

文章编号 1004-924X(2016)增-0300-09

合成孔径激光雷达大视场技术综述

李一哲^{1,2*}, 薛 斌², 赵意意²

- (1. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 101408;
2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要: 概述了合成孔径激光雷达国内外的研究现状, 指出了现阶段限制合成孔径激光雷达应用及工程化的困难, 着重分析了其系统成像视场过小问题的解决方法, 说明合成孔径激光雷达技术中外差探测视场在理论上的限制, 介绍了国内外学者针对这一问题所做的努力和探索, 最后对其发展前景进行了分析和展望。

关键词: 激光雷达; 合成孔径; 大视场; 外差探测; 接收视场角; 成像演示

中图分类号: 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20162413.0300

Development of wide field of view technology of synthetic aperture lidar

LI Yi-zhe^{1,2*}, XUE Bin², ZHAO Yi-yi²

(1. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology,
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;

2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

* Corresponding author, E-mail: liyizhe@opt.cn

Abstract: The development of Synthetic Aperture Lidar (SAL) both at domestic and abroad was reviewed, where the technical difficulties in its application and practice were introduced. Among these problems, the solutions to that of narrow field of view (FOV) were analyzed, demonstrating theoretical restriction in FOV of heterodyne detection in SAL. The endeavor and exploration of wide FOV SAL were summarized at home and abroad. Finally, the future development prospect of SAL was described and analyzed.

Key words: laser lidar; synthetic aperture; wide field of view; heterodyne detection; receiving field of view; imaging demonstration

1 引言

遥感探测中, 提高分辨率始终是人们追求的

目标之一。无线电和光学波段的探测方式会受到衍射极限的限制, 通常通过增大接收天线(或镜头)的尺寸(可理解为“孔径”)来提升分辨率, 但这会增大设备的尺寸和重量。

收稿日期: 2016-05-28; 修订日期: 2016-06-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60808028)

合成孔径成像的目的是利用小孔径系统来达到大孔径系统的分辨率。合成孔径成像方法主要分为:干涉法、孔径组合法和相干编码法^[1]。干涉法是通过测量物体辐射场的复相干度来获得物体信息的方法。孔径组合法是实现光学合成孔径最直接的一种方法,它是用多个小孔径部件相干综合来得到物体的信息。相干编码法是一种主动式合成孔径成像技术。它主要采用相干辐射照明物体,在观察面上逐点记录回波的振幅和位相,后再利用记录的数据重现观察的物体。该方法的主要实现形式是合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)。

SAR 是利用雷达与目标的相对运动,把尺寸较小的真实天线孔径用数据处理的方法合成较大的等效天线孔径的雷达。作为一种主动微波成像方式,它具有分辨率高,能全天候工作,可有效识别伪装并穿透遮盖物等优点。SAR 在经济、军事和科学研究等领域具有广泛的应用价值。SAR 成像针对静止目标,逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)针对运动目标成像,二者在原理上相似,只是形式和应用有所不同^[2]。

合成孔径激光雷达(Synthetic Aperture Ladar, SAL)是 SAR 在光学领域的实现形式^[3]。逆合成孔径激光雷达(Inverse Synthetic Aperture Ladar, ISAL)同 ISAR 类似。合成孔径原理上需要孔径接收信号的幅值和相位信息,在射频领域比较容易实现,但在光学波段目前还不能实现直接检测或补偿,精确的光学时延和大气校正也使 SAL 实现较为困难。SAL 的工作波长比 SAR 短 3~4 个数量级,理论上前者具备更高的方位向分辨率,更短的合成孔径时间,所以具有良好的军用和民用潜力^[4]。和常规的光学成像不同,SAL 利用目标散射回波的相位信息来反演目标图像,属于相干成像,相对于微波波段波长很短,实际工作过程中影响回波相位信息的因素很复杂,且难以补偿,所以 SAL 的实现有一定难度。目前,关于 SAL 的研究尚未进入实用阶段。

本文对国内外 SAL 实验研究进展及主要难点进行了论述和分析,汇总了国内外 SAL 实验的研究进展,罗列了最近实验演示成像结果,讨论了目前 SAL 实际应用要解决的几个问题。然后,从视场方面着重分析了 SAL 的研究现状,并汇总讨

论了实现大视场成像的方法。最后,总结了几种新体制 SAL 的特点与优势,对 SAL 的发展前景做了展望和分析。

2 SAL 研究进展

2.1 国外研究现状

美国在 20 世纪 60 年代末首先开始了 SAL 的概念验证实验。1969 年,美国联合航空器研究实验室尝试将 SAR 原理应用于 He-Ne 激光器,用于分辨两个位于非相干探测不能分辨的目标,但是只进行了方位向分辨,没有尝试分辨距离向^[5]。1970 年,该实验室又使用 CO₂ 激光器进行了成像,但由于连续激光器只能实现一维成像^[6],两次对目标的成像均清晰可辨。1987 年,密歇根环境研究所使用脉冲 TEA CO₂ 激光器作为辐射源,宣称实现了合成孔径三维成像实验装置,但没有公布获得的图像^[7]。1989 年,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的计算表明,用 10 W 连续 CO₂ 激光器和 20 cm 的光学孔径,可以在 200 km 距离获得 10 cm 的分辨率^[8]。1994 年,麻省理工大学林肯实验室使用 Nd:YAG 激光器实现了二维图像分辨率的提高,其图像质量超过相同大小的合成孔径雷达^[9-10]。1998 年,日本通信实验室探讨了采用激光以合成孔径方式对静止或运动目标进行探测的可行性,并以理论预测的分辨率实现目标的一维合成孔径成像^[11-12]。

进入 21 世纪后,随着激光器、光纤和探测器等技术的提高,SAL 的研究取得了较大进展。2002 年,美国海军实验室实现了基于光纤激光的

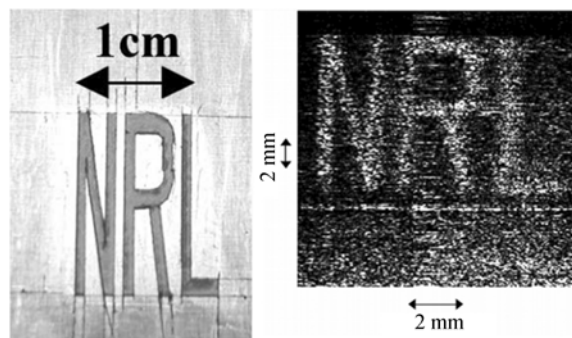


图 1 美国海军实验室实验目标和成像结果^[13]
Fig. 1 Experimental target and imaging result in Naval Research Laboratory(NRL)^[13]

二维 SAL 成像演示^[13-14]。该二组 SAL 的距离像通过线性调频技术实现,方位像通过合成孔径成像处理实现,是第一个采用类 SAR 技术的 SAL 成像演示。图 1 为实验目标照片及成像结果,字母图像较为清晰,但由于目标安装于铝板上图像中散斑较多。

2004 年,美国 Aerospace 公司首次实现用移动口径对固定散射目标的成像^[15-16],图 2 为该研究的部分成果,目标细节较为清晰。至此,美国基本完成了 SAL 在实验室的演示工作。

2006 年,在美国国防高级研究计划局支持下,雷声公司和诺斯罗普·格鲁门公司分别采用光纤激光和波长 $9.11 \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光实现了高分辨率机载 SAL 成像,成像质量达到照片级,取得了重大进展^[17]。虽然具体资料没有公开,但这个消息仍然鼓舞人心。2009 年,美国洛克希德马丁相干技术公司使用光纤激光器,在室外条件下实现 700 m 距离上 0.28 cm 的方位向分辨率^[18]; 2011 年,该公司又完成了正侧视条带模式的机载

SAL 实验^[19],斜距达 1.6 km,目标成像较为清晰,如图 3 所示。

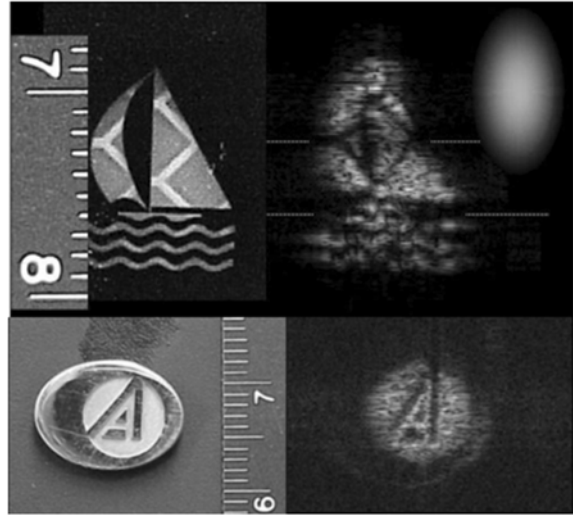


图 2 Aerospace 公司实验目标和成像结果^[16]
Fig. 2 Experimental target and SAL imaging outcomes of Aerospace Corporation^[16]

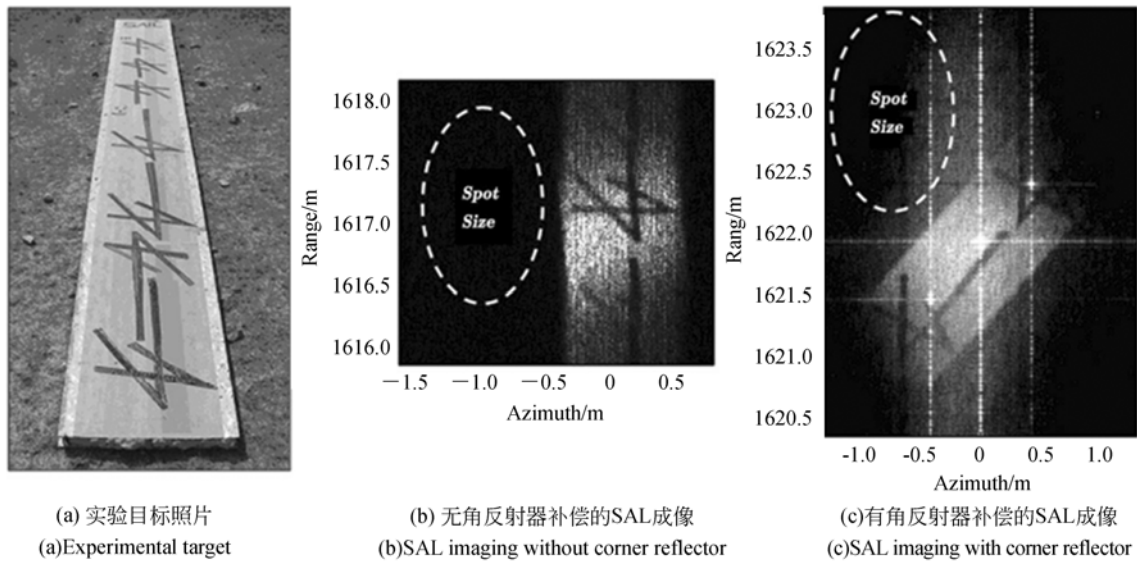


图 3 2011 年洛克希德马丁相干技术公司实验目标和成像结果^[19]

Fig. 3 Experimental target and SAL imaging outcomes of Lockheed Martin Coherent Technologies in 2011^[19]

2012 年,代顿大学及空军实验室展示了差分 SAL 对具有复杂空间结构的扩展散射目标的高分辨率成像能力,主要区别是使用了二维传感器阵列接收信号。2015 年,蒙大拿州立大学首次在实验室展示了差分 SAL,其主要特点是对相位的矫正不使用软件算法而基于硬件实现^[19],其验证

图像如图 4 所示。其中,左右两个图像的原目标分别为反射器在暗背景上摆放的“X”和“+”形状。

2.2 国内研究现状

国内 SAL 的研究工作开展相对较晚。2002 年,电子科技大学的彭仁军综合利用多幅干涉

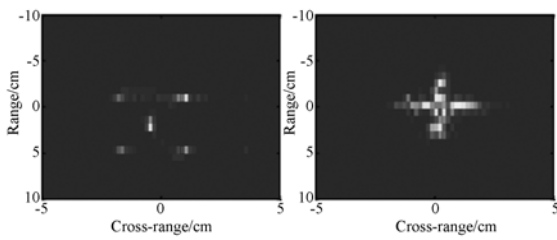


图 4 2015 年蒙大拿州立大学差分 SAL 成像结果
Fig. 4 Imaging outcomes of Differential SAL of Montana State University in 2015

场^[20]达到了孔径合成的实验目的,但是其回波数据没有整形,信号处理也较为简单。2009 年,西安电子科技大学的郭亮等人给出了一种室内 IS-AL 成像的实验系统^[21],但该系统只能工作于“一步一停”的理想模式,成像效果也需要改善。同年,中科院上海光机所周煜等人实现了实验室二维图案目标的方位向和距离向同时成像^[22],解决了 SAL 空间光学、时间光学和图像处理方面的问题,实现了系统的光学、光电子学和图像处理的集成,成像结果如图 5 所示。

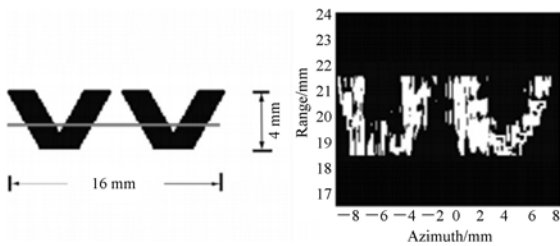


图 5 2009 年上海光机所的实验目标和成像结果^[22]
Fig. 5 Experimental target and SAL imaging outcome of Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics (SIOM) in 2009^[22]

2011 年,上海光机所刘立人等完成了室内 14 m 距离上的 SAL 成像实验,采用自由空间结构的 光学系统实现了实时二维成像^[23],但实验图像受到比较明显的激光散斑效应的影响,结果如图 6 所示,相比图 5 成像质量有所改善。

2013 年,中科院电子学所也完成了采用单程远场衍射照明的 SAL 成像演示^[24],其聚焦图像的形成只应用了基本的 SAL 成像理论,无需辅助相位自聚焦技术,成像结果较为清晰。实验中,由于目标背景为橡胶皮,与目标的反光材料相比回波弱,画面质量与图 1 相比有较大提高,结果如图 7 所示。

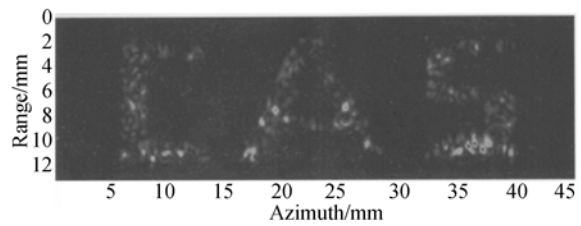


图 6 上海光机所实验成像结果^[23]
Fig. 6 Experimental imaging outcome of SAL in SIOM in 2011^[23]

2015 年,电子学所获得了条带模式 SAL 实验室高分辨率成像结果,得到了“照片级”质量的图像如图 8 所示,尤其展示了相位梯度自聚焦处理在高质量 SAL 图像聚焦中的重要作用^[25],但其是对实验室环境中反光条制作的 合作目标的成像,仍然属于原理性验证。

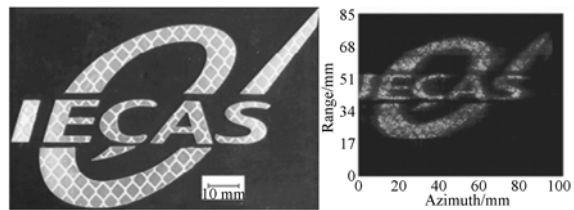


图 7 电子学所实验目标及成像结果^[24]
Fig. 7 Experimental target and SAL imaging outcome n institute of electronics in 2011^[24]

上海光机所刘立人在 2012 年提出直视 SAL 原理——它采用同轴光束自差接收,没有光学延时线^[26],并由栾竹等人在两年后完成该 SAL 原理的演示和室外成像实验,得到了预期的分辨率和满意的二维图像^[27],证实了直视 SAL 消除大气影响的能力。2015 年,上海光机所卢智勇等人 在此基础上开展了静态直视 SAL 演示成像^[28],可进一步实现对未建模视线移动的自动补偿。

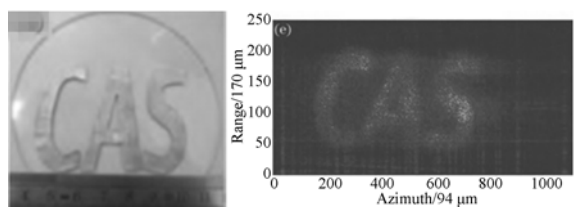


图 8 2015 年电子学所的实验目标及成像结果^[25]
Fig. 8 Experimental target and SAL imaging outcome of institute of electronics in 2015^[25]

2.3 现阶段 SAL 需解决的几个问题

SAL 的研究也有近 50 年的时间,由于这类技术的发展受工业整体水平的影响较大,目前还没有成熟的 SAL 系统,而我国则还没有实现真正意义上的外场实验。SAL 的实用化还需要实现更高的方位向分辨率、对大气湍流的稳定性以及更大的成像视场。其中,高精度成像是 SAL 技术的首要任务,其稳定的相位数据是影响分辨率的关键因素,利用这个数据可以无需成像算法辅助直接达到高分辨率的目的^[24,29]。其次,SAL 目前多应用于有大气的环境中,大气湍流对回波相位的影响较大。大气环境中的 SAL 研究涉及到体制和系统设计等方面,例如直视 SAL 就是消除大气湍流影响的思路之一^[26-27]。

更为直接的问题是 SAL 的成像视场非常小。以 2011 年洛克希德马丁相干技术公司的机载实验为例^[19],1.6 km 斜距上目标平面上的光学足迹(照明光斑和接受视场所关联的目标面接收尺度的较小者,理想情况下二者相等^[26])直径只有约 1 m 左右,对应的视场角不到 0.63 mrad。假设斜距延长至 30 km 其目标面直径也不到 20 m。用这样小的视场对大面积目标进行成像,通常的做法是将多次探测得到的大量小图像进行拼接,这无疑会拖累成像速度、增加系统复杂度。

3 SAL 视场问题研究

3.1 天线理论限制

SAL 的回波经过大气散射、吸收以及目标散射,到达探测器时已经十分微弱,直接探测不能满足微弱信号在复杂背景下的探测要求,需要使用

外差探测技术。该技术将外部光源引入并与信号光在探测器表面干涉,对产生的差频量进行探测从而还原信号光信息,其主要特点是灵敏度高。

1966 年,斯坦福大学 A. E. Siegman 提出光学外差接收信号的有效孔径面积 A_R 与信号接收视场立体角 Ω_R 有如下关系^[30]:

$$A_R \Omega_R \approx \lambda^2, \quad (1)$$

信号光、本振光光路中的光学器件可以在 A_R 与 Ω_R 之间做取舍但并不能改变这个结果,即孔径和视场角的乘积在波长平方的量级,二者之间服从反相关关系。对于量级较小的光学波长,这种制约关系其实影响着系统接收弱信号的能力和成像幅宽,单独提高其中一项是以牺牲另一项为代价的,并不能改善最终的信噪比^[31]。

3.2 主要 SAL 实验视场概况分析

由表 1 可以看出,目前主要 SAL 的视场角都很小,均在毫弧度量级,远不能达到实用要求。

3.3 SAL 外差探测视场问题研究

外差探测的主要优势但也是明显缺点的就是其非常窄、接近衍射极限的视场角^[32]。目前,国内外学者针对这个问题做了大量研究。

大视场概念首先应用于使用光折变材料的非线性效应产生自适应本振光的过程中。Delautre 等将其扩展到透镜聚焦外差探测系统,并对“天线理论”用艾里斑重合的概念进行解释,通过增大探测器的面积来提高接收视场^[33]。但他们没有考虑“天线理论”的限制,也不能提高信噪比。

Lucke 等认为 SAL 处于光子受限的工作状态,指出系统噪声应该是添加了噪声信号的估计值,并定量推导了 SAL 光子极限情况下信噪比的表达式^[34]。他虽然提到采用阵列探测可以改善

表 1 国内外主要 SAL 视场概况

Tab.1 Overview of field of view of main SAL at home and abroad

时间	单位	接收口径	目标距离	视场角/mrad	场地
2002	美国海军实验室	150 μm	1 m	10	室内
2004	Aerospace 公司	310 μm	~2 m	~5	室内
2009	洛克希德马丁相干技术公司	3 mm	700 m	~0.43	室外
2009	西安电子科技大学	7 mm	20 cm	<20	室内
2009	上海光机所	1 mm	3.2 m	<3.13	室内
2011	洛克希德马丁相干技术公司	2.4 mm	1.6 km	~0.625	机载
2011	上海光机所	0.2 mm	14 m	1.57	室内
2015	中科院电子学所	0.5 mm	12.9 m	6.98	室内

系统的信噪比,但并没有给出具体的讨论。

L. E. Adams 等认为“天线理论”是基于探测器表面的信号光和本振光线性叠加的假设得出的,他们利用光折变双相位共轭镜使本振光和信号光在探测器表面非线性叠加,从而使外差探测的视场扩大到衍射受限视场的 1.6 倍^[32]。但双相位耦合镜对较弱的信号光响应比较慢,需要数分钟才能到稳定状态,此外这种方法对视场的改善并不明显。

董洪舟等认为用透镜将信号光和本振光聚焦后会聚到探测器上时,输出的中频信号电流的振幅本质为透镜孔径透射率函数的频谱值,并提出采用孔径透射率调制方法来降低失配角对外差探测的影响^[35]。但对于孔径透射率调制来说,由于调制原件的透射率函数固定,这种方法只能对一定方位入射的信号光起到增强中频信号的作用,因此只能对合作目标进行探测。

邢旭东介绍了降低空间相干条件的方法——艾里斑原理,即在探测器前加一个同艾里斑大小相同的光阑,使艾里斑尺寸与探测器的光敏面尺寸相等^[36]。其实质是把角准直的困难转化为小孔光阑的精细调节,增大了系统装调的难度,视场也被限制为接收系统的衍射极限视场,采用这一方法将严重限制外差探测的成像幅宽。

李祥等应用数值模拟的方法分析了基于艾里斑原理的接收光学系统抑制准直失配对混频效率影响的优缺点,认为阵列探测器匹配接收可以有效减小准直失配角对混频效率的影响^[37]。但是

其讨论限于模拟和仿真,也没有指出探测器的实际选择。不过,阵列探测器匹配接收仍可以作为解决 SAL 视场问题的备选方案之一。

卢栋等从接收视场角、信号光可探测能力及信噪比三个方面分析讨论了望远镜接收、透镜接收及望远镜自差接收 3 种典型外差接收结构的优劣^[31]。结果表明,透镜-N 阵列元的阵列探测器接收结构能保证较大接收视场并将信噪比提升 \sqrt{N} 倍,具有一定的参考价值。

刘立人和卢栋等人分别对 SAL 外差探测装置进行了设计^[38-39]。其中,后者特地对视场问题做了研究,在理论上可实现比望远镜直接接收光学天线口径衍射所决定的视场大得多的接收视场角。整个视场中外差效率相对恒定,能够接收到较为稳定的外差电流信号,探测装置结构如图 9 所示。其中,离焦结构能够消除回波信号二次项相位差的影响^[40];透镜光阑具有孔径尺寸调节机构,探测器为面探测器或阵列探测器;透镜光阑、发射望远镜出瞳孔径和接收望远镜入瞳孔径同时为方形(或圆形)孔径,这有利于成像分辨率^[41]。具体实例中外差接收视场为 0.75 mrad,基本符合“天线定理”的预测。与传统衍射光学极限所决定的视场角(0.021 mrad)相比,进步已经相当大,所述方法有比较大的参考价值。

综上,除了压缩光束的有效孔径外,通过使用阵列探测器匹配接收或进一步改进外差接收系统对扩大系统视场有一定帮助。

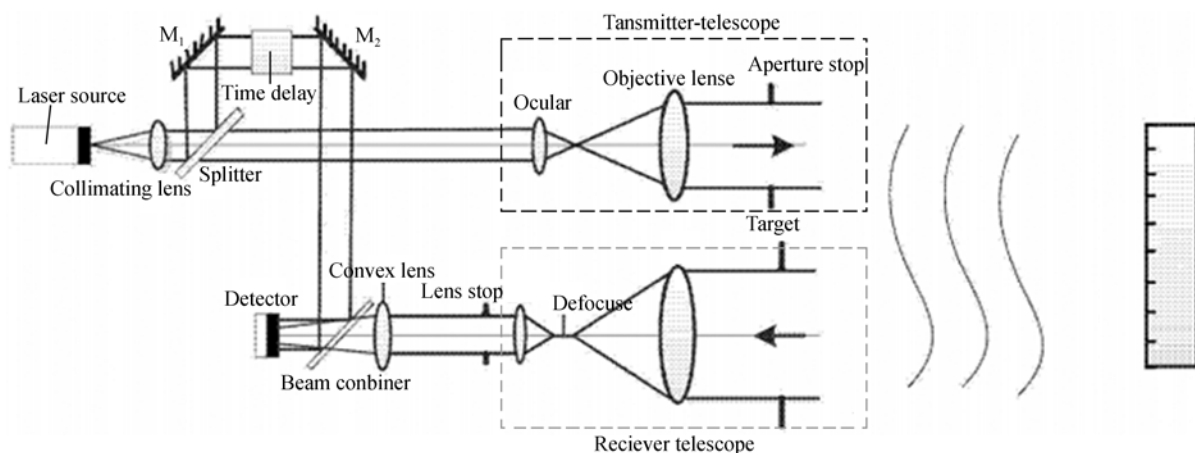


图 9 SAL 大视场外差探测装置^[37]

Fig. 9 Devices of heterodyne detection with wide field of view^[37]

4 新型 SAL 简介

随着研究的不断深入,几种新型的 SAL 应运而生,它们各具特色,值得期待。上海光机所刘立人提出的直视 SAL^[26-28],采用同轴光束自差接受可有效降低大气、运动平台和光学系统等相位变化和干扰的影响;不需要光学延时线,没有拍频初始相位同步的要求,没有成像阴影;使用低质量的光学系统即可同时实现大的光学足趾、高分辨率成像及较强的回波接收。这是一种拥有较为广阔前景的新型 SAL。美国劳伦斯利夫莫尔实验室提出的差分合成孔径激光雷达^[19,42],可极大降低系统对运动平台不规则运动的敏感程度和激光光谱纯净度的要求,对紫外线到中红外的短波长系统来说更为适用。另外,全息孔径激光雷达^[43]、上海光机所戴恩文等人提出的菲涅尔望远镜合成

孔径激光成像雷达^[44]及马萨诸塞大学提出的基于量子级联太赫兹逆合成孔径雷达^[45]等,也值得借鉴和学习。

5 结 论

SAL 具有快速、远距离、与目标距离无关的高分辨率成像能力等优点。但是它还存在一些问题,如容易受到大气湍流及扰动、运动平台稳定性、目标散斑及系统本身相位变化等的影响,这些问题限制了 SAL 的实用化。解决这些技术难题,将 SAL 推向产品化、商业化不仅需要细致的理论仿真,更需要不断摸索和创新关键技术。

未来随着高功率相干激光技术、高速数字信号处理技术与高灵敏外差探测技术等相关技术的成熟和发展,SAL 将成为高分辨率遥感的有力工具,在军用和民用领域具有广阔的前景。

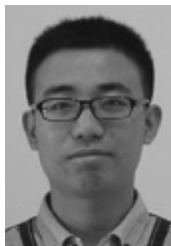
参考文献:

- [1] 王之江. 成像光学 [M]. 北京:科学出版社, 1991.
WANG ZH J. *Imaging Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese)
- [2] 汪玲. 逆合成孔径雷达成像关键技术研究 [D]. 南京航空航天大学, 2006.
WANG L. Study on key technologies of inverse synthetic aperture radar imaging. [D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [3] 吴谨. 关于合成孔径激光雷达成像研究 [J]. 雷达学报, 2012, 1(4): 353-60.
WU J. On the development of synthetic aperture Ladar imaging [J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(4): 353-60. (in Chinese)
- [4] TOMLINSON P G. Active imaging at DARPA [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2005, 5895: 589505-589505-9.
- [5] LEWIS T S, HUTCHINS H S. A synthetic aperture at optical frequencies [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1970, 58(4): 587-588.
- [6] LEWIS T S, HUTCHINS H S. A synthetic aperture at 10.6 microns [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1970, 58(10): 1781-1782.
- [7] HARNEY R C. Synthetic aperture imaging with a pulsed CO₂ tea laser [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1986, 783:29-40.
- [8] KYLE T G. High resolution laser imaging system [J]. *Applied Optics*, 1989, 28(13): 2651-2656.
- [9] MARCUS S, COLELLA B D, JR G T. Solid-state laser synthetic aperture radar [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(6): 960-964.
- [10] GREEN T J, MARCUS S, COLELLA B D. Synthetic-aperture-radar imaging with a solid-state laser [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(30): 6941-6949.
- [11] YOSHIKADO S, ARUGA T. Feasibility study of synthetic aperture infrared laser radar techniques for imaging of static and moving objects [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(24): 5631-5639.
- [12] YOSHIKADO S, ARUGA T. Short-range verification experiment of a trial one-dimensional synthetic aperture infrared laser radar operated in the 10- μm band [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(9): 1421-1425.
- [13] 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.
- [14] BASHKANSKY M, LUCKE R L, FUNK E E, et al.. Synthetic aperture imaging at 1.5 μm : laborato-

- ry demonstration and potential application to planet surface studies [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2002, 7(2): 387-404.
- [15] 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.
- [16] BUELL W, BUCK J, BECK S. Demonstration of synthetic aperture imaging lidar [J]. *SPIE*, 2005, 5791:152-166.
- [17] RICKLIN J, SCHUMM B, DIERKING M, *et al.*. Synthetic aperture lidar for tactical imaging (SALTI) (Briefing Charts)[J]. 2007.
- [18] BUCK J, KRAUSE B W, MALM A I, *et al.*. Synthetic aperture imaging at optical wavelengths [C]. *Proceedings of the International Quantum Electronics Conference, Optical Society of America*, 2009.
- [19] KRAUSE B, BUCK J, RYAN C, *et al.*. Synthetic aperture lidar flight demonstration [C]. *Proceedings of the CLEO: Science and Innovations, Optical Society of America*, 2011.
- [20] 彭仁军, 吴健, 杨春平, 等. 用于干涉法实现光学合成孔径技术 [J]. *光学学报*, 2002, 22(3): 355-359.
- PENG R J, WU J, YANG CH P, *et al.*. Synthesizing aperture in optics with interferometric imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(3): 355-359. (in Chinese)
- [21] 郭亮, 邢孟道, 张龙, 等. 室内距离向合成孔径激光成像的实验研究 [J]. *中国科学*, 2009, 10: 1678-1684.
- GUO L, XING M D, ZHANG L, *et al.*. Experimental study on indoor range distance synthetic aperture laser imaging[J]. *Science China*, 2009, 10: 1678-1684. (in Chinese)
- [22] 周煜, 许楠, 栾竹, 等. 尺度缩小合成孔径激光雷达的二维成像实验 [J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 2030-2032.
- ZHOU Y, XU N, LUAN ZH, *et al.*. 2D imaging experiment of a 2D target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 2030-2032. (in Chinese)
- [23] 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): 104-108.
- 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): 104-108. (in Chinese)
- [24] 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.
- WU J, YANG ZH SH, ZHAO ZH L, *et al.*. Synthetic aperture lidar imaging with one-way far-field diffraction. [J]. *Infrid Millim. Waves*, 2013, 32(6): 514-518. (in Chinese)
- [25] 吴谨, 赵志龙, 吴曙东, 等. 12.9 m 高分辨率合成孔径激光雷达成像 [J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 273-278.
- WU J, ZHAO ZH L, WU SH D, *et al.*. High resolution synthetic aperture lidar imaging at 12.9 m distance. [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 273-278. (in Chinese)
- [26] 刘立人. 直视合成孔径激光成像雷达原理 [J]. *光学学报*, 2012, 9: 280-287.
- LIU L R. Principle of down-looking synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, (9): 280-7. (in Chinese)
- [27] 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): 45-48.
- [28] 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): 89-92.
- [29] JIN W, FEI-FEI L, ZHI-LONG Z. Demonstration of strip map mode synthetic aperture lidar with PGA-independent high resolution images [J]. *Optics Laser Technology*, 2014.
- [30] SIEGMAN A. The antenna properties of optical heterodyne receivers [J]. *Applied Optics*, 1966, 5(10): 1588-1594.
- [31] 卢栋, 孙建锋, 周煜, 等. 大视场接收合成孔径激光成像雷达探测能力分析 [J]. *光学学报*, 2013, 7: 287-292.
- LU D, SUN J F, ZHOU Y, *et al.*. Analysis on detection capability of wide field receiving synthetic aperture imaging lidar. [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 7: 287-292. (in Chinese)
- [32] ADAMS L E, BONDURANT R S. Wide-field-of-view heterodyne receiver using a photorefractive double phase-conjugate mirror [J]. *Optics Letters*,

- 1991, 16(11): 832-834.
- [33] DELAUTRE D, BREUGNOT S, LAUDE V. Wide field of view coherent detection[C]. *Proceedings of the Aero Sense'99, International Society for Optics and Photonics*, 1999.
- [34] LUCKE R L, RICKARD L J. Photon-limited synthetic-aperture imaging for planet surface studies [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(24): 5084-5095.
- [35] 董洪舟, 吴健, 郭贞贞. 孔径透射率调制对外差探测的影响 [J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 8-13.
DONG H ZH, WU J, GUO ZH ZH. Study of the effect of aperture transmittance modulation on heterodyne detection. [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3):8-13. (in Chinese)
- [36] 邢旭东. 应用于激光相干探测技术的光学系统研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011.
XING X D. *The Optical System Research on Techniques of Coherent Laser Detect* [D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [37] 李祥, 杨进华, 姜成昊, 等. 激光外差探测中准直失配问题的研究 [J]. *激光与红外*, 2014, 44(3): 250-253.
LI X, YANG J H, JIANG CH H, *et al.*. Study on collimation mismatch in laser heterodyne detection. [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(3): 250-253. (in Chinese)
- [38] 刘立人. 合成孔径激光成像雷达的透镜焦面阵列外差接收光学天线 [M]. CN. 2009.
LIU L R. *Lens Focal Plane Array Heterodyne Receiving Optical Antenna in Synthetic Aperture Imaging Ladar* [M]. CN. 2009. (in Chinese)
- [39] 卢栋, 孙建锋, 周煜, 等. 合成孔径激光成像雷达大视场外差探测装置 [M]. 2013.
LU D, SUN J F, ZHOU Y, *et al.*. *Wide Field of View Heterodyne Detection Device in Synthetic Aperture Imaging Ladar* [M]. 2013. (in Chinese)
- [40] 刘立人. 合成孔径激光成像雷达(I):离焦和相位偏置望远镜接收天线 [J]. *光学学报*, 2008, 28(5): 997-1000.
LIU L R. Synthetic aperture imaging ladar (I): Defocused and phase-biased telescope for reception antenna [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 997-1000. (in Chinese)
- [41] 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.
LIU L R. Synthetic aperture imaging ladar (V): Imaging resolution and antenna aperture function. [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1408-1415. (in Chinese)
- [42] STAPPAERTS E A, SCHARLEMANN E T. Differential synthetic aperture ladar [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(18): 2385-2387.
- [43] VENABLE S M, DUNCAN B D, DIERKING M P, *et al.*. Demonstrated resolution enhancement capability of a stripmap holographic aperture ladar system [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(22): 5531-5542.
- [44] 戴思文, 孙建锋, 闫爱民, 等. 菲涅耳望远镜合成孔径激光成像雷达实验室验证 [J]. *光学学报*, 2012, 5: 270-275.
DAI E W, SUN J F, YAN A M, *et al.*. Demonstration of a laboratory fresnel telescope synthetic aperture imaging ladar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 5:270-275. (in Chinese)
- [45] DANYLOV A A, GOYETTE T M, WALDMAN J, *et al.*. Terahertz inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging with a quantum cascade laser transmitter [J]. *Optics Express*, 2010, 18(15): 16264-16272.

作者简介:



李一哲(1992—),男,山西临汾人,硕士研究生,2014年于哈尔滨工业大学(威海)获得学士学位,主要从事外差探测及光学设计方面的研究。E-mail: liy-zhe@opt.cn



薛斌(1979—),男,山东泰安人,研究员,2001年于西安电子科技大学获得学士学位,2006年于中科院西安光机所获得博士学位,主要从事嫦娥工程探测数据挖掘及新型光学遥感方法的研究。E-mail: xuebin@opt.ac.cn