

直视合成孔径激光成像雷达模拟远场条件下的 二维成像实验

栾 竹 孙建锋 职亚楠 周 煜 王利娟 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所 空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800)

摘要 报道了直视合成孔径激光成像雷达装置在使用焦距为 10 m 的平行光管模拟远场条件下的阵列目标二维成像实验结果, 实现的成像分辨率为 1 mm。

关键词 合成孔径雷达; 直视合成孔径激光成像雷达; 二维成像; 远场模拟

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0710003

Two-Dimensional Imaging Experiment of Down-Looking Synthetic Aperture Ladar under Simulated Far-Field Conditions

Luan Zhu Sun Jianfeng Zhi Yanan Zhou Yu Wang Lijuan Liu Liren

(Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology,

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

Abstract This paper gives experimentally the two-dimensional imaging results of a synthetic aperture ladar for an array target under simulated far-field conditions with an optical collimator of 10 m focal length. The imaging resolution of 1 mm is observed.

Key words synthetic aperture radar; down-looking synthetic aperture ladar; two-dimensional imaging; far-field simulation

OCIS codes 100.2000; 100.3010; 280.6730

1 引 言

合成孔径激光雷达(SAL)是提供远距离厘米级成像分辨率的光学成像方法,可以有侧视和直视两种工作方式^[1-2]。侧视 SAL 利用回波信号与本振信号相干探测的方式,大气湍流、振动等直接影响方位向成像,因此克服相位扰动是提高方位向成像分辨率的关键技术之一。2011年, Krause 等^[3]报道了采用相位梯度自聚焦算法(PGA)和角反射器作为合作目标得到方位向成像的实验。直视 SAL 与侧视 SAL 不同,利用两路同轴正交偏振光束自差接收,大气湍流的影响可以相互消减,降低了相位变化和干扰的影响,易于实现方位向压缩成像^[1]。

文献[2]给出了直视合成孔径激光雷达的 2 种原理结构,一种是产生二维二次项相位历程的正交偏振光束,一种是产生一维线性和一维二次项相位历程的正交偏振光束。根据第一种原理结构建立的实验装置实现了 4.3 m 的成像实验,数据处理采用

二维匹配滤波处理^[2,4]。本文根据第二种原理结构设计的实验装置,仅采用三个柱面镜,结构更为简单,并利用 10 m 平行光管模拟远场进行了成像实验,数据处理采用一维傅里叶变换和一维匹配滤波处理。该装置可进一步应用于真实远场成像。给出了阵列目标的成像结果,并进行了分析讨论。

2 实验装置

实验装置的原理如图 1 所示。基于直视 SAL 的原理^[1-2],发射采用两个正交偏振对向扫描的空间抛物波差的光束,接收实验采用自差探测,并采用焦距为 10 m 的平行光管模拟远场条件。实验装置的进一步结构改进包括直接采用一对交轨向柱面镜对向扫描而不是柱面镜转动和透镜衍射变换方式,同时采用柱面镜位置偏置实现交轨向成像位移,因此只使用一个平衡接收机。

收稿日期: 2013-12-27; 收到修改稿日期: 2014-03-24

作者简介: 栾 竹(1973—),女,硕士,副研究员,主要从事光学探测和干涉测量等方面的研究。

E-mail: luanzhu@siom.ac.cn

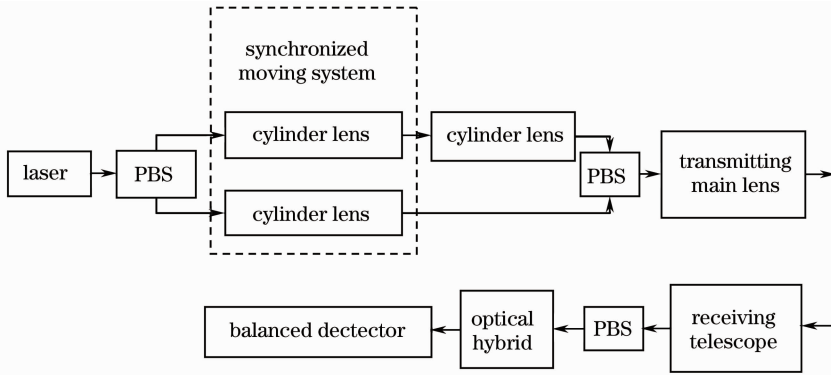


图 1 直视合成孔径成像实验装置原理方框图

Fig. 1 Experimental structure of the down-looking SAL imaging unit

发射采用波长为 532 nm, 功率为 5 W 的连续 Nd:YAG 激光器。如图 2 所示, 偏振正交的两光束为 H 光路和 V 光路, 2 个对称轴(Y 轴)平行的柱面镜 1 和 2, 分别位于 H 和 V 光路中, 并沿着垂直对称轴方向(交轨向)相对扫描, 速率为 α , 在目标面产生线性相位变化, 柱面镜焦距为 60 mm, 口径为 14 mm \times 14 mm。其中 H 光路中另有 1 个对称轴为 X 轴的柱面镜 3, 焦距为 60 mm, 口径为 14 mm \times 14 mm, 搭载平台转动时在顺轨向产生二次项相位历程。发射主镜为 Φ 200 mm, 焦距为 1.2 m。旁轴接收望远镜主镜为 Φ 200 mm, 焦距为 1.2 m, 接收信号经光学桥接器实现自差相干后, 由平衡接收机进行信号采集。

附着在反射镜表面组成。采集到的二维数据经过交轨向傅里叶变换聚焦和顺轨向匹配滤波聚焦后获得二维重构图像。

3 实验结果和分析

阵列目标成像照片如图 3 所示。交轨向压缩后的图像结果如图 4 所示。理论上交轨向压缩后的频谱与柱面镜的扫描速度成正比, 交轨向的理论分辨率与柱面镜的扫描范围成反比。实验中的扫描速度为 1 mm/s, 扫描范围为 1 mm, 对应理论分辨率(极小值全宽度)为 0.3 mm。

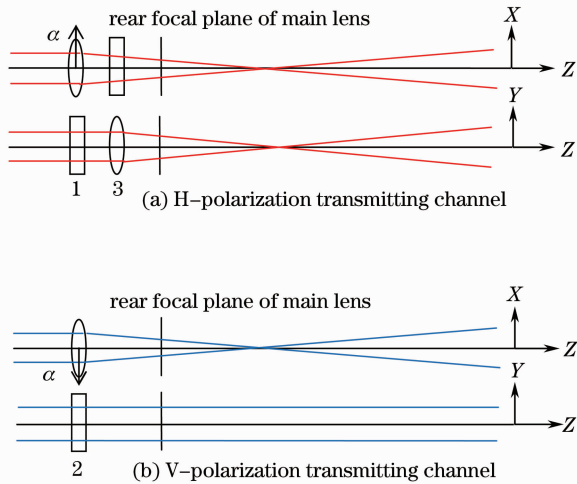


图 2 利用 3 个平凸柱面镜产生空间抛物线相位差的结构

Fig. 2 Configuration to produce a paraboloidal wavefront using 3 plano-convex cylinders

实验中 SAL 相对于目标的运动采用 SAL 转动实现, 搭载平台的转动速率为 0.00025 $^\circ$ /s。内场光斑为 Φ 3 mm, 目标面光斑尺寸约为 Φ 25 mm。目标由 5 个 Φ 0.3 mm、行列间距为 0.6 mm 的小孔阵列

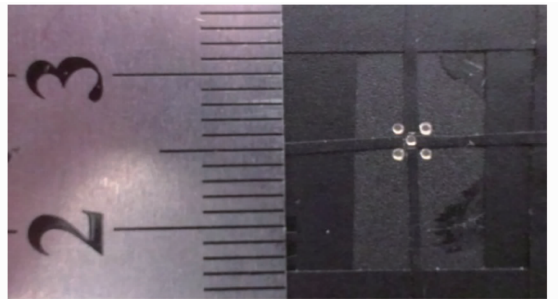


图 3 阵列目标照片

Fig. 3 Photography of the array target

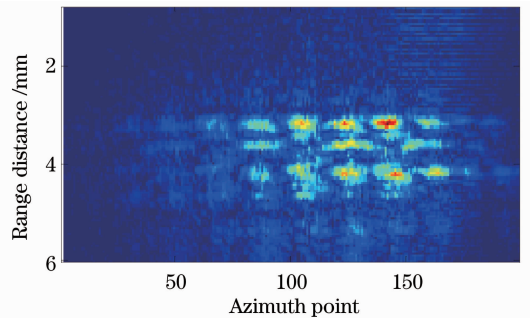


图 4 阵列目标的交轨方向聚焦成像
Fig. 4 Focused image of the array target in the range direction

经过交轨向压缩后的数据,提取顺轨向的相位,经过解包裹后如图 5 所示,所选取的采样线为交轨向坐标 2 mm,可以看到相位分布在顺轨向具有典型的二次分布特征。

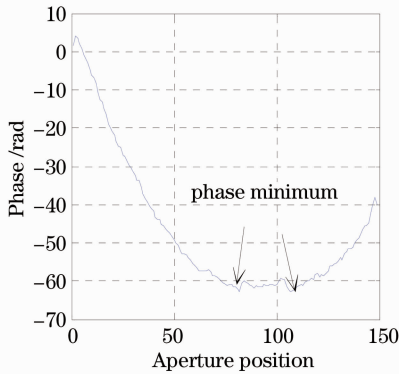


图 5 交轨向压缩后的相位

Fig. 5 Phase of one range after range compression

交轨向和顺轨向二维压缩后的图像如图 6 所示。交轨向的理论分辨率由转台的转动范围决定,实验中转台的转动范围为 0.035° ,对应的理想分辨率为 0.7 mm 。本装置在 10 m 模拟远场条件下具

有实现更高分辨率的潜力,但直径小于 0.3 mm 的小目标制作困难,因而采用了目前的设计参数。

图 7 为交轨向和顺轨向的剖面图,经过分析可得交轨向分辨率(极小值全宽度)为 0.5 mm ,顺轨向分辨率(极小值全宽度)为 1 mm ,与理论分辨率^[1-2]基本一致。图中强度的差别来自于小孔制造过程中的误差。由于采样率的影响,目前对于直径为 0.3 mm 的小孔目标的采样仅满足奈奎斯特采样定律,产生了暗斑,增大过采样系数可以减少混叠的影响。

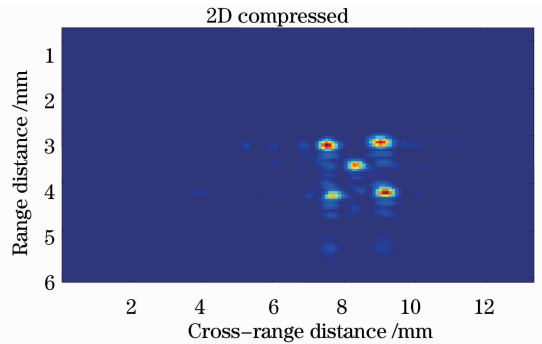


图 6 阵列目标二维图像

Fig. 6 Two-dimensional image of the array

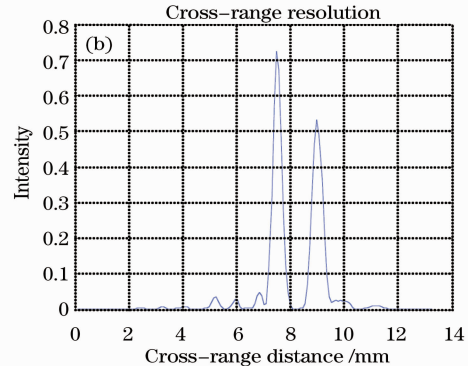
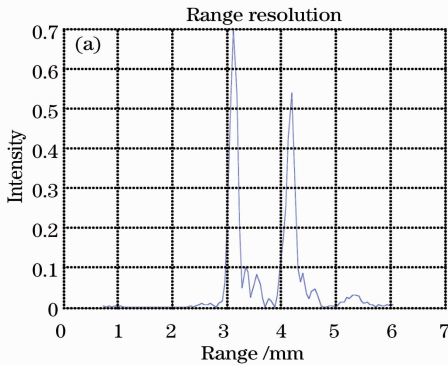


图 7 (a)交轨向和(b)顺轨向分辨率分析

Fig. 7 (a) Range resolution and (b) cross-range resolution at one range and one cross-range

4 结 论

报道了一种直视合成孔径激光成像装置,采用一对交轨向柱面镜对向扫描和一个顺轨向柱面镜,产生正交偏振空间抛物波差的发射光束。利用该装置,在采用焦距为 10 m 的平行光管模拟远场的条件下,实现了阵列目标的成像,成像分辨率为 1 mm 。

侧视 SAL 装置的实验中必须进行方位向相位干扰的测量,二次项相位历程经补偿后才能得到高质量的匹配滤波聚焦成像。实验采用的直视 SAL 装置在相同成像距离和更为复杂的环境条件下更容易获得聚焦成像结果。相比于侧视 SAL,直视 SAL 具有内在的抗大气湍流等相位干扰的潜力。

参 考 文 献

- 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.
- Liren Liu. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations [J]. Appl Opt, 2013, 52(4): 579-599.
- B Krause, J Buck, C Ryan, et al.. Synthetic aperture lidar flight demonstration [C]. OSA/CLEO, 2011. PDPB7.
- Dai Enwen, Sun Jianfeng, Yan Aimin, et al.. Demonstration of a laboratory Fresnel telescope synthetic aperture imaging lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0528003. 戴恩文, 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, 32(5): 0528003.

栏目编辑: 殷建芳