Lidar$;在图像信息获取效率上, $GISC\ Lidar \geq FPI\ Lidar = SI\ Lidar$;在成像分辨率上, $GISC\ Lidar > FPI\ Lidar > SI\ Lidar$;在成像信噪比上, $SI\ Lidar > FPI\ Lidar > GISC\ Lidar$ 。因此,可结合实际应用需求选择 GISC Lidar 的工作模式,使得系统的性能达到最佳。对于远距离稀疏场景(如:空对空、空对海)成像而言,宜采用 GISC Lidar 工作模式;对于远距离复杂场景成像而言,宜采用 SI Lidar 工作模式;对于近距离快速成像场景而言,宜采用 FPI Lidar 工作模式。

经过近 10 年来的研究,GISC Lidar 完成了从原理方案验证到关键技术攻关再到机载演示实验的系统性研究,实现了 GISC Lidar 技术从静止平台、静止目标到运动平台、运动目标的跨越。结合 GISC Lidar 现有的技术成熟度,近期有望在机载/星载对地高分辨三维观测、机载远距离探测与识别、水下目标探测与成像、局部地区连续监视与交通监控等领域进行成果转化;而基于单光子探测的 GISC Lidar、多光谱 GISC Lidar、高维信息同时获取的一体化探测系统以及多维信息关联融合处理可能是未来的重要发展趋势。此外,对于 GISC Lidar 理论和应用体系而言,还需在以下几个方面开展进一步的深入研究:

(1) 在理论和机理上,需重点开展基于信息论和光场编码的激光成像雷达统一理论、概率性统计或者首达光子探测模式下的 GISC Lidar、1-Bit 关联成像理论与图像重建以及 GISC Lidar 成像质量评价体系等方面的研究。

(2) 在核心技术上,需重点攻关实时图像获取、时间分辨稀疏阵列探测、非成像式目标识别与检测以及强度关联激光主被动复合多维信息融合重建等技术。

4 结论

面向实际应用,快速成像、运动模糊去除以及较好的环境适应性是 GISC Lidar 这一新型成像雷达体制需重点解决的技术问题。文中验证了通过高速可预置热光源、光场随机编码优化和高效图像重建算法可提升成像速度;通过结合关联成像的自身特点,能够一定程度上解决高速运动目标的运动模糊问题;通过将关联成像技术与现有技术结合起来,可以提升 GISC Lidar 的系统性能和环境适应性。然而,往实际应用转化,还需在实时成像、单光子探测体制下的信号重建以及多维信息融合等方面加强研究,希望上述讨论可以为有兴趣的同行提供有益的参考。

参考文献:

[1] Gong W, Zhao C, Yu H, et al. Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint [J]. *Scientific Reports*,

- 2016, 6(6): 26133.
- [2] Gong W, Yu H, Zhao C, et al. Improving the imaging quality of ghost imaging lidar via sparsity constraint by time-resolved technique [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(12): 8120991.
- [3] Deng C, Gong W, Han S. Pulse-compression ghost imaging lidar via coherent detection [J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 025983.
- [4] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y. Compressive ghost imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13): 131110.
- [5] Du J, Gong W, Han S. The influence of sparsity property of images on ghost imaging with thermal light [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(6): 1067-1069.
- [6] Gong W, Bo Z, Li E, et al. Experimental investigation of the quality of ghost imaging via sparsity constraints [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(15): 3510-3515.
- [7] Gong W, Han S. Multiple-input ghost imaging via sparsity constraints[J]. *JOSA*, 2012, 29(8): 1571-1579.
- [8] Gong W, Han S. Experimental investigation of the quality of lensless super-resolution ghost imaging via sparsity constraints[J]. *Physics Letters A*, 2012, 376(17): 1519-1522.
- [9] Gong W, Han S. High-resolution far-field ghost imaging via sparsity constraint[J]. *Scientific Report*, 2015, 5: 09280.
- [10] Gong W. High-resolution pseudo-inverse ghost imaging[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(5): 000234.
- [11] Gong W, Han S. Correlated imaging in scattering media[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 394-396.
- [12] Zhao C, Gong W, Chen M, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(14): 141123.
- [13] Chen M, Li E, Gong W, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints in real atmosphere [J]. *Optics and Photonics Journal*, 2013, 3(2B): 83-85.
- [14] Wu Nan, Gong Wenlin, Han Shensheng. Experimental research on pseudo-thermal light ghost imaging with random phase plate based on variable motion trail [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0711005. (in Chinese)
吴楠, 龚文林, 韩申生. 基于运动轨迹可调式随机相位板的赝热光鬼成像实验研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0711005.
- [15] Mei Xiaodong, Gong Wenlin, Yan Yi, et al. Experimental research on prebuilt three-dimensional imaging lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0710003. (in Chinese)
梅笑冬, 龚文林, 严毅, 等. 可预置强度关联激光三维成像雷达实验研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0710003.
- [16] Wang C, Mei X, Pan L, et al. NIR 3D GISC lidar on a balloon-borne platform [C]//Computational Optical Sensing and Imaging, 2017(1): JTU5A. 11.
- [17] Liu X, Shi J, Chen H, et al. First-photon ghost imaging [EB/OL].[2017-6-17]. <http://xueshu.baidu.com/>.
- [18] Meyers R E, Deacon K S. System and method for image improvement and enhancement: US, 8948539 [P]. 2015-02-03.
- [19] Sun M, Edgar M, Gibson G, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12010.
- [20] Zhang Y, Edgar M P, Sun B, et al. 3D single-pixel video [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(3): 035203.
- [21] Wang C, Gong W, Shao X, et al. The influence of the property of random coded patterns on fluctuation-correlation ghost imaging[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(6): 065703.
- [22] Yu H, Li E, Gong W, et al. Structured image reconstruction for three-dimensional ghost imaging lidar [J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 14541-14551.
- [23] Zhang Cong, Gong Wenlin, Han Shensheng. Ghost imaging for moving targets and its application in remote sensing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 204-210. (in Chinese)
张聪, 龚文林, 韩申生. 运动目标强度关联成像及其在遥感探测中的应用[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 204-210.
- [24] Li E, Bo Z, Chen M, et al. Ghost imaging of a moving target with an unknown constant speed [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(25): 251120.
- [25] Li X, Deng C, Chen M, et al. Ghost imaging for an axially moving target with an unknown constant speed[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(4): 153-157.
- [26] Deng C, Pan L, Wang C, et al. Performance analysis of ghost imaging lidar in background light environment [J]. *Photonics Research*, 2017, 5(5): 431-435.
- [27] Yang Y, Shi J, Cao F, et al. Computational imaging based on time-correlated single-photon-counting technique at low light level[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(31): 9277-9283.
- [28] Bo Zunwang, Gong Wenlin, Yan Yi, et al. Experimental research of ghost imaging based on photon counting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1104001. (in Chinese)
薄遵望, 龚文林, 严毅, 等. 基于光子计数的关联成像实验研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1104001.