

文章编号: 0253-2239(2008)12-2446-03

# 尺度缩小合成孔径激光成像雷达的孔径合成实验

周 煜 孙建锋 栾 竹 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 设计了一种尺度缩小的合成孔径激光成像雷达(SAIL),在实验室平台上模拟实施远场传输条件,相应地解决了波前测量和外差质量监视技术,实现了一个目标点的方位向孔径合成实验,实验结果与理论预测相近。

**关键词** 激光雷达;合成孔径;方位向分辨率;相位历程

中图分类号 TN958 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082812.2446

## Aperture-Synthesizing Experiment of a Down-Scaled Synthetic Aperture Imaging Ladar

Zhou Yu Sun Jianfeng Luan Zhu Liu Liren

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** A down-scaled synthetic aperture imaging ladar (SAIL) is designed to simulate the condition of the far-field diffraction on the table of laboratory, and the techniques to monitor the qualifications of wavefront and heterodyne are developed. As a result, a target point is imaged along the azimuth direction with aperture synthesizing. The experimental results are identical with the theoretical predictions.

**Key words** laser ladar; synthetic aperture; resolution in azimuth direction; phase history

合成孔径激光成像雷达(SAIL)的原理来自于微波合成孔径雷达,是能够在远距离取得厘米量级分辨率的唯一光学成像观察手段。美国海军研究所和航天公司分别报道了基于光纤技术的实验室小尺度实验验证<sup>[1,2]</sup>。SAIL中方位方向的孔径合成成像是较距离方向距离分辨成像重要和困难得多的任务,本文报道 SAIL 方位向成像实验,其特点是按照 SAIL 光学原理<sup>[3~6]</sup>设计了一个缩小尺寸的 SAIL 并在短距离的实验平台上模拟远场衍射,光学外差采用迈克耳逊干涉仪结构,比光纤外差结构更具有通用性。

图 1 为 SAIL 实验结构布置图。1  $\mu\text{m}$  单模稳频 YAG 连续激光通过保偏单模光纤和准直透镜形成平行光,再通过发射孔产生圆偏振的发射/本振光束。偏振镜用于提高光源的偏振度,旋转  $\lambda/2$  波片控制发射光束与本振光束的分束强度比。直接透过偏振分光镜的水平偏振分量作为发射光束通过  $\lambda/4$  波片变成圆偏振光射向目标,回波再通过该  $\lambda/4$  波片变成垂

直偏振光由同一偏振分光镜折出。发射孔相当于发射天线,控制发射光束的照射波面尺寸和二次项相位。通过偏振分光镜反射的垂直偏振分量作为本机振荡器光束,通过  $\lambda/4$  波片经过反射镜折回后再通过该  $\lambda/4$  波片变成水平偏振光而直接通过该分光镜。水平偏振的本振光束和垂直偏振的回波光束共同通过  $\lambda/2$  波片旋转偏振方向  $45^\circ$ 。它们共同的垂直偏振分量被第二个偏振分光镜反射折出,由 PIN 管进行外差接收。PIN 管前设置接收孔,相当于接收天线以控制光学外差接收视场。而共同的水平偏振分量直接通过该分光镜,采用 CCD 进行大视场光学外差干涉质量的实时监控,也可以作为平衡外差接收的另一臂。PIN 管的输出由计算机进行处理。发射孔光路和接收光路构成了一种简化的双向回路望远镜系统<sup>[6]</sup>。单一目标点采用反射镜加小孔形成,使用电子控制精密平动机械移动目标,模拟 SAIL 和目标之间的相对运动实施(逆)条带扫描工作模式。

收稿日期: 2008-11-17; 收到修改稿日期: 2008-11-19

作者简介: 周 煜(1976—),男,博士,副研究员,主要从事晶体光学、空间激光通信和空间激光雷达等方面的研究。

E-mail: sunny@mail.siom.ac.cn

导师简介: 刘立人(1942—),男,德国自然科学博士,研究员,博士生导师,主要从事晶体光学、空间激光通信和空间激光雷达等方面的研究。E-mail: lirenliu@mail.shenc.ac.cn

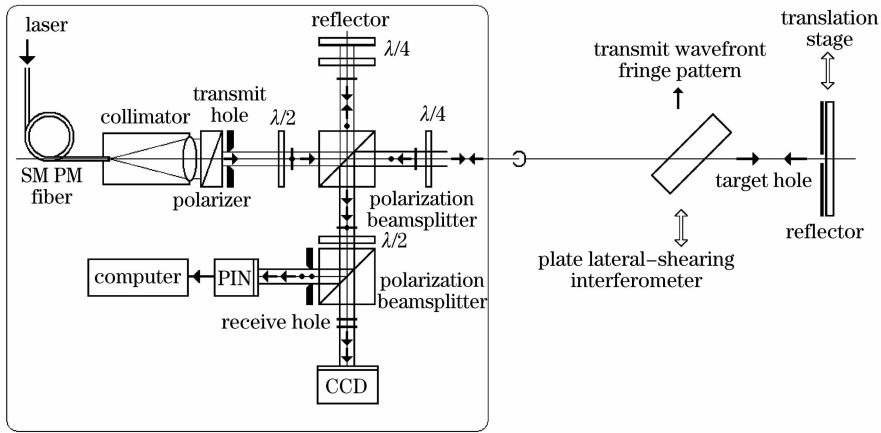


图 1 缩小尺度 SAIL 的实验布置图

Fig. 1 Experimental arrangement of a down-scaled SAIL

激光输出功率为 2 mW,准直光束直径为 2.1 mm。发射孔直径为 1 mm,其到目标的距离为 3.2 m,基本满足夫琅和费衍射条件,因此,在目标平面上产生曲率约为 3.2 m 的相位二次项照射波面其爱里斑直径为 7.8 mm,这个二次项波面产生方位向位相历程。接收孔直径为 1 mm,发射光束发散度和外差接收视场基本满足匹配条件<sup>[4,5]</sup>。目标点直径小于 0.5 mm,回波在接收孔平面产生二次项波面,曲率也约为 3.2 m,其随着目标平动而平动,所以也产生方位向位相历程。

目标步进间隔为 50 μm,行程为 3.15 mm。图 2(a)为某一次实验所得到的典型方位向接收信号光强输出,十分清楚地显示了它由一个相位二次项和一个线性项组成,二次项为孔径相干合成所需的相位历程,线性项是由于目标运动方向不严格垂直于系统光轴所致,约 300"。同时也可以看到存在发射天线方向性和外差接收方向性(衍射爱里斑)函数的调制以及目标运动误差的影响。并通过匹配滤波得到目标的像如图 2(b)所示,其宽度大于发散孔径,约为 2 mm,与分辨率理论预测相近<sup>[4]</sup>。

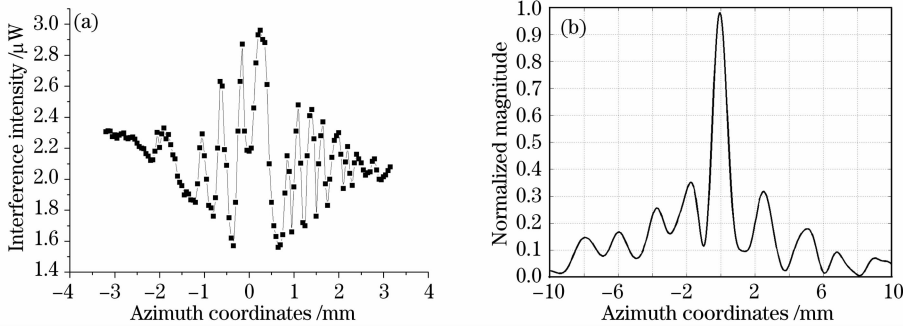


图 2 相位历程干涉光强和点目标的方位向成像

Fig. 2 Interferometric intensity of phase history and imaging of a target point along the azimuth direction

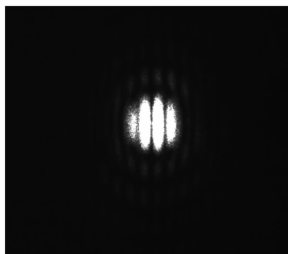


图 3 发射波面横向剪切干涉图

Fig. 3 Lateral-shearing interferogram of transmitted wavefront

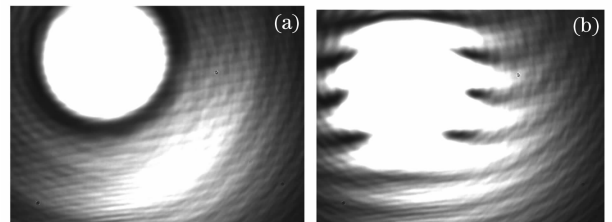


图 4 大视场接收外差干涉图观察

Fig. 4 Observation of heterodyne interferograms in a big viewing field

事实上 SAIL 方位向成像质量与照射波面的相位二次项质量有关。波面曲率可用横向剪切干涉仪或双剪切干涉仪测量<sup>[7]</sup>, 后者是等光程结构特别适用于光频啁啾波面的测量。图 3 给出了在观察距离 5 m 位置上的发射光束波面横向剪切干涉图, 剪切量为 1.9 mm, 测得条纹间隔 2.8 mm, 计算可得波面曲率半径为 5 m, 与观察距离 5 m 一致, 证明夫琅和费关系衍射。干涉条纹形态也表明波面质量好。干涉图中也包含隐含的同心圆环, 这种爱里斑分布证实了光束处于远场的衍射特性。CCD 进行大视场的回波和本振外差干涉质量的观察, 图 4 给出了两种监控场景, 图 4(a) 为本振和回波严格对准, 图 4(b) 为本振和回波严重偏差不能进行外差接收。

方位向的孔径相干合成是实现 SAIL 的关键, 为此设计了一种尺度缩小的 SAIL 系统并在实验平台上模拟远场传输, 实现了一个目标点的方位向孔径相干合成实验, 同时也提出了测试波面曲率和观察外差干涉图的质量监视方法, 解决了关键技术难题。由于光频领域系统尺度的可比性, 证明提出的

SAIL 光学系统一般设计原理<sup>[3~6]</sup>的准确性。

### 参 考 文 献

- 1 M. Bashkansky, R. L. Lucke, F. 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 Liren Liu. Optical antenna of telescope for synthetic aperture lidar[C]. *SPIE*, 2008, **7094**: 7094F1~F13
- 4 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
- 4 Liu Liren. Synthetic-aperture lidar (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
- 6 Liu Liren. Synthetic aperture lidar (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
- 7 L. Zhu, L. Liu, D. Liu *et al.*. Jamin double-shearing interferometer for diffraction-limited wave-front test[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(9): 1819~1824