

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

合成孔径激光雷达成像技术研究进展

徐晨, 晋凯, 魏凯

引用本文:

徐晨, 晋凯, 魏凯. 合成孔径激光雷达成像技术研究进展[J]. 光电工程, 2024, 51(3): 240007.

Xu C, Jin K, Wei K. Research progress of synthetic aperture ladar techniques[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 240007.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240007>

收稿日期: 2024-01-07; 修改日期: 2024-03-28; 录用日期: 2024-03-29

相关论文

远场合成孔径计算光学成像技术: 文献综述与最新进展

李晟, 王博文, 管海涛, 梁坤瑶, 胡岩, 邹燕, 张许, 陈钱, 左超

光电工程 2023, 50(10): 230090 doi: [10.12086/oe.2023.230090](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230090)

Wide-spectrum optical synthetic aperture imaging via spatial intensity interferometry

Chunyan Chu, Zhentao Liu, Mingliang Chen, Xuehui Shao, Guohai Situ, Yuejin Zhao, Shensheng Han

Opto-Electronic Advances 2023, 6(12): 230017 doi: [10.29026/oea.2023.230017](https://doi.org/10.29026/oea.2023.230017)

SAR实时成像光学处理器光机系统设计

赵洪强, 张星祥, 王夺, 毕国玲, 付天骄

光电工程 2022, 49(9): 210421 doi: [10.12086/oe.2022.210421](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210421)

基于双分支多尺度融合网络的毫米波SAR图像多目标语义分割方法

丁俊华, 袁明辉

光电工程 2023, 50(12): 230242 doi: [10.12086/oe.2023.230242](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230242)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.240007

合成孔径激光雷达成像 技术研究进展

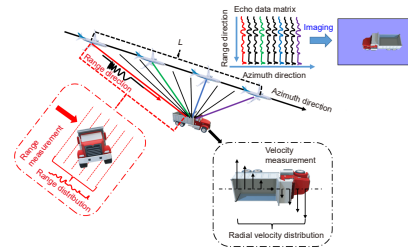
徐晨^{1,2}, 晋凯³, 魏凯^{3,4*}¹自适应光学全国重点实验室, 四川 成都 610209;²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;³浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310058;⁴极端光学技术与仪器全国重点实验室, 浙江 杭州 310058

摘要: 合成孔径激光雷达成像技术是一种能够突破光学系统衍射极限的主动光学成像技术, 其概念来自工作在微波波段的合成孔径雷达, 相比于合成孔径雷达, 合成孔径激光雷达具有成像速度快、成像分辨率高以及能获取符合人眼感知的图像的优势, 在远距离目标感知与识别中具有很高的潜在价值。本文从合成孔径激光雷达的工作原理出发, 回顾和梳理了合成孔径激光雷达的主要关键技术的主要进展, 包括合成孔径激光雷达的系统模型和基础理论、系统设计与架构、激光相位噪声抑制、运动补偿技术以及成像算法; 同时对国内外重要的外场实验进展进行了总结。最后探讨了后续实现工程化所需面对的困难和挑战。

关键词: 主动光学成像技术; 合成孔径激光雷达; 相干激光雷达; 计算成像

中图分类号: TN249; O439

文献标志码: A



徐晨, 晋凯, 魏凯. 合成孔径激光雷达成像技术研究进展 [J]. 光电工程, 2024, 51(3): 240007

Xu C, Jin K, Wei K. Research progress of synthetic aperture lidar techniques[J]. Opto-Electron Eng, 2024, 51(3): 240007

Research progress of synthetic aperture lidar techniques

Xu Chen^{1,2}, Jin Kai³, Wei Kai^{3,4*}¹ National Laboratory on Adaptive Optics, Chengdu, Sichuan 610209, China;² Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;³ College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;⁴ State Key Laboratory of Extreme Photonics and Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China

Abstract: Synthetic aperture lidar is an advanced active optical imaging technology that overcomes the diffraction limit of the traditional optical system. This technology is inspired by the working principles of synthetic aperture radar in the microwave band. Compared with synthetic aperture radar, synthetic aperture lidar has several advantages such as fast imaging speed, high resolution, and its images being similar to what the eye is used to seeing, thanks to its operation wavelength, which makes synthetic aperture lidar potentially valuable. This paper aims to provide a comprehensive review of the progress made in key technologies related to synthetic aperture lidar, including its system model and basic theory, system design and structures, laser phase noise suppression

收稿日期: 2024-01-07; 修回日期: 2024-03-28; 录用日期: 2024-03-29

*通信作者: 魏凯, kwei@zju.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

technology, motion compensation technologies, and imaging algorithms. Furthermore, some important outdoor experiments at home and abroad were summarized. At last, the difficulties and challenges for the subsequent implementation of engineering were discussed.

Keywords: active optical imaging technology; synthetic aperture lidar; coherent lidar; computational imaging

1 引言

合成孔径激光雷达 (Synthetic aperture lidar, SAL) 是一种分辨率不随接收口径变化的主动超分辨光学成像技术^[1]。SAL 的概念来自于微波成像技术中的合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR)^[2-6], 其工作原理是利用运动的雷达平台, 将沿运动轨迹不同位置孔径发射的相干脉冲信号接收并进行相干合成处理, 以实现等效大口径的成像效果。凭借光波的短波长和人眼的可感知性, 相对于工作在微波波段的 SAR, 它具有以下两个优势^[7-8]: 第一, 光波波长比微波波长短 3~4 个数量级, 在原理上, SAL 的成像速度和成像分辨率比 SAR 更快和更高; 第二, 光波段是人感知世界的主要信息来源, 物体在光学波段的反射特性更符合人眼所见, 因此 SAL 图像更易于解读和识别。美国海军实验室的 Lucke 曾指出^[9]: 以当前的望远镜接收口径水平来看, SAL 技术是能实现千公里距离上厘米级成像分辨率的唯一光学手段。另一个重要的概念是逆合成孔径激光雷达 (inverse synthetic aperture lidar, ISAL), 此处的“逆”并非指原理上的逆, 而是指雷达平台静止而目标运动这种情况, 除此之外 ISAL 和 SAL 并无本质区别。从历史发展的角度来看, 由于这两者具有技术共通性, SAL 和 ISAL 互相交织, 共同进步。因此, 在下文的讨论中不做特殊说明将不区分这两个概念。

对于 SAL 技术研究进展的分类梳理, 从不同的角度有着不同的呈现方式, 但是任何一种梳理方式都无法做到面面俱到、全面覆盖该领域所有研究方向, 因此。本文将从 SAL 系统技术研究路线的角度出发, 按照系统关键技术和外场实验两个大类进行阐述, 其中系统关键技术是 SAL 进行外场实验验证的基础和前期研究。在系统关键技术部分, 按照研究流程和技术实现顺序的角度, 从基础理论研究出发, 介绍 SAL 系统的硬件基础, 即系统设计及架构, 再梳理 SAL 系统激光相位噪声抑制方法, 以及运动补偿和成像算法层面的工作进展。最后对 SAL 技术发展现状进行总结, 并从作者的角度指明后续的研究方向。

2 合成孔径激光雷达成像原理及关键科学技术问题

在回顾和梳理 SAL 技术的研究进展之前, 首先介绍 SAL 的成像原理及其关键科学和技术问题。

2.1 成像原理

SAL 本质上是一种具备测距和多普勒测量能力的相干激光雷达系统, 因此本节将从测距和多普勒测量角度阐述 SAL 成像原理。SAL 原理如图 1 所示, 运动的激光雷达平台斜侧视目标, 并对观测目标持续发射相干的周期性调制激光信号, 同时采集从目标反射的回波信号。单个调制激光信号具备测距能力, 能获取目标反射系数沿雷达视线方向的距离分布, 该维度被称为“距离向”(range direction)。假设单个脉冲调制带宽为 B , 光速为 c , 测距分辨率可以表示为

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

这即是 SAL 的距离向分辨率。

对于相对运动的目标而言, 另一个独立于距离信息的维度是速度信息, 由于相对运动的存在, 目标中各点相对 SAL 存在速度差异。因此对目标反射系数沿径向速度的分布进行高精度测量可以给 SAL 提供另一维度的信息, 以获取二维图像。为避免和距离维信息耦合, 并获得较高的测速分辨率, 对连续多个脉冲进行相干积累实现对目标径向速度的测量。该维度被称为“方位向”(azimuth direction), 通常在实际物理空间近似表现为沿雷达平台运动方向, 在回波数据矩阵中表现为沿着脉冲间方向。该过程实际上利用了激光雷达的多普勒测量能力, 根据多普勒激光雷达测速原理, SAL 的方位向分辨率可以写为

$$\delta a = \frac{\lambda R}{2v_a T}, \quad (2)$$

其中: λ 表示激光载波波长, R 表示 SAL 相对目标的距离, v_a 表示 SAL 平台的切向速度, T 表示相干积累时间 (或合成孔径时间)。注意到式 (2) 与实孔径光学成像的分辨率公式类似, 其中 $2v_a T$ 对应传统成像中的口径大小, 即为 SAL 中的合成孔径长度, 对应图 1

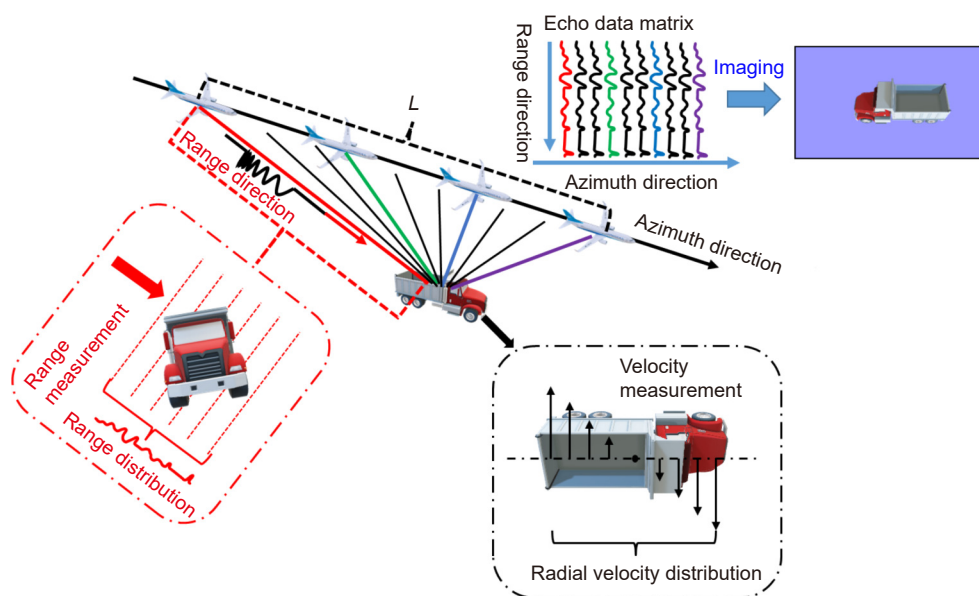


图 1 合成孔径激光雷达原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SAL principle

中的 L , 它仅与相对运动速度以及相干积累时间有关。因此 SAL 本质上是利用雷达平台与目标的相对运动实现等效大口径的成像效果。

2.2 SAL 面临的主要关键科学技术问题

SAL 的工作流程主要分为探测和成像反演两部分, 因此想要获取高分辨、高精细的图像, 主要需解决探测和成像反演两个层面的关键科学技术问题:

1) 系统相干性损失建模和补偿。相比于传统的测距和测速应用的相干激光雷达, SAL 需要更长的相干积累时间, 因此 SAL 对相干性有着更高的要求。然而, 激光器自身相位噪声、大气扰动、粗糙目标的运动等均会造成系统相干性损失, 影响系统成像性能。因此, 如何完备准确地对 SAL 系统的相干性损失机理进行建模并对其有效补偿是 SAL 系统设计和走向实用化过程中的关键科学问题之一。

2) 高精度运动补偿和成像。由于光波波长短, SAL 系统对微小非理想运动极为敏感, 微米量级的误差都将造成图像散焦甚至无法成像, 这对运动补偿技术的精度提出了很高的要求。同时, 大多数目标在光学波段可视为粗糙物体, 其图像更加稠密和连续, 难以有效提取用以估计运动误差的强孤立散射点, 传统方法应用困难^[10]。因此, 如何在 SAL 系统内实现高精度运动补偿和成像成为 SAL 系统走向实用化的另一项关键科学问题。

在 SAL 研究的进程中, 大多数研究均围绕这两

个问题展开, 未来所需攻克的研究方向也是基于对这两个问题的研究。

3 合成孔径激光雷达关键技术研究现状

3.1 系统模型与基础理论研究

由于光电子相关器件制约, 早期 SAL 系统并未完全采用 SAR 系统结构和模型, 而是利用光学全息理论和技术实现合成孔径^[11-15], 该方法需要在目标附近放置一个理想反射点作为参考光以及运动补偿的基准, 这使得其在实际应用中面临困难, 因此该类技术一直处于实验室中并未得到广泛应用。

随着相关技术的发展, 90 年代后陆续出现接近 SAR 结构 SAL 系统^[16-19], 尤其是 2002 年, 美国海军实验室的 Lucke 和 Bashkansky 等人^[9,20-21]首次实现了与 SAR 结构相同的 SAL 系统。此后 SAR 系统的理论模型便引入 SAL 相关研究中, 成为主流模型。然而, SAL 和 SAR 的差异不仅仅是波长差异这么简单, 两者在载波生成机理、信号调制过程、路径扰动及损失、目标散射特性以及回波信号探测过程等方面均有不同。针对这些问题, 国内外研究团队先后对此进行过分析和研究。

通常 SAL/ISAL 系统主要部署形式有地基、空基和天基三类, 其很大一部分应用场景需要经过大气介质, 因此传输路径中的大气湍流对 SAL 的影响研究

较多。2003 年, Karr^[22] 研究了大气湍流对 SAL 成像分辨率的影响, 研究表明, 当合成孔径长度小于大气相干长度的一半时, 大气湍流并不会对 SAL 的成像分辨率造成影响; 当合成孔径长度超过大气相干长度时, 增加合成孔径长度将不会获得分辨率的提升。2004 年, Lucke^[23] 用相位屏仿真对 Karr 的研究结论进行分析, 分析认为 Karr 的理论中采用的分辨率指标包含了图像对比度, Karr 理论中的分辨率大幅度降低在很大程度上是由对比度降低造成的, 分辨率并不会大幅衰减, 因此在图像指标选取上必须综合考虑分辨率和对比度。2017 年, Schumm 等人^[24] 在 Karr 与 Lucke 工作的基础上研究了大气湍流对 SAL 图像质量的综合影响, 分别对图像分辨率、图像对比度和系统点扩散函数的积分旁瓣比三个指标进行分析。2018 年, 美国空军实验室的 Rustowicz 等人^[25] 利用光线追踪技术研究了不同大气湍流强度对 SAL 成像及不同目标识别率的影响。2022 年, 中国科学院合肥物质科学研究院的艾则孜姑丽等人^[26] 利用多层动态相位屏仿真分析了动态大气湍流对回波信号时间相干性的影响, 进而为 ISAL 系统设计提供数据支撑。

在其他基础理论问题方面, 国内外亦有研究。2014 年, 蒙大拿州立大学的 Barber 等人^[27-28] 从信息论的角度分析了 SAL 系统最低探测极限, 并进行了实验验证, 理论分析和实验结果表明, SAL 成像灵敏度能够达到单像素单光子的水平。2015 年中国科学院上海光机所的刘立人团队^[29] 分析了激光线宽对相

位编码 SAL 系统成像质量的影响, 为相位编码 SAL 系统设计提供激光线宽选取标准。该团队对 SAL 系统中的时空散斑特征进行了大量分析工作^[30-33], 并基于分析结论提出一种基于波长特性的散斑抑制技术^[34]。西安电子科技大学的党文佳等人^[35] 针对粗糙目标对 SAL 系统的退相干效应进行了理论分析和仿真实验, 并指出目标粗糙表面的退相干效应是制约 SAL 系统实用化的瓶颈之一。

综上所述, 当前对于 SAL 系统中各类非理想因素传递过程和作用机制依然缺乏理论与实验的交叉验证, 这使得 SAL 系统设计中的误差分配难以进行, 进而导致 SAL 系统的可设计性较低, 需要进行大量实验测试, 费时费力。因此, 后续研究工作的重点之一在于如何建立完善且精确的误差传递模型和系统评价标准, 使得 SAL 系统的误差便于事先分配和控制, 为 SAL 工程化打下基础。

3.2 系统设计及架构

作为一种相干激光雷达, 目前的 SAL 系统主要分为调频连续波 (frequency modulation continuous wave, FMCW) 系统以及相位编码系统。作为 SAL 系统的架构和基础, 本部分将分别讨论这两种系统优缺点和研究现状。

3.2.1 调频连续波体制的合成孔径激光雷达系统

典型的 FMCW 激光雷达如图 2 所示, 调制激光器发射线性调频 (linear frequency modulation, LFM) 信

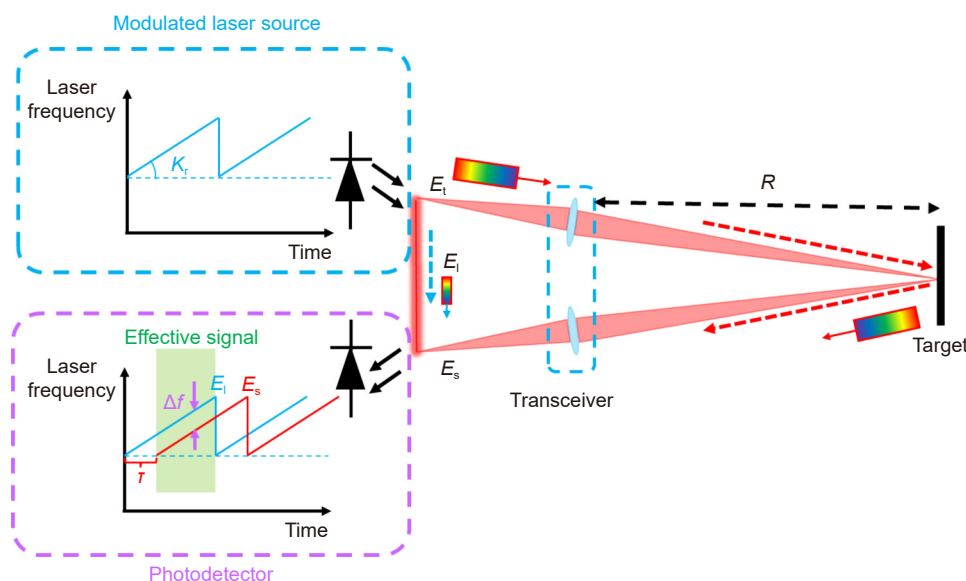


图 2 FMCW 激光雷达系统示意图
Fig. 2 Schematic diagram of FMCW Ladar

号, 并分为两路, 一路作为发射信号, 它的调频率为 K_r , 另一路作为本振信号。发射信号经过目标反射特性以及运动特性的调制后被接收光学系统接收与本振信号进行拍频, 产生拍频信号, 如图 2 中光电探测器中的拍频过程示意图。该过程将回波信号 E_s 与本振信号 E_l 的延时差 τ 转化为拍频信号的频率, 即 $\Delta f = \tau K_r$ 。该特性能大幅降低回波信号的带宽, 降低接收端电子学系统的带宽和采样率压力^[36]。FMCW 激光雷达的另一个优势是能够利用调谐激光器直接产生极大带宽的 LFM 激光信号, 这降低了激光信号调制的硬件需求。然而, FMCW 激光雷达输出的有效信号为回波信号 E_s 与本振信号 E_l 有效重叠的区域 (如图 2 光电探测器模块中的绿色区域所示), 随着目标距离的增加, 单个信号周期内的有效信号占比将下降, 这将造成回波能量利用率和测距分辨率的降低, 因此, 对于远距离目标, FMCW 激光雷达会存在性能损失。

2002 年, 美国海军实验室的 Lucke 等人^[9,20-21]首次实现了与 SAR 系统相似的 SAL 系统, 该系统如图 3 所示。该系统利用可调谐激光器产生 LFM 激光信号, 利用氰化氢 (HCN) 通道记录每个脉冲的起始位置, 利用参考通道记录发射激光信号的相位误差用于对回波信号的相位误差进行补偿。为实现精确的相位误差补偿, 在该系统中需要保证参考通道延时与目标通道延时一致, 对未知距离目标探测较为困难。

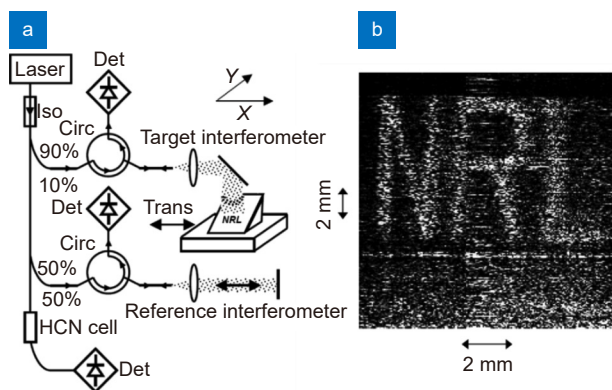


图 3 美国海军实验室的 SAL 系统和成像结果^[21]。

(a) 实验系统; (b) 成像结果

Fig. 3 The SAL system and imaging result of Naval Research Laboratory^[21]. (a) Experimental system; (b) Imaging result

为解决上述问题, 2005 年, 美国 Aerospace 公司的 Beck 等人^[37-38]设计并搭建了一套全光纤结构的 SAL 系统, 并提出自适应相位误差补偿技术, 该方法不再需要保证参考通道和目标通道的延时一致, 大幅

提升了系统的实用性。此外, 该系统使用了平衡光电探测器 (balanced photoelectronic detector, BPD) 进一步抑制了接收信号的共模噪声。该系统结构日后成为 SAL 研究的经典结构, 国内首套 SAL 原理验证实验便是以该实验系统为基础^[39-41], 实验系统和成像结果如图 4 所示。

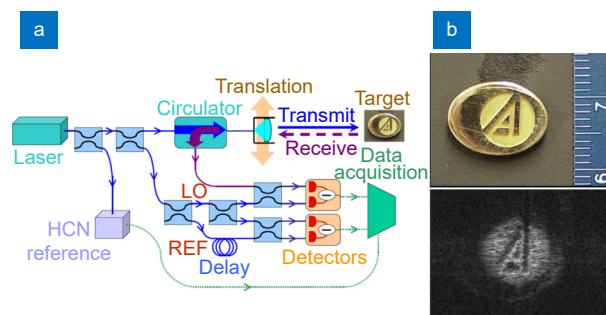


图 4 美国 Aerospace 公司的 SAL 系统和实验结果^[37]。

(a) 实验系统; (b) 成像结果

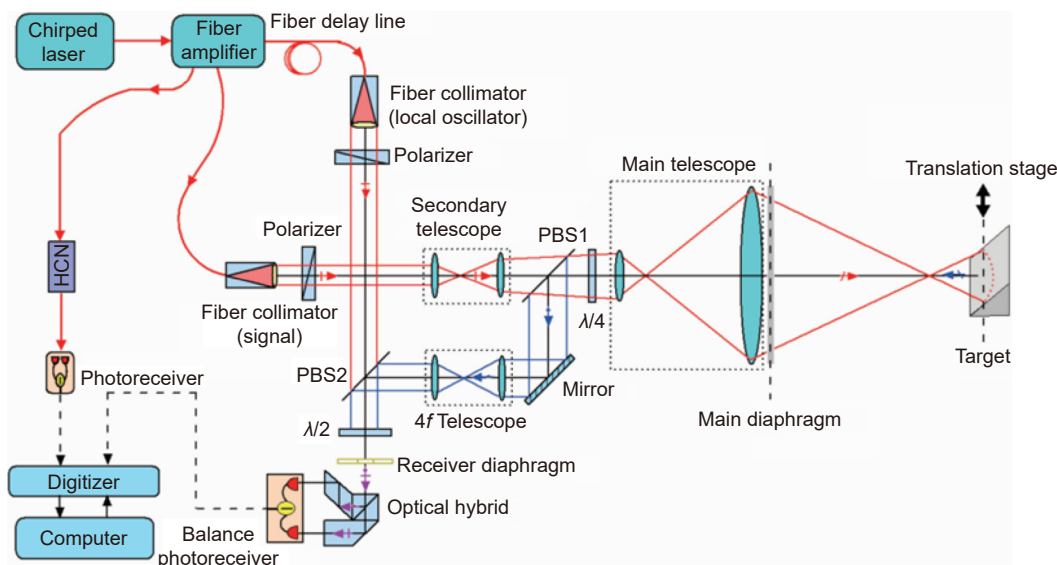
Fig. 4 The SAL system and imaging result of Aerospace Corporation^[37]. (a) Experimental system; (b) Imaging result

2011 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所的刘立人团队^[42]在先前工作的基础上搭建了一套基于空间光路的大口径 SAL 系统, 如图 5 所示。该系统含有较多的优化设计。其中, 使用四分之一波片和偏振分束器实现相较于环路器更高的发射隔离度; 此外, 该系统接收通道的 4f 望远镜和主望远镜构成回波空间二次相位补偿光路, 发射通道的次级望远镜和主望远镜构成近距离模拟附加装置, 以实现在近距离处模拟远场成像的效果。

随着光电子学技术的发展, 电光调制技术被用于 FMCW 体制的 SAL 系统, 用于产生高频率线性度的 LFM 激光信号^[43]。2016 年, 中国科学院电子学研究所的吴一戎团队设计并搭建了基于 I/Q (in-phase and quadrature) 电光调制器架构的 ISAL 系统^[44], 并开展了一系列公里级成像实验^[45-51]。系统结构如图 6 所示, 该系统器件全部由商用光通信组件构成, 工艺成熟, 成本较低。由于电光调制生成的 LFM 激光信号线性度高, 因此系统中无需增加参考通道对调制非线性产生的相位误差进行补偿。凭借这些优势, 该系统成为近年来 SAL 领域主流系统之一。

3.2.2 相位编码体制的合成孔径激光雷达系统

相较于 FMCW 系统, 基于相位编码的 SAL 系统具有探测信噪比更高、性能不受探测距离影响的优点, 同时还具备实现通感一体化的能力, 但对电子学系统带宽要求较高。随着电子技术的发展, 相位编码激光

图 5 中国科学院上海光机所的大口径 SAL 系统^[42]Fig. 5 The SAL system with large aperture in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS^[42]

雷达系统在学术界受到了关注。典型的相位编码激光雷达系统如图 7 所示, 激光源输出两路信号, 一路进入调制器, 加载相位编码信息; 另一路成为本振光, 用于解调回波信号, 最后通过脉冲压缩获取信号的距离向信息。

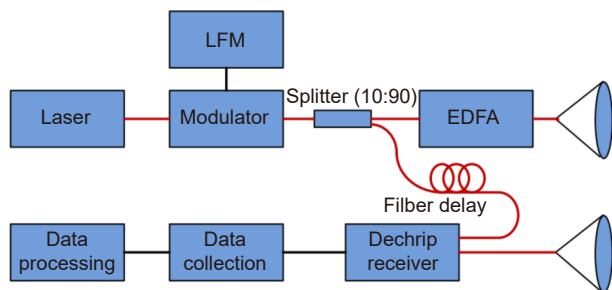
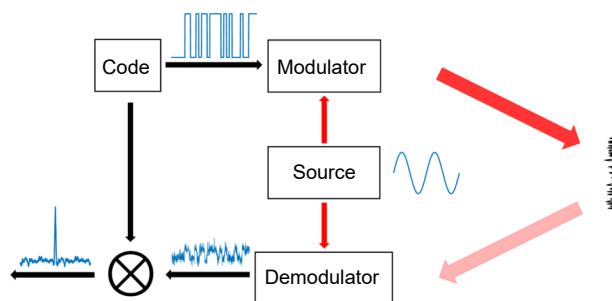
图 6 基于电光调制的 FMCW-SAL 系统^[44]Fig. 6 FMCW-SAL system based on electro-optical modulation^[44]

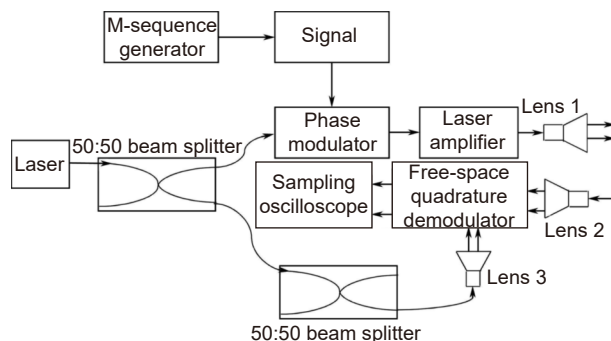
图 7 相位编码激光雷达原理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of phase-code ladar

2011 年洛克希德-马丁相干技术公司^[52]开展了机载相位编码 SAL 成像实验, 为实现 2 cm 分辨率, 信

号带宽设置为 7 GHz, 在正交接收下设置 ADC (analog to digital converter) 采样率达 8 GHz, 编码码型为伪随机码, 具体系统结构未公布。此后洛马公司未披露更多有关 SAL 实验的报道或内容。

此后国内相关研究团队对此开展了大量研究工作。中国科学院上海技术物理研究所于 2016 年完成了 M 序列相位编码 SAL 设计仿真^[53], 并于 2017 年实现了对目标的成像^[54], 系统设计如图 8 所示, 该系统设计方案成为了相位编码 SAL 的主流方案。基于中国科学院上海技术物理研究所的方案, 上海交通大学的张增辉团队^[55-57]进行了相位编码 SAL 成像实验, 并取得一系列成像结果。2022 年, 中国科学院空天信息创新研究院的李道京团队^[58]实现了大斜视角下相位编码 SAL 对运动点目标的成像。

图 8 中国科学院上海技术物理研究所的相位编码 SAL 系统^[54]Fig. 8 The phase-code SAL system in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS^[54]

基于上述研究工作, 中国科学院光电技术研究所的宋岸鹏等人^[59]针对传统系统复杂度高的问题开展了优化设计, 提出了基于副载波调制的单边带相位编码 SAL 系统, 其结构如图 9 所示, 该系统能在不增加系统带宽及采样速率的情况下仅通过实采样实现对拓展目标的高分辨成像。

综上所述, 当前随着光电子技术的发展, SAL 体制结构也从单一波形的 FMCW 转向更为灵活的相位编码, 灵活波形调控能力也将使 SAL 系统不再功能单一化, SAL 硬件系统将能实现测距、测速、微动测量、SAL 成像以及通感一体化, 为多维度信息感知提供硬件基础。

3.3 运动补偿

根据 SAL 成像原理, 合成孔径过程是通过方位向相干积累实现的, 雷达与目标的非理想相对运动将在方位向引入相位误差, 影响相干积累, 造成图像的方位向散焦。这一问题在波长更短的光学波段更为严重, 平台或者目标的微小振动也将影响成像质量。因此, 不能简单地将 SAR 运动补偿手段应用于 SAL 系统中, 必须研究适用于 SAL 的运动补偿方法。目前, SAL 领域主流的运动补偿技术路线可以分为两大类: 一类是基于数字信号处理的运动补偿方法, 这类方法通过对回波数据进行处理, 估计相位误差并进行补偿; 另一类是通过干涉测量的方式测量相位误差并进行补偿。下面分别对这两类方法的主要研究进展进行回顾和梳理。

3.3.1 基于数字信号处理的运动补偿方法

在实际应用中, SAL 系统中的非理想运动主要可

以分为来自目标相对雷达的整体非理想刚性运动和微小振动, 这两类误差的补偿方式有所不同, 下面分别进行讨论。

1) 刚性运动误差补偿

通常, 刚性运动误差会引入越距离单元徙动和脉冲间初相误差。实际上, 相比于 SAR, SAL 成像时间非常短, 距离徙动并不明显, 因此这块研究主要集中在脉冲间初相误差补偿方面。

早期的 SAL 系统初相误差补偿方法主要是 SAR 领域中常用的相位梯度自聚焦 (phase gradient autofocus, PGA) 算法^[60,61]、时频分析法^[62]、CLEAN 算法^[63]等。其中 PGA 算法和其改进方法凭借其适应能力和补偿性能被广泛应用于 SAL 领域^[64-66]。PGA 算法要求图像中存在孤立强散射点, 这在微波成像中容易实现。然而在光学波段, 绝大多数目标是粗糙的, 这使得 SAL 图像更加连续均匀, 很难寻找到孤立强散射点。因此 PGA 方法在 SAL 运动补偿中性能受限。针对不存在强散射点的应用场景, 中国科学院空天信息创新研究院的宋子奇等人^[67]提出了相位梯度矩阵自聚焦 (phase gradient matrix autofocus, PGMA) 方法, 其实验结果如图 10 所示。

除 PGA 类方法以外, 基于参数模型的 SAL 运动补偿方法也备受关注。2015 年, 西安电子科技大学的徐刚等人^[68]提出一种联合误差估计算法, 以图像熵为条件同时估计平动和转动参数, 减小残余误差影响。基于此, 中国科学院光电技术研究所的刘盛捷等人^[69]于 2018 年提出一种基于 Nelder-Mead 单纯形法的联合补偿算法, 通过 Nelder-Mead 单纯形法搜索运

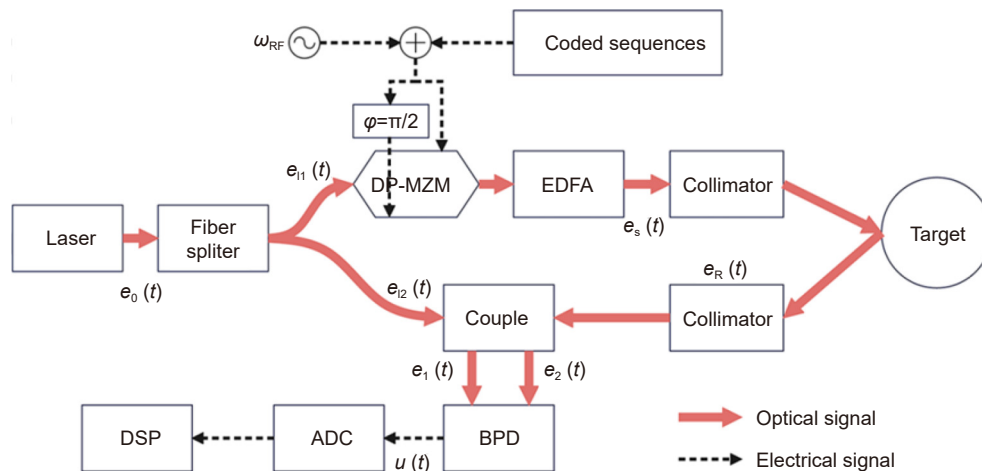


图 9 中国科学院光电技术研究所的相位编码 SAL 系统^[59]

Fig. 9 The phase-code SAL system in Institute of Optics and Electronics, CAS^[59]

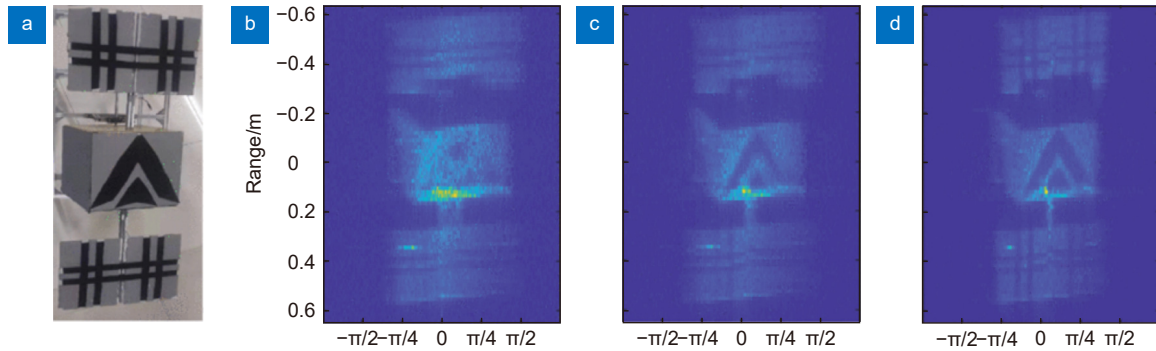


图 10 PGMA 实验结果^[67]。(a) 成像目标; (b) 直接 FFT 结果; (c) PGA 聚焦结果; (d) PGMA 聚焦结果

Fig. 10 Experimental results of PGMA algorithm^[67]. (a) Photography of the target; (b) Image formatted by ordinary FFT; (c) Image autofocused by PGA; (d) Image autofocused by PGMA

动参数补偿平动、转动和模型误差, 再利用拟牛顿法补偿残余误差, 其中针对转动角速度估计的相对误差可以控制在 $\pm 4\%$ 以内; 此后该课题组的李建等人于2021年提出利用粒子群优化算法求解参数模型^[70], 进一步控制误差估计精度在 $\pm 0.4\%$ 内; 后续又提出一种自适应约束运动参数估计算法^[71], 将估计结果作为最终输出的评判条件, 避免参数估计结果偏离真值。2023年, 北京跟踪与通信技术研究所的阮航等人^[72]针对回波信号可近似为多分量线性调频信号的特点, 提出了一种基于Radon-Wigner变换的快速成像算法, 估计出信号参数后无需进行瞬时多普勒成像, 运算量大幅降低。2023年, 西安电子科技大学的尹红飞等人^[73]提出了一种基于脉内多普勒补偿和残差视频相位校正的星载高速运动目标ISAL成像算法, 仿真结果表明, 该方法可有效抑制目标高速运动导致的距离像主瓣展宽。

2) 振动误差补偿

振动分量相较于刚性运动分量较小, 但由于激光波长只有微米量级, 所以SAL系统对振动十分敏感。对于远距离目标而言, 振动分量参数估计难度较大, 采用参数估计方法实现误差补偿较为困难, 非参数化方法只需基于回波数据进行处理。

2013年, 阮航等人^[74]将PGA和SCA结合, 解决非合作目标相位误差严重的问题, 首先利用SCA对相位误差粗略补偿, 再利用PGA进行精细补偿, 仿真结果验证了该方法的有效性。2016年, 中国科学院上海技术物理研究所的张鸿翼等人^[75]针对SAL平台振动问题建立了振动相位误差多项式模型, 提出利用遗传优化算法以锐化函数作为适应度函数估计相位误差多项式不同阶系数。2019年, 中国科学院空

天信息创新研究院的李明磊等人^[65]开展了大随机振动相位误差下的SAL成像实验, 利用PGA多次处理回波数据获得了高分辨图像。同年, 中国科学院空天信息创新研究院的宋子奇等人^[45]提出一种针对卫星目标的微小振动相位误差非参数化估计的自聚焦方法, 通过选取两个位于不同方位的特显点并利用PGA估计各自的相位误差, 再联立方程解得共模分量和差模分量, 图11为实验结果。

3.3.2 基于干涉的运动补偿方法

基于数字信号处理的运动误差估计方法通常需要利用较多距离单元的数据来做计算以保证误差估计精度, 但SAL成像累积时间通常较短, 所能获取的数据量有限, 累积时间较长, 相对转角过大, 误差累积量也大, 运动误差补偿更加困难。干涉测量技术可以精确获取信号相位, 在运动误差相位测量中具有独特的优势。

1974年, Graham首次提出将干涉测量技术应用到SAR成像系统^[76]以获取地面高程信息以及目标运动参数等信息。2014年, 中国科学院上海光学精密机械研究所的刘立人提出一种基于直视SAL的自干涉SAL成像原理^[77], 图12是直视SAL的一种具体结构。直视SAL与传统意义上的SAL在原理上有所差异, 本质上是一种利用信息光学方法, 利用波前调控实现等效合成孔径效果的超分辨成像技术。从原理上看, 它采用波前变换方式对目标投射两个同轴同心且偏振正交的光束, 这两个光束在沿运载平台运动的正交方向上具有曲率相同但是弯曲方向相反的波前。在探测时, 两束光束同时发出, 同时接收, 在接收机内完成对两束光的偏振分离, 并对这两束光进行自干涉操作, 即内差处理, 最后通过算法反演实现合成孔径成像。其中, 两束正交偏振光经过相同路径, 路径

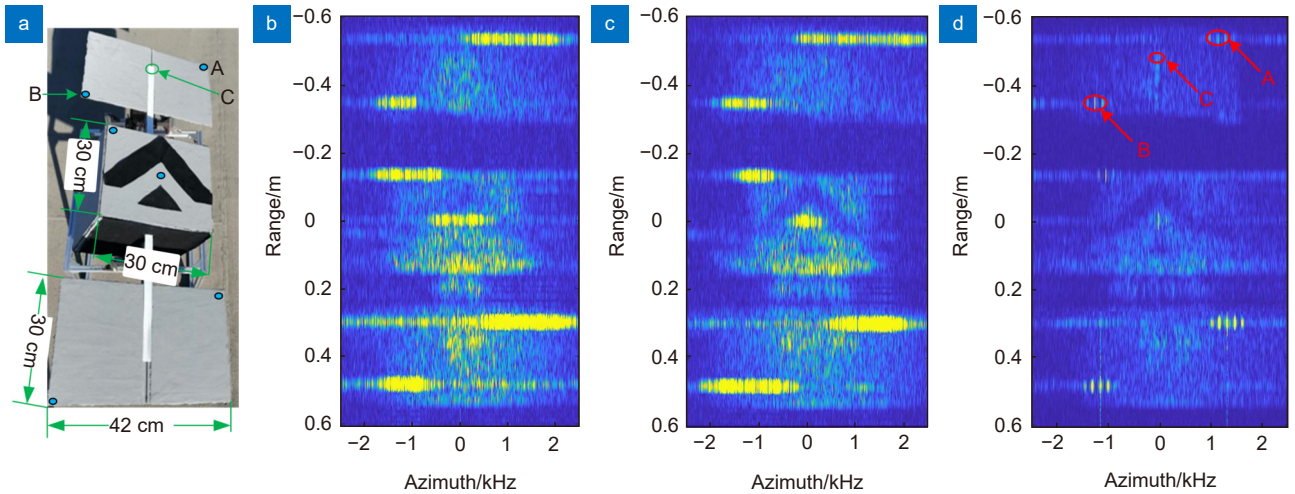


图 11 卫星微小振动补偿实验结果^[45]。(a) 实验目标; (b) 未补偿结果; (c) PGA 补偿结果; (d) 所提方法的补偿结果
Fig. 11 The experimental results of micro-vibration error compensation^[45]. (a) Photography of the satellite model; Image formatted (b) Without phase error compensation; (c) By method using PGA algorithm; (d) By using the proposed algorithm

包含大气扰动以及平台和目标相对运动影响, 内差处理使得两束光中的大气扰动、相对运动误差相互抵消, 因此在消除运动误差影响的同时也消除了大气扰动的影响。然而, 该方法对波前控制有着较高的要求, 此外, 对于微弱回波, 内差过程相对于外差而言存在增益受限问题, 影响作用距离。

中国科学院空天信息创新研究院的李道京团队针对干涉 SAL 技术研究进行了大量工作。2014 年马萌等人^[78]研究了振动情况下的机载 SAL 成像处理技术, 提出基于顺轨双探测器的机载 SAL 成像处理方法, 通过两个探测器回波信号的干涉相位估计目标振动速度, 从而计算得到振动引入的斜距进行补偿, 该研究

基于严格的顺轨运动模式假设, 但真实目标的运动很难满足该条件。针对该问题, 2016 年, 杜剑波等人^[79]提出了一种基于正交基线干涉的振动相位误差估计和成像处理方法, 图 13 是系统结构示意图, 三个接收望远镜形成的基线相互垂直, 通过测量振动误差相位从而得到振动速度信息, 在慢时间内积分得到斜距误差用于误差补偿。

2018 年, 针对 ISAL 目标振动误差补偿问题, 李道京团队的胡烜等人^[80]提出了一种多通道系统结构的 ISAL 目标振动相位误差估计与成像方法, 当目标速度矢量与基线不平行时, 交轨分量引入的距离变化相位差会干扰顺轨误差的提取, 针对该问题李道京团

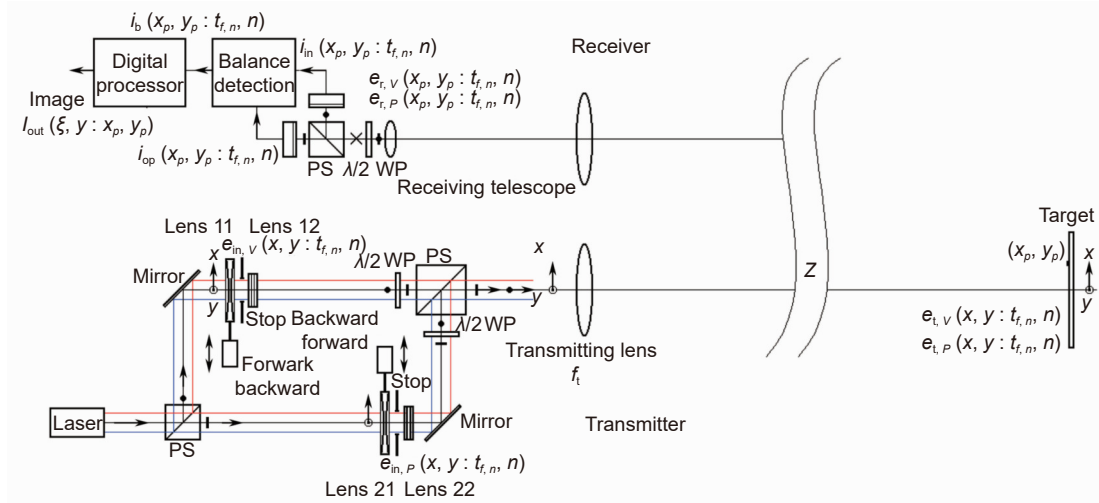


图 12 自干涉直视 SAL 示意图^[77]
Fig. 12 Schematic diagram of self-interferometer SAL^[77]

法补偿回波信号中的激光相位噪声, 仿真结果初步证明了该方法的有效性。2022 年, 高敬涵等^[85]对该技术进行扩展, 提出了发射参考通道 (TRC) 和本振参考通道 (LORC) 联合补偿方法, 并对室外远距离 (5.4 km) 静止合作目标进行测距实验, 实验验证了该方法在实际大气环境中的有效性, 结果如图 15 所示。

2022 年, 中国科学院空天信息创新研究院的吴谨团队通过外场试验验证了级联生成相位方法 (concatenately generated phase, CGP) 在 FMCW 相干激光雷达上的可行性^[86-87]。CGP 方法最早被用于补偿频域反射干涉仪中相位噪声^[88-89], 提升其探测距离和分辨率, 该方法通过马赫-曾德尔干涉仪结构的参考

通道记录本振激光信号的相位噪声, 应用插值与求和方法对回波信号的相位噪声进行估计和补偿。对静止角反射器的测量结果表明, 在长距离 (12 km 和 19.5 km) 大气传播条件下, CGP 方法能有效地补偿 FMCW 激光雷达中的激光器相位噪声。在 12 km 目标测距实验中, 强回光水平下测量结果为 12013.905 m, 测距分辨率为 2.4 cm, 在弱回光水平下测量结果为 12013.920 m, 测距分辨率为 2.5 cm。

2023 年, 中国科学院空天信息创新研究院的默迪等人^[90]提出了一种数字相干探测方法, 以突破相干长度对相干激光雷达检测范围的限制。该方法利用双通道马赫-曾德尔干涉仪记录激光相位噪声, 并通过系统观测矩阵的广义逆算法, 快速重构激光相位噪

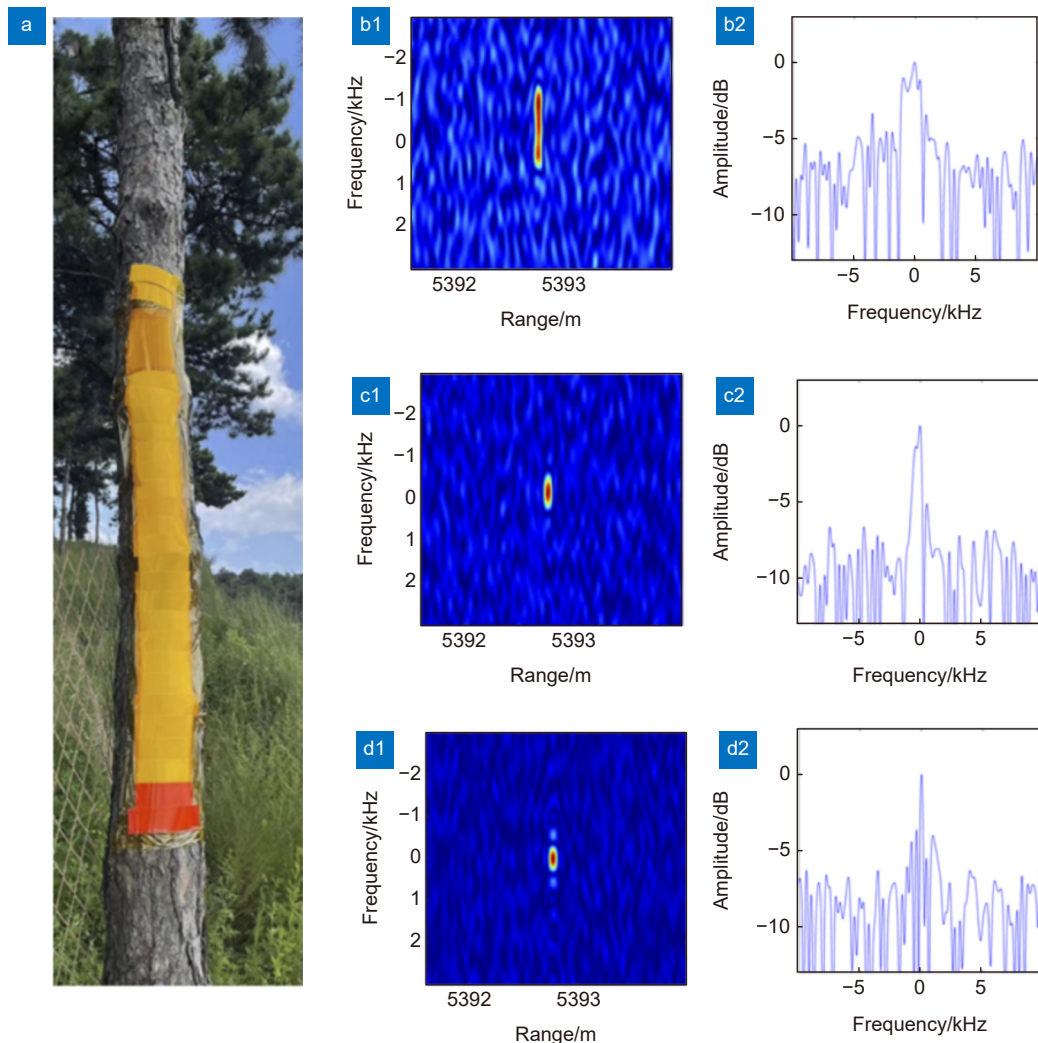


图 15 发射参考通道和本振参考通道补偿实验结果^[85]。(a) 目标实物图; (b) 补偿前的距离-多普勒域成像结果;

(c) 发射参考通道补偿结果; (d) 发射参考通道与本振参考通道联合补偿结果

Fig. 15 Correction and compensation effect of TRC and LORC^[85]. (a) Photo of the target; (b) Range-doppler domain imaging results before compensation; (c) Range-doppler domain imaging results after TRC correction; (d) Range-doppler domain imaging results after TRC correction and LORC compensation

声, 用于补偿目标回波中的激光相位噪声, 降低激光的等效线宽, 从而有效克服激光相干长度的限制。光纤内实验表明, 该方法即使在光程差超过相干长度的 1000 倍时, 也能产生稳定的、高质量的拍频信号, 实验中等效的激光线宽被压缩了 10^5 倍。实验结果如图 16 所示。

综上所述, 目前针对 SAL 系统的激光相位噪声抑制技术的研究尚处于初期阶段, 主要方法是利用辅助干涉仪测量激光本振相位噪声并利用算法重构回波相位噪声。然而, 这类方法的补偿精度依赖于辅助干涉仪的延时差的精度, 实际应用中, 环境温度波动、平台振动等因素均会造成辅助干涉仪延时差的偏移, 导致补偿效果下降, 因此如何平衡相位噪声补偿方法的精度和稳定性是后续一项重点研究方向。此外, 针对运动扩展目标的 SAL 成像的相位噪声补偿结果尚未见报道, 相位噪声补偿技术在实际 SAL 成像场景下的应用能力缺乏直观的实验结果支撑, 这也是后续所要研究的问题。

3.5 成像算法

成像算法是 SAL 信号处理的最后一步, 也是决定 SAL 系统能否准确成像的关键一步。由于 SAL 原理与 SAR 类似, 因此 SAL 成像算法大部分都借鉴自

SAR, 例如距离-多普勒 (Range-Doppler, RD) 算法^[2,91]、后向投影 (Back-Projection, BP) 算法^[92]等。然而这类传统方法所成图像与光学图像有明显差异, 表现为强散斑特征, 降低了图像的可读性。该问题的出现主要有如下三个原因^[93]: 第一, 目标的后向散射特性在光学波段和微波波段截然不同, SAR 图像通常表现为稀疏点云特征, 而目标的光学散射特征则更为连续, 建立在散射中心理论的 SAR 成像算法不一定适用于 SAL; 第二, 传统 SAL 成像技术中常用的傅里叶变换方法是一种最小二乘估计, 该过程会放大噪声并产生过拟合现象, 导致图像质量退化; 第三, 传统的 SAL 成像算法均是对目标的复反射系数分布进行估计, 最后对其取模方获得目标的反射率分布进而成像, 然而绝大多数目标在光学波段下是粗糙的, 这也意味着在传统成像算法下 SAL 中每一个像元都是由大量具有随机相位的阵元叠加而成, 因此造成了图像的散斑。

为解决上述问题, 2016 年美国空军实验室的 Pellizzari 等人^[93-94]将计算成像框架引入 SAL 成像领域, 提出了一种基于贝叶斯估计的 SAL 成像算法, 称为基于模型的迭代重构 (model based iterative reconstruction, MBIR) 算法。该方法通过建立复反射

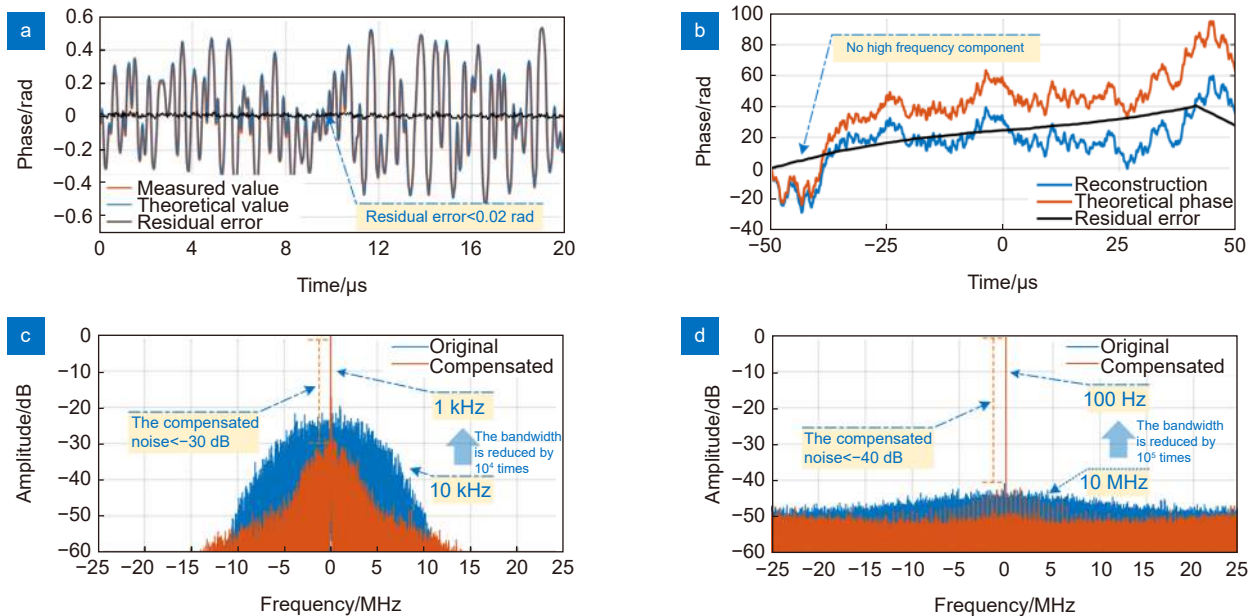


图 16 激光相位噪声测量与补偿结果^[90]。(a) 相干探测信号相位的测量值和理论值; (b) 激光相位噪声的估计结果;

(c) 高斯线宽激光相位噪声补偿结果; (d) 洛伦兹线宽激光相位噪声补偿结果

Fig. 16 Measured and compensated results for laser phase noise^[90]. (a) Comparison of the measured and theoretical values for the phase of the heterodyne signal; (b) The estimation results of the laser phase noise; (c) The compensation results with Gaussian linewidth; (d) The compensation results with Lorentz linewidth

系数分布、反射率分布和观测数据之间的联系, 同时利用 Q 广义高斯马尔可夫随机场 (q-generalized Gaussian Markov random field, q-GGMRF) 作为反射率分布的先验模型, 从而直接对复反射系数的方差进行估计。该方法所重构出的 SAL 图像具有较好的散斑和噪声抑制能力。

2022 年, 在 Pellizzari 工作的基础上, 中国科学院光电技术研究所的徐晨等人^[95]提出了一种改进的 MBIR 算法, 该方法针对原有 MBIR 方法模型复杂度和计算效率方面进行优化, 提出了改进的 MBIR 算法 (MMBIR), 仿真和 6.9 km 外场实验均验证该算法的有效性, 算法成像仿真结果如图 17 所示。然而, 这类基于模型的成像算法需要更多的计算资源以充分利用回波信号中的信息, 随着算力的提升并结合机器学习方法, 相信这类方法会得到广泛应用。

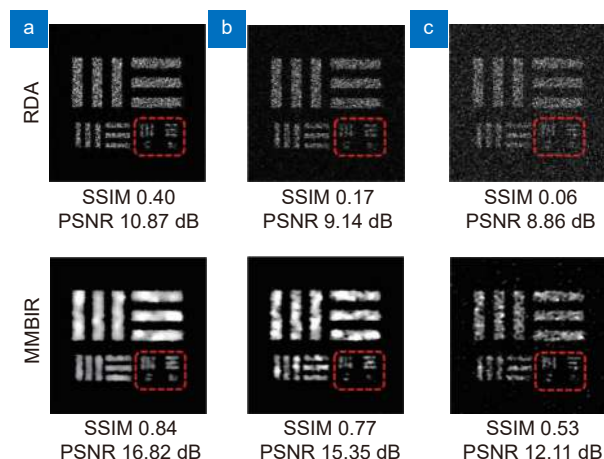


图 17 RD 和 MMBIR 成像算法在不同载噪比下的仿真对比^[95]。红色区域为图像细节部分 (a) 5 dB; (b) 0 dB; (c) -5 dB

Fig. 17 Simulation comparison results of RDA and MMBIR algorithm under different CNRs^[95]. (a) 5 dB; (b) 0 dB; (c) -5 dB. The red dash area is the detail part of the images

4 合成孔径激光雷达外场实验研究进展

外场实验是验证系统实际环境性能的必要测试手段, 也是 SAL 迈向实用化前必不可少的一步。目前国内外主流团队已完成公里级地面甚至是机载实验。本节将回顾和梳理国内外团队在该领域所取得的重要研究进展。

2009 年, 美国洛克希德-马丁相干技术公司的 Buck 等人^[96]展示了室外 1550 nm 红外波段 0.7 km 距

离成像实验结果, 距离向和方位向分辨率分别达到 2 cm 和 0.28 cm。2011 年, 该团队进行了机载成像实验^[52], 系统采用相位编码体制, 成像斜视 45°斜距为 1.6 km, 结合 PGA 补偿前后方位向分辨率分别为 3.3 cm 和 2.5 cm。实验载具平台和实验结果如图 18 所示。

2018 年, 美国的轨道 ATK 公司在美国空军实验室的支持下, 基于 GEO 轨道的 EAGLE 卫星平台, 开展了星载 SAL 成像实验研究。2022 年, GSSAP5-6 发射, 据称搭载了 SAL 成像相关载荷, 然而上述项目成果和技术细节暂未公开。

国内在 SAL 领域虽然起步较晚, 但众多研究团队已经进行了大量外场实验, 积累了大量工程经验和实验数据。2014 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所率先完成直视 SAL 外场 1.2 km 成像实验^[97], 成像分辨率为 5.5 cm×6.8 cm。2016 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所完成了机载直视 SAL 成像实验^[98-99], 机载平台飞行高度约 3 km, 光束垂直于机舱照射地面靶标, 实验结果如图 19 所示。2018 年, 该单位又开展了直视 ISAL 外场 3.4 km 成像实验^[100], 实现了对无人机目标的高分辨率成像, 成像分辨率优于 1 cm。

中国科学院空天信息创新研究院在相关领域也开展了大量工作。2016 年该单位完成机载飞行试验^[48-50], 与上光所不同, 空天院的机载 SAL 系统采用的是主流 FMCW 激光雷达结构, 激光信号调制方式采用电光调制, 作用距离 2 km, 系统成像分辨率优于 4 cm×5 cm。电子所的机载飞行实验系统及成像效果如图 20 所示。

2017 年, 中国科学院空天信息创新研究院的默迪等人^[49]开展了室外 1.1 km 距离成像实验, 目标是一个表面打磨的飞机模型, 发射信号带宽 4 GHz 获取距离向分辨率为 4 cm, 接收口径的衍射极限为 37.8 cm, 通过合成孔径处理获取的方位向分辨率为 1 mm。同年, 王宁等人进行了室外 1 km 距离扩展目标 ISAL 成像实验^[46], 采用联合时频分析和多视处理回波信号获取的目标图像更加清晰, 并分析了本振延时对成像效果的影响。

近年来, 中国科学院空天信息创新研究院的汪丙南副研究院团队对阵列 SAL 开展了深入研究^[101-108], 旨在突破单个光斑观测视场受限这一瓶颈。该体制通过大功率阵列发射、阵列平衡探测接收、逐脉冲动态

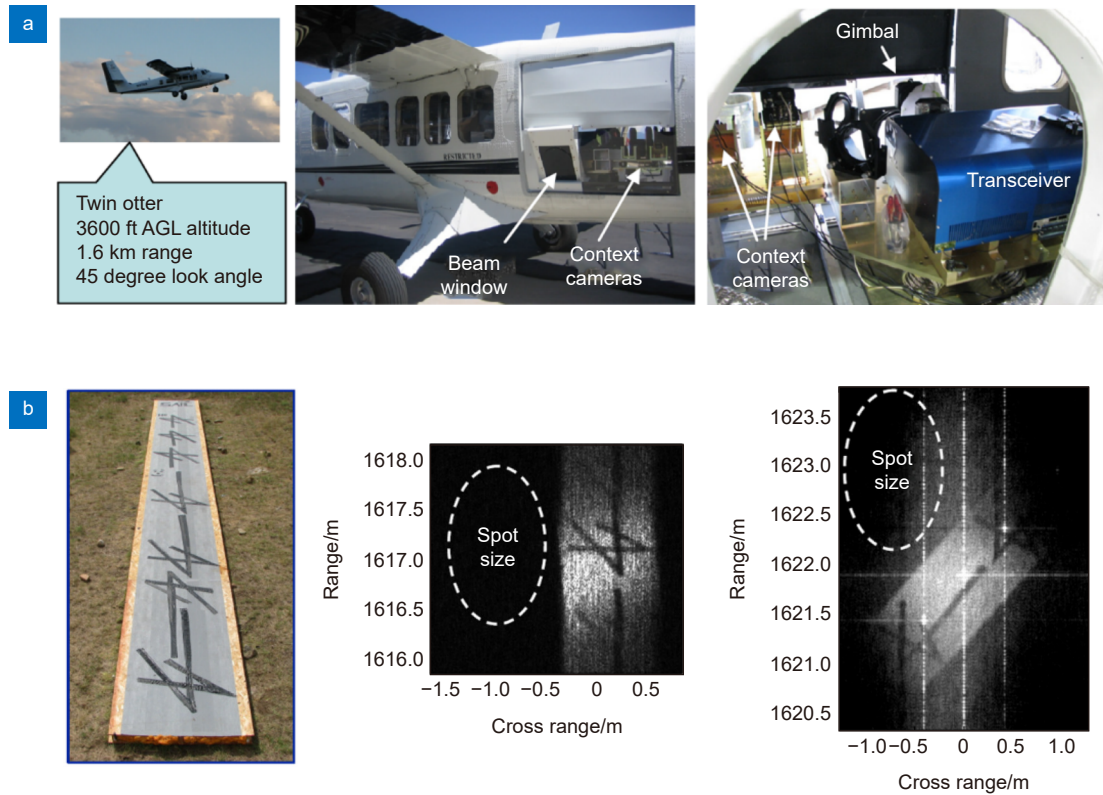


图 18 洛克希德-马丁相干技术公司的机载 SAL 实验结果^[52]。(a) 实验平台; (b) 成像结果

Fig. 18 Airborne SAL experimental results of Lockheed Martin Coherent Technologies^[52]. (a) Experimental system; (b) Imaging results

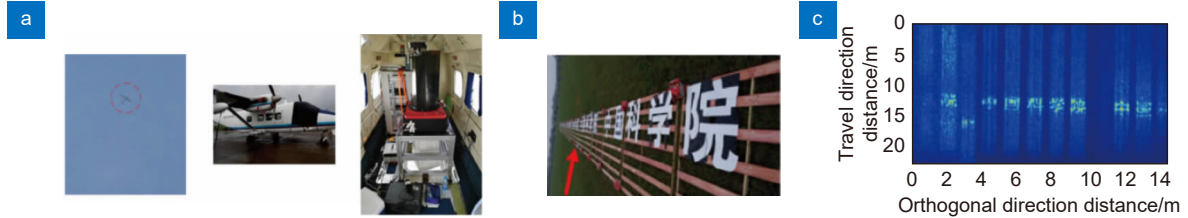


图 19 上光所的机载 SAL 实验^[98]。(a) 实验场景; (b) 目标图像; (c) 成像结果

Fig. 19 Airborne SAL experiment in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics^[98].

(a) Experiment scene; (b) The photograph of target; (c) Imaging result

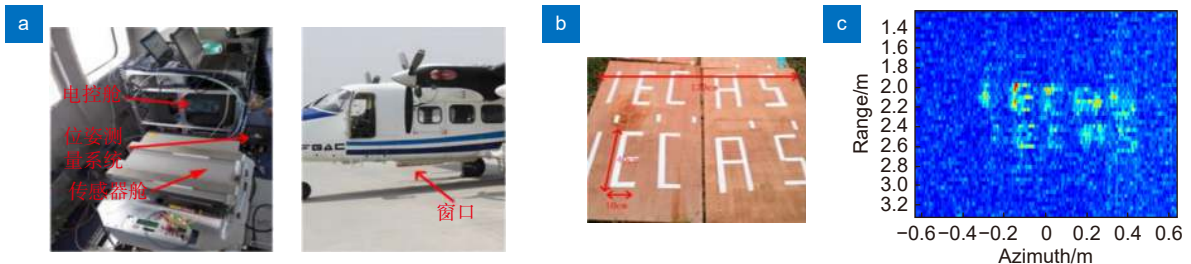


图 20 电子所的机载 SAL 实验^[48]。(a) 实验场景; (b) 目标照片; (c) 成像结果

Fig. 20 Airborne SAL experiment in Institute of Electronics^[48]. (a) Experimental scene; (b) Photograph of target; (c) Imaging result

内定标, 实现了激光多路相干收发, 利用对多个阵列光斑独立成像结果进行拼接, 具备超衍射极限高分辨率和阵列大幅宽的成像特点, 为合成孔径激光雷达对地观测及大幅宽成像奠定基础。阵列 SAL 实验装置

及成像结果如图 21 所示。

2021 年至今, 浙江大学魏凯团队在 SAL 领域进行了大量实验研究工作, 先后完成了室内 20 m、外场 1.1 km 以及 6.9 km 的 ISAL 成像实验^[59,71,95,109-110]。

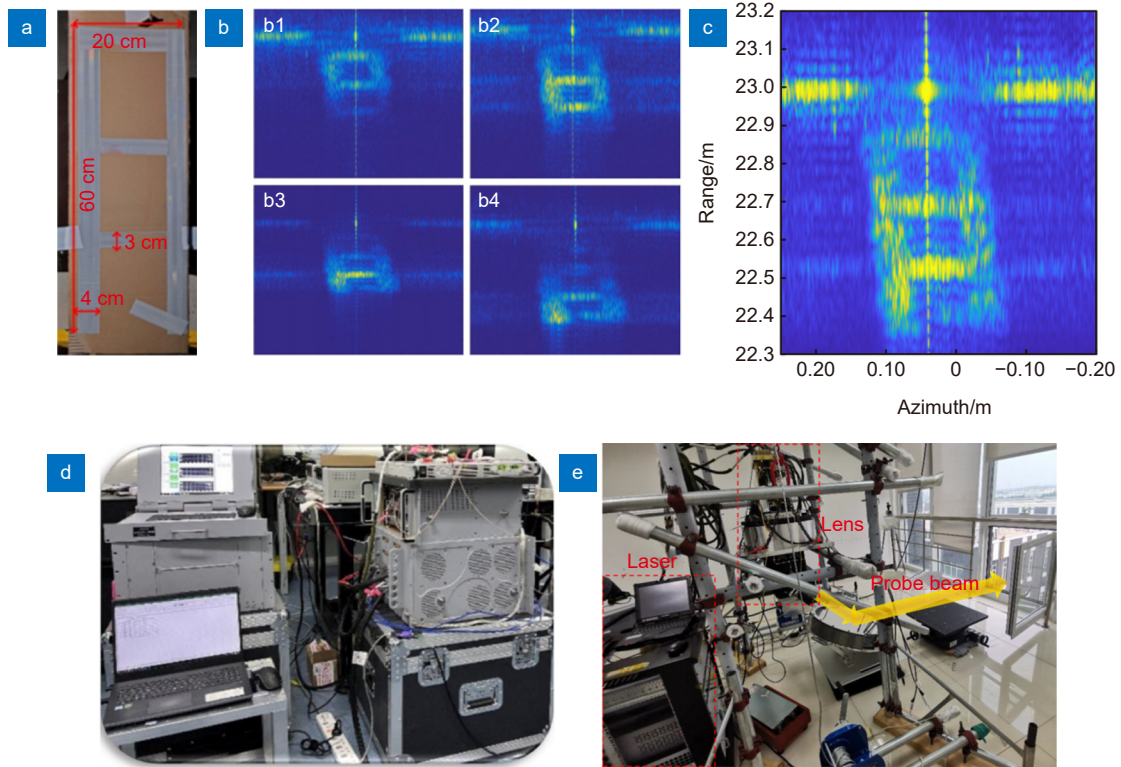


图 21 电子所的阵列 SAL 实验^[96]。(a) 目标照片；(b) 4 通道图像结果；(c) 拼接结果；(d) 电子学系统；(e) 光学系统

Fig. 21 Array SAL experiment in Institute of Electronics^[96]. (a) Photograph of the target; (b) Imaging results of four channels; (c) The whole imaging result; (d) The electronic system; (e) The optical system

在所有实验中系统的出射激光平均功率低于 2 W, 收发望远镜口径 40 mm。外场实验场景、实验系统与 1.1 km 实验结果如图 22 所示。在 6.9 km 成像实验中, 由于目标距离较远, 且激光输出功率有限, 采用课题组所提出的 MMBIR 成像算法^[95]对图像进行增强, 在不使用非相干叠加的情况下实现清晰成像, 且图像更

平滑和连续, 6.9 km 成像结果如图 23 所示, 其中 ENL 表示等效视数, 其值越高表述图像散斑噪声越小。

综上所述, 在外场实验方面, 实验距离由宏观的整机实验转向针对实际应用所面临问题的专用技术测试, 核心目标是解决 SAL 在实际应用过程中面临的

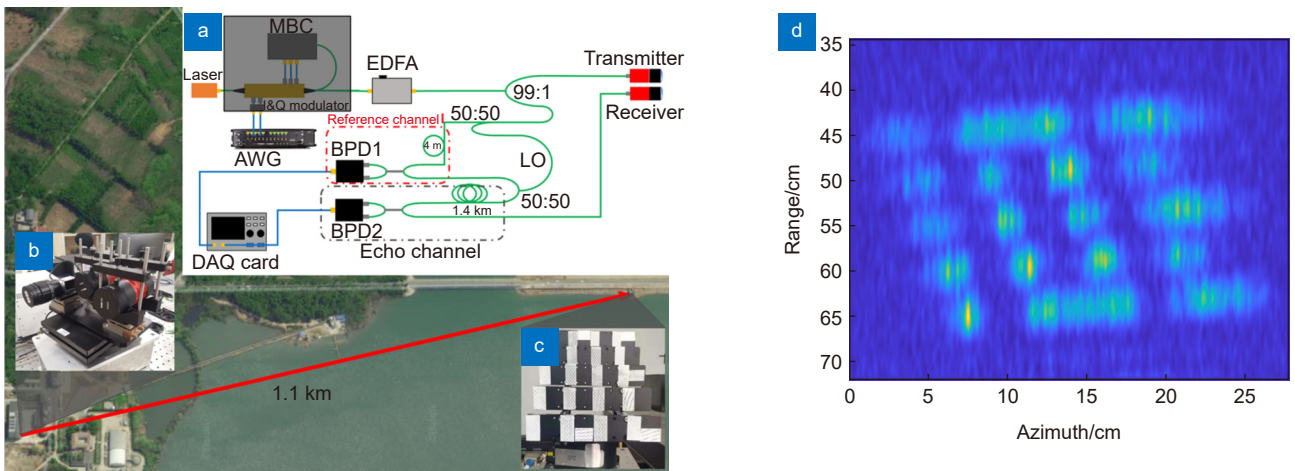


图 22 外场 1.1 km 成像场景和结果^[109]。(a) ISAL 系统示意图；(b) 收发光学系统；(c) 目标图片；(d) 成像结果

Fig. 22 Outdoor experimental scene and result at 1.1 km away^[109]. (a) Schematic diagram of ISAL system; (b) Photography of the transceiver; (c) Photography of the target; (d) Imaging result

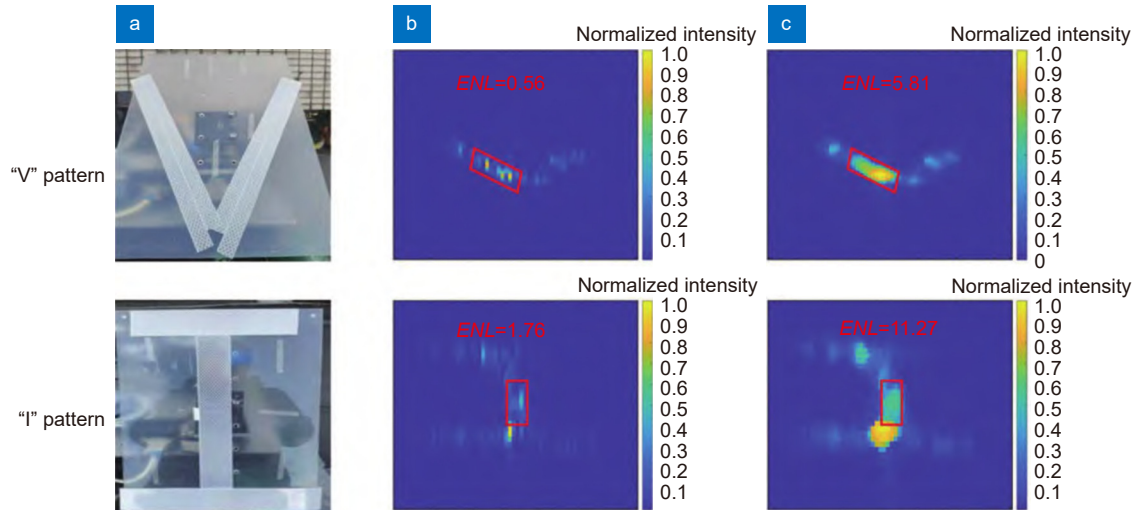


图 23 外场 6.9 km 实验成像结果^[95]。(a) 靶标图像; (b) RD 算法成像结果; (c) MMBIR 算法成像结果

Fig. 23 Outdoor experimental result at 6.9 km away^[95]. (a) Photography of the target; (b) Images recovered by RDA; (c) Images recovered by MMBIR

问题, 如激光照明光束窄、接收光学系统视场小、SAL 图像散斑影响图像信噪比等。此外, 当前外场实验主要针对合作目标, 非合作目标的散射特性以及如何有效探测和成像成为下一阶段 SAL 外场实验重点关注的內容。未来走向实际应用还需其他辅助技术如激光相位噪声抑制、大气扰动抑制、高功率窄线宽激光器等的支持。并且在有各项技术积累的条件下, 外场实验需要逐步走向更加真实的环境, 以便验证实际 SAL 系统性能边界。

5 结 论

合成孔径激光雷达凭借其全天时感知能力、类人眼观感成像能力、高速成像能力和超分辨成像能力得到了广泛的关注和研究, 其技术和相关支撑技术有望在远距离目标监测、遥感以及自动驾驶等领域产生潜在应用价值。本文回顾和梳理了合成孔径激光雷达及其关键技术的发展历程和当前研究现状, 在五十多年的发展历程中, 其原理、关键技术和相关实验方面均取得不小的进步, 但离实际工程化应用还有一段路要走, 为达到工程化的目的, 还需要对以下几个方面进行研究。

1) 合成孔径激光雷达是一种高相干激光雷达系统^[111], 相比传统的测距或者测速相干激光雷达, 其对系统相干性有着更高的需求, 激光相位噪声、系统退相干源及其作用机制目前缺乏理论模型指导, 这导致在实际系统设计时需要进行大量实验测试, 使得在设计初期对系统的评估和预测较为困难。此外, 对合

成孔径激光雷达系统退相干机制的研究有助于对系统误差分配提供依据, 进而对各项退相干源的补偿方法提出控制要求。因此, 需要基于 SAL 系统传输链路, 建立系统相位误差的全链路传递模型, 明确误差来源和统计特征, 结合系统性能评价指标进行性能预测和相位误差的分配, 以实现系统的可预测性和可设计性, 并为相位误差控制技术提供约束边界。

2) 合成孔径激光雷达采用相干探测方式, 其对回波波前、偏振状态等比较敏感, 光学系统、未知的目标散射特性和大气扰动将不可避免地导致激光雷达对目标反射率估计的不稳定, 影响成像质量和目标识别的性能。因此, 如何保证在实际使用过程中合成孔径激光雷达对不同目标、不同环境的稳定性是日后工程化所需面临的重要课题之一。

3) 合成孔径激光雷达的主要优势之一是能对远距离目标实现高分辨率成像, 然而作为一种相干激光雷达, 激光器的相干长度限制了其最大作用距离。虽然可以通过前馈或后馈方式降低激光器自身瞬时线宽以获得更长的相干长度, 但是随着激光器线宽变窄, 其制造难度和成本急剧上升。因此, 后续研究的一个主要方向便是利用辅助信息(如辅助发射信号、辅助干涉仪)结合数字信号处理的方式消除激光相位噪声带来的负面影响, 提高 SAL 作用距离和成像质量。

4) 相干积累在理论上具有很高的处理增益, 增益与积累时间成正比。由于激光雷达与目标相对运动会导致信号的退相干, 这导致相干积累时间无法持续增长。因此单帧合成孔径激光雷达成像存在单像素能量

受限的问题,使得对远距离目标成像信噪比存在极限。一方面,该问题将限制合成孔径激光雷达的作用距离;另一方面,想增加作用距离意味着需要大功率激光器,将大大增加系统的尺寸和成本。因此,利用目标的先验信息,充分发掘成像算法的信息获取能力在一定程度上降低系统硬件需求,提升系统性能,这也是未来一个值得研究的方向。

合成孔径激光雷达是一种集光、机、电、算为一体的高相干系统,想要走向真正的实用化还需要汇集多学科优势,对包括上述但不限于上述问题进行攻关,提升系统在真实环境下的性能和稳定性,希望在国内外学者的努力下,合成孔径激光雷达也能像合成孔径雷达一样,成为实用的高分辨传感手段。

利益冲突:所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Li S, Wang B W, Guan H T, et al. Far-field computational optical imaging techniques based on synthetic aperture: a review[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(10): 230090.
李晟, 王博文, 管海涛, 等. 远场合成孔径计算光学成像技术: 文献综述与最新进展[J]. *光电工程*, 2023, **50**(10): 230090.
- [2] Cumming I G, Wong F H. *Digital Signal Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*[M]. Boston: Artech House, 2004.
- [3] Brown W M. Synthetic aperture radar[J]. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 1967, **AES-3**(2): 217–229.
- [4] Wiley C A. Pulsed Doppler radar methods and apparatus: 3196436[P]. 1965-07-20.
- [5] Ding J H, Yuan M H. A multi-target semantic segmentation method for millimetre wave SAR images based on a dual-branch multi-scale fusion network[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(12): 230242.
丁俊华, 袁明辉. 基于双分支多尺度融合网络的毫米波SAR图像多目标语义分割方法[J]. *光电工程*, 2023, **50**(12): 230242.
- [6] Zhao H Q, Zhang X X, Wang D, et al. Optical-mechanical system design of SAR real-time imaging optical processor[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(9): 210421.
赵洪强, 张星祥, 王夺, 等. SAR实时成像光学处理器光机系统设计[J]. *光电工程*, 2022, **49**(9): 210421.
- [7] Liu L R. A new way to high-resolution remote sensing: synthetic aperture imaging lidar[J]. *Science*, 2014, **66**(6): 25–29.
刘立人. 高分辨率遥感新途径——合成孔径激光成像雷达[J]. *科学*, 2014, **66**(6): 25–29.
- [8] Wu J. On the development of synthetic aperture lidar imaging[J]. *J Radars*, 2012, **1**(4): 353–360.
吴瑾. 关于合成孔径激光雷达成像研究[J]. *雷达学报*, 2012, **1**(4): 353–360.
- [9] Lucke R L, Rickard L, Bashkansky M, et al. Synthetic aperture lidar (SAL): fundamental theory, design equations for a satellite system, and laboratory demonstration[R]. Washington: Naval Research Laboratory, 2002.
- [10] Li D J, Gao J H, Cui A J, et al. Research progress of coherent lidar technology for imaging and detection[J]. *Mod Radar*, 2023, **45**(11): 1–6.
李道京, 高敬涵, 崔岸婧, 等. 成像探测相干激光雷达技术研究进展[J]. *现代雷达*, 2023, **45**(11): 1–6.
- [11] Aleksoff C C, Accetta J S, Peterson L M, et al. Synthetic aperture imaging with a pulsed Co₂ laser[J]. *Proc SPIE*, 1987, **783**: 29–41.
- [12] Aleksoff C C. Interferometric two-dimensional imaging of rotating objects[J]. *Opt Lett*, 1977, **1**(2): 54–55.
- [13] Aleksoff C C. Synthetic interferometric imaging technique for moving objects[J]. *Appl Opt*, 1976, **15**(8): 1923–1929.
- [14] Aleksoff C C, Christensen C R. Holographic Doppler imaging of rotating objects[J]. *Appl Opt*, 1975, **14**(1): 134–141.
- [15] Lewis T S, Hutchins H S. A synthetic aperture at 10.6 microns[J]. *Proc IEEE*, 1970, **58**(10): 1781–1782.
- [16] Marcus S, Colella B D, Green T J. Solid-state laser synthetic aperture radar[J]. *Appl Opt*, 1994, **33**(6): 960–964.
- [17] Green T J, Marcus S, Colella B D. Synthetic-aperture-radar imaging with a solid-state laser[J]. *Appl Opt*, 1995, **34**(30): 6941–6949.
- [18] Yoshikado S, Aruga T. Short-range verification experiment of a trial one-dimensional synthetic aperture infrared laser radar operated in the 10- μ m band[J]. *Appl Opt*, 2000, **39**(9): 1421–1425.
- [19] Yoshikado S, Aruga T. Feasibility study of synthetic aperture infrared laser radar techniques for imaging of static and moving objects[J]. *Appl Opt*, 1998, **37**(24): 5631–5639.
- [20] Bashkansky M, Lucke R L, Funk E E, et al. Synthetic aperture imaging at 1.5 μ m: laboratory demonstration and potential application to planet surface studies[J]. *Proc SPIE*, 2002, **4849**: 48–56.
- [21] Bashkansky M, Lucke R L, Funk E, et al. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Opt Lett*, 2002, **27**(22): 1983–1985.
- [22] Karr T J. Synthetic aperture lidar resolution through turbulence[J]. *Proc SPIE*, 2003, **4976**: 22–33.
- [23] Lucke R L. Synthetic aperture lidar simulations with phase screens and Fourier propagation[C]//*Proceedings of 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2004.
<https://doi.org/10.1109/AERO.2004.1367959>.
- [24] Schumm B E, Dierking M P. Wave optics simulations of synthetic aperture lidar performance through turbulence[J]. *J Opt Soc Am A*, 2017, **34**(10): 1888–1895.
- [25] Rustowicz R M, Ross J W, Barnes L J, et al. Atmospheric effects and impact on target classification for Synthetic Aperture Lidar (SAL) imagery[J]. *Proc SPIE*, 2018, **10636**: 1063609.
- [26] Azizigul A, Tao Z W, Liu S W, et al. Influence of atmospheric turbulence on temporal coherence characteristics of received optical field[J]. *Acta Phys Sin*, 2022, **71**(23): 234201.
艾则孜姑丽·阿不都克热木, 陶志伟, 刘世伟, 等. 大气湍流对接收光场时间相干特性的影响[J]. *物理学报*, 2022, **71**(23): 234201.
- [27] Barber Z W, Dahl J R. Sensitivity in synthetic aperture lidar imaging[C]//*Proceedings of 2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) - Laser Science to Photonic Applications*, 2014.
- [28] Barber Z W, Dahl J R. Synthetic aperture lidar imaging demonstrations and information at very low return levels[J]. *Appl Opt*, 2014, **53**(24): 5531–5537.
- [29] Cai G Y, Hou P P, Ma X P, et al. The laser linewidth effect on the image quality of phase coded synthetic aperture lidar[J]. *Opt Commun*, 2015, **356**: 495–499.
- [30] Xu Qian, Zhou Yu, Sun Jianfeng, et al. Analysis and Simulation of Space-Time Speckle Effect Based on Synthetic Aperture Imaging Lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(10): 1028002.
许倩, 周煜, 孙建峰, 等. 合成孔径激光成像雷达时空散斑效应模

- 拟与分析[J]. *光学学报*, 2013, **33**(10): 1028002.
- [31] Liu L R. Synthetic aperture imaging lidar (VI): space-time speckle effect and heterodyne signal-to-noise ratio[J]. *Acta Opt Sin*, 2009, **29**(8): 2326–2332.
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(VI): 时空散斑效应和外差探测信噪比[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2326–2332.
- [32] Xu Q, Zhou Y, Sun J F, et al. Analysis of integrated speckle receiving characteristics based on synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Opt Sin*, 2014, **34**(3): 0328002.
许倩, 周煜, 孙建锋, 等. 合成孔径激光成像雷达散斑天线接收特性分析[J]. *光学学报*, 2014, **34**(3): 0328002.
- [33] Xu Q, Zhou Y, Sun J F, et al. Influence of space-time speckle effect on the image quality in a synthetic aperture imaging lidar[J]. *Opt Commun*, 2014, **333**: 265–273.
- [34] Xu Q, Sun Z W, Sun J F, et al. Speckle reduction of synthetic aperture imaging lidar based on wavelength characteristics[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, **12**(8): 080301.
- [35] Dang W J, Zeng X D, Feng Z J. Decoherence effect of target roughness in synthetic aperture lidar[J]. *Acta Phys Sin*, 2013, **62**(2): 024204.
党文佳, 曾晓东, 冯喆珩. 目标粗糙对合成孔径激光雷达回波的退相干效应[J]. *物理学报*, 2013, **62**(2): 024204.
- [36] Lu Z Y, Ge C F, Wang Z Y, et al. Basics and developments of frequency modulation continuous wave LiDAR[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, **46**(7): 190038.
卢焰宇, 葛春风, 王肇颖, 等. 频率调制连续波激光雷达技术基础与研究进展[J]. *光电工程*, 2019, **46**(7): 190038.
- [37] Buell W, Marechal N, Buck J, et al. Demonstration of synthetic aperture imaging lidar[J]. *Proc SPIE*, 2005, **5791**: 152–166.
- [38] Beck S M, Buck J R, Buell W F, et al. Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing[J]. *Appl Opt*, 2005, **44**(35): 7621–7629.
- [39] Xing M D, Guo L, Tang Y, et al. Design on the experiment optical system of synthetic aperture imaging lidar[J]. *Infrared Laser Eng*, 2009, **38**(2): 290–294.
邢孟道, 郭亮, 唐禹, 等. 合成孔径成像激光雷达实验系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(2): 290–294.
- [40] Guo L, Ma Y J, Xing M D, et al. Rotating objects imaging of synthetic aperture imaging lidar[J]. *Infrared Laser Eng*, 2009, **38**(4): 637–641.
郭亮, 马瑜杰, 邢孟道, 等. 合成孔径成像激光雷达旋转目标成像[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(4): 637–641.
- [41] Guo L, Xing M D, Zhang L, et al. Research on indoor experimentation of range SAL imaging system[J]. *Sci China Ser E: Technol Sci*, 2009, **52**(10): 3098–3104.
- [42] 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 Opt Sin*, 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.
- [43] Adany P, Allen C, Hui R Q. Chirped lidar using simplified homodyne detection[J]. *J Lightwave Technol*, 2009, **27**(16): 3351–3357.
- [44] Wang N, Wang R, Li G Z, et al. Experiment of inverse synthetic aperture lidar at 1.1 km[J]. *Proc SPIE*, 2016, **10155**: 101551G.
- [45] Song Z Q, Mo D, Wang N, et al. Inverse synthetic aperture lidar autofocus imaging algorithm for micro-vibrating satellites based on two prominent points[J]. *Appl Opt*, 2019, **58**(25): 6775–6783.
- [46] Wang N, Wang R, Mo D, et al. Inverse synthetic aperture LADAR demonstration: system structure, imaging processing, and experiment result[J]. *Appl Opt*, 2018, **57**(2): 230–236.
- [47] Mo D, Wang R, Wang N, et al. Three-dimensional inverse synthetic aperture lidar imaging for long-range spinning targets[J]. *Opt Lett*, 2018, **43**(4): 839–842.
- [48] Zhang K S, Li G Z, Wang R, et al. The study on airborne laser synthetic aperture radar[C]//*Proceedings of the 4th China High Resolution Earth Observation Conference*, 2017: 12.
张珂殊, 李光祚, 王然, 等. 机载激光合成孔径雷达研究[C]//第四届高分辨率对地观测学术年会论文集, 2017: 12.
- [49] Mo D, Wang R, Wang N, et al. Experiment of inverse synthetic aperture LADAR on real target[C]//*Proceedings of 2017 7th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication*, 2017: 319–321.
<https://doi.org/10.1109/ICEIEC.2017.8076572>.
- [50] Li G Z, Wang N, Wang R, et al. Imaging method for airborne SAL data[J]. *Electron Lett*, 2017, **53**(5): 351–353.
- [51] Li G Z, Wang R, Song Z Q, et al. Linear frequency-modulated continuous-wave lidar system for synthetic aperture imaging[J]. *Appl Opt*, 2017, **56**(12): 3257–3262.
- [52] Krause B W, Buck J, Ryan C, et al. Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]//*Proceedings of 2011 - Laser Science to Photonic Applications*, 2011.
- [53] Huang Y X, Zhang H Y, Li F, et al. Phase modulated lidar imaging design and simulation[J]. *Infrared Laser Eng*, 2017, **46**(5): 0506003.
黄宇翔, 张鸿翼, 李飞, 等. 相位调制激光雷达成像设计及仿真[J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(5): 0506003.
- [54] Huang Y X, Song S, Xu W M, et al. Real-time inverse synthetic aperture lidar system based on continuous m-sequence phase modulation[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2017, **54**(7): 072801.
黄宇翔, 宋盛, 徐卫明, 等. 连续m序列相位调制的实时逆合成孔径激光雷达系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, **54**(7): 072801.
- [55] Gao S, Zhang Z H, Yu W X, et al. Inverse synthetic aperture lidar imaging based on modified cubic phase function[J]. *Appl Opt*, 2021, **60**(7): 2014–2021.
- [56] Xu X W, Gao S, Zhang Z H. Inverse synthetic aperture lidar demonstration and outdoor experiments[C]//*Proceedings of 2018 China International SAR Symposium*, 2018: 1–4.
<https://doi.org/10.1109/SARS.2018.8551972>.
- [57] Gao S, Zhang Z H, Xu X W, et al. The laboratory demonstration and signal processing of the inverse synthetic aperture imaging lidar[J]. *Proc SPIE*, 2017, **10427**: 104271I.
- [58] Cui A J, Li D J, Wu J, et al. Moving target imaging of a dual-channel ISAL with binary phase shift keying signals and large squint angles[J]. *Appl Opt*, 2022, **61**(18): 5466–5473.
- [59] Song A P, Jin K, Xu C, et al. Subcarrier modulation based phase-coded coherent lidar[J]. *Opt Express*, 2024, **32**(1): 52–61.
- [60] Wahl D E, Eichel P H, Ghiglia D C, et al. Phase gradient autofocus—a robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 1994, **30**(3): 827–835.
- [61] Eichel P H, Jakowatz C V. Phase-gradient algorithm as an optimal estimator of the phase derivative[J]. *Opt Lett*, 1989, **14**(20): 1101–1103.
- [62] Chen V C. Adaptive time-frequency ISAR processing[J]. *Proc SPIE*, 1996, **2845**: 133–140.
- [63] Högbom J A. Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines[J]. *Astron Astrophys Suppl*, 1974, **15**: 417–426.
- [64] Pellizzari C J, Bos J, Spencer M F, et al. Performance characterization of Phase Gradient Autofocus for inverse synthetic aperture LADAR[C]//*Proceedings of 2014 IEEE Aerospace Conference*, 2014: 1–11.
<https://doi.org/10.1109/AERO.2014.6836491>.
- [65] Li M L, Wu J, Bai T, et al. Stripmap mode synthetic aperture lidar imaging under large random phase errors condition[J].

- Chin Opt*, 2019, **12**(1): 130–137.
- 李明磊, 吴谨, 白涛, 等. 大随机相位误差下条带模式合成孔径激光雷达成像实验[J]. *中国光学*, 2019, **12**(1): 130–137.
- [66] Zhang J, Wang R, Zhang K S. Application and improvement of phase gradient autofocus algorithm in synthetic aperture lidar[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2016, **53**(6): 062801.
- 张洁, 王然, 张珂殊. 相位梯度自聚焦算法在合成孔径激光雷达中的应用与改进[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, **53**(6): 062801.
- [67] Song Z, Mo D, Li B, et al. Phase gradient matrix autofocus for ISAL Space-time-varied phase error correction[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2020, **32**(6): 353–356.
- [68] Xu G, Xing M D, Yang L, et al. Joint approach of translational and rotational phase error corrections for high-resolution inverse synthetic aperture radar imaging using minimum-entropy[J]. *IET Radar Sonar Navig*, 2016, **10**(3): 586–594.
- [69] Liu S J, Fu H C, Wei K, et al. Jointly compensated imaging algorithm of inverse synthetic aperture lidar based on nelder-mead simplex method[J]. *Acta Opt Sin*, 2018, **38**(7): 0711002.
- 刘盛捷, 付翰初, 魏凯, 等. 基于Nelder-Mead单纯形法的逆合成孔径激光雷达联合补偿成像算法[J]. *光学学报*, 2018, **38**(7): 0711002.
- [70] Li J, Wang K P, Jin K, et al. Inverse synthetic aperture lidar motion compensation imaging algorithm for maneuvering targets[J]. *Acta Opt Sin*, 2021, **41**(19): 1928001.
- 李建, 王鲲鹏, 晋凯, 等. 逆合成孔径激光雷达机动目标运动补偿成像算法[J]. *光学学报*, 2021, **41**(19): 1928001.
- [71] Li J, Jin K, Xu C, et al. Adaptive motion error compensation method based on bat algorithm for maneuvering targets in inverse synthetic aperture LiDAR imaging[J]. *Opt Eng*, 2023, **62**(9): 093103.
- [72] Ruan H, Zhang Q, Yang Y A, et al. Spaceborne inverse synthetic aperture lidar imaging of nonuniformly rotating orbit object[J]. *Infrared Laser Eng*, 2023, **52**(2): 20220406.
- 阮航, 张强, 杨雨昂, 等. 非均匀转动空间目标天基逆合成孔径激光雷达成像[J]. *红外与激光工程*, 2023, **52**(2): 20220406.
- [73] Yin H F, Li Y C, Guo L, et al. Spaceborne ISAL imaging algorithm for high-speed moving targets[J]. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, 2023, **16**: 7486–7496.
- [74] Ruan H, Wu Y H, Ye W, et al. Algorithm of phase error compensation for inverse synthetic aperture lidar[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2013, **50**(10): 102801.
- 阮航, 吴彦涛, 叶伟, 等. 逆合成孔径激光雷达相位误差补偿算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, **50**(10): 102801.
- [75] Zhang H Y, Li F, Xu W M, et al. Research on the phase error compensation in synthetic aperture lidar by using optimization algorithm[J]. *Acta Electron Sin*, 2016, **44**(9): 2100–2105.
- 张鸿翼, 李飞, 徐卫明, 等. 利用优化算法对合成孔径激光雷达相位误差补偿的研究[J]. *电子学报*, 2016, **44**(9): 2100–2105.
- [76] Graham L C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping[J]. *Proc IEEE*, 1974, **62**(6): 763–768.
- [77] Liu L R. Principle of self-interferometric synthetic aperture lidar for 3D imaging[J]. *Acta Opt Sin*, 2014, **34**(5): 0528001.
- 刘立人. 自干涉合成孔径激光三维成像雷达原理[J]. *光学学报*, 2014, **34**(5): 0528001.
- [78] Ma M, Li D J, Du J B. Imaging of airborne synthetic aperture lidar under platform vibration condition[J]. *J Radars*, 2014, **3**(5): 591–602.
- 马萌, 李道京, 杜剑波. 振动条件下机载合成孔径激光雷达成像处理[J]. *雷达学报*, 2014, **3**(5): 591–602.
- [79] Du J B, Li D J, Ma M, et al. Vibration estimation and imaging of airborne synthetic aperture lidar based on interferometry processing[J]. *Chin J Lasers*, 2016, **43**(9): 0910003.
- 杜剑波, 李道京, 马萌, 等. 基于干涉处理的机载合成孔径激光雷达振动估计和成像[J]. *中国激光*, 2016, **43**(9): 0910003.
- [80] Hu X, Li D J. Vibration phases estimation based on multi-channel interferometry for ISAL[J]. *Appl Opt*, 2018, **57**(22): 6481–6490.
- [81] Zhou K, Li D J, Gao J H, et al. Vibration phases estimation based on orthogonal interferometry of inner view field for ISAL imaging and detection[J]. *Appl Opt*, 2023, **62**(11): 2845–2854.
- [82] Gallion P, Debarge G. Quantum phase noise and field correlation in single frequency semiconductor laser systems[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1984, **20**(4): 343–349.
- [83] Hu X, Li D J, Zhao X F. Maintaining method of signal coherence in synthetic aperture lidar based on local oscillator digital delay[J]. *Chin J Lasers*, 2018, **45**(5): 0510003.
- 胡烜, 李道京, 赵绪锋. 基于本振数字延时的合成孔径激光雷达信号相干性保持方法[J]. *中国激光*, 2018, **45**(5): 0510003.
- [84] Hu X, Li D J, Tian H, et al. Impact and correction of phase error in lidar signal on synthetic aperture imaging[J]. *Infrared Laser Eng*, 2018, **47**(3): 0306001.
- 胡烜, 李道京, 田鹤, 等. 激光雷达信号相位误差对合成孔径成像的影响和校正[J]. *红外与激光工程*, 2018, **47**(3): 0306001.
- [85] Gao J H, Li D J, Zhou K, et al. Maintenance method of signal coherence in lidar and experimental validation[J]. *Opt Lett*, 2022, **47**(20): 5356–5359.
- [86] Ke J Y, Song Z Q, Wang P S, et al. Long distance high resolution FMCW laser ranging with phase noise compensation and 2D signal processing[J]. *Appl Opt*, 2022, **61**(12): 3443–3454.
- [87] Ke J Y, Song Z Q, Cui Z M, et al. Phase noise compensation experiment with frequency modulated continuous wave laser in atmospheric propagation[J]. *Opt Eng*, 2022, **61**(7): 073101.
- [88] Ito F, Fan X Y, Koshikiya Y. Long-range coherent OFDR with light source phase noise compensation[J]. *J Lightwave Technol*, 2012, **30**(8): 1015–1024.
- [89] Fan X Y, Koshikiya Y, Ito F. Phase-noise-compensated optical frequency domain reflectometry with measurement range beyond laser coherence length realized using concatenative reference method[J]. *Opt Lett*, 2007, **32**(22): 3227–3229.
- [90] Wu S B, Mo D, Wang R, et al. Surpassing the limitation of a coherence length in lidar by digital coherence[J]. *Opt Lett*, 2023, **48**(21): 5455–5458.
- [91] Bao Z, Xing M D, Wang T. *Radar Imaging Technology*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [92] Yegulalp A F. Fast backprojection algorithm for synthetic aperture radar[C]//*Proceedings of the 1999 IEEE Radar Conference. Radar into the Next Millennium*, 1999: 60–65. <https://doi.org/10.1109/NRC.1999.767270>.
- [93] Pellizzari C J, Trahan R, Zhou H Y, et al. Synthetic aperture LADAR: a model-based approach[J]. *IEEE Trans Comput Imaging*, 2017, **3**(4): 901–916.
- [94] Pellizzari C J, Bouman C A. Inverse synthetic aperture LADAR image construction: an inverse model-based approach[J]. *Proc SPIE*, 2016, **9982**: 99820F.
- [95] Xu C, Song A P, Jin K, et al. Modified imaging algorithm for inverse synthetic aperture LiDAR based on optical imaging model[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2023, **60**(12): 1228001.
- 徐晨, 宋岸鹏, 晋凯, 等. 改进的基于光学成像模型的逆合成孔径激光雷达成像算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, **60**(12): 1228001.
- [96] Buck J R, Krause B W, Malm A I R, et al. Synthetic aperture imaging at optical wavelengths[C]//*Proceedings of the International Quantum Electronics Conference 2009*, 2009. <https://doi.org/10.1364/IQEC.2009.PThB3>.
- [97] 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]. *Chin Opt Lett*, 2014, **12**(11): 111101.
- [98] Lu Z Y, Zhou Y, Sun J F, et al. Airborne down-looking synthetic aperture imaging lidar field experiment and its flight testing[J]. *Chine J 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.
- [99] Li G Y, Sun J F, Zhou Y, et al. Attitude-error compensation for airborne down-looking synthetic-aperture imaging lidar[J]. *Opt Commun*, 2017, **402**: 355–361.
- [100] Li G Y, Lu Z Y, Zhou Y, et al. Outdoor experiment of down-looking inverse synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Opt Sin*, 2018, **38**(4): 0401001.
李光远, 卢智勇, 周煜, 等. 直视逆合成孔径激光成像雷达外场实验[J]. *光学学报*, 2018, **38**(4): 0401001.
- [101] Wang S, Xiang M S, Wang B N, et al. A channel phase error compensation method for multi-channel synthetic aperture lidar[J]. *Optik*, 2019, **178**: 830–840.
- [102] Wang S, Wang B N, Xiang M S, et al. Analysis and compensation of telescopes' gaps effect on aperture synthesis in a multi-channel synthetic aperture lidar system[J]. *Appl Opt*, 2019, **58**(18): 4884–4891.
- [103] Wang R R, Xiang M S, Li C. Denoising FMCW lidar signals via EEMD with singular spectrum constraint[J]. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2020, **17**(6): 983–987.
- [104] Wang S, Wang B N, Xiang M S, et al. Synthetic aperture lidar motion compensation method based on symmetrical triangular linear frequency modulation continuous wave[J]. *Opt Commun*, 2020, **471**: 125901.
- [105] Wang R R, Xiang M S, Wang B N, et al. Time-frequency domain nonlinear phase compensation for FMCW lidar signals[C]//*Proceedings of 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2020.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS39084.2020.9323798>.
- [106] Wang R R, Xiang M S, Wang B N, et al. Nonlinear phase estimation and compensation for FMCW lidar based on synchrosqueezing wavelet transform[J]. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2021, **18**(7): 1174–1178.
- [107] Wang R R, Wang B N, Xiang M S, et al. Simultaneous time-varying vibration and nonlinearity compensation for one-period triangular-FMCW lidar signal[J]. *Remote Sens*, 2021, **13**(9): 1731.
- [108] Wang B N, Zhao J Y, Li W, et al. Array synthetic aperture lidar with high spatial resolution technology[J]. *J Radars*, 2022, **11**(6): 1110–1118.
汪丙南, 赵娟莹, 李威, 等. 阵列激光合成孔径雷达高分辨成像技术研究[J]. *雷达学报*, 2022, **11**(6): 1110–1118.
- [109] Xu C, Jin K, Jiang C C, et al. Amplitude compensation using homodyne detection for inverse synthetic aperture LADAR[J]. *Appl Opt*, 2021, **60**(34): 10594–10599.
- [110] Hong K, Jin K, Song A P, et al. Low sampling rate digital dechirp for Inverse Synthetic Aperture Lidar imaging processing[J]. *Opt Commun*, 2023, **540**: 129482.
- [111] Brown W M, Palermo C J. Theory of coherent systems[J]. *IRE Trans Mil Electron*, 1962, **MIL-6**(2): 187–196.

作者简介



徐晨 (1994-), 男, 博士, 中国科学院光电技术研究所博士后, 助理研究员, 研究方向包括主动光电探测与感知、相干激光雷达性能增强技术、计算成像。

E-mail: xuchen171@mailsucas.edu.cn



晋凯 (1990-), 男, 博士, 浙江大学助理研究员, 研究方向光电探测与识别、相干激光雷达、激光微动特征测量。

E-mail: hijk1990@live.com



【通信作者】魏凯 (1981-), 男, 博士, 教授, 浙江大学求是特聘教授, 光电学院与先进技术研究院双聘教授, 博士生导师, 美国加州理工学院高级访问学者。先后任地基大口径望远镜副总设计师、总师, 美国凯克 10 米望远镜激光发射系统负责人、国际 30 米望远镜激光导星系统负责人, 研究方向包括片上集成光电器件设计、合成孔径激光雷达成像技术、增强感知技术以及无人系统自主感知方向。

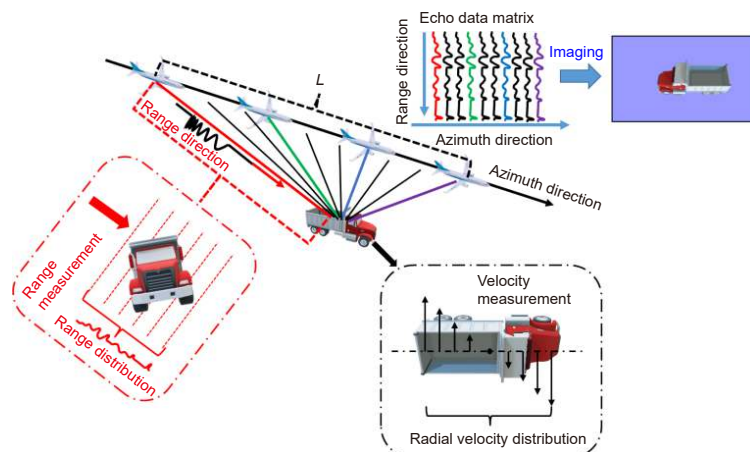
E-mail: kwei@zju.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Research progress of synthetic aperture ladar techniques

Xu Chen^{1,2}, Jin Kai³, Wei Kai^{3,4*}



Schematic diagram of synthetic aperture ladar principle

Overview: Ladar is an active sensing technology employing laser for detecting, measuring and imaging. According to the detection modes, ladars are usually divided into two types: non-coherent ladar and coherent ladar. Coherent ladar employing heterodyne detection can provide more information, such as frequency shift and phase. This combination of features enables multi-functional, high-precision, and operationally important detection and sensing applications.

Synthetic aperture ladar (SAL) is a special type of coherent ladar whose principle is similar to synthetic aperture radar (SAR) operating in the microwave band. It utilizes a wideband modulated signal to obtain a high axial resolution, which is called range resolution. In another dimension called cross-range direction or azimuth direction, the moving ladar platform transmits and receives a series of coherent pulses, and then these pulses are coherently accumulated to achieve an equivalent large aperture. Thus, its resolution is independent of the optical aperture. Compared with SAR, it has higher imaging speed and higher imaging resolution. It can obtain images similar to what the human is used to seeing, thanks to the operation wavelength of SAL. These characteristics make SAL become a potentially valuable technology in the field of remote sensing and object identification.

Although SAL is a kind of coherent ladar, it has higher coherence requirements than other systems, which makes SAL face many technical problems like atmosphere disturbance, laser phase noise, motion errors, etc. To address these issues, considerable efforts have been undertaken by a wide array of research professionals and collaborative teams across the field. The main goal of this paper is to provide a review of the progress of these efforts and point out the challenges faced in future development. First, this paper will briefly introduce the working principle of SAL. The second part introduces the research progress of the key technologies in the field of SAL. These key technologies include the system model and basic theoretical problems, system design and architecture, laser phase noise suppression technology, motion error compensation method, and imaging algorithms. The third part reviews the progress of the outdoor experiments at home and abroad. Outdoor experiment is an important step before practical application, which is able to reveal the defects and deficiencies of the system in the real environment. Finally, we summarized the challenges that prevent SAL systems from becoming practical and provided some future directions.

Xu C, Jin K, Wei K. Research progress of synthetic aperture ladar techniques[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 240007; DOI: 10.12086/oe.2024.240007

¹National Laboratory on Adaptive Optics, Chengdu, Sichuan 610209, China; ²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ³College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China; ⁴State Key Laboratory of Extreme Photonics and Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China

* E-mail: kwei@zju.edu.cn