

基于相干探测的单像素激光成像雷达研究进展

龚文林^{1,2*†}, 孙建锋^{3†}, 邓陈进², 卢智勇^{3**}, 周煜³, 韩申生^{2***}

¹ 苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006;

² 中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800;

³ 中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

摘要 基于相干探测的单像素激光成像雷达是一种结合光场的主动调制和光学相干探测、通过无空间分辨能力的单像素探测器便可以获取目标信息的计算成像技术, 在高维信息获取和抗背景光干扰方面具有显著优势。本文简述了近年来发展起来的两种新型相干探测单像素激光成像雷达(合成孔径激光成像雷达和激光关联成像雷达)的基本原理和特点, 介绍了近期取得的主要研究进展, 并对其未来发展趋势进行了展望。

关键词 成像系统; 计算成像; 激光雷达; 相干探测; 图像重建

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011003

Research Progress on Single-Pixel Imaging Lidar via Coherent Detection

Gong Wenlin^{1,2*†}, Sun Jianfeng^{3†}, Deng Chenjin², Lu Zhiyong^{3**}, Zhou Yu³, Han Shensheng^{2***}

¹ School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;

² Key Laboratory for Quantum Optics of CAS, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800, China;

³ Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology of CAS, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800, China

Abstract Single-pixel imaging lidar via coherent detection is a computational imaging method that obtains the target's information through a detector without the ability of spatial resolution, by combining active modulation of light field with optical coherent detection. This method has significant advantages in high-dimensional information acquisition and anti-background light disturbance. The basic principles and characteristics of two new single-pixel imaging lidar via coherent detection such as synthetic aperture imaging lidar and ghost imaging lidar, are briefly reviewed and their main research progress are introduced in recent years. The future development trend is also prospected.

Key words imaging systems; computational imaging; lidar; coherent detection; image reconstruction

OCIS codes 110.1758; 280.3640; 030.1640; 110.3010

1 引言

激光成像雷达是一种将调控的激光光场辐照于待测目标, 通过对目标回波信号进行探测和数据处理后而获取目标图像信息的主动成像技术^[1]。由于该

技术具备成像分辨率高、测距测速精度高、抗干扰能力强、全天时工作等优势特点, 已在测绘、气象监测、考古、机器人自动导航、目标识别等领域得到了广泛应用^[2]。目前, 激光成像雷达主要分为基于“所见即所得”的成像模式和基于探测与计算重构的成像模

收稿日期: 2021-03-08; 修回日期: 2021-04-11; 录用日期: 2021-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(61991454)、国家重点研发计划(2020YFB04012600)、国防基础科研计划(D040301)、苏州大学学术启动经费(NH15900221)

*E-mail: wlgong@suda.edu.cn; **E-mail: zylyu@siom.ac.cn; ***E-mail: sshan@mail.shnc.ac.cn

† 共同第一作者

式。对于前者,代表性的有点扫描激光成像雷达和闪光式焦平面激光成像雷达;对于后者,代表性的有合成孔径激光成像雷达(SAIL)和激光关联成像雷达(GI Lidar)^[3-13]。近年来,随着计算机存储量和运算性能的大幅度提升,依赖于复杂计算的激光成像雷达技术已不再拘泥于硬件的设计和核心单元器件的性能,而是侧重于利用高效、灵活性强的软件算法来重建目标图像,可突破传统激光成像雷达的物理极限。比如,SAIL解决了光学系统孔径对成像分辨率的限制^[3-8];GI Lidar打破了奈奎斯特采样定律的限制^[9-10];基于单光子激光成像雷达突破了高成像信噪比所需的光子数极限^[11-12]。

相比于闪光式焦平面激光成像雷达,单像素激光成像雷达因能量集中作用距离较远、单像素探测器件成熟且成本低等优势特点,近年来取得了诸多显著性的突破。尤其在基于计算成像技术的单像素激光成像雷达方向,引起了一股较强的研究热潮,比较有代表性的为合成孔径激光成像雷达^[3-8]和激光关联成像雷达^[13]。与传统点扫描激光成像雷达不同,基于计算成像技术的单像素激光成像雷达采用大波束激光照射待测目标、多角度或者多次测量目标回波信号,进而通过计算重构方式获取目标图像信息,其空间角分辨率不再受限于激光的波束角,而受限于激光雷达系统等效的光学口径^[3-8,14]。同时,由于该激光雷达采用的是面成像方式且无机械扫描结构,因此图像信息连贯且不存在位置配准问题,适用于高速运动目标成像^[5-7,15-17]。

类似于传统激光雷达,目前基于计算成像技术的单像素激光成像雷达主要分为两种工作方式:1)窄脉冲激光照明、直接测量目标回波强度信息^[18-19];2)基于时间调制的长脉冲激光照明、相干探测方式测量目标回波光场信息^[20-24]。目前,合成孔径激光成像雷达主要采用第二种工作方式,该技术已经建立了完善的理论框架,解决了空间衍射光学、时间域干涉光学、统计光学和图像处理等基础科学问题,突破了总体技术、光学天线系统、接收/发射光电子系统和图像重建等关键技术,完成了实验室近距离模拟、室外远距离演示以及机载对地公里级超分辨成像实验验证;实验室内方位向分辨率能够达到理论值,机载条件下其分辨率通常能做到理论值的两倍左右^[3-8,23-27]。对于激光关联成像雷达而言,目前大多数的研究集中在第一种工作方式,已经建立了较为完善的理论体系,实现了从X射线到微波波段的实验验证^[28-32],验证该技术具备较高的图像

获取效率和较强的抗烟雾干扰能力^[33-35];完成了公里级车载/机载激光三维关联成像、公里级多运动目标关联成像和百公里级单光子探测灵敏度的激光三维关联成像演示实验^[36-39]。基于相干探测的激光关联成像雷达研究目前处于初步阶段,其优势主要在于隐秘性好、抗背景光干扰能力强以及可获取的目标信息维度更高,已经有一些相关的理论分析、数值模拟和实验验证工作^[20-22]。

本文以基于计算成像技术的相干探测单像素激光成像雷达为核心,介绍了近年来研究热点较高的合成孔径激光成像雷达和激光关联成像雷达的基本原理、技术特点和最新进展。并且结合这两类激光成像雷达系统的实际应用转化,对亟须解决的科学与技术问题、发展趋势以及应用方向进行了初步的探讨。

2 合成孔径激光成像雷达

合成孔径激光成像雷达的基本原理源自射频波段的合成孔径雷达(SAR)^[40],利用雷达与目标之间的相对运动把尺寸较小的真实天线孔径通过数据处理的方法合成为较大的等效天线孔径,从而实现高分辨成像。合成孔径激光成像雷达将合成孔径技术和激光雷达技术融合在一起,可以实现远距离高分辨成像,是目前国外报道的实现几千公里距离上厘米量级成像分辨率的重要光学手段之一,在军事和空间领域有着重要应用前景。尽管合成孔径激光成像雷达的思想是从微波合成孔径雷达发展而来的,但由于波段从微波过渡到光波,其波长小5个数量级左右,天线尺寸与光学波长的比值为5个数量级左右,因此在物理本质上呈现了光学波段的特性。加之光频器件和电子器件原理不同,产生了空间域和时间域光学新问题。也就是说,微波合成孔径雷达的原理和方法并不能简单地或者直接地应用到合成孔径激光成像雷达,这使得其研究具有很高的挑战性。下面将简述合成孔径激光成像雷达的基本原理、技术特点和近期主要研究进展,并初步探讨该技术亟须解决的问题与发展趋势。

2.1 基本原理

SAIL的研究发展首先是采用复制射频波段侧视合成孔径雷达的基本原理和方法,即在距离向上通过发射宽带调制信号实现视距的距离分辨成像,在方位向上采用雷达与目标相对运动、经信号处理产生等效的大孔径实现相干孔径合成成像^[3-8]。其中距离向的分辨率 d_x 为

$$dx = \frac{c}{2B}, \quad (1)$$

式中： c 为光速； B 为激光器发射的线性调频脉冲信号带宽。方位向的分辨率 dy 为

$$dy = \frac{d}{2}, \quad (2)$$

式中： d 为发射孔径的大小，因此，理想的方位向成像分辨率可达到真实孔径的一半。图1给出了条带式合成孔径激光成像雷达示意图及其光学原理图，雷达沿飞行方向做直线运动，光学足趾（一个光斑的

阴影部分）在目标平面内扫描。成像雷达照射到目标点位置时，发射线性调频啁啾脉冲信号，目标回波信号与本征信号进行光外差混频后，探测器记录此位置处光场的振幅信息和相位信息；然后成像雷达移动到下一个位置，重复以上操作直到光学足趾从该目标点移出，最终获取整个合成孔径长度内不同方位上的目标回波信号，组成距离向和方位向上的光外差回波信号二维数据矩阵。对该二维数据矩阵进行相关成像算法处理后，便可以获取目标的图像信息^[3-8]。

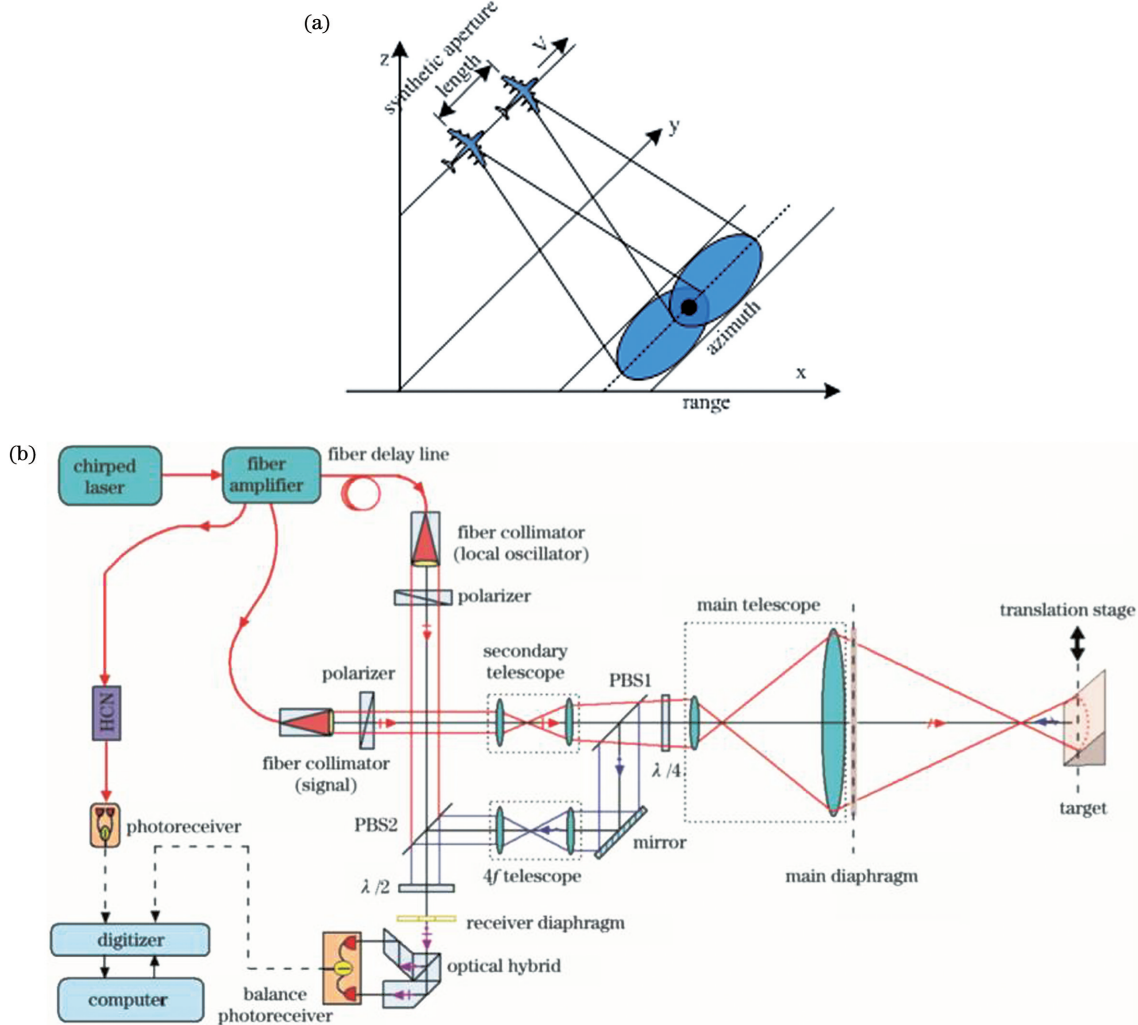


图1 SAIL示意图。(a)条带式机载SAIL工作示意图；(b)SAIL光学原理图

Fig. 1 SAIL diagram. (a) Working diagram of stripe airborne SAIL; (b) optical schematic of SAIL

2.2 技术特点

SAIL在交轨向(距离向)上的信息提取采用线性调频啁啾激光外差探测解耦方法,在顺轨向(方位向)上的信息提取采用相干孔径合成的方法,因此合成孔径激光成像雷达属于时间-空间全相干处理,涉及光频信号的振幅、偏振、频率、时间相位以及空间相位的严密确定关系,对激光的发射脉冲相位同步

和探测接收端提出了非常严格的要求,通常需要采用参考光路或者相位梯度自聚焦算法校准收发过程中产生的回波信号相位误差信息,在总体设计、光学天线、接收/发射光电子系统和图像处理方面都存在较高的难度。但是,合成孔径激光成像雷达与其他探测手段相比,具备以下优势特点:

1) 成像时间短。SAIL利用目标与雷达之间的

相对运动合成更大的等效发射孔径,与微波相比,其发射视场窄,成像时间更短,在 ms 量级。

2) 分辨率高。SAIL 方位方向上的分辨率与入射激光波长和作用距离无关,能够在几千公里探测距离上实现厘米量级的成像分辨率。

2.3 近期主要研究进展

国外方面,2002 年美国海军实验室取得了合成孔径激光成像雷达的核心关键技术突破,实现了世界上第一个移动目标的二维合成孔径激光雷达成像^[3-4];2005 年,美国空军实验室第一次采用移动的孔径实现对固定的漫反射目标成像,采用数字延时

替代光学延时线,并通过参考通道的一阶相位误差来估算目标信号中的相位,实现了合成孔径激光成像雷达良好的聚焦成像^[5-7],其结果如图 2 所示。其中,图 2(a)为实验系统方案,图 2(b)为待测靶标,图 2(c)为成像结果。同年,雷声公司和诺格公司在美国国防预先计划研究局合成孔径激光雷达传感战术成像计划 SALTI(Synthetic Aperture Ladar for Tactical Imaging)的资助下,分别采用光纤激光器和 CO₂ 激光器对合成孔径激光雷达的机载演示进行设计、建造和概念验证^[41-42],并均于 2006 年完成了机载成像实验,但并未公开报道相关的实验结果。



图 2 美国空军实验室 SAIL 原理验证结果^[5]。(a)实验系统方案;(b)靶标;
(c)成像结果

Fig. 2 Principle demonstration result of SAIL by Air Force Research Lab^[5]. (a) Scheme of experimental system; (b) target; (c) imaging result

2011 年,美国洛克希德马丁公司采用 1.5 μm 光纤激光器和掺铒光纤放大器进行了机载合成孔径激光成像雷达实验^[23,43-44]。采用了脉冲内相位编码代替频率啁啾实现距离向分辨,实验的脉冲时间宽度为 20 ns,其重复频率为 100 kHz,飞机以 55 m/s 的速度飞行,距离目标 1.6 km。激光器光束从飞机

侧面窗口发出,且与地面目标成 45° 夹角照射,该目标由反射材料上面覆盖洛克希德马丁公司的黑色胶带 Logo 组成。最终获得的距离向分辨率为 2 cm,方位向分辨率为 3.3 cm,成像结果如图 3 所示。其中,图 3(a)为机载实验场景照片,图 3(b)为测试靶标,图 3(c)为成像结果。

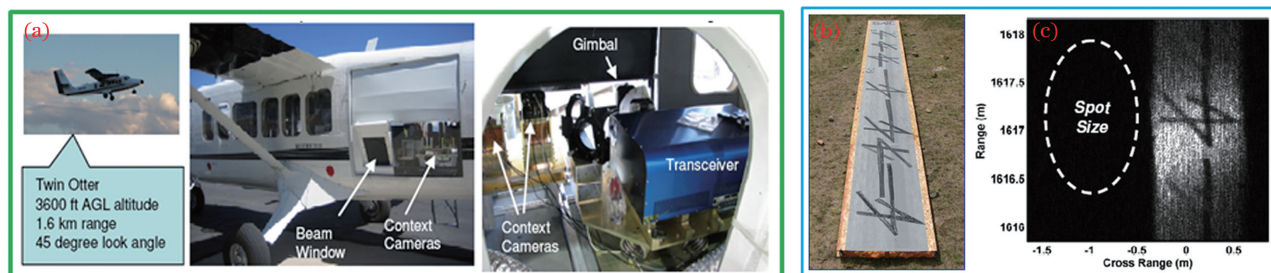


图 3 美国洛克希德马丁公司机载 SAIL 实验样机和机载实验结果^[23]。(a)机载实验场景照片;(b)测试靶标;(c)成像结果

Fig. 3 Airborne SAIL system and experimental results by Lockheed Martin corporation of America^[23]. (a) Picture of airborne testing scene; (b) testing target; (c) imaging result

2012 年,蒙大拿州立大学光谱实验室采用中心波长 1.55 μm 、啁啾率为 5 THz/s 的光纤激光器和掺铒光纤放大器进行了聚束模式和干涉合成孔径激光成像雷达实验^[45],其目标距离为 2 m,获得了单个硬币的高分辨图像,如图 4 所示。2014 年,他们

采用合作相位参考和相位梯度自聚焦(PGA)算法实现了接近单光子探测的低回波功率合成孔径激光成像雷达实验^[46],实验过程中并没有利用 HCN 光谱吸收盒来同步初始相位,这也是一个突破性的进展。此外,2018 年 4 月 14 号晚一枚美国联合发射

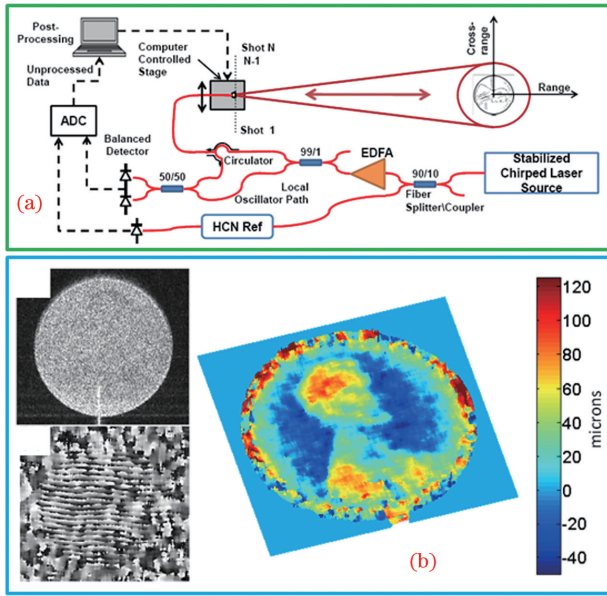


图4 蒙大拿州立大学干涉 SAIL 实验验证^[45]。(a)实验原理图;(b)成像结果

Fig. 4 Experimental demonstration of interference SAIL by Montana State University^[45]. (a) Experimental schematic; (b) imaging result

同盟(ULA)的阿特拉斯 V 型运载火箭成功发射了 CBAS 和 EAGLE 两枚卫星,其中 EAGLE 卫星上装载了一部逆合成孔径激光雷达,用以获得超越传统光学设备搜集空间目标高分辨率图像的能力^[47]。

国内方面对合成孔径激光成像雷达的研究起步较晚,近年来有多家单位开展了合成孔径激光成像雷达理论和实验研究,如中国科学院上海光学精密机械研究所、中国电子科技集团公司第二十七研究所、中国科学院电子学研究所、西安电子科技大学等科研院所和高校^[48-55]。2008年,中国科学院上海光学精密机械研究所采用自由空间光学结构实现了缩小尺度的合成孔径激光成像雷达实验^[49-50],如图5所示。其中,图5(a)为实验原理图,图5(b)为“VV”测试靶标,图5(c)为成像结果。采用 $1.55\ \mu\text{m}$ 单模啁啾半导体激光器,输出功率为 $2\ \text{mW}$,激光啁啾范围为 $1538.5\sim 1541\ \text{nm}$,扫描速率为 $100\ \text{nm/s}$ 。目标由高反射率材料制作的两个V字母图案,成像距离 $3.2\ \text{m}$ 且与光束成倾角 45° 放置,实验成功获得了距离向分辨率为 $1.6\ \text{mm}$ 、方位向分辨率为 $2\ \text{mm}$ 的成像结果,是国内进行合成孔径激光成像雷达研究的首次成功实验报道。在此基础上,2011年该单位又设计研制出一种模拟探测距离为 $50\ \text{km}$ 的 $\Phi 300\ \text{mm}$ 孔径的合成孔径激光成像雷达演示样机并进行了实验室近距离演示实验验证,该样机在

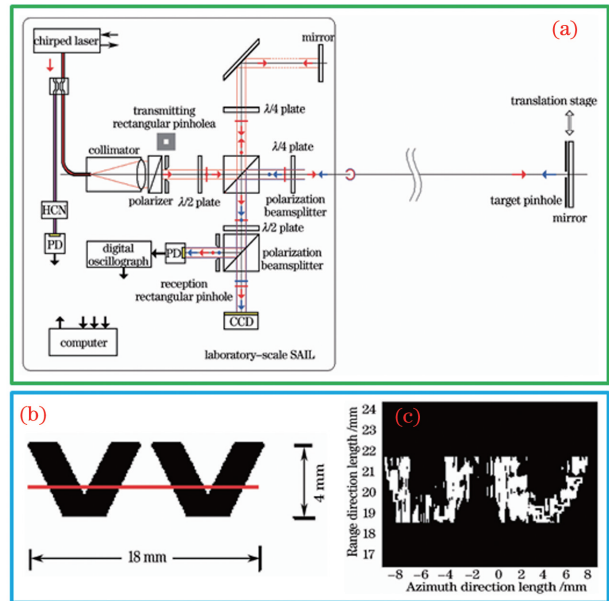


图5 上海光机所 SAIL 缩比实验验证^[49-50]。(a)实验原理图;(b)测试靶标;(c)成像结果

Fig. 5 Experimental demonstration of SAIL by SIOM^[49-50]. (a) Experimental schematic; (b) testing target; (c) imaging result

$14\ \text{m}$ 传输距离上实现了分辨率值优于 $1.4\ \text{mm}$ (方位向) $\times 1.2\ \text{mm}$ (距离向)的动态二维合成孔径激光成像雷达成像^[51-52]。

2013年,中国科学院电子学研究所实现了单程远场衍射的 SAIL 实验室演示成像实验^[54]。该系统采用光纤结构,成像距离为 $2.4\ \text{m}$ 。目标图案由3M 钻石反光材料经激光切割而成,成像目标和成像结果如图6所示。2014年,该单位又实现了 $2.4\ \text{m}$ 距离的三维干涉合成孔径激光成像雷达实验^[55],获得了 $2.5\ \text{mm}$ 的高程信息。

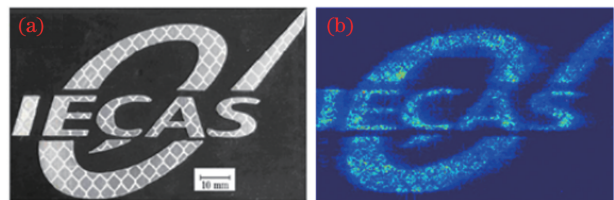


图6 单程远场衍射 SAIL 实验室演示成像^[54]。(a)测试靶标;(b)成像结果

Fig. 6 Experimental demonstration of SAIL based on one-way far-field diffraction in laboratory^[54]. (a) Testing target; (b) imaging result

上述介绍的 SAIL 都是在侧视条件下工作且采用光学外差接收结构,在调制、解调和处理方面对于光信号的振幅、偏振、频率、时间相位和空间相位存在非常苛刻的要求,相位受大气扰动、运动平台振

动、目标散斑、激光雷达系统本身等影响非常敏感,且存在成像视场小的缺点。为了降低难度,也有非相干聚束模式合成孔径激光成像雷达的体系结构建议,采用非相干处理的孔径合成不需要考虑光频的时间和空间相位同步,降低了实施难度和简化了硬件结构,但成像分辨率和接收灵敏度都有所下降,而且大气湍流的影响仍然存在。这些侧视合成孔径激光成像雷达系统在大气对回波相位的影响超过波长量级的情况下,方位向聚集差,采用PGA算法也显得非常有限。为了提高成像视场,中国科学院上海光学精密机械研究所提出了基于自由空间发射结构的直视合成孔径激光成像雷达,其优点是光学足迹大,且对大气等相位干扰具有自动消除的性能^[56-59]。其基本原理是:采用波前变换原理对目标投射两个同轴同心且偏振正交的光束,两光束共同经历大气湍流的传输路径,回波进行偏振的自差探测接收。由于本振光与信号光经历相同的平台振动、大气湍流、激光散斑等外界干扰,在自差接收后可以自动消除。2014年,该单位实现了实验室内10 m距离成像和室外1.2 km各种大气湍流环境下的成像实验^[57-58]。2017年又开展了3 km机载成像实验,实现了高反射率3M散射目标的机载合成孔径成像^[24],如图7所示;并在地面演示了6 km以上的角锥目标高分辨成像实验^[25-26]。2017年,中国科学院电子学研究所也实现了对高反射率3M散射目标的3 km的机载激光合成孔径成像^[27]。

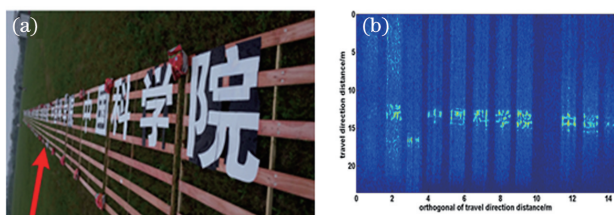


图7 机载直视SAIL的目标成像^[24]。(a)地面目标照片;
(b)SAIL二维聚焦像

Fig. 7 Airborne down-looking SAIL image^[24].
(a) Photograph of the target; (b) two-dimensional SAIL focus image

2.4 亟须解决的问题及发展趋势

总体来说,SAIL虽然已完成了实验室、机载等实验验证,但是要想实现应用转化,存在诸多亟须解决的科学和技术问题,主要表现在以下几个方面:

1) 合成孔径激光成像雷达需要一个特殊的发射和采样之间的同步系统以确保距离向聚焦信号的初始相位同步,不产生相位历程的干扰而严重影响

成像质量。因此无发射采样同步系统或者只需低精密密度发射采样同步系统的合成孔径激光成像雷达体系结构是一个具有高度实用价值的研究方向。

2) 阵列相干探测。单个相干探测器所能成像的视场角相对较小,需采用阵列相干探测器探测接收,进而扩大相干探测合成孔径激光成像雷达成像视场。

3) 全光处理成像。射频合成孔径雷达早期曾采用光学处理器,近些年来国际上仍在研究适合于航天使用的相干光学处理器,结合合成孔径激光成像雷达和光学处理为一体的全光合成孔径雷达是一个值得探索的方向。

4) 多种遥感方式相结合实现复合探测。合成孔径激光成像雷达发散角小、角分辨率高、电磁干扰能力强;而微波雷达搜索能力强、但对电磁干扰敏感,它们之间存在着互补性。采用微波和激光主动遥感相配合使用可以发挥更大的作用。

5) 探测通信一体化发展趋势。通过光学的大容量通信方式进行传输,将探测的数据实时高速传输回中央控制台,探索探测通信一体化技术具有重要的应用价值。

3 相干探测激光关联成像雷达

与传统激光成像雷达技术不同,激光关联成像雷达是建立在辐射场的高阶相干性理论基础之上,通过调控光场涨落和单像素探测器接收目标回波信号、结合计算重构方法获取目标的图像信息^[60-63]。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^[13-14,33-35]。目前,激光关联成像雷达主要有三种工作方式:1)窄脉冲直接探测激光关联成像雷达,采用窄脉冲的空间调制激光照明和回波信号强度探测模式^[18-19];2)电子外差探测激光关联成像雷达,采用长脉冲的时空二维调制激光照明和回波信号强度外差探测模式^[64-66];3)相干探测激光关联成像雷达,采用长脉冲的时空二维调制激光照明和回波信号光学相干探测模式^[20-22]。与前面两种体制相比,相干探测激光关联成像雷达在隐秘性和抗背景光干扰方面优势比较显著,且可以获取目标的微振动信息,可能是激光关联成像雷达未来几年的重点研究方向。

3.1 基本原理

相干探测激光关联成像雷达是一种结合关联成像物理原理和相干探测方法而发展起来的凝视成像技术^[20]。如图8所示,通过对激光进行时空二维调

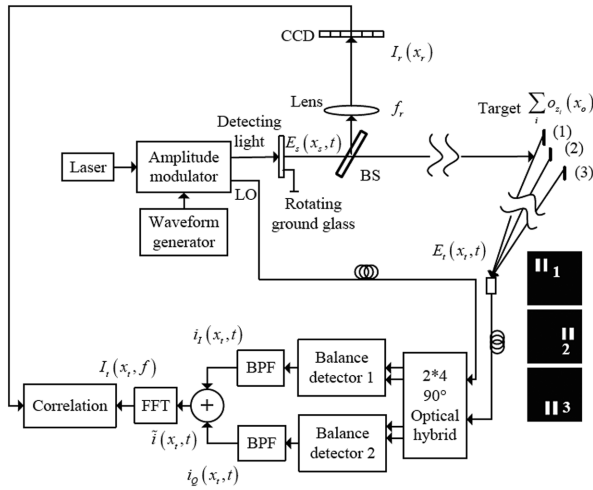


图8 相干探测激光关联成像雷达原理图^[20]

Fig. 8 Schematic of ghost imaging lidar via coherent detection^[20]

制,产生关联成像所需的赝热光场。赝热光场经分光片(BS)后分成两束,其中反射光束为参考光路,通过具备空间分辨能力的面阵探测器记录赝热光场强度分布;透射光路为探测光路,赝热光场辐射于待测目标上,目标回波信号通过光学接收系统并以光学相干探测方式进行测量和记录。通过参考光路所记录的赝热光场强度分布与目标回波信号的关联运算,便可以获取目标的空间图像、距离和速度等信息^[20]。值得强调的是,为了保证空间和时间调制的独立性,相干探测激光关联成像雷达时空光场调制方式有:1)时间上幅度调制,空间上相位调制或者幅度调制;2)时间上相位调制,空间上仅能幅度调制。此外,为了保证光场在空间分布上具备较高的对比度,在一个时间调制周期内应保证空间调制不变。

根据关联成像基本原理,相干探测激光关联成像雷达的图像重建过程可表示为^[20,60-61]

$$\Delta G^{(2,2)}(x_r, x_t, f) = \frac{1}{K} \sum_{s=1}^K [I_r^s(x_r) - \langle I_r(x_r) \rangle] \times I_i^s(x_t, f), \quad (3)$$

式中: K 为光场的空间调制次数; $I_r^s(x_r)$ 为参考光路第 s 次光场的空间强度分布; $\langle I_r(x_r) \rangle$ 表示光场空间强度分布的时间平均值; $I_i^s(x_t, f)$ 为探测光路第 s 次在空间位置 x_t 、时间频率 f 点处探测到的目标回波信号强度。

如图8所示,相干探测激光关联成像雷达的回波信号获取实际上是一种基于光场干涉原理的信号探测与数据处理过程。通过频率信号 $I_i^s(x_t, f)$ 与赝热光场强度分布的并行重构,我们不但可以获取目标图像信息,而且可以区分出目标的运动状态信

息。根据文献[20]的理论分析结果,基于运动目标多普勒频率测量所对应的关联成像结果为

$$\Delta G^{(2,2)}(x_r, x_t, f = f_{d_i}) \propto |A_{LO}|^2 \int dx T_{Z_{i,n}}(x) \times \text{sinc}^2 \left[\frac{D_s}{\lambda f_r} \left(x_r - \frac{f_r}{Z_{i,n}} x \right) \right], \quad (4)$$

式中: $f_{d_i} = 2v_i/\lambda$; $Z_{i,n} = Z_{i0} + v_i nT$; f_{d_i} 和 v_i 分别为第 i 个目标的多普勒频率和运动速度; Z_{i0} 为雷达系统发出的第1个脉冲时与第 i 个目标的距离; n 为第 n 个脉冲数; T 为脉冲周期。而基于目标距离频率谱测量所对应的关联成像结果为

$$\Delta G^{(2,2)}(x_r, x_t, f = f_{b_{i,n}}) \propto \frac{m^2}{4} |A_{LO}|^2 \times \int dx T_{Z_{i,n}}(x) \text{sinc}^2 \left[\frac{D_s}{\lambda f_r} \left(x_r - \frac{f_r}{Z_{i,n}} x \right) \right], \quad (5)$$

式中: $f_{b_{i,n}} = f_{d_i} + 2Z_{i,n}\beta/c$, β 和 c 分别为频率调制率和光速。从(4)式和(5)式可以看出:对于线性关联重建算法,相干探测激光关联成像雷达的空间分辨率受限于待测目标处光场的横向相干长度,即 $\Delta x_{i,n} = \lambda Z_{i,n}/D_s$,这个跟窄脉冲直接探测激光关联成像雷达一样,对应于成像雷达发射系统的衍射极限;但是通过压缩感知图像重建算法,利用目标的稀疏先验信息,其空间分辨率可以突破系统衍射极限的限制^[14]。而对应的目标距离和速度分别为

$$\begin{cases} Z_{i,n} = c(f_{b_{i,n}} - f_{d_i})/2\beta, \\ v_i = \lambda f_{d_i}/2 \end{cases}. \quad (6)$$

基于(4)式和(5)式的成像结果,我们可以判断出静止目标和运动目标,从而解决速度-距离耦合问题;同时结合(6)式可以获取各个目标的距离和速度信息。

3.2 技术特点

窄脉冲直接探测激光关联成像雷达采用时间飞行法进行测距测速,只需对光场进行空间调制和对目标回波信号进行强度探测,整个系统结构、光场调控和数据处理均相对简单。而相干探测激光关联成像雷达采用时间调制方式实现目标距离和速度信息的获取,同时需要对光场进行时空二维调制并对目标回波信号进行光场信息测量,整体雷达系统结构、光场调控和数据处理相对复杂。此外,为了保证相干探测的有效性,相干探测激光关联成像雷达的单次成像视场角 θ 和接收口径 D 需满足 $\theta \leq \lambda/D$ 。但是,当接收系统的有效通光口径相同时,与窄脉冲直接探测激光关联成像雷达相比,相干探测激光关联成像雷达具备以下优势特点:

1) 更好的抗背景光干扰能力。相干探测激光关联成像雷达的本征信号与背景光信号相关性极低,在背景光功率高于信号光功率4个数量级以上仍可以获取目标的高质量图像^[21]。

2) 更高的探测灵敏度。相干探测激光关联成像雷达采用长脉冲累积和脉冲压缩方式获取目标回波信息,探测的光功率灵敏度可达到 fW 量级。

3) 更强的信息获取能力。相干探测激光关联成像雷达不但可以获取目标的表面空间分布信息,还可以获取目标的距离、速度和微振动信息。

4) 良好的隐蔽性。相干探测激光关联成像雷达发射的是时空随机信号且辐照于目标上的信号光功率可以远远低于背景光功率,从而不易被对方目标发现。

3.3 近期主要研究进展

我国在相干探测激光关联成像雷达方面开展率先性的研究工作。2016年,中国科学院上海光学精密机械研究所将脉冲压缩技术、相干探测方法和激光关联成像结合起来,率先提出了相干探测激光关联成像雷达方案,从理论上分析了相干探测激光关联成像和解决多目标探测距离-速度耦合问题的可行性,并且通过数值模拟进行了验证,如图9所示^[20]。图9(a)给出了运动速度为0.1 m/s的目标1和1.0 m/s的目标2的多普勒频率与雷达系统

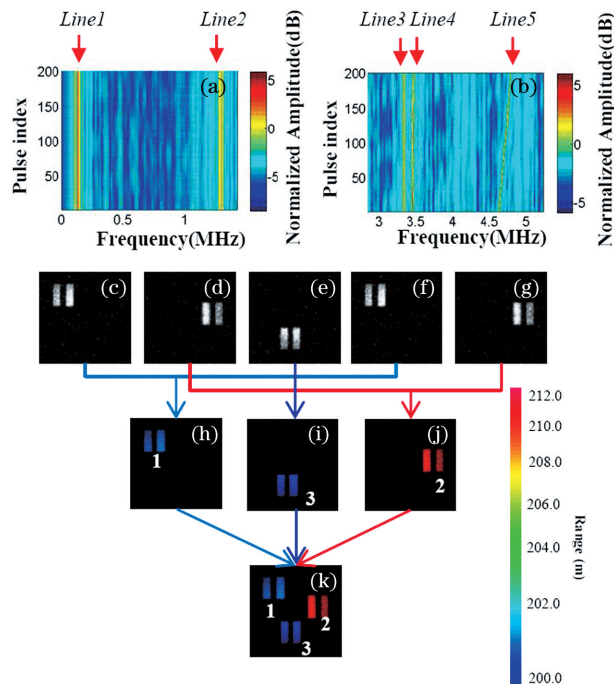


图9 运动目标相干探测激光关联成像数值模拟结果^[20]

Fig. 9 Simulation results of ghost imaging via coherent detection for moving targets^[20]

发射的脉冲数之间的关系,而图9(b)为静止目标3和运动目标1和2的距离-速度耦合频率与雷达系统发射的脉冲数之间的关系。可以看出:匀速运动目标的多普勒频率和静止目标对应的距离频率为固定值,不随雷达系统发射脉冲的前后顺序而发生变化,而运动目标的距离-速度耦合频率会随着雷达系统发射脉冲的前后顺序呈线性变化,且目标运动速度越快,线性变化率越大,这与点目标相干探测激光雷达测距测速性能一样。根据图9(a)和图9(b)的特征线与空间调制光场信息进行关联运算,所重构的对应结果见图9(c)~(g)所示。结合上面的重构结果,进而可以确定图9(c)和图9(f)属于运动目标1的图像,图9(d)和图9(g)属于运动目标2的图像,而图9(e)为静止目标3的图像,从而不但获取了静止目标和运动目标的图像信息,而且实现了静止目标和运动目标的分离并获取了对应目标的速度信息,解决了多目标距离-速度耦合问题。

2017年,研究人员理论分析了背景光对窄脉冲直接探测激光关联成像雷达、电子外差探测激光关联成像雷达和相干探测激光关联成像雷达成像质量的影响,其数值模拟结果如图10所示^[21]。图10(a)的结果表明,窄脉冲直接探测激光关联成像雷达要求辐照信噪比(信号光-背景光强度比值)大于10 dB才能获得较好的成像结果,而图10(b)和图10(c)所示的电子外差探测激光关联成像雷达和相干探测激光关联成像雷达在辐照信噪比分别为-20 dB和-30 dB条件下所获得的成像结果与窄脉冲直接探

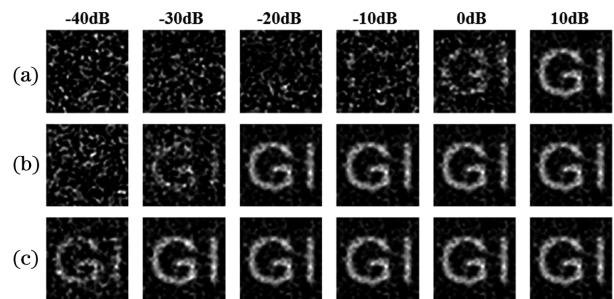


图10 辐照信噪比对不同探测模式激光关联成像雷达性能影响数值模拟结果^[21]。(a)窄脉冲直接探测激光关联成像雷达;(b)电子外差探测激光关联成像雷达;(c)相干探测激光关联成像雷达

Fig. 10 Simulation results of the influence of irradiation signal-to-noise ratio to ghost imaging lidar with different detection modes^[21]. (a) Narrow pulsed ghost imaging lidar; (b) heterodyne ghost imaging lidar; (c) ghost imaging lidar via coherent detection

测激光关联成像雷达在辐照信噪比为 10 dB 条件下的成像质量相当,从而验证了相干探测激光关联成像雷达具备较强的抗背景光干扰和隐秘探测能力。

基于图 8 的原理装置,中国科学院上海光学精密机械研究所搭建了如图 11(a)所示的探测波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 、调制时长为 $500 \mu\text{s}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 单模光纤接收下的相干探测激光关联成像实验装置,给出了接收信号光功率依次在 $5 \sim 1900 \text{ pW}$ 下的激光关联成像

结果,如图 11(b)所示。可以看出:在接收信号光功率为 5 pW 时,仍可以较好地重构出目标图像^[22]。此外,将待测目标与喇叭固定在一起,通过喇叭的振动传导到待测目标上而模拟目标的微振动情形,基于图 11(a)的相干探测激光关联成像实验平台,开展了微振动目标激光关联成像初步实验研究,如图 12 所示,验证了相干探测激光关联成像雷达可同时获取目标图像和微振动信息的能力^[67]。

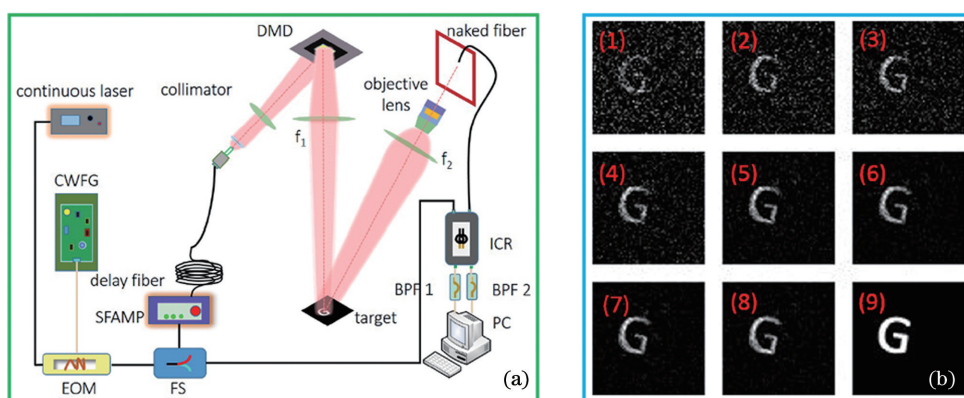


图 11 不同接收信号光功率下的相干探测激光关联成像实验结果^[22]。(a)相干探测激光关联成像实验结构图;(b)不同接收信号光功率下的关联成像重建结果

Fig. 11 Experimental results of ghost imaging via coherent detection in different receiving echo powers^[22].

(a) Experimental schematic of ghost imaging via coherent detection; (b) reconstruction results of ghost imaging in different receiving echo powers

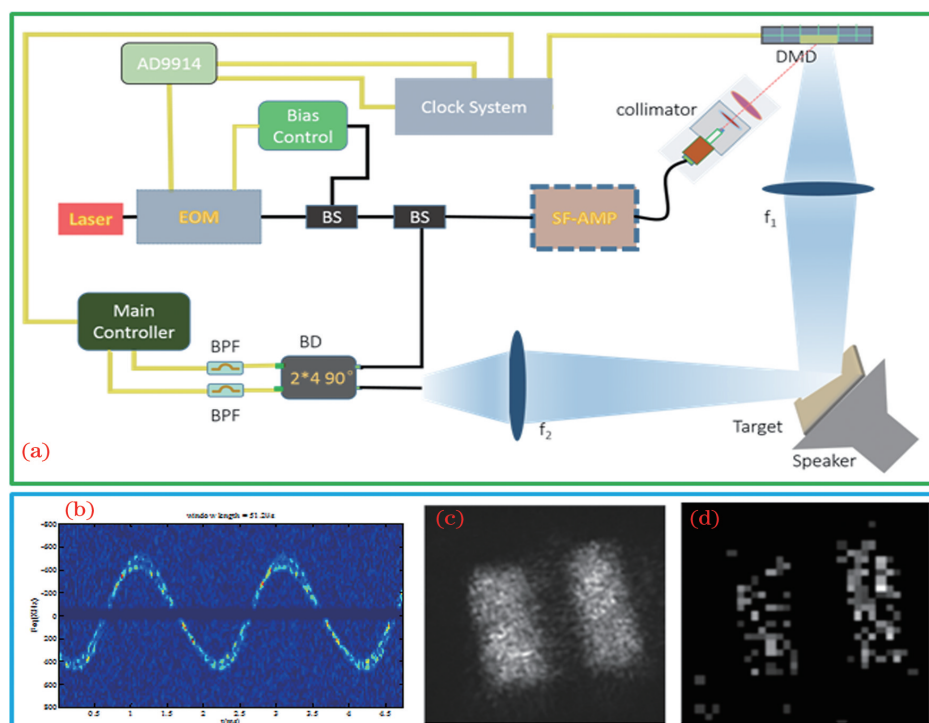


图 12 微振动目标激光关联成像实验结果^[67]。(a)实验结构图;(b)解译后的目标微振动信号;(c)测试目标;(d)重建结果

Fig. 12 Experimental results of ghost imaging for micro-vibration target^[67]. (a) Experimental schematic; (b) recovered micro-vibration of the target; (c) testing target; (d) reconstruction result

3.4 亟须解决的问题及发展趋势

总的来说,与窄脉冲直接探测激光关联成像雷达相比,相干探测激光关联成像雷达的研究目前较少。虽然已开展了一些相关的理论分析、数值模拟和初步实验验证,但是相干探测激光关联成像雷达要想往实际应用转化,存在诸多科学和技术问题亟须梳理和解决,主要表现在以下几个方面:

1) 单光子水平下的相干探测与高维信息携带机理。需厘清单光子水平回波信号与强本征信号的干涉机制,理论解释单光子水平回波信号携带目标的图像、距离、速度、振动等信息的能力。

2) 高维信息耦合机制与信息解译。需厘清相干探测机制下目标图像、距离、速度、振动等信息的耦合规律,探索具备强背景光混叠、高维信息相互耦合特性的回波信号解译方法,有效提取目标的高维信息。

3) 基于相干探测的弱信号检测与增强方法。在单光子水平回波信号条件下,需探索通过本征信号的放大作用并抑制系统噪声、进而实现高增益相干探测信号输出的新方法和新技术。

4) 高效、稳定的时空二维光场调制。探索基于超构材料或超构表面的新型光场调制器件,发展高能量利用率、MHz 调制速率的时空二维光场调控新方法。

5) 复杂大气环境下的信息解译与定量表征。需厘清湍流、散射等复杂环境引起信息解译产生偏差的物理机制,发展关联成像架构下的目标速度、距离、灰度分布等信息解译和定量表征方法。

6) 小规模阵列相干探测器。单个相干探测器接收目标回波信号时系统能量利用率(接收口径太小)和探测信噪比均较低,需加强 8×8 或者 16×16 的阵列相干探测器研制,提高相干探测激光关联成像雷达系统的探测信噪比和成像视场。

4 结束语

合成孔径激光成像雷达和激光关联成像雷达,作为近年来发展起来的两种较为新颖且研究较热门的单像素主动成像技术,经过近二十年的发展,在理论、信号处理与图像重建算法、实验验证与性能演示等方面均得到了较大的发展。以典型应用场景为牵引,开展典型应用示范演示验证和成果转化是下一步的发展方向。本文重点介绍了基于相干探测的合成孔径激光成像雷达和激光关联成像雷达的研究进展,初步探讨了其亟须解决的问题与发展趋势。对

于合成孔径激光成像雷达而言,与 SAR 相比,具有更高的成像分辨率以及目标精细识别能力;对于相干探测激光关联成像而言,与窄脉冲直接探测激光关联成像雷达相比,该技术能够获取的目标信息更多,且具备良好的隐蔽性和抗背景光干扰能力。基于相干探测的单像素激光成像雷达在无人驾驶、全天时定点监测、目标识别、要地防御等领域具有更好的应用前景,将会成为未来的一个重点研究方向。

参 考 文 献

- [1] Shapiro J H, Capron B A, Harney R C. Imaging and target detection with a heterodyne-reception optical radar [J]. *Applied Optics*, 1981, 20 (19): 3292-3313.
- [2] Mcmanamon P, Buell W, Choi M, et al. Laser radar: progress and opportunities in active electro-optical sensing [M]. Washington, D.C.: The National Academy Press, 2014.
- [3] Bashkansky M, Lucke R L, Funk E, et al. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain [J]. *Optics Letters*, 2002, 27 (22): 1983-1985.
- [4] Lucke R L, Rickard L J, Bashkansky M, et al. Synthetic aperture ladar (SAL): fundamental theory, design equations for a satellite system, and laboratory demonstration [R]. Defense Technical Information Center, 2002.
- [5] Beck S M, Buck J R, Buell W F, et al. Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(35): 7621-7629.
- [6] Buell W, Marechal N, Buck J, et al. Demonstration of synthetic aperture imaging ladar [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5791: 152-166.
- [7] Muller R A, Buffington A. Real-time correction of atmospherically degraded telescope images through image sharpening [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1974, 64(9): 1200-1210.
- [8] Liu L R. Synthetic aperture imaging ladar (V): imaging resolution and antenna aperture function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1408-1415.
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(V): 成像分辨率和天线孔径函数 [J]. *光学学报*, 2009, 29(5): 1408-1415.
- [9] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y. Compressive ghost imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95 (13): 131110.
- [10] 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.
- [11] Kirmani A, Venkatraman D, Shin D, et al. First-photon imaging[J]. *Science*, 2014, 343(6166): 58-61.
- [12] Pawlikowska A M, Halimi A, Lamb R A, et al. Single-photon three-dimensional imaging at up to 10 kilometers range[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11919-11931.
- [13] Zhao C Q, Gong W L, Chen M L, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(14): 141123.
- [14] Gong W, Han S. High-resolution far-field ghost imaging via sparsity constraint[J]. *Scientific Report*, 2015, 5: 9280.
- [15] 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.
- [16] Li X H, Deng C J, Chen M L, et al. Ghost imaging for an axially moving target with an unknown constant speed[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(4): 153-157.
- [17] Sun S, Gu J H, Lin H Z, et al. Gradual ghost imaging of moving objects by tracking based on cross correlation[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(22): 5594-5597.
- [18] Gong W, Zhao C, Yu H, et al. Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint [J]. *Scientific Report*, 2016, 6: 26133.
- [19] Sun M J, Edgar M P, Gibson G M, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12010.
- [20] Deng C J, Gong W L, Han S S. Pulse-compression ghost imaging lidar via coherent detection[J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 25983-25994.
- [21] Deng C J, Pan L, Wang C L, et al. Performance analysis of ghost imaging lidar in background light environment[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(5): 431-435.
- [22] Pan L, Deng C J, Gong W L, et al. Experimental demonstration of pulse-compression ghost imaging via coherent detection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11567: 115670S.
- [23] Krause B W, Buck J, Ryan C, et al. Synthetic aperture lidar flight demonstration [C] // *CLEO: 2011-Laser Science to Photonic Applications*, May 1-6, 2011, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2011: 1-2.
- [24] Lu Z Y, Zhou Y, Sun J F, et al. Airborne down-looking synthetic aperture imaging lidar field experiment and its flight testing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0110001.
- 卢智勇, 周煜, 孙建峰, 等. 机载直视合成孔径激光成像雷达外场及飞行实验[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0110001.
- [25] Li G Y, Lu Z Y, Zhou Y, et al. Far-field outdoor experimental demonstration of down-looking synthetic aperture lidar[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(8): 082801.
- [26] Li G Y, Sun J F, Zhou Y, et al. Attitude-error compensation for airborne down-looking synthetic-aperture imaging lidar[J]. *Optics Communications*, 2017, 402: 355-361.
- [27] Zhang K S, Pan J, Wang R, et al. Study of wide swath synthetic aperture lidar imaging technology[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 1-10.
- 张珂殊, 潘洁, 王然, 等. 大幅宽激光合成孔径雷达成像技术研究[J]. *雷达学报*, 2017, 6(1): 1-10.
- [28] Zhang A X, He Y H, Wu L G, et al. Tabletop X-ray ghost imaging with ultra-low radiation[J]. *Optica*, 2018, 5(4): 374-377.
- [29] Ferri F, Magatti D, Gatti A, et al. High-resolution ghost image and ghost diffraction experiments with thermal light[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(18): 183602.
- [30] Chan W L, Charan K, Takhar D, et al. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(12): 121105.
- [31] Liu H C, Zhang S. Computational ghost imaging of hot objects in long-wave infrared range[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(3): 031110.
- [32] Guo Y Y, He X Z, Wang D J. A novel super-resolution imaging method based on stochastic radiation radar array[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(7): 074013.
- [33] Gong W L, Han S S. Correlated imaging in scattering media[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 394-396.
- [34] Chen M L, Li E R, Gong W L, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints in real atmosphere[J]. *Optics and Photonics Journal*, 2013, 3(2): 83-85.
- [35] Erkmén B I. Computational ghost imaging for remote sensing[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, 29(5): 782-789.
- [36] Gong W L, Yu H, Zhao C Q, et al. Improving the imaging quality of ghost imaging lidar via sparsity constraint by time-resolved technique [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(12): 991.
- [37] Wang C L, Mei X D, Pan L, et al. Airborne near infrared three-dimensional ghost imaging LiDAR via sparsity constraint [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10

- (5): 732.
- [38] Mei X D, Wang C L, Pan L, et al. Experimental demonstration of vehicle-borne near infrared three-dimensional ghost imaging LiDAR [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 5-10, 2019, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2019: JW2A.7.
- [39] Liu X L, Shi J H, Sun L, et al. Photon-limited single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8132-8144.
- [40] Jakowatz C V Jr, Wahl D E, Eichel P H, et al. Spotlight-mode synthetic aperture radar: a signal processing approach[M]. Boston: Springer, 1996.
- [41] Ricklin J, Schumm B, Dierking M, et al. Synthetic aperture lidar for tactical imaging (SALTI) [R]. DARPA Strategic Technology Office, 2007.
- [42] Ricklin J C, Tomlinson P G. Active imaging at DARPA [J]. *Proceeding of SPIE*, 2005, 5895: 589505.
- [43] Buck J R, Krause B W, Malm A I R, et al. Synthetic aperture imaging at optical wavelengths[C] // Conference on Lasers and Electro-Optics/ International Quantum Electronics Conference, June 2-4, 2009, Baltimore, Maryland. Washington, D. C.: OSA, 2009: PThB3.
- [44] Gatt P, Jacob D, Bradford B, et al. Performance bounds of the phase gradient autofocus algorithm for synthetic aperture lidar [J]. *Proceeding of SPIE*, 2009, 7323: 73230P.
- [45] Crouch S, Barber Z W. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture lidar techniques [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24237-24246.
- [46] Barber Z W, Dahl J R. Synthetic aperture lidar imaging demonstrations and information at very low return levels [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(24): 5531-5537.
- [47] Gunter's Space Page. EAGLE [EB/OL]. [2021-03-08]. https://space.skyrocket.de/doc_sdat/eagle.htm.
- [48] Liu L R. Antenna aperture and imaging resolution of synthetic aperture imaging lidar [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7468: 74680R.
- [49] Zhou Y, Sun J F, Luan Z, et al. Aperture-synthesizing experiment of a down-scaled synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(12): 2446-2448.
周煜, 孙建锋, 栾竹, 等. 尺度缩小合成孔径激光成像雷达的孔径合成实验 [J]. *光学学报*, 2008, 28(12): 2446-2448.
- [50] Zhou Y, Yan A M, Xu N, et al. A multi-purpose SAIL demonstrator design and its principle experimental verification [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7468: 74680S.
- [51] Liu L R, Zhou Y, Zhi Y N, et al. A large-aperture synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its verification in laboratory space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900112.
刘立人, 周煜, 职亚楠, 等. 大口径合成孔径激光成像雷达演示样机及其实验室验证 [J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900112.
- [52] Liu L R. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 579-599.
- [53] Li F, Wu S Y, Zheng Y C, et al. Overview of the development of synthetic aperture lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 55-65.
李番, 邬双阳, 郑永超, 等. 合成孔径激光雷达技术综述 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(1): 55-65.
- [54] Wu J, Yang Z S, Zhao Z L, et al. Synthetic aperture lidar imaging with one-way far-field diffraction [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, 32(6): 514-518, 525.
吴谨, 杨兆省, 赵志龙, 等. 单程远场衍射合成孔径激光雷达成像实验室演示 [J]. *红外与毫米波学报*, 2013, 32(6): 514-518, 525.
- [55] Zhao Z L, Wu J, Su Y Y, et al. Three-dimensional imaging interferometric synthetic aperture lidar [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(9): 091101.
- [56] Liu L R. Principle of down-looking synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0920002.
刘立人. 直视合成孔径激光成像雷达原理 [J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0920002.
- [57] Luan Z, Sun J F, Zhi Y N, et al. Two-dimensional imaging experiment of down-looking synthetic aperture lidar under simulated far-field conditions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0710003.
栾竹, 孙建锋, 职亚楠, 等. 直视合成孔径激光成像雷达模拟远场条件下的二维成像实验 [J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0710003.
- [58] Luan Z, Sun J F, Zhou Y, et al. Down-looking synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its experiments over 1.2 km outdoor [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(11): 111101.
- [59] Lu Z Y, Zhang N, Sun J F, et al. Laboratory demonstration of static-mode down-looking synthetic aperture imaging lidar [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(4): 042801.
- [60] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W, et al. Quantum and classical coincidence imaging [J].

- Physical Review Letters, 2004, 92(3): 033601.
- [61] Cheng J, Han S S. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(9): 093903.
- [62] Angelo M D, Shih Y H. Quantum imaging [J]. Laser Physics Letters, 2005, 2(12): 567-596.
- [63] Shapiro J H, Boyd R W. The physics of ghost imaging[J]. Quantum Information Processing, 2012, 11(4): 949-993.
- [64] Yang X, Zhang Y, Yang C H, et al. Heterodyne 3D ghost imaging [J]. Optics Communications, 2016, 368: 1-6.
- [65] Pan L, Deng C J, Gong W L, et al. Influence of chirped-amplitude correlated imaging under incoherent detection[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1011001.
- 潘龙, 邓陈进, 龚文林, 等. 非相干探测模式下啁啾调幅关联成像影响因素研究 [J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1011001.
- [66] Pan L, Deng C J, Bo Z W, et al. Experimental investigation of chirped amplitude modulation heterodyne ghost imaging[J]. Optics Express, 2020, 28(14): 20808-20816.
- [67] Pan L. Research on chirped-amplitude modulation ghost imaging lidar[D]. Shanghai: Shanghai institute of optics and fine mechanics, Chinese academy of sciences, 2020: 96-105.
- 潘龙. 啁啾调幅激光关联成像雷达研究 [D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2020: 96-105.