

# 大口径合成孔径激光成像雷达演示样机及其实验室验证

刘立人 周 煜 职亚楠 孙建锋 吴亚鹏 栾 竹 闫爱民 王利娟 戴恩文 鲁 伟

(中国科学院上海光学精密机械研究所中国科学院空间激光通信及检验技术重点实验室, 上海 201800)

**摘要** 合成孔径激光成像雷达(SAIL)的主要技术指标如光学足趾尺寸和成像分辨率等都必须是在所设计的远距离传输后实现。提出了一种在实验室空间近距离实现 SAIL 全系统贯通验证的方法,即在 SAIL 中附加光学装置使其在近距离产生发射光束的准几何投影和足够大的外差接收视场,从而产生近距离二维 SAIL 成像必需的并且适当的光学足趾和方位向二次项相位历程。给出了一种  $\Phi 300$  mm 口径合成孔径激光成像雷达演示样机的主体结构 and 光学附件装置的设计方案,实现了实验室空间近距离演示验证,给出了在 14 m 传输距离上的二维 SAIL 成像动态演示的结果,实验测得光学足趾达到  $22\text{ mm} \times 22\text{ mm}$ ,成像分辨率优于  $1.4\text{ mm}$ (方位向)  $\times 1.2\text{ mm}$ (距离向)。

**关键词** 遥感;合成孔径激光成像雷达;实验室空间近距离验证;相位历程

中图分类号 TN958 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0900112

## A Large-Aperture Synthetic Aperture Imaging Ladar Demonstrator and Its Verification in Laboratory Space

Liu Liren Zhou Yu Zhi Ya'nan Sun Jianfeng Wu Yapeng Luan Zhu  
Yan Aimin Wang Lijuan Dai Enwen Lu Wei

(Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The main specifications of synthetic aperture imaging ladar (SAIL), such as the size of optical footprint and the imaging resolution etc., can be realized only in the case of designed long transmission distance. This paper proposes a method to systematically verify an SAIL in the close distance of laboratory space. The SAIL is modified with the additional optical elements to produce both a geometric projection of transmitting beam onto the target and an enough large field of heterodyne reception. Therefore, the optical footprint and quadratic phase history essential and suitable for two-dimensional (2D) SAIL imaging in the close distance can be generated. A major structure of  $\Phi 300$  mm SAIL demonstrator modified with the accessory optical elements is designed and then verified experimentally in a 14 m distance to the target. The result of well-focused 2D SAIL dynamic imaging is obtained. The optical footprint size is measured as  $22\text{ mm} \times 22\text{ mm}$  and the imaging resolution is better than  $1.4\text{ mm}$  (azimuth)  $\times 1.2\text{ mm}$  (range).

**Key words** remote sensing; synthetic aperture imaging ladar; close distance verification in laboratory space; phase history

**OCIS codes** 280.6730; 100.2000; 110.2970; 030.6140; 030.4280

## 1 引 言

20 世纪 70 年代国际上就开展了合成孔径激光成像雷达(SAIL)技术的研究,但是直到 2002 年美

国海军实验室才取得了突破性进展实现了固定孔径对移动目标的二维成像<sup>[1]</sup>,其采用了  $1.55\text{ }\mu\text{m}$  的半导体可调谐激光器,在距离向采用波长啁啾实现高

收稿日期: 2011-07-07; 收到修改稿日期: 2010-07-19

基金项目: 国家自然科学基金委员会青年基金(60908029,60907006,60807024)和上海市自然科学基金(09ZR1435300)资助课题。

作者简介: 刘立人(1942—),男,研究员,博士生导师,目前主要从事空间信息光学的研究。

E-mail: lirenliu@mail.shenc.ac.cn

分辨率成像,在方位向采用合成孔径实现高分辨率成像。关键在于利用 HCN 光谱吸收盒解决了啁啾频率触发同步的问题。此后 2005 年美国宇航公司实验室采用长度不匹配的数字参考通道,实现了移动孔径对固定目标的二维成像<sup>[2]</sup>。2006 年美国雷声公司和诺斯罗普·格鲁门公司在美国国防先进研究计划局(DARPA)的资助下分别成功研制了合成孔径激光成像雷达装置系统,据报道是进行了机载实验,但是没有任何实验结果的具体公开报道<sup>[3]</sup>。本课题组已经完成了实验室平台合成孔径激光成像雷达全系统贯通并且实现了实时二维成像,采用了自由空间结构的光学系统<sup>[4~6]</sup>,而不是上述报道的系统所采用的全光纤系统。

尽管合成孔径激光成像雷达的思想是从微波合成孔径雷达发展而来的,但由于波段从微波过渡到光波,其波长小 5 个数量级左右,天线尺寸与光学波长的比值为 5 个数量级左右,因此在物理本质上呈现了光学波段的特性。也就是说微波合成孔径雷达的原理和方法并不能简单地或者直接地应用到合成孔径激光成像雷达。在 SAIL 中空间-时间四维尺度的光学信号的振幅(偏振)、频率、时间相位和空间相位全部都必须给予严密的关系确定,是至今所有光学应用科学中难度最高的研究之一<sup>[7]</sup>。因此本课题组对于 SAIL 归纳了空间衍射光学、时间域干涉光学、统计光学和图像处理四个领域基础科学问题,同时总结出总体技术、光学天线系统、发射/接收系统和图像处理系统等关键技术<sup>[8~15]</sup>。SAIL 对激光、光机械、光电子、电子、光学和测量等器件和单元提出了新的更高要求。

事实上合成孔径激光成像雷达的基本技术指标如光学足迹尺寸(包括激光照明光斑和外差接收视场)和成像分辨率(距离向和方位向)等都必须要在所设计的远距离上通过发射光束和目标回波的非涅耳或夫琅禾费衍射的传输实现,完全不可能在实验室空间近距离范围内(如数十米量级)进行实验验证。然而为了奠定 SAIL 外场试验的基础,需要寻求一种方法能够在实验室空间的近距离范围内验证所设计的 SAIL 系统。这种方法本质上要求在近距离上不仅能够产生空间二次项照射和非涅耳衍射,而且可以产生足够大的外差接收视场,以期得到必需的光学足迹尺寸和合适的二次项相位历程。据此,本文提出了一种在实验室空间近距离实现 SAIL 全系统贯通验证的方法,即在 SAIL 中附加光学装置使得其在近距离上沿发射方向产生激光光束的准几何

投影,在接收方向维持目标分辨单元的非涅耳衍射并同时产生足够大的外差接收视场,从而在近距离产生二维 SAIL 成像必需的尺寸合适的光学足迹和等效半径合适的方位向二次项相位历程。同时控制啁啾带宽使得距离向成像分辨率与方位向基本一致,最终得到二维成像验证。

基于我们的实验基础和对于基础科学问题的认识,本课题组探索设计和研制了一个探测距离为 50 km 的  $\Phi 300$  mm 口径的合成孔径激光成像雷达演示样机,同时为了实现在实验室空间近距离内进行成像性能验证,设计了附加光学装置。理论设计和实验结果表明该组合演示样机在 14 m 传输距离上产生的光学足迹尺寸为 22 mm $\times$ 22 mm,二维成像分辨率的理论设计为 0.38 mm(方位向) $\times$ 0.84 mm(距离向),而实验测试值优于 1.4 mm(方位向) $\times$ 1.2 mm(距离向)。

## 2 实验系统

大口径 SAIL 演示样机的近距离验证实验结构如图 1 所示。演示样机的光学主体结构由啁啾激光源、光纤放大器、HCN 时间同步回路、本振准直器及光路、信号发射准直器及光路、接收/发射双向回路(分光棱镜 1 和 2)、收发主望远镜、接收通道匹配传输 4f 望远镜和光学桥接器组成。接收/发射双向回路、接收通道 4f 望远镜和光学主望远镜构成回波空间二次项相位的补偿光路,其原理已有报道<sup>[10~12]</sup>。发射通道附加次级望远镜,主望远镜的孔径光阑和探测器光阑组成近距离模拟附加装置,其具有两个作用:1) 附加望远镜离焦从而在目标面前实现聚焦而形成曲率半径很小的照明二次项投影;2) 采用探测器光阑形成光学外差很小的接收孔径,以在近距离的目标上产生足够大的外差接收视场。应当注意矩形孔径下的 SAIL 具有最好的成像分辨率<sup>[14]</sup>,因此本文设计的演示样机中均采用矩形孔径。

合成孔径激光成像雷达演示样机的具体工作过程如下。激光发射源由光纤放大器放大并输出三路光纤光束,一路作为 HCN 光谱吸收盒的触发光信号,以克服啁啾激光器初始发射频率随机性导致的不同脉冲间产生随机相位误差的问题,一路经光纤准直镜形成本机振荡准直激光光束。主输出光纤的光束经光纤准直镜形成发射激光光束,其经过偏振镜、次望远镜,第一偏振分光棱镜(PBS1,透射)、 $\lambda/4$ 波片、主望远镜和主光阑发射往目标。主望远镜配

合次望远镜的离焦将对于目标产生一个数米量级曲率半径的照明波前。目标的回波激光波前通过主望远镜、 $\lambda/4$ 波片、PBS1(反射)、 $4f$ 望远镜和第二偏振分光棱镜(PBS2,反射)与本机振荡准直激光光束合束。其中主望远镜需要少许离焦以消除回波波面的固有偏置, $\lambda/4$ 波片用于控制回波在第一偏振分光棱镜的反射。回波和本振光束一同通过半波片和接收机光阑入射 $2\times 2$ 光学桥接器,其中半波片用于旋

转光束 $45^\circ$ 使得所分成的两路干涉光束被平衡接收机的两个光电探测器接收。该SAIL系统具有集成化控制系统,采用计算机为控制中心,可以实现激光器控制、数据采集、目标平台移动和实时图像处理等全过程自动化处理。因此本系统能够在采集数据的同时,根据分析计算与图像处理结果,显示原始图像数据以及距离向压缩图、方位向压缩图和二维成像图这3个图像,实现了SAIL成像的实时性。

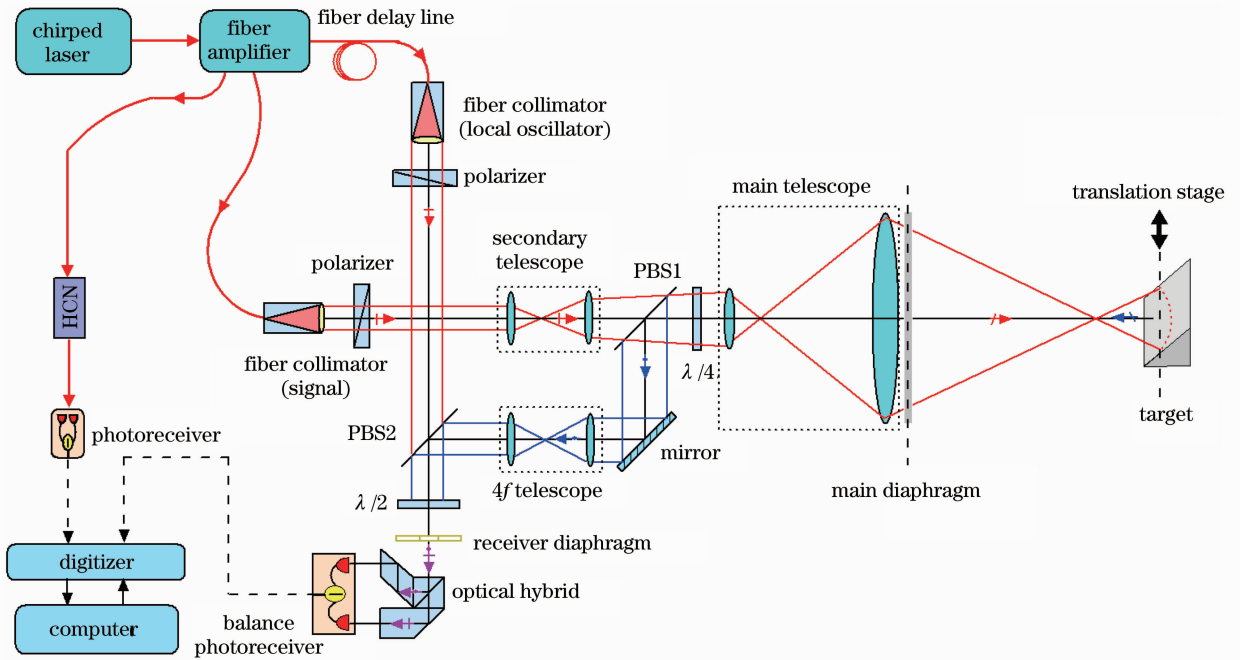


图1 大口径光学SAIL结构及其近距离验证示意图

Fig. 1 Structure diagram of a large-aperture SAIL and its setup for short-distance verification

### 3 实验结果

由于实验室场地限制,目标工作距离设定为14 m。演示样机的望远镜主镜口径为 $\Phi 300$  mm,主望远镜系统放大倍率设定为10倍,次望远镜系统放大倍率设定为10倍,作为光源的光纤耦合器发射光斑为2.87 mm,因此主镜面发射光斑为 $\Phi 287$  mm,经由方形孔径光阑切割为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的出射光斑。由于目标距离为14 m,则主望远镜离焦量约为110.8 mm。因此设计发射系统望远镜离焦以在目标面形成3.3 m的等效发射半径, $32\text{ mm}\times 32\text{ mm}$ 的照明光斑以覆盖接收视场,并预留一定余量。由于发射波面和接受波面曲率不等,等效的合成孔径二次项半径为其两者倒数和的倒数,因此等效合成孔径二次项半径约为2.67 m。接收机光阑孔径为 $0.2\text{ mm}\times 0.2\text{ mm}$ ,相当于在天线入瞳为 $2\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ ,因此在目标面上的光学外差接收视场尺度为

$22\text{ mm}\times 22\text{ mm}$ 。综合照明光斑和接收视场,组合演示样机的光学足趾为 $22\text{ mm}\times 22\text{ mm}$ ,因此方位向理论分辨率约为0.38 mm。

考虑到HCN工作特性,激光啁啾范围设定为1549~1553 nm,即啁啾波长差为4 nm。波长扫描速率100 nm/s,啁啾速率 $1.2674\times 10^{13}\text{ Hz/s}$ 。由于目标采用 $45^\circ$ 放置,因此距离向理论分辨率约为0.84 mm(深度向分辨率0.6 mm)。总之,理论成像分辨率为0.38 mm(方位向) $\times$ 0.84 mm(距离向),这里给出的成像分辨率相当于成像的点扩展函数宽度。本振光学系统与目标中心光程差约60 mm,分别采用了光纤延迟线与自由空间光学反射镜系统,所产生的外差信号中心频率为2.5 kHz。目标方位向步进间隔0.1 mm,示波器采样频率2.5 MHz。探测到的二维分布的光电子信号经过距离向傅里叶变换聚焦和方位向的相位二次项匹配滤波后将产生

与目标字符相同的实验结果输出图像。受激光器啁啾特性限制导致重复频率很低,实验采用一步一停的实验方式,实验过程相当于条带扫描模式<sup>[13]</sup>。

实验目标为3个英文字母“C”,“A”,“S”,总的尺寸为36 mm(长)×10 mm(高),其成像结果如图2所示,此时的匹配滤波器宽度为光学足趾的一半左右。成像分辨率可以采用一个类似点函数的点目标的成像来测定。成像中采用的点目标的尺寸为

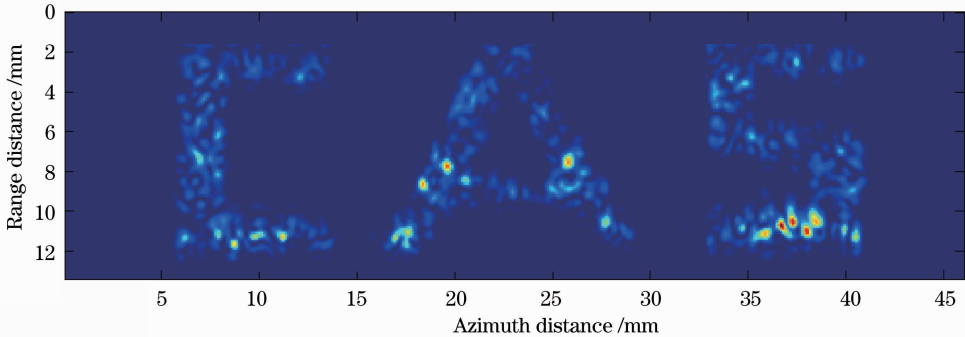


图2 三个英文字母“C”,“A”,“S”,的二维 SAIL 成像实验结果

Fig. 2 Experimental results of 2D SAIL imaging of three characters including “C”, “A”, and “S”

输出图像上存在非常明显的强度随机分布特性,这是由于漫反射目标激光回波的散斑效应所造成的。已知目标分辨单元的设计尺寸为 $0.38\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$ ,相当于在接收面产生的激光散斑<sup>[15,16]</sup>强度的平均尺寸为 $57.1\text{ mm} \times 36.2\text{ mm}$ ,其远远大于天线的外差接收口径 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ ,可以预计成像中会出现强烈的散斑效应。

实验安排上在目标面上也设置了一个反射镜,其与 SAIL 构成了一个干涉测长装置,因此可以实时测量目标光路中引入的外界相位干扰,用于对方位向取得的相位因子进行补偿以得到质量提高的输出像。图2的实验结果是经过干扰相位测量和补偿的。

## 4 结 论

给出了一个探测距离为50 km的 $\Phi 300\text{ mm}$ 口径的 SAIL 演示样机及其近距离验证用的附加光学装置的结构和设计。实验表明该组合系统在传输长度14 m上产生光学足趾尺寸为 $22\text{ mm} \times 22\text{ mm}$ ,二维成像分辨率为 $1.4\text{ mm}$ (方位向)× $1.2\text{ mm}$ (距离向)。

实验结果显示该组合 SAIL 系统实现了距离向外差信号的相位同步,也实现了方位向准确的二次项相位历程的产生,表明已经解决了关键性科学技术问题,也表明本文提出的近距离验证 SAIL 的方法是可

$\Phi 1\text{ mm}$ ,成像点的(接近零值)全宽度为 $1.4\text{ mm}$ (方位向)× $1.2\text{ mm}$ (距离向),为简单起见现在认定它为成像分辨率,实际值还要好一些。测量分辨率低于理论设计值,主要原因是方位向聚焦成像时匹配滤波的实际可采用的积分宽度低于足趾宽度,距离向聚焦成像时傅里叶变换的实际可采用的积分宽度也低于激光脉冲时间,这里考虑了激光散斑、非线性啁啾等因素的影响。

行的。特别是干扰的实时干涉测量和补偿被实验证明是有效的,可以进一步应用于实用 SAIL 中。

合成孔径激光成像雷达属于激光高分辨率成像装置,因此必定会受到激光散斑效应的影响<sup>[7,15]</sup>,在本实验中也观察到了强烈的散斑效应。由于激光散斑效应严重影响 SAIL 的成像质量,必须加以抑制,这是本课题下一步的重点研究内容之一。

## 参 考 文 献

- 1 M. Bashkansky, R. L. Lucke, E. Funk *et al.*. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(22): 1983~1985
- 2 S. M. Beck, J. R. Buck, W. F. Buell *et al.*. Synthetic-aperture imaging lidar: laboratory demonstration and signal processing [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(35): 7621~7629
- 3 J. Ricklin, M. Dierking, S. Fuhrer *et al.*. Synthetic Aperture Lidar for Tactical Imaging[R]. DARPA Strategic Technology Office, 2007
- 4 Zhou Yu, Sun Jianfeng, Luan Zhu *et al.*. Aperture-synthesizing experiment of a down-scaled synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2446~2448  
周煜, 孙建锋, 栾竹等. 尺度缩小合成孔径激光成像雷达的孔径合成实验[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2446~2448
- 5 Zhou Yu, Xu Nan, 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  
周煜, 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
- 6 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  
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
- 7 R. L. Lucke, M. Bashkansky, J. Reintjes *et al.*. Synthetic Aperture Ladar (SAL): Fundamental Theory, Design Equations for A Satellite System, and Laboratory Demonstration[R]. Naval Research Laboratory Report NRL/FR/7218-02-10, 2002
- 8 Liren Liu. Optical antenna of telescope for synthetic aperture ladar[C]. *SPIE*, 2008, **7094**: 70940F
- 9 Liren Liu. Antenna aperture and imaging resolution of synthetic aperture imaging ladar[C]. *SPIE*, 2009, **7468**: 74680R
- 10 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging ladar (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
- 11 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging ladar (II): spatial phase biased telescope for transmitting antenna [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1197~1200  
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(II):空间相位偏置发射望远镜[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1197~1200
- 12 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging ladar (III): circulated duplex telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1405~1410  
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(III):双向环路发射接收望远镜[J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1405~1410
- 13 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging ladar (IV): unified operation mode and two-dimensional data collection equation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 1~6  
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(IV):统一工作模式和二维数据收集方程[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 1~6
- 14 Liren Liu. Synthetic aperture ladar (V): imaging resolution and antenna aperture shape [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1408~1415  
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(V):成像分辨率和天线孔径函数[J]. 光学学报, 2009, **29**(5): 1408~1415
- 15 Liren Liu. Synthetic aperture imaging ladar (VI): space-time speckle effect and heterodyne SNR [J]. *Acta Optica Sinica*, 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
- 16 J. W. Goodman. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Application [M]. Cao Qizhi Transl.. Beijing: Science Press, 2009  
J. W. Goodman. 光学中的散斑现象-理论和应用[M]. 曹其智译. 北京:科学出版社,2009