

关于合成孔径激光雷达成像研究

吴 谨*

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: 该文概述了合成孔径激光雷达(SAL)成像演示的国内外研究现状;分析了已有的 SAL 成像图片质量、成像体制及总的研究进展等,并指出为满足最终用户需求, SAL 研究至少需要解决扩大成像视场和降低大气湍流影响等问题。同时呼吁相关研究者积极贡献室外合成孔径激光雷达成像实验研究数据,共同推动合成孔径激光雷达成像技术的发展。

关键词: 合成孔径激光雷达; 成像演示; 图像质量; 分辨率

中图分类号: TP751

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)04-0353-08

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20076

On the Development of Synthetic Aperture Ladar Imaging

Wu Jin

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A brief overview on the development of Synthetic Aperture Ladar (SAL) imaging both domestically and abroad is introduced, where the quality of the obtained SAL image, the system architecture adopted and the overall progress on SAL development are reviewed. We suggest that a practical SAL should have proper imaging field of view and can be kind of adaptive to atmospheric turbulence so as to be accepted by possible end-users. We also urge that more outdoor SAL imaging experiments should be carried out and more imaging results should be published for the further development of SAL.

Key words: Synthetic Aperture Ladar (SAL); Imaging demonstration; Image quality; Resolution

1 引言

人们对目标的探测都需要借助传感器。传感器收集目标信息的单元,在微波波段,常称“天线”;在光学波段,俗称“镜头”。天线的尺寸或镜头的大小,可理解为本文标题中的“孔径”。“合成孔径”即是多个“孔径”通过某种处理,形成一个大“孔径”。合成后的“孔径”尺寸大,能提高目标识别的分辨率。

常见的“合成孔径”方式有两种。一种是利用多个小孔径同时收集目标信息,将这些信息处理形成一个等效大孔径一次收集的信息;另一种是利用小孔径不同时收集的目标信息,经过处理等效一个大孔径一次收集的信息。两种方法的目的都是为了提高目标识别的分辨率,从而获取更多的目标信息。前者的例子如光学上的“稀疏孔径成像”^[1]或“分布孔径成像”^[2];后者的例子如合成孔径雷达(Synthetic

Aperture Radar, SAR)^[3]。

SAR 是一种主动式微波成像雷达。SAR 自带探测源主动照明目标,通过收集目标散射回波信息,实现对目标的高分辨率识别。为了实现合成孔径, SAR 利用了自带探测源的电(磁)场信息以及目标和 SAR 之间的相对运动。SAR 具有与距离无关的高分辨率成像能力,已装载于多种平台(如飞机、卫星等),在地形测绘、资源勘探、军事侦察、目标识别及火控系统等方面获得了广泛的应用^[4]。

合成孔径激光雷达(Synthetic Aperture Ladar, SAL)是 SAR 技术在光学波段的类推。由于光学波长比微波小 3、4 个数量级,理论上, SAL 可以用比 SAR 更短的合成孔径时间,实现同样高的图像分辨率,形成的图像不需要专门的解读技巧就能识别。SAL 的这种远距离、高分辨、快速成像特点,使之具有良好的军用和民用潜力^[5]。

与常规的光学成像不同, SAL 利用目标散射回波的相位信息反演目标图像,属相干成像,因此,稳定的回波相位史数据是实现高分辨率 SAL 成像的保证。由于光学波长很短,影响回波相位信息的因素众多,且难以补偿,所以, SAL 的实现并不容易。

2012-10-17 收到, 2012-11-26 改回; 2012-12-04 网络优先出版
国家自然科学基金(61178071)和国家 863 计划(2007AA12Z107)资助
课题

*通信作者: 吴谨 jwu909@263.net, jwu@mail.ie.ac.cn

不过,近十年来,随着相关技术的发展,SAL的研究也取得了良好的进展。

下面将对国内外SAL成像实验研究进展做一个简单的评述。第2节主要汇总了SAL成像研究的实验研究进展,尤其是罗列了最近的实验演示成像结果;第3节从图像质量、系统体制等方面对目前的SAL研究现状进行了分析;第4节则从最终用户的角度,讨论了SAL走向实际工程应用至少要关注的若干问题;最后指出,SAL的研究尚处于起始阶段,仍需大量深入细致的关键技术探索。

2 SAL成像研究进展

2.1 国外研究现状

在20世纪,美国即开始了较多的SAL研究。关于SAL概念的简单实验验证,可以追溯到60-70年代^[6-9],例如,1970年,T. S. Lewis和H. S. Hutchins发表了用波长 $0.6328\ \mu\text{m}$ 的He-Ne激光器对点目标和波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ 的连续 CO_2 激光器对双点目标的SAL成像结果^[6,7]。1987年美国C. C. Aleksoff等人运用脉冲 CO_2 TEA激光器作为辐射源,建成实现合成孔径3维成像实验装置(没有公布获得的图像)^[10]。1994年,美国麻省理工学院林肯实验室(MIT/LL)的Stephen Marcus等人利用波长 $1.06\ \mu\text{m}$ 的微片Nd:YAG激光器,演示了运动目标的SAL成像^[11,12]。另外,1998年,日本S. Yoshikado和T. Aruga也探讨了采用红外激光以合成孔径方式对静止或运动目标进行激光雷达探测的可行性,并用 CO_2 激光器作为光源进行了简单的1维合成孔径实验验证^[13,14]。

进入21世纪后,随着激光器、光纤等相关技术的发展,SAL成像研究取得了较大进展。2002年美

国海军实验室(NRL)的M. Bashkansky等人报道了基于 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长光纤激光实现的2维SAL成像演示^[15,16]。这是第1个具有SAR技术意义的SAL成像演示——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,目标距离约 $0.3\ \text{m}$ 。图1为NRL实验的目标照片和成像结果,3个“NRL”字母清晰可辨认。NRL的实验中,由于字母贴在铝板上,铝板背景回波较强,所以SAL成像呈现较多的散斑。2004年,美国Aerospace公司的W. F. Buell等人进一步报道了第1个扩展目标的SAL成像^[17-19]。图2为Aerospace公司发表的一些成像结果,目标距离约 $2\ \text{m}$ 。图2中,三角形及帆船目标是采用反光材料制作。从图2可以看到,目标表面的细节也在SAL图像中显示出来。尤其重要的是,Aerospace公司的工作引入测距雷达中采用参考信道消除的非线性调频的方法^[20],解决了线性调波带来的非线性调频引起的距离分辨率降低问题^[17-19]。至此,美国基本完成了SAL成像实验室演示研究工作。

2006年,有消息报道,在美国DARPA的支持下,美国Raytheon公司采用 $1.55\ \mu\text{m}$ 的光纤激光、Northrop Grumman公司采用 $10.6\ \mu\text{m}$ 波段的 CO_2 激光分别实现了高分辨率机载SAL成像,成像质量达到照片级分辨率,取得了里程碑似的进展^[21]。这是当年SAL研究激动人心的消息。报道说, Raytheon公司的光纤激光SAL采用Boeing 727-223/Advanced飞机, Northrop Grumman公司的 CO_2 激光SAL采用BAC 1-11试验飞机,在不同的环境条件下,对自然地物(陆地和水面)进行了几十次飞行,成功验证了SAL的成像能力。不过,至今这两个公司2006年完成的系列机载SAL实验结果

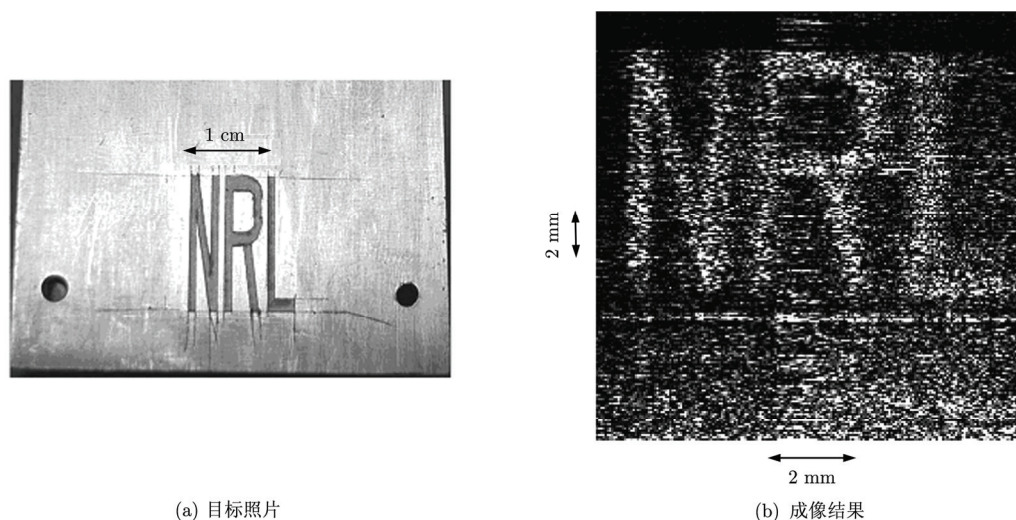


图1 SAL室内SAL演示成像结果之一(美国NRL)^[15,16]

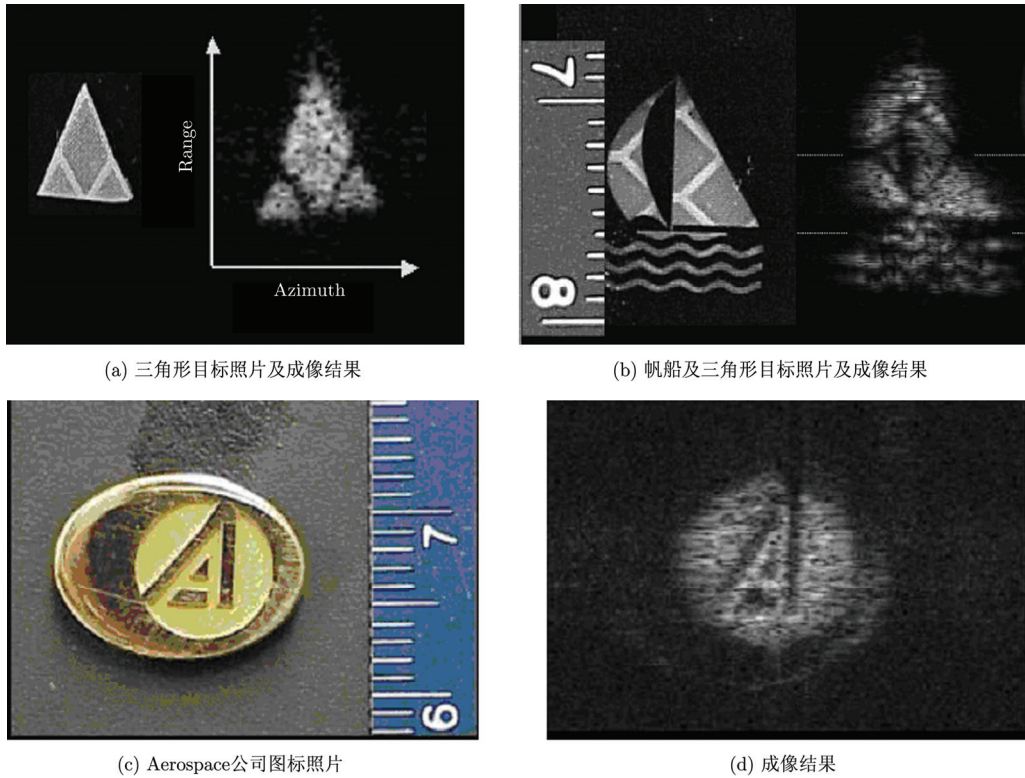


图 2 室内 SAL 演示成像结果之二(美国 Aerospace 公司)^[17-19]

还未见对外公开。2009 年, 美国洛克希德马丁相干技术公司(LMCT)的 J. R. Buck 等人报道了采用 1.55 μm 波长的脉冲光纤激光, 在室外条件下, 实现了 700 m 距离上方位双点目标 SAL 成像^[22], 图 3 所示为成像结果。图 3(a)是距离压缩像, 图 3(b)是方位合成孔径像, 可见两个方位向的点目标清晰地呈现出来。2011 年, LMCT 继续报道了采用 1.55 μm 波长脉冲光纤激光的机载 SAL 成像结果, 如图 4 所示^[23]。图 4 中, SAL 工作于正侧视条带模式, 斜距 1.6 km, 可见目标表面的图案细节成像清晰。这是首次且目前唯一公开的机载 SAL 成像图像。

2.2 国内研究现状

国内对 SAL 研究的关注比较早, 但实验研究工作开展相对较晚。2002 年, 成都电子科技大学的彭仁军等采用干涉法演示了光学合成孔径技术^[24]。2006 年以后, 受到美国机载 SAL 演示成功的消息的鼓舞, 更多的 SAL 演示成像实验研究开展起来^[25-33]。2009 年, 西安电子科技大学的郭亮等人报道了室内距离向成像实验^[25]; 同年, 上海光机所周煜等人报道了实验室 2 维 SAL 成像实验演示, 成像距离约 3.2 m, 成像结果如图 5 所示^[27]; 2011 年, 上海光机所刘立人等人报道了 14 m 距离上的 SAL 成像演示实验,

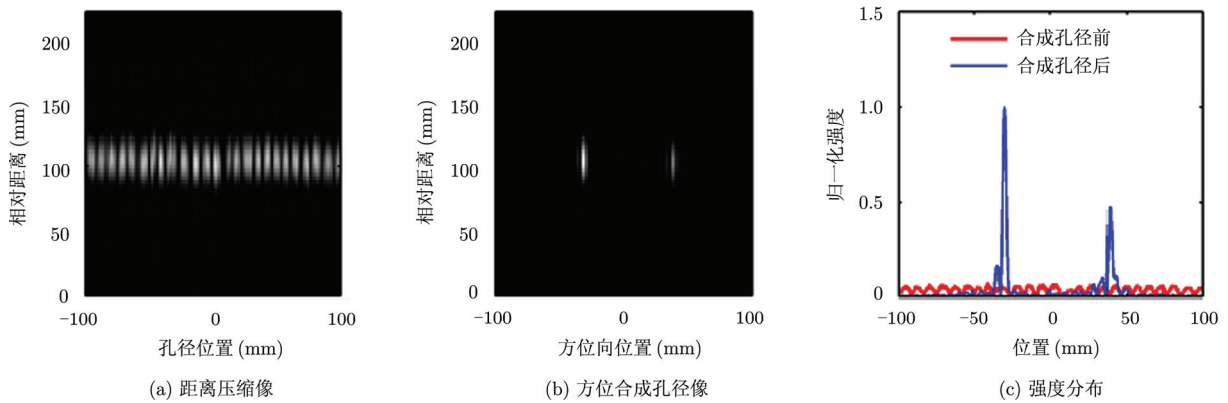
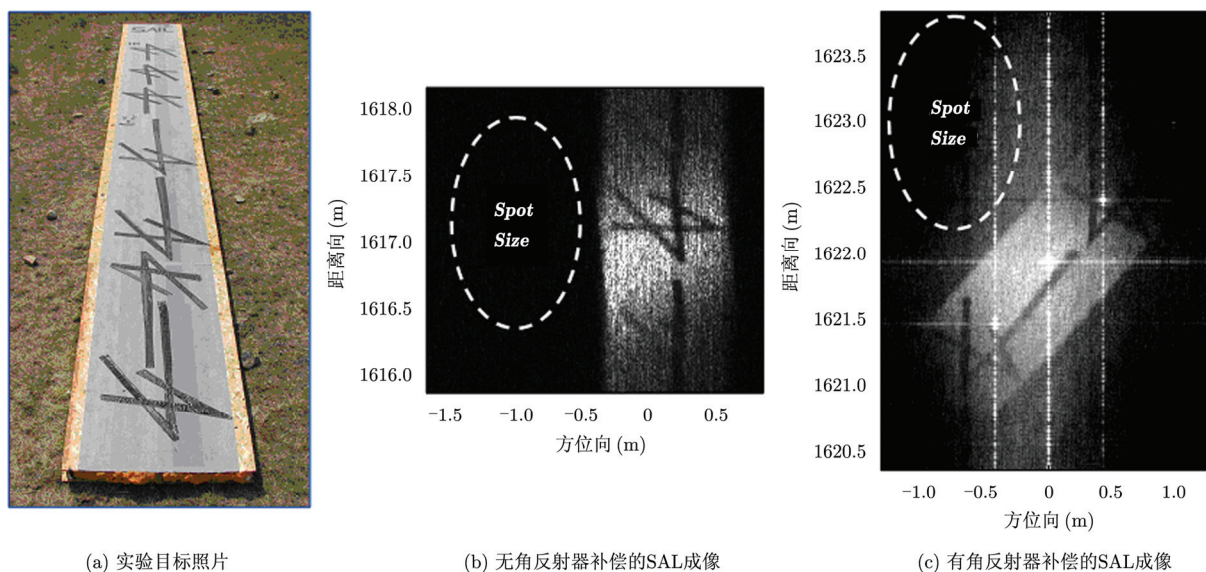


图 3 室外 SAL 演示成像结果(美国 LMCT)^[22]

图4 机载 SAL 演示成像结果(美国 LMCT)^[23]

成像结果如图6所示^[28]；2011年底，中国科学院电子所也实现了SAL实验演示成像，目标距离约2.4 m，成像结果如图7所示^[33]。图7(a)为目标照片，尺寸约为100 mm (方位) × 68 mm (距离)，图案由3M钻石反光材料经激光切割而成；图7(b)为SAL成像图像。在图7的实验中，目标背景为一块橡胶皮，与3M钻石反光材料相比，回波弱，所以，与图1中NRL的成像相比，背景干净，目标表面细节清晰。在图7工作基础上，中国科学院电子所还进一步演示了基于单程远场衍射的SAL成像^[34]。

3 国内外 SAL 研究状况分析

3.1 SAL 成像图片

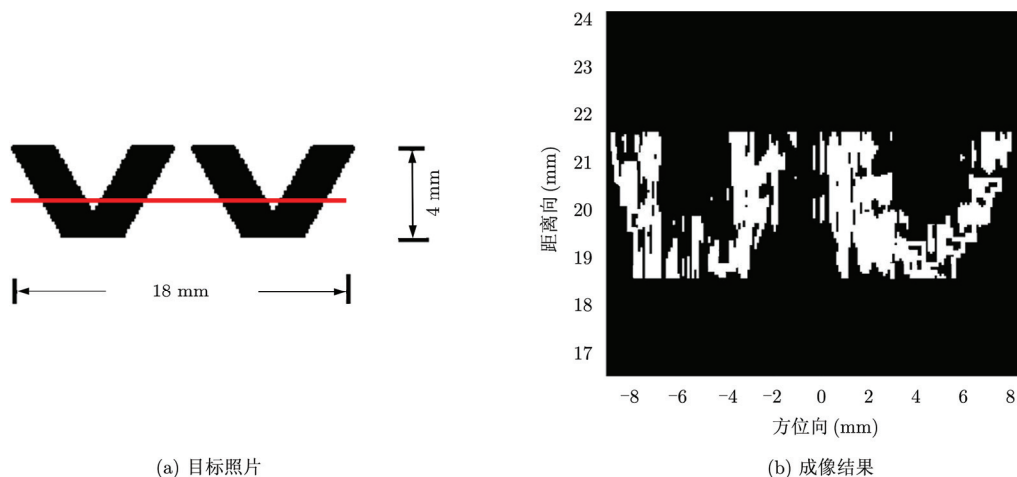
丰富的高质量SAL成像图片是开展SAL研究的重要参考资料。SAL属相干成像，高分辨SAL成像依赖良好的回波相位史数据。在实验室条件下，

影响相位的因素大都可以通过某些措施进行控制，因此，实验室SAL演示研究可以展示与理论预期一致的成像分辨率，例如，高分辨率的SAL成像展示了目标表面的细节^[17-19,33]。

目前，室内SAL演示成像研究已经有较多的SAL成像图片发表。通过这些公布的成像图片，研究者可以分析相应SAL系统形成的相位史数据特点。室外(包括机载)研究目前仅有LMCT提供的简短会议信息和有限数量的成像图片^[22,23]，远远不能满足研究用途的需要，仍需相关研究人员积极努力，贡献更多的、不同目标场景的、不同环境条件下的SAL成像图片。

3.2 SAL 体制

目前完成的SAL成像室内演示实验大都采用线性调频脉冲激光体制^[15-19,25-34]，在两个公开室外SAL实验成像资料中，采用的是编码脉冲激光体

图5 室内 SAL 演示成像结果之三(上海光机所)^[27]

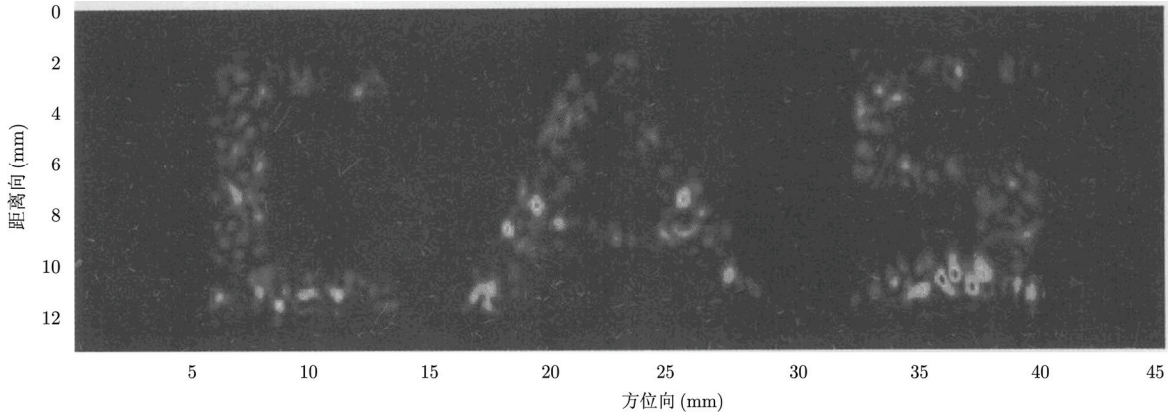
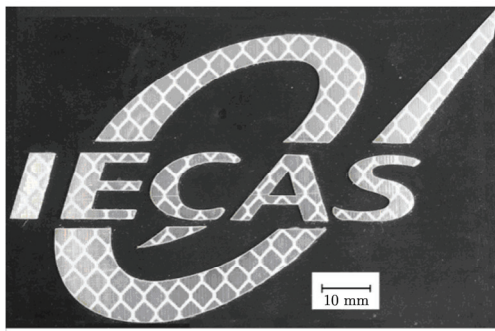
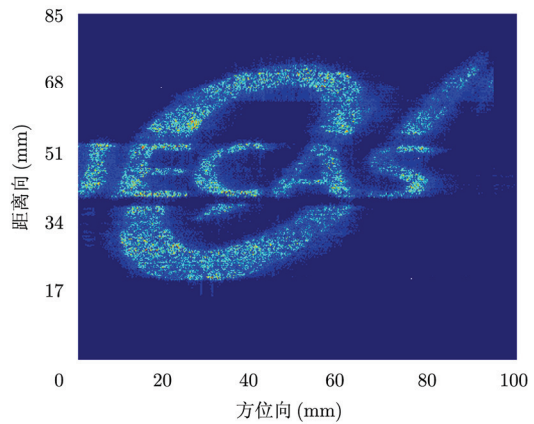


图 6 室内 SAL 演示成像结果之四(上海光机所)^[28]



(a) 目标照片



(b) 成像结果

图 7 室内 SAL 演示成像结果之五(中国科学院电子所)^[33]

制^[22,23]。这两种体制虽然只是距离像的实现方式改变,但是,相应 SAL 的技术实现有所不同。对室内 SAL 成像演示而言,目的是高分辨率光学合成孔径成像原理演示,通过线性调波长方式实现激光线性调频,容易获得大调频带宽,从而实现高的距离像分辨率。然而,室内演示实验中,激光器的线性调波长一般采用机械转动方式实现,调节速度有限,不易实现高重复频率,因此,在室外尤其是机载 SAL 实验中,由于运载平台的速度快,线性调波长的方式可能满足不了机载 SAL 的重复率要求。编码脉冲激光体制,能够实现高重复频率,同时需要 SAL 系统具有较高的采样频率,如文献^[22,23]中,采样率高达 8 GS/s。

3.3 SAL 研究进展

美国在 2004 年左右完成 SAL 实验室成像演示工作^[15-19],2006 年报道了机载 SAL 研究消息^[20],五年后的 2011 年,美国 LMCT 公司开始公开机载 SAL 实验图像^[23]。从相关报道来看,美国 Raytheon 公司和 Northrop Grumman 公司在 2006 年进行了

内容丰富的机载 SAL 成像实验,内容涉及不同的激光器波长(1.5 μm 波段、10 μm 波段)、2 维甚至 3 维 SAL 成像、大气影响等等。目前,相关实验结果及细节并未公开,但工作进展似乎超越了 2011 年 LMCT 公开的工作。

国内经过多年努力也已经完成 SAL 成像实验室探索,建立了成像稳定的实验平台,获得了高分辨率成像图像,为进一步开展室外 SAL 成像研究创造了基础条件。

4 SAL 研究需解决的几个问题

SAL 的发展已有几十年的历史,只是由于相关技术的发展限制,一直进展有限。随着有关技术的发展,SAL 可能具备了走入工程应用的条件。目前,公开报道的 SAL 室外成像结果远没有 SAR 那样丰富,实用化 SAL 的研究还有大量的工作要做。例如,从最终用户的角度,SAL 研究至少需要面对如下问题:分辨率、成像视场和大气湍流。

4.1 分辨率

与常规非相干成像方法不同的是,SAL 成像具

有与目标距离无关的高分辨率。按照美国 NRL 的 M. Bashkansky 等人的说法, 成像距离大于百公里时, 以米级的接收口径, 只有 SAL 才能提供厘米级的成像分辨率^[16]。因此, SAL 只有充分展示其远距离、高分辨、快速成像能力, 才能体现其与众不同的优越性。我们知道, SAL 的方位成像分辨率是以合成孔径方式实现的; 而稳定的相位史数据是 SAL 实现高分辨成像的关键。SAL 系统的设计首先要考虑如何获得稳定的相位史数据。虽然, 后期数据处理中应用相位误差处理方法, 如相位梯度自聚焦算法(PGA)^[35], 能够提高 SAL 成像的聚焦效果^[17-19,23]; 但是, 从 PGA 原理知道, PGA 技术的有效性依赖于场景中能提取强反射点, 当相位误差很大时, 方位向聚焦差, PGA 技术的作用也显得有限^[36]。事实上, 已有的 SAL 成像结果表明, 当方位相位史数据稳定时, 无需 PGA 就能获得高分辨率 SAL 成像^[33,34]。

4.2 成像视场

在 LMCT 公开的机载 SAL 实验中, 1.6 km 斜距目标平面上的光斑脚印大小只有约 $\phi 1$ m, 对应的视场角不到 1 mrad^[23]。以这个视场角成像, 斜距延长至 20 km 时, 目标平面上的激光照明范围将不到 20 m。以这样小的视场对大面积目标成像时, 将需要进行大量“马赛克”式的图像拼接。这可能增加 SAL 系统技术复杂程度和影响成像速度。

大视场、高分辨率、远距离三者之间存在一定的制约, 如何协调三者之间的关系, 是 SAL 研究者需要考虑的问题。目前, 相关实验报道有限, 还需要感兴趣者付出更多的努力。

4.3 大气湍流

SAL 应用于有大气的环境时, 大气湍流是一个不可忽视的问题。大气不仅能使激光束传输方向发生变化、也会严重改变激光束的波前。当大气在目标回波信号中引入巨大的相位误差时, 实现高分辨 SAL 成像是困难的^[37-39]。

大气对 SAL 成像影响的实验研究目前的资料还很少。2006 年, 美国 Raytheon 公司和 Northrop Grumman 公司进行的机载 SAL 实验涉及大气影响的内容, 据说, 大气对回波相位的影响可超过波长量级。这种量级的相位误差从理论上将严重影响 SAL 成像。因此, 在大气环境中的 SAL 成像研究, 可能涉及到 SAL 体制、系统设计、数据处理, 等等, 也还需要相关研究者贡献更多的实验数据。

5 小结

SAL 的优点在于其远距离、快速、与目标距离

无关的高分辨率成像能力。作为一种利用相干激光进行主动探测的高分辨率成像雷达, 高功率相干激光技术、高灵敏外差探测技术、高速数字信号处理技术、甚至光纤通信技术等技术的迅速发展, 为其发展和成熟创造了条件。

SAL 室内外演示成像已经由美国研究者实现, 工程化涉及的各项技术问题也许正在积极的探索之中。我国 SAL 研究也已经有了良好的起步, 实现了室内高分辨 SAL 成像演示, 建立了深入探索关键技术的实验平台。

SAL 研究重要的是技术实现。在运动平台上, 建立适合用户需要的 SAL 成像系统, 需要克服的技术难题还很多。这些问题的解决, 既需要深入细致的理论仿真分析, 更需要关键技术的实验探索。值得注意的是, 已经有一些创新性的工作发表出来, 如美国劳伦斯利夫莫尔实验室(LLNL)的 Eddy A. Stappaerts 和 E. T. Scharlemann 提出的 DSAL^[40]、美国 Dayton 大学 Bradley D. Duncan 和空军实验室(AFRL)的 Matthew P. Dierking 共同提出的 HAL^[41-44]以及周期伪噪声波形 SAL^[45]、上海光机所的刘立人提出的直视 SAL^[46]等。借鉴这些新颖的思想, 也许有助于 SAL 的工程实现。

可以预期, SAL 技术的成熟和发展将弥补已有成像手段的不足, 成为一种有价值的高分辨率成像遥感设备, 在军用和民用领域得到应用。

致谢 这些年的 SAL 研究过程中, 中国科学院电子学研究所七室刘畅副主任在成像处理理论和实践方面一直给予积极指导和无私帮助; 中国科学院电子学研究所众多 SAR 研究专家, 如王小青副研究员、陈永强副研究员、宋红军研究员、齐向阳研究员、胡东辉副研究员、孟大地副研究员等, 多次参与讨论。在此一并致谢。

参考文献

- [1] Chung Soon-Jo, Miller D W, and de Weck O L. Design and implementation of sparse aperture imaging systems[C]. Proceedings of SPIE, 2002, Vol. 4849: 181-192.
- [2] Marron J C and Kendrick R L. Distributed aperture active imaging[C]. Proceedings of SPIE, 2007, Vol. 6550: 65500A.
- [3] Curlander J C and McDonough R N. Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing[M]. John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [4] 邓云凯, 赵凤军, 王宇. 星载 SAR 技术的发展趋势及其应用浅析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 1-10.
Deng Yun-kai, Zhao Feng-jun, and Wang Yu. Brief analysis on the development and application of spaceborne SAR[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 1-10.

- [5] Ricklin J C and Tomlinson P G. Active imaging at DARPA [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, Vol. 5895: 589505.
- [6] Lewis T S and Hutchins H S. A synthetic aperture at optical frequencies[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1970, 58(4): 578–588.
- [7] Lewis T S and Hutchins H S. A synthetic aperture at 10.6 microns[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1970, 58(10): 1781–1782.
- [8] Aleksoff C C and Christensen C R. Holographic Doppler imaging of rotating objects[J]. *Applied Optics*, 1975, 14(1): 134–141.
- [9] Aleksoff C C. Synthetic interferometric imaging technique for moving objects[J]. *Applied Optics*, 1976, 15(8): 1923–1929.
- [10] Aleksoff C C, Accetta J S, and Tai L M, *et al.* Synthetic aperture imaging with a pulsed CO₂ TEA laser[C]. *Proceedings of SPIE*, 1987, Vol. 783: 29–40.
- [11] Marcus S, Collella B D, and Green T J, Jr.. Solid-state laser synthetic aperture radar[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(6): 960–964.
- [12] Green T J, Jr., Marcus S, and Colella B D. Synthetic-aperture-radar imaging with a solid-state laser[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(30): 6941–6949.
- [13] Yoshikado S and 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.
- [14] Yoshikado S and 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.
- [15] Bashkansky M, Lucke R L, and Funk E, *et al.* Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(22): 1983–1985.
- [16] Bashkansky M, Lucke R L, and Funk E, *et al.* Synthetic aperture imaging at 1.5 μm: laboratory demonstration and potential application to planet surface studies [C]. *Proceedings of SPIE*, 2002, Vol. 4849: 48–56.
- [17] Buell W F, Marechal N J, and Buck J R, *et al.* Synthetic-aperture imaging lidar[J]. *The Aerospace Corporation Magazine of Advances Technology*, 2004, 5(2): 45–49.
- [18] Beck S M, Buck J R, and Buell W F, *et al.* Synthetic aperture imaging lidar: laboratory demonstration and signal processing[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(35): 7621–7629.
- [19] Buell W, Marechal N, and Buck J, *et al.* Demonstrations of synthetic aperture imaging lidar[C]. *Proceedings of SPIE*, 2005, Vol. 5791: 152–166.
- [20] Amann M C, Bosch T, and Myllyla R, *et al.* Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement [J]. *Optics Engineering*, 2001, 40(1): 10–19.
- [21] Dierking M, Schumm B, and Ricklin J C, *et al.* Synthetic aperture LADAR for tactical imaging overview[C]. The 14th Coherent Laser Radar Conference(CLRC), 2007, Session 9.
- [22] Buck J R, Krause B W, Malm A I R, *et al.* Synthetic aperture imaging at optical wavelength[C]. OSA/CLEO/ IQEC, 2009.
- [23] Krause B W, Buck J, Ryan C, *et al.* Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]. OSA/CLEO/IQEC, 2011.
- [24] 彭仁军, 吴健, 杨春平, 等. 用干涉法实现光学合成孔径技术 [J]. *光学学报*, 2002, 22(3): 355–359.
Peng Ren-jun, Wu Jian, Yang Chun-ping, *et al.* Synthethizing aperture in optics with interferometric imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(3): 355–359.
- [25] 郭亮, 邢孟道, 张龙, 等. 室内距离向合成孔径激光雷达成像的实验研究[J]. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2009, 39(10): 1678–1684.
Guo Liang, Xing Meng-dao, Zhang Long, *et al.* Research on indoor experimentation of range SAL im aging system[J]. *Science China Technological Sciences*, 2009, 39(10): 1678–1684.
- [26] 周焯, 许楠, 栾竹, 等. 实验室合成孔径激光雷达点目标二维成像实验[J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 566–568.
Zhou Yi, Xu Nan, and Luan Zhu, *et al.* Two-dimensional imaging experiment of a point target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 566–568.
- [27] 周焯, 许楠, 栾竹, 等. 尺度缩小合成孔径激光成像雷达的二维成像实验[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 2030–2032.
Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu, *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.
- [28] 刘立人, 周焯, 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验证[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 112–116.
Liu Li-ren, Zhou Yu, Zhi Ya-nan, *et al.* A large aperture synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its verification in laboratory space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 112–116.
- [29] 戴恩文, 孙建峰, 闫爱明, 等. 菲涅耳望远镜合成孔径激光雷达实验室验证[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 278–283.
Dai En-wen, Sun Jian-feng, Yan Ai-ming, *et al.* Demonstration of a laboratory Fresnel telescope synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 278–283.
- [30] 洪光烈, 王建宇, 孟昭华, 等. Chirp强度调制与近红外激光合成孔径雷达距离向处理[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, 28(3): 229–234.
Hong Guang-lie, Wang Jian-yu, Meng Zhao-hua, *et al.* Chirped amplitude modulation and range dimension processing of near infrared synthetic aperture lidar[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 28(3): 229–234.
- [31] 刘国国, 吴谨, 朱炳祺, 等. 合成孔径激光雷达距离像分辨率非线性恶化与补偿[J]. *激光与红外*, 2009, 39(9): 934–938.

- Liu Guo-guo, Wu Jin, Zhu Bing-qi, *et al.*. Nonlinear degradation and compensation on range resolution in synthetic aperture radar experiment[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(9): 934–938.
- [32] 朱炳祺, 吴谨, 赵美静, 等. 条带式合成孔径激光雷达光轴影响距离成像研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(11): 42–48.
- Zhu Bing-qi, Wu Jin, Zhao Mei-jing, *et al.*. Influence of optical axis on range imaging in stripmap synthetic aperture radar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(11): 42–48.
- [33] Wu Jin, Li Fei-fei, Zhao Zhi-long, *et al.*. Demonstration of stripmap mode synthetic aperture radar with PGA-independent high resolution images[J]. (Submitted to *Optics & Laser Technology*).
- [34] 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*, 待发表.
- Wu Jin, Yang Zhao-sheng, Zhao Zhi-long, *et al.*. Laboratory demonstration on synthetic aperture radar imaging with one-way far-field diffraction[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, to be published.
- [35] Eichel P H, Wahl D E, Ghiglia D C, *et al.*. Phase gradient autofocus—a robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 1994, 30(3): 827–835.
- [36] 赵美静, 吴谨, 朱炳祺. 随机相位误差影响条带模式合成孔径激光雷达成像的数学模拟[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(12): 2418–2423.
- Zhao Mei-jing, Wu Jin, and Zhu Bing-qi. Mathematical simulation on stripmap mode synthetic aperture radar imaging with random phase errors, *infrared and laser engineering*[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2418–2423.
- [37] Karr T J. Atmospheric phase error in coherent laser radar[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(4): 1122–1132.
- [38] Karr T J. Resolution of synthetic-aperture imaging through turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2003, 20(6): 1067–1083.
- [39] Lucke R L. Synthetic aperture radar simulations with phase screens and Fourier propagation[C]. 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2004: 1788–1798.
- [40] Stappaerts E A and Scharlemann E T. Differential synthetic aperture radar[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(18): 2385–2387.
- [41] Duncan B D and Dierking M P. Holographic aperture radar[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(6): 1168–1177.
- [42] Duncan B D and Dierking M P. Stripmap holographic aperture radar[C]. IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2008: 511–512.
- [43] Stafford J W, Duncan B D, and Dierking M P. Experimental demonstration of a stripmap holographic aperture radar system[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(12): 2262–2270.
- [44] Venable S M, III, Duncan B D, Dierking M P, *et al.*. Demonstrated resolution enhancement capability of a stripmap holographic aperture radar system[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(22): 5531–5542.
- [45] Dierking M P and Duncan B D. Periodic, pseudonoise waveforms for multifunction coherent radar[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(10): 1908–1922.
- [46] 刘立人. 直视合成孔径激光雷达成像原理[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 287–294.
- Liu Li-ren. Principle of down-looking synthetic aperture imaging radar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 287–294.

作者简介



吴谨(1965–), 男, 湖南绥宁人, 博士, 中国科学院电子学研究所研究员, 目前主要研究兴趣为合成孔径激光雷达(SAL)、激光多普勒遥感(LDV)、脉冲CO激光器。

E-mail: jwu909@263.net,
jwu@mail.ie.ac.cn