

合成孔径激光雷达成像发展及关键技术

吕亚昆, 吴彦鸿

装备学院光电装备系, 北京 101416

摘要 合成孔径激光雷达(SAL)能够突破激光的衍射限制, 满足对远距离目标和场景进行高精度实时成像的需求。从 SAL 理论和实验进展两方面, 详细总结分析了 SAL 的国内外发展现状。在此基础上, 总结和分析了实现 SAL 实际应用, 还需深入研究的几个关键技术: 激光光源、发射信号波形、探测体制、激光传输特性和目标反射特性、成像算法和运动补偿等, 为进行 SAL 的深入研究和实用化奠定基础。

关键词 遥感; 合成孔径激光雷达; 高分辨率精细成像; 运动补偿; 激光

中图分类号 TN958 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.100004

Development and Key Technologies of Synthetic Aperture Ladar Imaging

Lü Yakun, Wu Yanhong

Department of Photoelectric Equipment, Equipment Academy, Beijing 101416, China

Abstract Synthetic aperture ladar (SAL) breaks through the diffraction restrict of laser, which is able to afford the need of high precision and real time imaging for the remote targets and scenes. The development situation of SAL at home and abroad is analyzed in detail, through two aspects of theoretical status and experimental progress. On this basis, the key technologies such as SAL laser source, emission signal waveform, laser transmission characteristics and target reflection characteristics, imaging algorithm and motion compensation are summarized and analyzed. It lays the foundation for further study and practical application of SAL.

Key words remote sensing; synthetic aperture ladar; high resolution precise imaging; motion compensation; laser

OCIS codes 280.6730; 280.4750; 280.5600; 280.3640

1 引言

激光成像雷达近年来发展迅速, 通过直接照射目标并接收目标的后向散射光实现成像, 具有测量和跟踪精度高、成像分辨率高等优点。然而, 激光成像雷达的方位分辨率受激光波束宽度的限制, 并且随着作用距离的增加而恶化, 无法满足对远距离目标的高分辨精细成像要求。微波合成孔径雷达利用合成孔径原理能够有效提高和改善方位向分辨率。但是, 由于微波段波长较长, 其成像速度较慢, 且目前微波段雷达实际分辨率已接近其理论极限, 故难以满足对远距离目标的高分辨精细成像需求。

为有效解决这些问题, 人们将合成孔径技术引入到光波波段, 开始了光波波段合成孔径雷达的研究。合成孔径激光雷达(SAL)是一种主动式有源成像系统, 将合成孔径信号处理技术与极大带宽的相干激光雷达相结合, 能够实现对目标的超高分辨实时成像, 且其合成孔径时间短, 具备实时获取目标图像的潜力。更有学者指出, SAL 在理论上是实现千米距离处获得厘米级分辨率的唯一光学手段^[1]。因此, SAL 在预警探测、目标监视和识别等领域具有重要的应用价值。

收稿日期: 2017-04-28; **收到修改稿日期:** 2017-05-15

作者简介: 吕亚昆(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事合成孔径激光雷达成像方面的研究。E-mail: lykc123@sina.com

导师简介: 吴彦鸿(1971—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事信息获取与处理、信息对抗等方面的研究。

E-mail: mail2wyh@163.com

2 SAL 雷达发展现状

20 世纪 60 年代末,国外学者开始在合成孔径激光成像方面进行初步尝试^[2],然而受当时激光器件的限制未能有深入的研究和发展。直到近二十年激光器技术有了大幅发展,人们的眼光才又聚集到合成孔径激光成像的研究上,并逐步成为当前的一个研究热点,国外主要是美国国防高级研究计划局(DAPAR)、麻省理工学院林肯实验室、美国国家航空航天局、美国空军、诺斯罗普·格鲁曼公司,以及日本通信实验室等单位进行研究和实验,国内主要是西安电子科技大学、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院电子学研究所、空军工程大学等研究机构在激光器件、成像理论、关键技术、仿真实验等方面进行了探索和研究。2011 年以前,国内外主要针对 SAL 的理论和光学可实现性问题进行研究,重点解决光学系统光源的设计、发射接收信号以及采用合成孔径技术成像等问题。2011 年后,开始针对 SAL 成像体制、信号调制方式、不同场景成像算法、运动目标成像算法以及大气和相位补偿算法等提高成像质量的具体问题展开研究。逆合成孔径激光雷达(ISAL)作为 SAL 的一种特殊应用,其某些技术问题是光波段合成孔径成像的共性问题。因此,将在下文一并介绍部分 ISAL 发展概况和技术研究现状。

2.1 国外成像理论和实验进展现状

20 世纪 60 年代末至 70 年代初,Goodman 提出了光学合成孔径的概念。Lewis 等^[3]分别采用波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器和波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光器作为辐射源,在可见光和红外波段实现了方位向一维合成孔径成像,从而验证了合成孔径原理在光波波段的可行性。

1987 年,Aleksoff 等^[4]使用脉冲横向激励高压二氧化碳激光器(TEA CO_2)的辐射源,发射一系列具有一定间隔的单频脉冲,以此获取距离向信息,搭建了目标三维成像实验装置。Kyle^[5]提出对连续光源编码的合成孔径成像方式,编码脉冲系统向目标场重复发送脉冲阵列,同时接收孔径对所接收到的回波信号进行快速 Hadamard 变换和处理,获得目标的图像。采用光学孔径为 20 cm、功率为 10 W 的连续 CO_2 激光器,理论计算可知,在对 200 km 距离处目标成像时,能够获得 10 cm 的分辨率。

1994 年,美国麻省理工学院林肯实验室的 Marcus 等研制了波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 固体激光器,系统采用外差探测,本振信号通过分束器进行分光,成功实现了一维合成孔径成像实验。1995 年通过在距离向采用非对称天线孔径又实现了二维的 SAL 实验^[6-7],其实验系统框图和结果如图 1 所示。

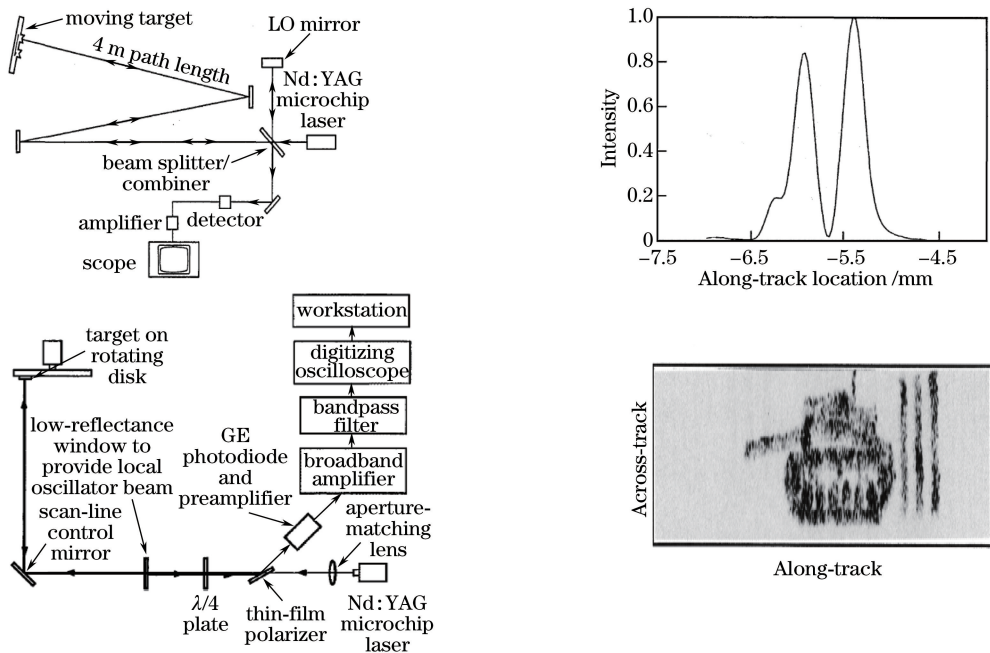


图 1 林肯实验室实验系统框图和实验结果^[6-7]。

(a) 一维实验系统; (b) 一维实验结果; (c) 二维实验系统; (d) 二维实验结果

Fig. 1 Experimental system and results of Lincoln Laboratory^[6-7]. (a) One-dimensional experimental system;

(b) one-dimensional experimental results; (c) two-dimensional experimental system; (d) two-dimensional experimental results

1998年,日本通信实验室 Yoshikado 等^[8]使用 CO₂ 激光器验证了二维 SAL 成像的可行性,并于 2000 年在实验室内实现了短距离非常接近的两个点目标的一维 SAL 成像,并计划研制 10 μm 的室外远距离 SAL 成像系统。

2002年,美国海军实验室 Lucke 等^[9]采用波长为 1.55 μm 的单模可调谐激光器,首次成功实现了对运动目标的二维成像(属于 ISAL 范畴),实验框图和 30 cm 处目标成像结果如图 2 所示。此外,还给出了扫描式星载 SAL 设计方程,并用相位屏法研究了 SAL 信号在大气中的传输情形^[10-11]。

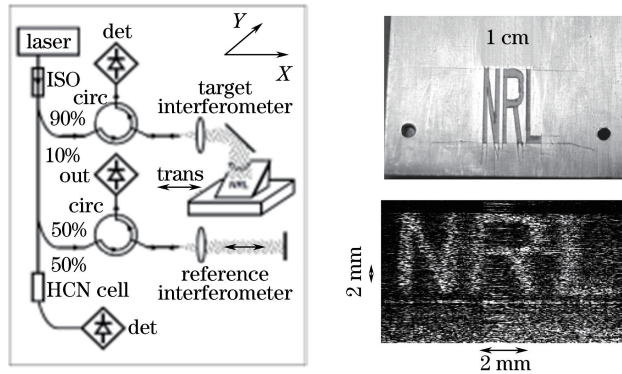


图 2 美国海军实验室实验系统框图和实验结果^[10]。(a)实验系统;(b)实验结果

Fig. 2 Experimental frame and experimental results of Navy Laboratory^[10]. (a) Experimental system; (b) experimental results

2004~2005年,美国 Aerospace 公司 Beck 等^[12]采用波长为 1.5 μm 的脉冲光纤激光光源对静止目标进行了 SAL 成像实验,该实验利用运动的发射接收孔径对镜面目标和漫散射目标成像,是第一次真正意义上的二维 SAL 成像实验,距离向和方位向分辨率达到了 60 μm×50 μm。其框图和结果如图 3 所示。

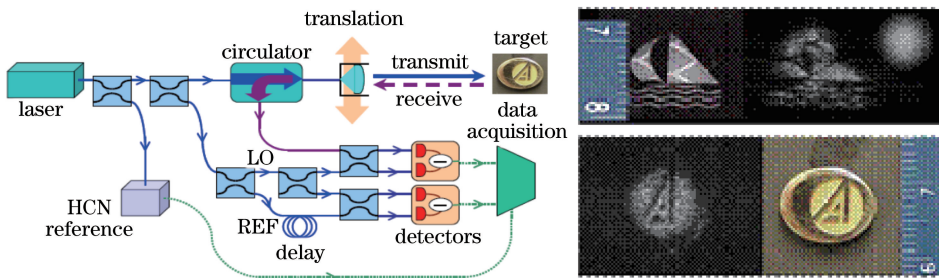


图 3 美国 Aerospace 公司实验框图和结果^[12]

Fig. 3 Experimental block diagram and results of Aerospace company^[12]

2006年,在 DARPA 的赞助下,美国雷声公司和诺斯罗普·格鲁曼公司分别采用了不同的激光波长成功设计并制造出世界上第一部机载 SAL 系统,并进行了高分辨率成像飞行实验^[13],但是未公布实验结果。

2009年,洛克希德马丁相干技术中心,利用 1.55 μm 的光纤激光器等搭载成的实验系统,进行了 1 km 的中距离 SAL 成像实验,得到了二维 SAL 图像;并于 2011 年公布了 SAL 成像装置和成像结果,如图 4 所示^[14]。

2012年,美国蒙大拿州立大学物理光谱实验室 Stephen 等^[15]采用波长为 1.55 μm 的超宽带线性调频调制激光信号成功演示了实验室聚束 SAL 成像,如图 5 所示,其中图 5(a)为实验框图,图 5(b)为干蜻蜓条带模式成像结果及对应光学照片,图 5(c)为采用相位梯度自聚焦(PGA)和 Chirp-Z 变换极坐标格式(CZT-PF)处理的聚束模式成像结果,图 5(d)为聚束模式运动控制和双基几何模型。图 5(b)和图 5(c)右上翼的对比结果表明,聚光模式成像能更好的揭示了干蜻蜓翅膀的精细结构。

2012年,Turbide 等^[16]指出传统微波 SAR 分辨率已经达到了理论极限,并且利用微波信号处理方法获得的数据量比较大,因此提出一种纯光学的快速实现方法。2014年,由于 SAL 波长短、分辨率高,相比微波 SAR 能够更好地实现远距离地面监视,提出采用 SAL 来实现对地面的实时监视,设计了一种工作波长为 1.55 μm 的机载 SAL 对地监视系统^[17],并采用干涉合成孔径激光雷达(IFSAL)对基础设施监视实验^[18],实验中螺丝帽旁边地面微小塌陷结果清晰可见,如图 6 所示。2016年,提出一种基于具有可编程幅度波形的

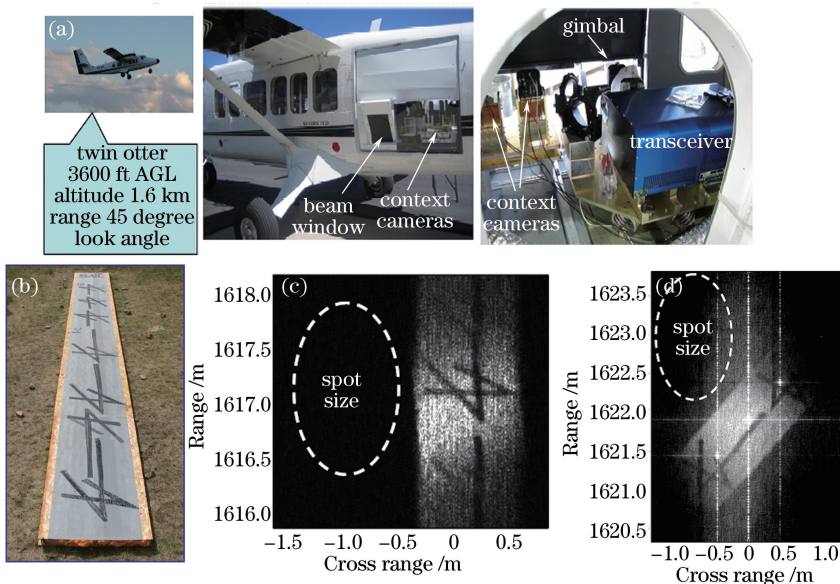


图 4 洛克希德马丁相干技术中心实验结果^[14]。(a)成像装置;(b)目标图片;(c)无角反射镜时成像结果;(d)有角反射镜时成像结果

Fig. 4 Experimental results of Lockheed Martin coherent Technology Center^[14]. (a) Imaging device; (b) target image; (c) imaging results without an angle reflector; (d) imaging results with an angle reflector

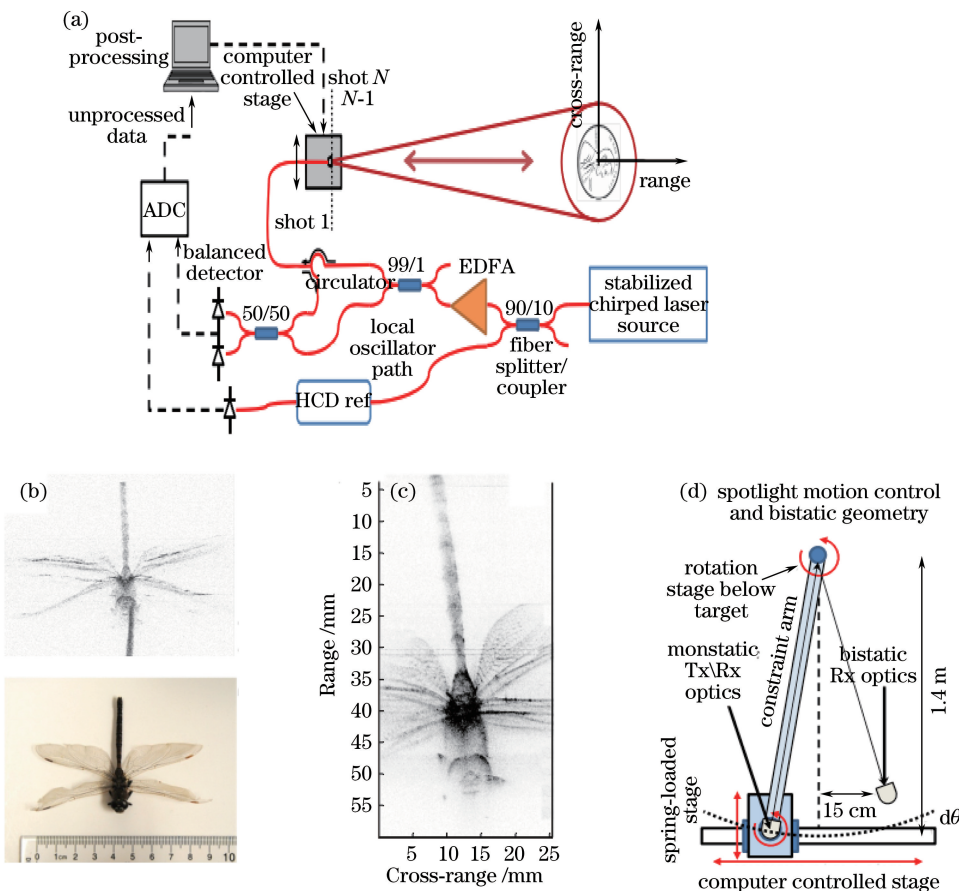


图 5 聚束 SAL 成像实验^[15]。(a)实验框图;(b)干蜻蜓条带模式成像结果及对应光学照片;
(c)聚束模式成像结果;(d)聚束模式运动控制和双基几何模型

Fig. 5 Spotlight SAL imaging experiment^[15]. (a) Experimental diagram; (b) imaging results of stripmap mode and photograph of dried dragonfly; (c) spotlight mode image; (d) spotlight motion control and bistatic geometry model

主振荡器(MOPAW)的合成孔径激光雷达,并给出了 3 m 和 10 m 范围处的 SAL 二维图像结果,如图 7 所示,实现了 $1.7\text{ mm} \times 0.84\text{ mm}$ 的距离和方位分辨率^[19]。

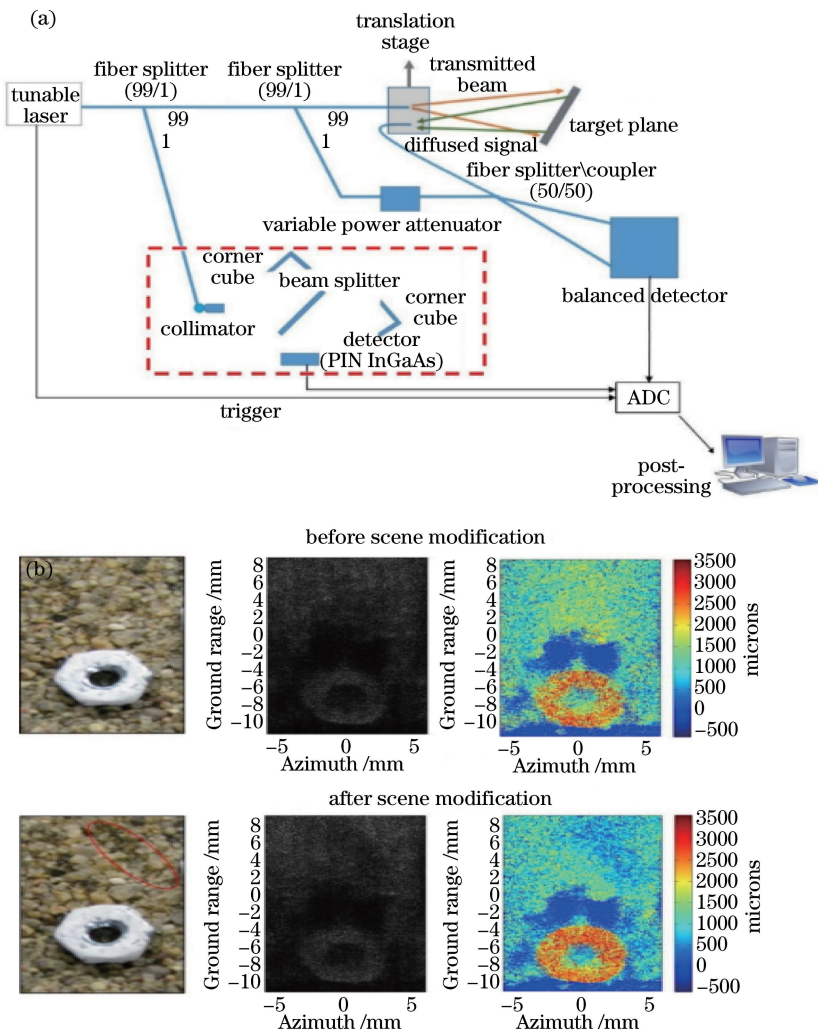


图 6 IFSAL 对地监视实验^[18]。(a)实验框图;(b)成像结果

Fig. 6 IFSAL ground surveillance experiment^[18]. (a) Experimental diagram; (b) imaging results

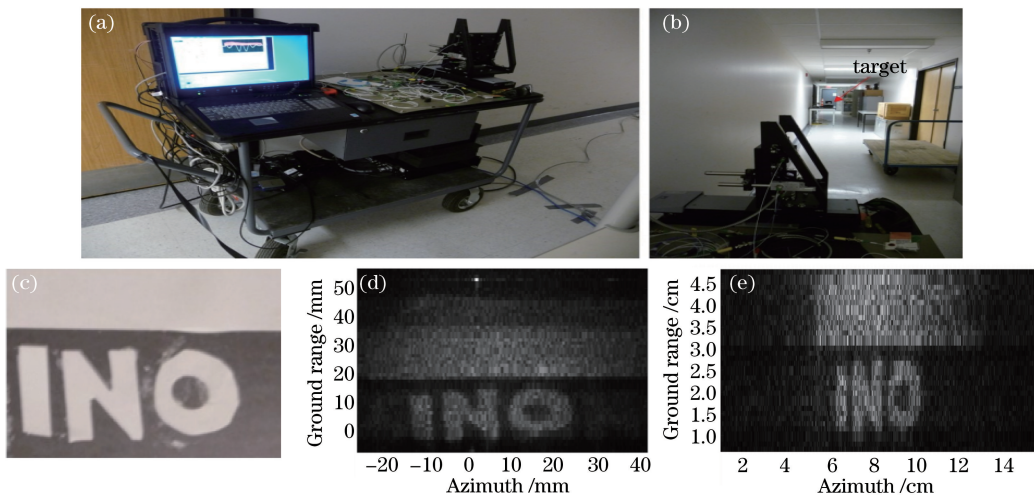


图 7 基于 MOPAW 的 SAL^[19]。(a)实验系统;(b)目标照片;(c) 3 m 成像结果;(d) 10 m 成像结果

Fig. 7 SAL based on MOPAW^[19]. (a) Experimental system; (b) target image; (c) 3 m imaging results; (d) 10 m imaging results

2014年, Barber等^[20-21]给出了低信噪比条件下的SAL成像演示实验, 并采用PGA算法进行相位自聚焦。2016年, Trahan等^[22]研究了大气湍流条件下低载波噪声比(CNR)ISAL成像实验, 指出存在大气湍流时要想达到与无大气湍流相同对比度同等质量的图像, 载噪比要提高2倍以上, 其实验装置和实验结果如图8所示, 成像结果图中载噪比和对比度在无大气湍流时分别为0.31和1.3, 有大气湍流时分别为0.79和1.8。

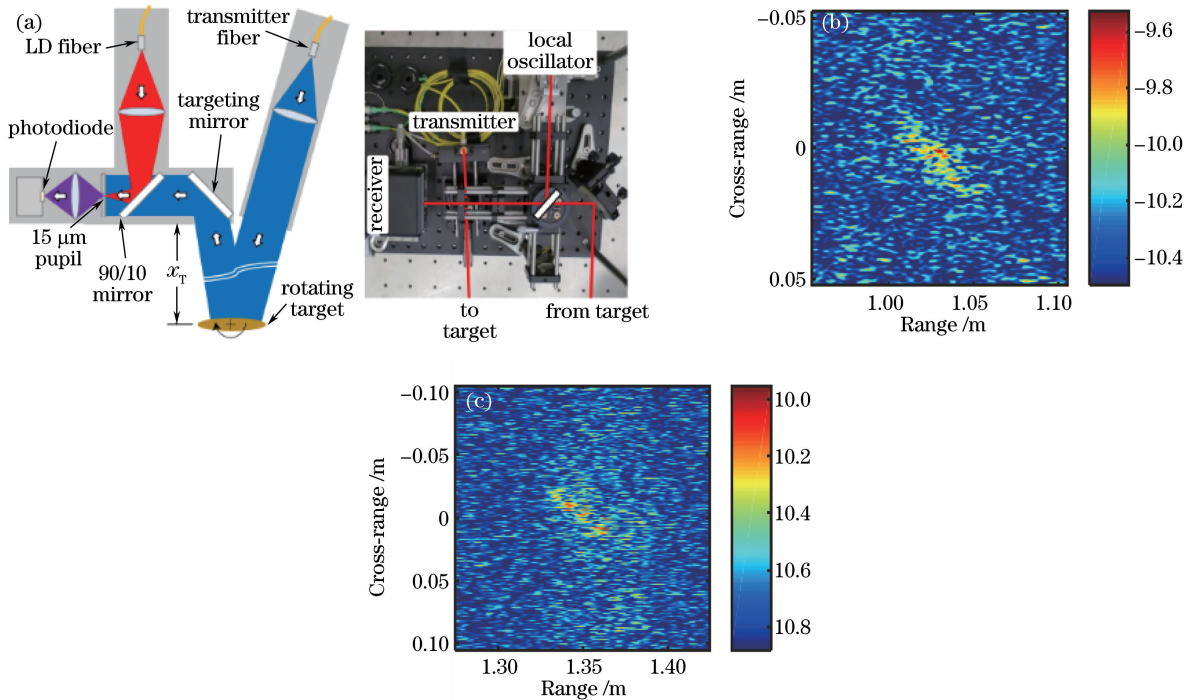


图8 大气湍流条件下低载波噪声比ISAL成像实验^[22]。(a)成像设备;(b)无大气湍流;(c)有大气湍流

Fig. 8 ISAL imaging experiment of low CNR in atmospheric turbulence^[22]. (a) Imaging device;

(b) without atmospheric turbulence; (c) with atmospheric turbulence

2.2 国内成像理论和实验进展现状

国内对SAL的研究起始于1990年, 周兆萍^[23]在《红外与激光技术》中详细介绍了美国SAL研究计划的国防科技报告, 主要内容是在光学波段采用双控干涉实现合成孔径技术的概念、系统与方法。2006年, 张云等^[24]对正侧视条带模式和二维扫描模式的SAL基本理论展开了研究。

2008年, 西安电子科技大学用光纤激光器, 采用收发镜头分离的方式, 搭建了实验室SAL仿真平台, 于11月公开报道了其设计的SAL实验系统, 在国内首次获得了比较理想的一维和二维SAL图像, 并初步研究了机载聚束式成像算法和距离补偿算法。2011年, 又实现了对1m处转台运动目标的二维ISAL成像实验, 如图9所示, 成像分辨率 $0.3\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ ^[25]。2011年, 郭亮等^[26]为解决低脉冲重复频率(PRF)SAL成像率低的问题, 提出一种沿方位向放置多个望远镜接收的系统设计方法, 利用空间自由度解决由于PRF较

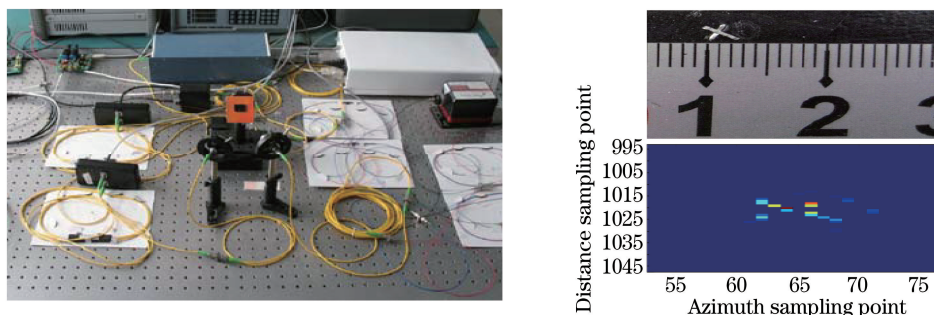


图9 ISAL成像实验^[25]。(a)实验装置;(b)实验结果

Fig. 9 ISAL imaging experiment^[25]. (a) Experimental device; (b) experimental results

低带来的方位模糊问题。此后研究重点主要侧重具体应用和成像算法方面。

2008年,中国科学院上海光学精密机械研究所刘立人团队开始研究SAL,主要是对光学系统部分进行了深入的研究,发表了多项研究成果^[27-28]。设计了缩小尺度的SAL实验装置,实现了在短距离上模拟远场衍射点目标的方位向激光合成孔径成像。2009年,实现了点目标和二维图像目标的成像,如图10所示,成像分辨率达到 $1.2\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ ^[29]。2011年,探索研制了一个探测距离为50 km、口径为 $\Phi 300\text{ mm}$ 的合成孔径激光成像雷达演示样机,并在实验室进行近距离演示验证,成像结果如图11所示,在14 m距离上获得二维成像分辨率优于 $1.4\text{ mm}\times 1.2\text{ mm}$ ^[30]。

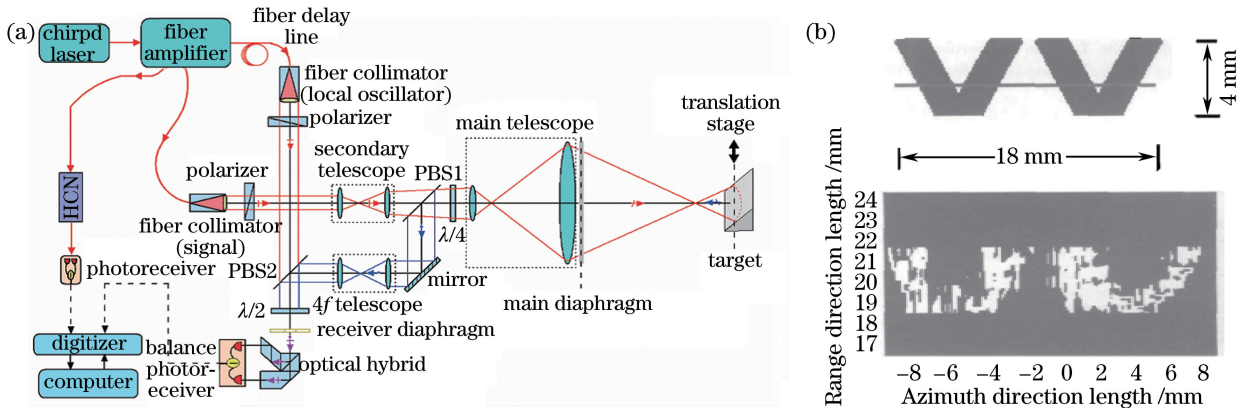


图10 缩小尺度的SAL成像实验^[29]。(a)实验装置;(b)成像结果

Fig. 10 Reduced scale SAL imaging experiment^[29]. (a) Experimental device; (b) experimental results

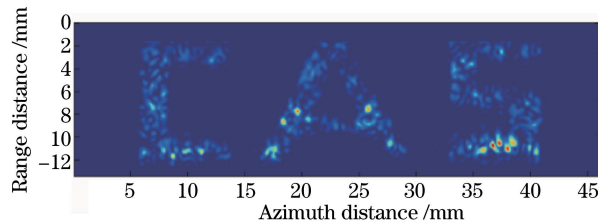


图11 成像结果^[30]

Fig. 11 Imaging results^[30]

2012年,刘立人^[31]指出,现有的侧视SAL采用光学外差接收,受大气扰动、运动平台振动、目标散斑和激光雷达系统本身相位变化等影响很大,影响了侧视SAL的实用化,因此提出了直视SAL,直视SAL发射采用两个正交偏振同轴且波前差相对扫描的空间为抛物面型的光束,接收采用自差及相位复数化探测。在直视SAL成像基础上,刘立人^[32]又提出自干涉合成孔径激光三维成像雷达和双曲波前差自扫描直视合成孔径激光成像雷达^[33]实现原理。2013年,马小平等^[34]提出了一种新的双面反射镜旋转发射结构,实现了同轴正交偏振的双光束,Xu等^[35-36]对激光的散斑效应进行了数值推导。2015年,Lu等^[37-39]研究了全光学多功能直视SAL、静态目标和聚束模式直视SAL成像实验,如图12~14所示。实验用10 m焦距来模拟远场条件,成像分辨率达到了 $0.8\text{ mm}\times 1.1\text{ mm}$,接近理论设计值,表明直视模型能够消除大气湍流造成的影响,适合在大气环境中应用。2016年,张宁等^[40]用15 m的平行光管模拟远场条件对直视SAL的滑动聚束模式进行了研究,并通过延长成像时间的方式来提高信噪比。

2014年,中国科学院电子学研究所成功实现了条带模式二维SAL成像和干涉SAL三维成像演示^[41-42]。2015年,吴谨等^[43]发表了一个条带模式SAL实验室高分辨率成像结果,以 $0.5\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ 的等效收发口径,在12.9 m距离处获得了照片级的高分辨率SAL成像图像,如图15所示。2016年,Wang等^[44]搭建了一个ISAL目标转台成像系统,实现了对1.1 km户外目标的良好实验成像,目标和雷达的相对运动是由一个旋转平台实现,成像结果如图16所示。2017年,卢智勇等^[45]利用基于正弦相位调制的大视场机载直视合成孔径激光成像雷达系统进行外场实验和飞行验证。在室外3.8 km距离处进行了视场扫描和成

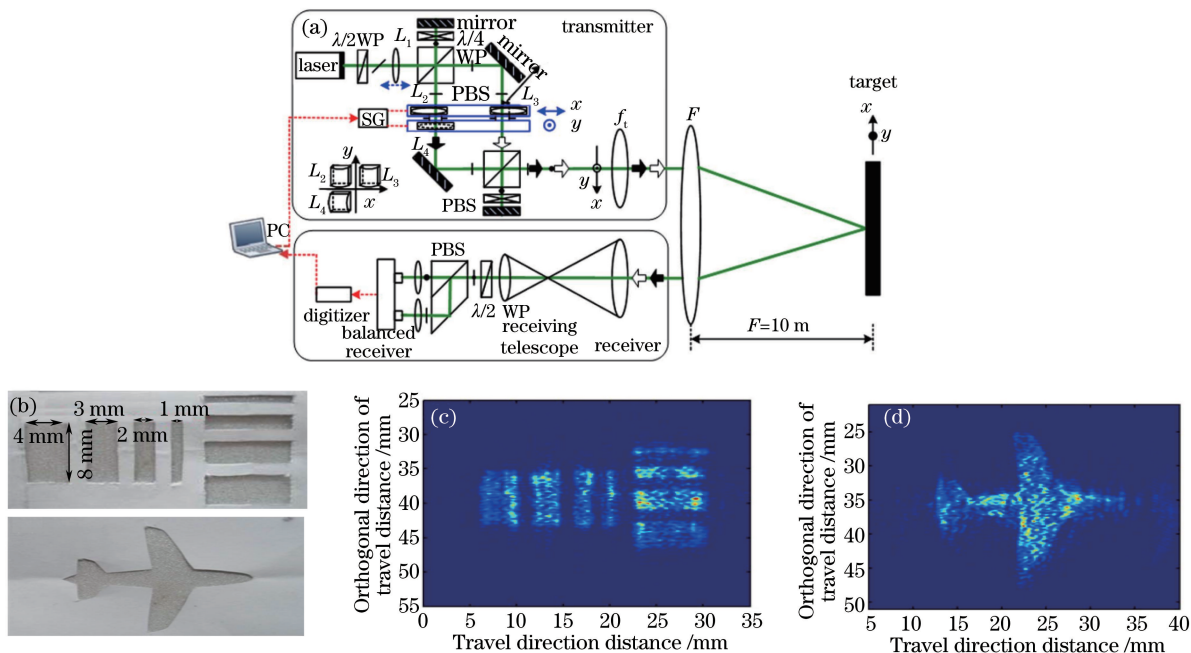


图 12 静态目标的直视 SAL 成像实验^[37]。(a) 直视 SAL 系统结构图；(b) 多条目标和飞机目标照片；
(c) 多条目标成像结果；(d) 飞机目标成像结果

Fig. 12 Down-looking SAL imaging experiment of static target^[37]. (a) SAL system structure;
(b) multiple strip targets and aircraft target photos; (c) multiple strip imaging results; (d) aircraft imaging results

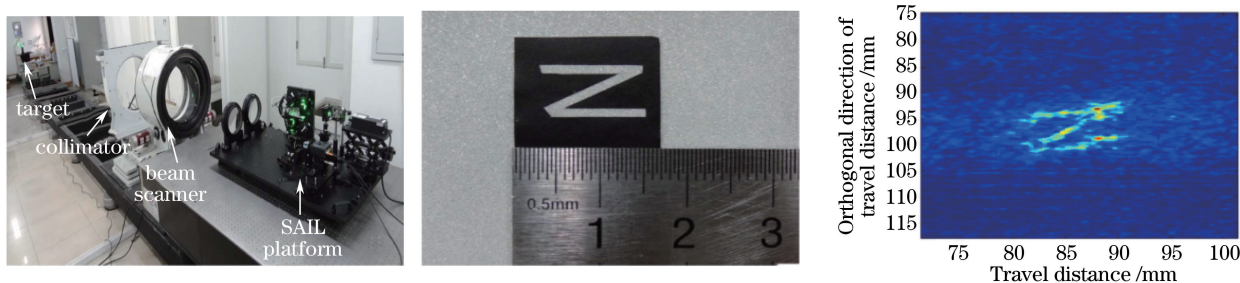


图 13 聚束模式直视 SAL 成像实验^[38]

Fig. 13 SAL imaging experiment of spotlight mode^[38]

像,并进行了机载直视合成孔径激光成像雷达的 3 km 飞行实验,获得了高质量大视场图像,其成像视场提高了一个量级达到了 4.8 mrad,如图 17 所示。Li 等^[46]采用一种新型高效的线性调频连续波(FMCW)合成孔径激光成像雷达系统,在 1 km 的距离使用 2 个 0.41 cm 口径望远镜获得的光学合成孔径图像,这些图像的分辨率可以达到 4 cm,约比传统实孔径成像分辨率提高 10 倍。黄宇翔等^[47]使用基于连续 m 序列相位调制的 ISAL 实现了对 33.5 m 外的转动目标实时成像,采用 RD 算法复现了目标特征,距离向分辨率和多普勒域分辨率分别为 18 cm 和 1.576 kHz。

3 SAL 关键技术分析

总结 SAL 的国内外发展现状和部分实验进展情况可知,要实现 SAL 的实际应用,还需要针对 SAL 雷达系统的激光源、工作体制、信号的发射波形、大气补偿算法、成像算法和运动补偿算法等关键问题进行研究。此外,考虑到 SAL 主要针对场景进行高分辨率进行成像,而 ISAL 主要针对非合作的运动目标进行成像,因此,在系统设计过程中也要考虑场景和目标特点的情况。

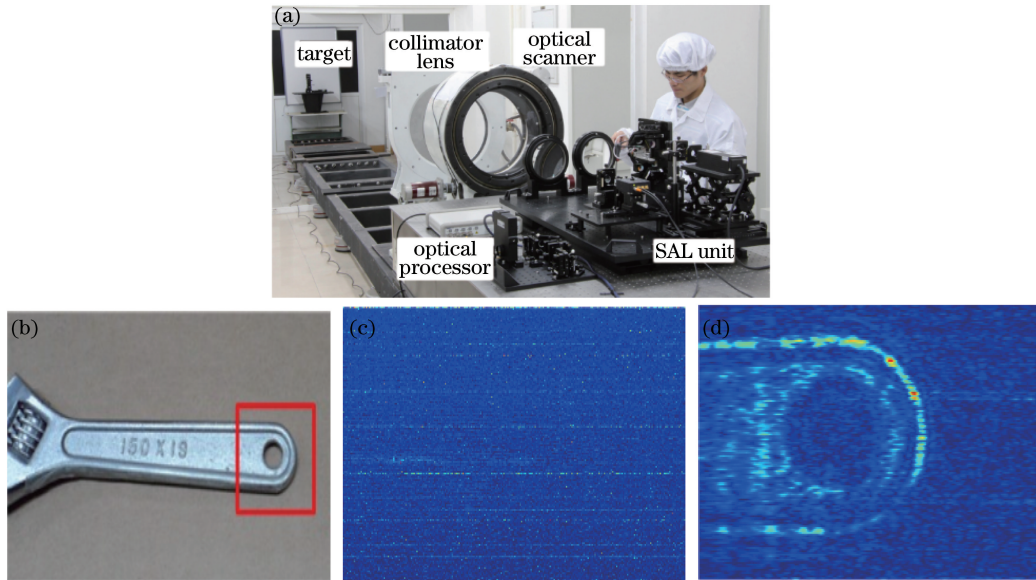


图 14 全光学系统多功能直视 SAL 实验^[39]。(a) 直视 SAL 实验平台;(b) 目标照片图;(c) 二维数据;(d) 成像结果
Fig. 14 All-optronic multifunctional down-looking SAL experiment^[39]. (a) Down-looking SAL experimental platform;
(b) target photograph; (c) two-dimensional data; (d) imaging results

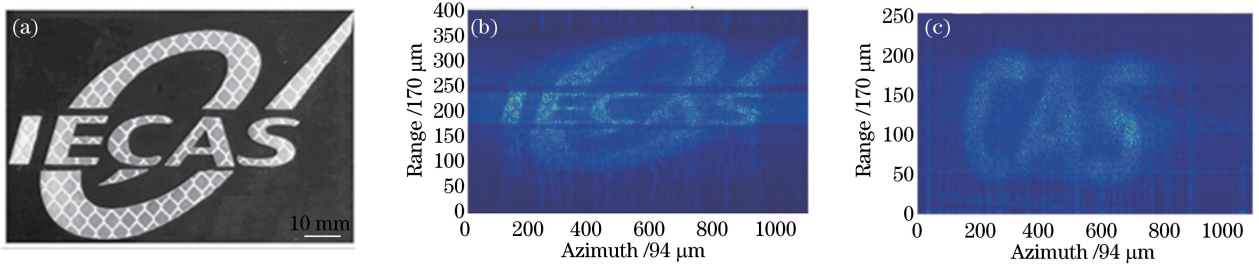


图 15 12.9 m SAL 成像实验^[43]
Fig. 15 12.9 m SAL imaging experiment^[43]

3.1 激光源

SAL/ISAL 雷达要实现远距离、高精度的探测必须具有稳定的光源和比较严格的技术指标。然而,受当前技术的限制,人们对光信号的控制处理能力远不及对电信号的控制处理能力。激光源的选择通常需要具备以下特点:1) 为减小大气传输对激光的影响需要具有合适的工作波长;2) 为实现较高的成像分辨率需要较小的发射孔径;3) 为获得远距离目标的探测需要较大峰值功率;4) 为解决距离模糊和作用距离对脉冲重复频率的限制关系需要具有合适的重复频率等^[48]。此外,目前广泛采用的激光外差探测处理方式,要求混频信号中的接收光信号和本振光信号应是理想相干的单频单模光,激光器应当具备较高的脉冲重复频率并且频率稳定度优于 10^{-8} 。目前采用恒温、防震装置的 CO_2 激光器频率稳定度可达 10^{-7} ,如果要提高到 10^{-8} 以上,需要采用主动稳频的方法,因此能够达到相应指标的激光源是一个值得研究的内容。

3.2 发射信号波形

SAL 雷达为解决探测距离与系统分辨率之间的矛盾,实现远距离精细成像需要对信号进行相关调制。目前对激光信号的调制技术主要有频率调制技术、相位编码技术和幅度调制技术。基于频率调制的激光调制技术,由于受声光器件的限制,目前可实现的信号带宽较小,还不能满足 SAL 厘米级分辨率的要求。但是,调频激光信号可以采用“去调频”的接收处理方式,能较大幅度降低 A/D 的采样速率。相位编码信号需要较高的 A/D 采样速率,但由于其不要求信号相位连续变化,因此适用于激光信号高功率放大后相位存在较大失真的场合。

当前,国内外学者为实现大的信号带宽和数据率,分别将合成频率步进线性调频信号、强度编码信号、基

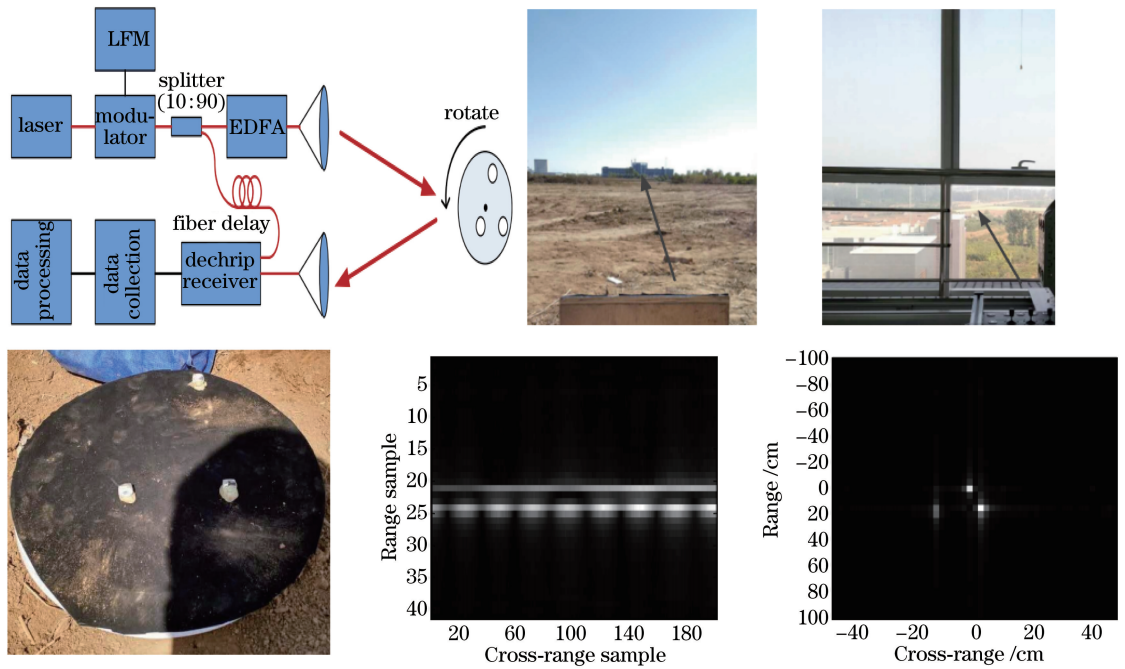


图 16 ISAL 目标成像系统^[44]。(a) 实验装置;(b) 目标场景;(c) 目标照片;(d) 距离压缩结果;(e) 方位压缩结果

Fig. 16 ISAL imaging system^[44]. (a) Experimental device; (b) target scenario; (c) target photograph; (d) distance compression result; (e) azimuth compression result

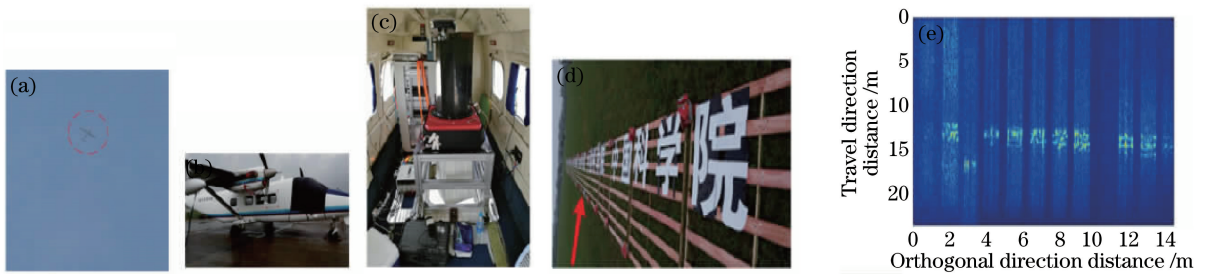


图 17 机载直视 SAL 的目标成像^[45]。(a) 成像系统;(b) 地面目标照片;(c) SAL 二维聚焦像

Fig. 17 Airborne down-looking SAL demonstrator^[45]. (a) SAL system; (b) target photograph; (c) 2D SAL focus image

于线性调频信号的相位调制信号等引入到 SAL 成像中。其中,杜剑波等^[49]将相位调制信号应用于机载 SAL 成像中,并对三种相位调制信号的性能以及相位调制信号的收发方式和成像处理方法进行了分析。赵志龙等^[50]提出采用合成频率步进线性调频信号(SFSCS),可以满足 SAL 所需的高重复频率和大带宽相干光源的要求,该方案采用多台独立的窄带宽高重复频率线性调频激光器构成 SFSCS,通过给出的成像数据方程和图像形成方法,能够使距离向成像分辨率至少提高 N 倍, N 为独立激光器数目。李飞等^[51]首次将强度编码方式应用到合成孔径激光中,用来解决高速运动平台的采用传统信号调制速率和线性度受限的问题,推导了强度编码 SAL 压缩原理公式,并通过搭建基于光纤的强度编码距离向分辨率验证实验系统仿真验证了 m 序列编码的压缩性能。但是,性能更加优越、更加适合激光波段发射与处理的信号调制波形仍是需要深入研究的内容之一。

3.3 探测体制

当前国内外研究工作中关于 SAL 的信号成像处理,主要有两种探测方法:

1) 基于光学和电子学技术结合方案光外差探测技术,即通过本振信号与接收回波混频类似于微波 SAR 中的解线频调去斜处理方法,将得到的电信号进行相应相位补偿后实施二维脉冲压缩成像,这种方法灵敏度高、技术成熟、适合处理超大带宽信号、相位误差项相对明确,应用于侧视 SAL 成像中。但移植到光波段的外差探测技术由于波长变短,相位误差影响增大,因此需要稳定的本振信号以及考虑光波段各种相位误差对

成像的影响并加以补偿。李祥等^[52]研究了光外差探测器光敏面上两光束光场分布,对准直失配、偏移失配等影响外差探测混频效率的因素进行数值仿真,提出了可行的改进方案。

2) 光自差探测方式,通过发射两个正交偏振同轴且波前差相对扫描的空间成抛物面型的光束,接收时采用自差及相位复数化探测,能够消除传播过程中相同因素的影响,尤其是大气湍流对激光的影响,主要应用在直视 SAL 成像中,中国科学院上海光学精密机械研究所在直视 SAL 方面取得较多成果^[34]。自差探测具有不同于外差探测的本质独特性,通过全光学成像处理技术相比于电子学成像技术,具有成像速度快、实时性好的特点,同样能够使用小光学孔径在远距离实现高分辨率二维成像。但是,目前光学成像处理精度较低,对实际系统中存在的各种相位误差补偿能力较弱^[53]。

因此,当前阶段 SAL 成像探测技术,应重点解决基于不同探测技术的实时性、处理精度和相位补偿问题。

3.4 激光传输特性和目标反射特性问题

由于激光的极高频、极短波长使其传输和目标的反射回波具有独特性。激光在大气中传输时,很容易受到大气衰减和大气湍流因素影响。大气衰减会降低雷达的作用距离,其变化呈指数形式衰减;大气湍流则会影响回波信号的强度和相位,严重时会造成信号的严重畸变,影响系统的检测概率和降低成像质量。Lucke 等^[10]首次利用符合 Kolmogorov 谱的随机相位屏仿真了大气湍流对 SAL 成像的影响,研究表明大气湍流更容易在幅度上引入误差,且引入的幅度误差对方向成像质量影响较大。华志励等^[54]采用蒙特卡罗仿真、功率谱法,对大气湍流进行了建模,仿真分析了大气湍流对 SAL 成像的影响,并提出了迭代傅里叶相位共轭算法补偿相位误差。鲁天安等^[55]研究了大气湍流对机载 SAL 成像的影响,计算了不同湍流、不同波长情况下机载 SAL 的成像结果,采用改进的秩一相位误差估计法(IROPE)对湍流效应造成的 SAL 图像失真进行补偿。

激光照射目标主要可以分为镜面反射目标和漫反射目标,不同类型的目标反射回波也不相同,对激光成像也会造成一定程度的影响。党文佳等^[56-57]指出目标表面粗糙特性是制约 SAL 实用化的重要瓶颈之一,激光照射到目标不同位置时,因表面起伏对波前形成调制,导致回波光外差信号相消,造成严重的退相干效应,严重影响实际光外差信号的检测。通过对目标粗糙表面建立蒙特卡罗模型,得出当目标表面高度起伏均方根超过 0.2λ 时光外差信号非常微弱,当均方根高度起伏为 0.1λ 时给光外差探测造成困难,其中 λ 表示激光波长。

因此,实际工作在空基和地基平台以及天基对地监视的 SAL 雷达,由于激光信号会在大气中传播,必须要考虑大气补偿和不同目标回波探测的问题。具体来说,需要建立完善的大气影响和目标反射模型,深入分析不同大气状况、不同目标反射下对 SAL 成像的影响因素,并给出相应补偿算法。

3.5 成像算法和运动补偿问题

由于激光信号具有极高的载频、极大的带宽和极短的波长等特点,当探测目标与雷达存在相对运动时容易产生多普勒模糊和频谱展宽效应。此外,平台的振动也会导致信号相位的明显变化,造成目标运动参数估计不准确,影响成像处理。因此,不能直接将微波波段的 SAR 成像算法移用到 SAL 的成像处理中,需要研究适合于 SAL 的成像算法。

西安电子科技大学的郭亮等^[58]研究了机载 SAL 成像算法,先后提出了改进的 ω - k 算法、频率变标算法(FS),并研究了低脉冲重复频率下的 SAL 成像方法和基于室内实测数据的 ISAL 成像方法。臧博^[59]利用压缩感知理论,解决了在低信噪比、回波存在缺失条件下的稀疏多孔径成像问题,并研究了基于 ISAL 稀疏性的相位校正算法。为解决方位非相干、低重频、低信噪比、大气湍流等因素对雷达回波信号的影响,他还提出一种基于逆 Radon 变换的实包络成像算法。李小珍^[60]提出采用一种 SAL 多通道扫描工作模式的成像方法,解决机载 SAL 光斑小,影响成像场景的幅宽的问题,并采用谱分析思想,解决图像方位聚焦问题。

空军工程大学的何劲等^[61]分析了匀速运动目标的 ISAL 回波信号特征,指出由于回波信号存在距离色散的问题,会导致一维距离像的展宽,提出利用基于重排 Wigner 分布的 Hough 变换方法对光外差探测后的信号进行时频检测,估计出目标的径向速度来实现对回波信号的精确运动补偿。此外,何劲等^[62]还分析了 ISAL 成像中的微多普勒效应及特征提取方法,提出了一种基于压缩感知理论的 SAL 成像算法,使系统采样

率远低于奈奎斯特采样率时仍能实现对目标的超高分辨成像。Yang 等^[63]针对 ISAL 成像中回波信号存在的脉冲内多普勒效应,利用基于参考点的运动补偿方法补偿 ISAL 回波信号,实现了对运动目标的超高分辨二维成像。

装备学院的阮航等^[64]研究了空间目标的 ISAL 成像算法和相位补偿算法,提出了一种相位梯度自聚焦-空间相关法(PGA-SCA)相结合的算法,解决了空间目标 ISAL 成像中的振动相位误差、平动相位误差和信号初始相位随机误差;此外,针对均匀转动目标的距离色散和距离徙动问题,提出了基于分数阶傅里叶变换(FrFT)的平稳运动目标成像方法^[65],针对非均匀转动目标提出了改进的 Radon-Wigner 变换(RWT)方法和基于方位时频域 keystone 变换的非均匀转动目标成像^[66]。

胡以华^[67]重点针对星载 SAL 成像的性能需求、工作模式、系统设计、成像方法以及运动目标对相干探测影响等进行了全面的研究。丁健等^[68]针对飞行中的鸟类安全问题,提出利用 ISAL 的高精度成像技术,对鸟类目标进行探测和成像,给出了实现框图和成像模型,并采用基于压缩感知的稀疏合成方法,解决以较少有效数据获得鸟类目标高分辨方位像的问题。

李增局等^[69]分析了振动对 SAL 成像的影响,指出在一个脉冲周期内可认为振动项基本不变,故距离向压缩不存在干扰;但在方位向压缩时振动初相位、低频振动均对图像有明显影响,故必须考虑振动项。洪光烈等^[70]将振动分为线振动和角振动,线振动引起激光雷达相位中心的变化从而引入相位误差,影响多普勒频谱的频率特性,角振动相位误差在星载平台的影响可以忽略^[71]。马萌等^[72]提出利用子孔径成像与相位梯度自聚焦相结合的方法解决振动条件下的 SAL 成像处理问题。张鸿翼等^[73]将振动误差展开成多项式模型,利用优化算法对多项式系数进行优化求解,解决振动误差的相位补偿问题。杜剑波等^[74]提出采用一种基于三探测器正交基线干涉处理的方法来估计振动误差。张艳等^[75]利用锐化函数对 SAL 初相位误差进行补偿,并提出通过寻找光强的最大值来进行相位补偿,能够实现高阶相位误差补偿,显著压缩由于高阶相位误差造成的距离向光斑弥散,提高距离分辨率。

由以上分析可知,SAL 发射信号源的改变造成与微波信号的差异,因此在成像算法上应当侧重于发射信号改变对成像结果的影响^[76],成像算法具体需要解决的问题主要包括:发射信号脉冲之间的相干性较差且随着成像积累时间的增加而恶化的问题;平台振动和目标运动所产生的相位误差对成像的影响问题;距离色散和越距离单元徙动的问题等。

4 结束语

作为新体制成像雷达的创新和发展,SAL 完美实现了光学和电子学的结合,突破激光的衍射能力能够实现厘米级高精度成像,能够满足人们对于远距离目标和场景的高精度、实时性成像需求,在未来工程技术满足时,将会在军事、科研以及民用领域产生广阔应用前景。主要从 SAL 理论现状、实验进展方面展开,详细分析了 SAL 的国内外发展现状,并总结了 SAL 从理论实践到工程应用还需要解决的几个关键技术难题。

1) 激光源:SAL 要实现方位向压缩成像需要精确地相位信息,因此需要保证超高的激光频率稳定度(10^{-8} 量级),目前已经能实现 10^{-7} 量级的稳定度,还需进一步改进稳频方式。要实现距离向高分辨率,对激光信号的信号调制技术必不可少。线性调频技术相对成熟,后端成像处理实现简单,在外差探测体制中应用广泛,但目前可实现的带宽还不能满足远距离的厘米级成像需求,针对这一点可采用合成步进线性调频信号实现大带宽,但是频率和相位的连续性还需要进一步研究;相位编码信号采用数字调制方式调制速度快可选编码方式较多,可以实现大带宽,具有较好地二维分辨能力,但是需要较高的 A/D 采样速率,相位误差对信号的成像性能影响较大。

2) 探测技术:激光外差技术主要应用于侧视 SAL 成像中,是早期从微波 SAR 雷达中借鉴过来的处理技术,原理和实现方式简单,但是大气湍流和运动误差容易对回波信号的相位产生较大影响,目前各类相位补偿算法也都是基于外差探测体制提出的。自差探测体制是近几年提出的概念,属于纯光学概念,主要采用两个正交偏振光同发同收来获取目标的相位历程,应用于直视 SAL 系统中,用于解决大气扰动、平台振动和系统本身造成的相位误差影响。但是,目前光学成像处理精度较低,对实际系统中存在的各种相位误差补偿能力较弱,自差探测技术能否应用到对运动目标的成像还未见相关报道。

3) 成像算法:目前大部分成像和补偿算法都是基于外差探测后的信号回波进行处理。由于激光波长一般在微米量级,相比微波要短4个量级,导致SAL在距离向和方位向更敏感,微小的相对运动误差容易导致成像质量变差,此外,激光的照射场景范围非常小,限制了成像场景的幅宽。因此,目前SAL成像算法除可以参考现有微波中的成像算法外,还需要重点解决成像中出现的距离色散、越距离单元徙动、方位散焦和大场景成像等问题,可以考虑采用更加精准的回波重构方法和成像补偿技术来实现。对于成像平台的振动和传输过程中大气带来的相位误差,在微波段可以忽略,但是在激光波段必须考虑通过补偿技术消除对成像的影响。

4) 应用前景:SAL主要是解决远距离精细成像的问题,具体来说是解决激光雷达方位分辨率受限以及微波段成像速度慢、分辨率低等问题,它能够高精度地获取目标更加丰富的属性信息,相比现有成像技术分辨率大大提升,更加符合遥感成像信息获取和空间目标监视的需求,并且激光波段抗干扰能力强相比微波更加适合于战场环境。目前SAL主要是取得了一些基于实验性质的精细成像应用,如图4中的机载SAL成像,图5中的蜻蜓成像实验结果都接近光学效果,图6中对地面基础设施微小变化的监视以及图16采用ISAL技术对转动目标的成像。此外,还有学者提出可以将SAL技术应用于星载平台,实现对地对空间目标的监视,以及应用于飞机上监视鸟类目标以避免撞机。

综上所述,这些分析总结为进行SAL的深入研究奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging radar (I): defocused and phase biased telescope for reception antenna[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(5): 997-1000.
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.
- [2] Zhang Xiaohong, Yang Min, Guo Liang. Research progress of synthetic aperture lidars[J]. Laser Technology, 2011, 35(2): 255-259.
张小红, 杨敏, 郭亮. 合成孔径激光雷达研究进展[J]. 激光技术, 2011, 35(2): 255-259.
- [3] Lewis T S, Hutchins H S. A synthetic aperture at 10.6 microns[C]. Proceedings of the IEEE, 1970, 58(10): 1781-1782.
- [4] Aleksoff C C, Accetta J S, Peterson L M, *et al.* Synthetic aperture imaging with a pulsed CO₂ TEA laser[C]. Technical Symposium Southeast International Society for Optics and Photonics, 1987: 29-41.
- [5] Kyle T G. High resolution laser imaging system[J]. Applied Optics, 1989, 28(13): 2651-2656.
- [6] Strauss C E M. Synthetic-array heterodyne detection: a single-element detector acts as an array[J]. Optics Letters, 1994, 19(20): 1609-1611.
- [7] Green J T J, Marcus S, Colella B D. Synthetic-aperture-radar imaging with a solid-state laser[J]. Applied Optics, 1995, 34(30): 6941-6949.
- [8] 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.
- [9] Lucke R L, Richard L J, Bashkansky M, *et al.* Synthetic aperture lidar (SAL): Fundamental theory, design equation for a satellite system, and laboratory demonstration[R]. Naval Research Laboratory, 2002.
- [10] 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.
- [11] Bashkansky M, Lucke R L, Funk E E, *et al.* Synthetic aperture imaging at 1.5 μ: laboratory demonstration and potential application to planet surface studies[C]. Astronomical Telescopes and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2002: 48-56.
- [12] 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.
- [13] Ricklin J, Dierking M, Fuhrer S, *et al.* Synthetic aperture lidar for tactical imaging (SALTI) flight test results and path forward[C]. Proceedings of the the 14th Coherent Laser Radar Conference, Colorado, 2007: 8-13.
- [14] Krause B, Buck J, Ryan C, *et al.* Synthetic aperture lidar flight demonstration[J]. 2011 Conference on Laser and Electro-Optics, 2011: PDPB7.

- [15] Stephen Crouch, Zeb W Barber. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture lidar techniques[J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24237-24246.
- [16] Turbide S, Marchese L, Terroux M, *et al.* An all-optronic synthetic aperture lidar[C]. SPIE, 2012, 8542: 854213.
- [17] Turbide S, Marchese L, Terroux M, *et al.* Investigation of synthetic aperture lidar for land surveillance applications [C]. SPIE, 2013, 8897: 889709.
- [18] Turbide S, Marchese L, Terroux M, *et al.* Synthetic aperture lidar concept for infrastructure monitoring[C]. SPIE, 2014, 9250: 92500B.
- [19] Turbide S, Marchese L, Bergeron A, *et al.* Synthetic aperture lidar based on a MOPAW laser[C]. SPIE, 2016, 10005: 1000502.
- [20] 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.
- [21] Crouch S, Barber Z W. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture lidar techniques [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24237-24246.
- [22] Trahan R, Nemati B, Zhou H, *et al.* Low-CNR inverse synthetic aperture lidar imaging demonstration with atmospheric turbulence[C]. SPIE, 2016, 9846: 98460E.
- [23] Zhou Zhaoping. Synthetic aperture lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1990(2): 49-52.
周兆萍. 合成孔径激光雷达[J]. *红外与激光工程*, 1990(2): 49-52.
- [24] Zhang Yun, Wu Jin, Tang Yongxin. Synthetic aperture lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, 42(7): 48-50.
张云, 吴谨, 唐永新. 合成孔径激光雷达[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(7): 48-50.
- [25] Guo Liang, Xing Mengdao, Zeng Xiaodong, *et al.* Inverse synthetic aperture lidar imaging of indoor real data[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 637-642.
郭亮, 邢孟道, 曾晓东, 等. 室内实测数据的逆合成孔径激光雷达成像[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(4): 637-642.
- [26] Guo Liang, Zeng Xiaodong, Xing Mengdao, *et al.* Study of synthetic aperture lidar imaging with lower pulse repetition frequency[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2011, 22(5): 772-777.
郭亮, 曾晓东, 邢孟道, 等. 低脉冲重复频率合成孔径激光雷达成像[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(5): 772-777.
- [27] Liu L R. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 579-599.
- [28] Liu L R. Optical antenna of telescope for synthetic aperture lidar[C]. SPIE, 2008, 7094: 70940F.
- [29] Luan Z, Sun J, 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.
- [30] Liu Liren, Zhou Yu, Zhi Yanan, *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.
- [31] Liu Liren. Principle of down-looking synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0928002.
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): 0928002.
- [32] Liu Liren. Principle of self-interferometric synthetic aperture lidar for 3D imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 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.
- [33] Liu Liren. 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.
- [34] Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Lu Zhiyong. Research on spatial wave-front characteristics of the inner optical fields of the transmitter with double-face rotatable reflectors in down-looking synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1228001.
马小平, 孙建锋, 卢智勇, 等. 直视合成孔径激光成像雷达双面反射棱镜旋转发射装置内发射场的空间波前特性研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1228001.

- [35] Xu Q, Sun Z, Sun J, *et al.* Speckle reduction of synthetic aperture imaging lidar based on wavelength characteristics [J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(8): 080301.
- [36] Xu Qian, Zhou Yu, Sun Jianfeng. 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.
- [37] Lu W, Lu Z, Sun Z, *et al.* A demonstrator of all-optronic multifunctional down-looking synthetic aperture LADAR [C]. SPIE, 2015, 9617: 96170O.
- [38] Lu Z Y, Zhang N, Sun J, *et al.* Laboratory demonstration of static-mode down-looking synthetic aperture imaging lidar[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(4): 042801.
- [39] Zhang N, Lu Z Y, Sun J, *et al.* Laboratory demonstration of spotlight-mode down-looking synthetic aperture imaging lidar[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(9): 091001.
- [40] Zhang Ning, Lu Zhiyong, Sun Jianfeng. Research on the signal-to-noise ratio in sliding spotlight mode down-looking synthetic aperture imaging lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0828001.
张宁, 卢智勇, 孙建峰. 直视合成孔径激光成像雷达滑动聚束模式下图像信噪比研究[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0828001.
- [41] 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.
- [42] Wu J, Li F F, Zhao Z L, *et al.* Demonstration of strip map mode synthetic aperture lidar with PGA-independent high resolution images[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(11): 3559-3564.
- [43] Wu Jin, Zhao Zhilong, Wu Shudong, *et al.* High resolution synthetic aperture lidar imaging at 12.9 m distance[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1228002.
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): 1228002.
- [44] Wang N, Wang R, Li G, *et al.* Experiment of inverse synthetic aperture Lidar at 1.1 km [C]. SPIE, 2016, 10155: 101551G.
- [45] Lu Zhiyong, Zhou Yu, Sun Jianfeng, *et al.* Airborne down-looking synthetic aperture imaging lidar field experiment and its flight testing[J]. Chinese 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.
- [46] Li G Z, Wang R, Song Z Q, *et al.* Linear frequency-modulated continuous-wave lidar system for synthetic aperture imaging[J]. Applied Optics, 2017, 56(12): 3257-3262.
- [47] Huang Yuxiang, Song Sheng, Xu Weiming, *et al.* Real-time inverse synthetic aperture lidar system based on continuous m-sequence phase modulation method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 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.
- [48] Tang Y, Qin B, Yan Y, *et al.* Multiple-input multiple-output synthetic aperture lidar system for wide-range swath with high azimuth resolution[J]. Applied Optics, 2016, 55(6): 1401-1405.
- [49] Du Jianbo, Li Daojing, Ma Meng. Performance analysis and image processing of phase-modulated signal on airborne synthetic aperture lidar[J]. Journal of Radars, 2014, 3(1): 111-118.
杜剑波, 李道京, 马萌. 机载合成孔径激光雷达相位调制信号性能分析和成像处理[J]. 雷达学报, 2014, 3(1): 111-118.
- [50] Zhao Zhilong, Su Yuanyuan, Wu Jin. Synthetic aperture radar imaging via synthetic Frequency stepped linearly chirping signal[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(5): 21-26.
赵志龙, 苏园园, 吴谨. 基于合成频率步进线性调频信号的合成孔径激光雷达成像[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(5): 21-26.
- [51] Li Fei, Zhang Hongyi, Wu Jun, *et al.* Mechanism and experiment of code intensity-modulation on synthetic aperture lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(9): 2575-2582.
李飞, 张鸿翼, 吴军, 等. 强度编码合成孔径激光雷达原理与实验[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2575-2582.
- [52] Li Xiang. Research on optical heterodyne detection in inverse synthetic aperture Lidar [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 12-26.

- 李祥. 逆合成孔径激光雷达光外差探测关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 12-26.
- [53] Liu Xu, Chen Jianwen, Lu Changyong, *et al.* Developing technologies and key inverse synthetic aperture problems of lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 642-649.
刘旭, 陈建文, 卢常勇, 等. 激光雷达逆合成孔径成像技术现状及关键问题[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(4): 642-649.
- [54] Hua Z, Li H, Gu Y. Atmospheric turbulence phase compensation in synthetic aperture LADAR data processing[C]. *SPIE*, 2007, 6787: 678724.
- [55] Lu Tianan, Li Hongping. Phase error compensation in airborne synthetic aperture lidar data processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0801002.
鲁天安, 李洪平. 机载合成孔径激光雷达相位误差补偿研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0801002.
- [56] Dang Wenjia, Zeng Xiaodong, Cao Changqing, *et al.* Simulation of the rough target's signal in synthetic aperture lidar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(3): 0304001.
党文佳, 曾晓东, 曹长庆, 等. 粗糙目标合成孔径激光雷达信号仿真[J]. *光子学报*, 2015, 44(3): 0304001.
- [57] Dang Wenjia, Zeng Xiaodong, Feng Zhejun. Decoherence effect of target roughness in synthetic aperture lidar[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 024204.
党文佳, 曾晓东, 冯喆珺. 目标粗糙对合成孔径激光雷达的退相干效应[J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 024204.
- [58] Guo Liang, Xing Mengdao, Liang Yi. Synthetic aperture imaging lidar imaging algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(2): 448-452.
郭亮, 邢孟道, 梁毅. 合成孔径成像激光雷达成像算法研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(2): 448-452.
- [59] Zang Bo. Synthetic aperture imaging lidar imaging algorithm[D]. Xi'an: Xidian University, 2011: 40-64.
臧博. 合成孔径成像激光雷达算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011: 40-64.
- [60] Li Xiaozhen. Study on system design and algorithm of airborne synthetic aperture lidar[D]. Xi'an: Xidian University, 2015: 49-54.
李小珍. 机载合成孔径激光雷达系统设计与算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015: 49-54.
- [51] He Jin, Zhang Qun, Yang Xiaoyou, *et al.* Imaging algorithm for inverse synthetic aperture imaging lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 1094-1100.
何劲, 张群, 杨小优, 等. 逆合成孔径成像激光雷达成像算法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 1094-1100.
- [62] He Jin, Zhang Qun, Yang Xiaoyou. SAL imaging algorithm based on compressed sensing theory [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(11): 2395-2402.
何劲, 张群, 杨小优, 等. 基于压缩感知理论的合成孔径激光雷达成像算法[J]. *宇航学报*, 2011, 32(11): 2395-2402.
- [63] Yang X Y, Chi L, Zhang Q, *et al.* Analysis of inner-pulse Doppler effect for the echoes of inverse synthetic aperture lidar[C]. *IEEE International Conference on Signal Processing*, 2010: 2295-2298.
- [64] Ruan Hang, Wu Yanhong, Ye Wei. Algorithm of phase errors compensation for inverse synthetic aperture lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 102801.
阮航, 吴彦鸿, 叶伟. 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.
- [65] Ruan Hang, Wu Yanhong, Ye Wei. Inverse synthetic aperture lidar imaging algorithm for uniform motion targets[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1124-1129.
阮航, 吴彦鸿, 叶伟. 匀速运动目标逆合成孔径激光雷达成像算法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(4): 1124-1129.
- [66] Ruan H, Wu Y, Jia X, *et al.* Novel ISAR imaging algorithm for maneuvering targets based on a modified keystone transform[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(1): 128-132.
- [67] Hu Yihua. Laser imaging technology for space target precise reconnaissance [J]. *National Defense Science & Technology*, 2016, 37(1): 30-36.
胡以华. 空间激光成像目标精确侦察技术[J]. *国防科技*, 2016, 37(1): 30-36.
- [68] Ding Jian, Li Lei. Research on imaging avian using ISAIL[J]. *Laser Journal*, 2015, 36(2): 60-62.
丁健, 李磊. 逆合成孔径激光雷达鸟类目标成像方法研究[J]. *激光杂志*, 2015, 36(2): 60-62.
- [69] Li Zengju, Wu Jin, Liu Guoguo, *et al.* Preliminary investigation on airborne SAL imaging with platform vibration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 994-1001.
李增局, 吴谨, 刘国国, 等. 振动影响机载合成孔径激光雷达成像初步研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(4): 994-1001.

- [70] Hong Guanglie, Guo Liang. Analysis of effects of line vibration on imaging quality of synthetic aperture ladar[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0428001.
洪光烈, 郭亮. 线振动对合成孔径激光雷达成像的影响分析[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0428001.
- [71] Hong Guanglie, Guo Liang. Effects of angle vibration on imaging quality of synthetic aperture ladar[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(6): 571-576.
洪光烈, 郭亮. 角振动对合成孔径激光雷达成像的影响[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(6): 571-576.
- [72] Ma Meng, Li Daojing, Du Jianbo. Imaging of airborne synthetic aperture ladar under platform vibration condition[J]. Journal of 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.
- [73] Zhang Hongyi, Li Fei, Xu Weiming. Research on the phase error compensation in synthetic aperture ladar by using optimization algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(9): 2100-2105.
张鸿翼, 李飞, 徐卫明. 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.
- [74] Du Jianbo, Li Daojing, Ma Meng. Vibration estimation and imaging of airborne synthetic aperture ladar based on interferometry processing[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(9): 0910003.
杜剑波, 李道京, 马萌. 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.
- [75] Zhang Yan, Chen Yong, Zhou Dingfu, *et al.* Influence of sharpen function on the object image of synthetic aperture ladar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(9): 2588-2592.
张艳, 陈涌, 周鼎富, 等. 锐化函数对合成孔径激光雷达成像图像的影响[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2588-2592.
- [76] Li Daojing, Du Jianbo, Ma Meng, *et al.* System analysis of space borne synthetic aperture ladar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(11): 269-276.
李道京, 杜剑波, 马萌, 等. 天基合成孔径激光雷达系统分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 269-276.