

菲涅耳望远镜合成孔径激光成像雷达实验室验证

戴恩文 孙建锋 闫爱民 职亚楠 周 煜 吴亚鹏 刘立人

(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和检验技术重点实验室, 上海 201800)

摘要 对菲涅耳望远镜合成孔径激光成像雷达进行了实验室尺度条件下的原理验证实验。实验中利用不同曲率半径、垂直正交偏振的两个球面波通过二维(2D)扫描方式照明远距离处的目标,接收望远镜接收到的目标回波经过偏振分光镜分成两束作为信号光和本振光进入 2×4 90° 桥接器,桥接器输出的四路光信号被两个平衡探测器接收,平衡探测器输出电信号经模数转换后经过复数化、两维相位二次项匹配滤波算法处理后可以重构出目标图像。对 4.3 m 处点目标和 2D 面目标进行了成像实验,取得了具有良好成像分辨率和对比度且带有散斑效应的预期成像结果,证明了该合成成像激光雷达概念的正确性。

关键词 遥感;合成孔径激光成像雷达;菲涅耳望远镜;光学桥接器;平衡接收;光束扫描;匹配滤波

中图分类号 T958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0528003

Demonstration of a Laboratory Fresnel Telescope Synthetic Aperture Imaging Ladar

Dai Enwen Sun Jianfeng Yan Aimin Zhi Ya'nan Zhou Yu Wu Yapeng Liu Liren

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

Abstract A laboratory demonstration of Fresnel telescope synthetic aperture imaging ladar system is presented. The target is two-dimensional (2D) scanned by a beam that is combined by two concentric and coaxial quadratic wavefront laser beams with orthogonal polarization. The scattered signal light from the target is collected by a telescope and is split into two beams by a polarized beamsplitter. The two separated beams then pass through a half and quarter waveplate, respectively, and enter a 90° degree 2×4 optical hybrid. The four outputs of optical signals from optical hybrid are detected by two pairs of balanced detectors and then stored in computer using AD converters. The image of the target can be reconstructed from the data acquired by 2D scanning through data processing. A point image of $0.3 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ and 2D Chinese character are reconstructed in experiments with high resolution and contrast. The expected speckles are also observed in the reconstructed image that commonly existed in coherent imaging. The experimental results prove the correctness of the concept of the Fresnel telescope synthetic aperture imaging ladar.

Key words remote sensing; synthetic aperture imaging ladar; Fresnel telescope; optical hybrid; balanced receiver; optical scanning; matched filtering

OCIS codes 280.3640; 010.0280; 110.6770; 100.3008

1 引 言

合成孔径激光成像雷达(SAIL)具有厘米级的成像分辨率,在时间域关键技术取得突破后^[1],近年来在空间域理论^[2~4]和实验方面^[5~9]取得了快速发展。SAIL工作在光频段,其二维(2D)成像的基

本原理是在距离方向上进行距离分辨成像,在方位方向上实施孔径合成即相位二次项匹配滤波成像。因此任何相位波动和干扰,如大气扰动,运动平台振动,目标散斑效应,SAIL本身相位扰动等,都将严重降低 SAIL 性能。在美国有人提出了采用干涉方

收稿日期: 2011-11-22; **收到修改稿日期**: 2011-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(60907006)资助课题。

作者简介: 戴恩文(1977—),男,博士,副研究员,主要从事激光技术、信息光学及激光雷达技术等方面的研究。

E-mail: enwendai@siom.ac.cn

法实时测量累加相位波动并进行补偿的^[10],在实验上取得了良好的效果^[7,9]。但是以目标的一部分或者合作目标作为相位测量的对象在实际应用中是困难的或者是不可能的,因此希望发展一种新的合成孔径雷达方法,能够对于每一个目标点同时进行信号和相位波动的采样和补偿。

本课题组^[11]提出了一种用于远距离目标高分辨成像的非涅耳望远镜全孔径合成成像激光雷达理论。基本物理思想是利用两个不同曲率半径且同轴同心偏振正交的球面波组成的光斑通过扫描方式照明目标。目标的反射回波信号经过偏振分束器和偏振控制器后进入 2×4 90° 光学桥接器^[12,13]。利用两个平衡探测器和模数转换器将桥接器输出的4路光信号转换成两路具有 $\pi/2$ 位相差的数字时间信号,时间信号经过复数化和匹配滤波处理后可以得到目标图像。该成像雷达具有两种工作模式,对于运动目标采用一维(1D)周期扫描方式,对于静止目标采用2D周期扫描方式。由于采用了同轴二次项相位差双光束照明和2D相位二次项匹配滤波2D成像,

该非涅耳望远镜成像激光雷达事实上不仅是一种2D合成孔径的激光成像雷达而且是一种同光路同时产生目标点回波和目标点等效本振光束的差动SAIL体系。比较孔径差动的原理^[14],这种体系能够满足对于每一个目标点同时进行信号和相位波动的采样和补偿,必定可以有效抑制相位波动和干扰的影响。

本文对于非涅耳望远镜SAIL进行了实验室尺度条件下的原理验证实验,不仅证明了该合成成像激光雷达概念的正确性,而且取得了具有良好成像分辨率和对比度且带有散斑效应的预期成像结果。

2 基本原理与实验装置

非涅耳望远镜合成孔径成像雷达原理如图1所示,分成上下两部分,其中上半部分为发射装置,主要包含激光光源、偏振分束棱镜、透镜、 $\lambda/2$ 波片、2D扫描振镜以及信号源。下半部分为接收装置。主要包含接收望远镜、偏振分束器、 $\lambda/2$ 波片、 $\lambda/4$ 波片、 2×4 90° 光学桥接器、平衡探测器以及模数转换器。

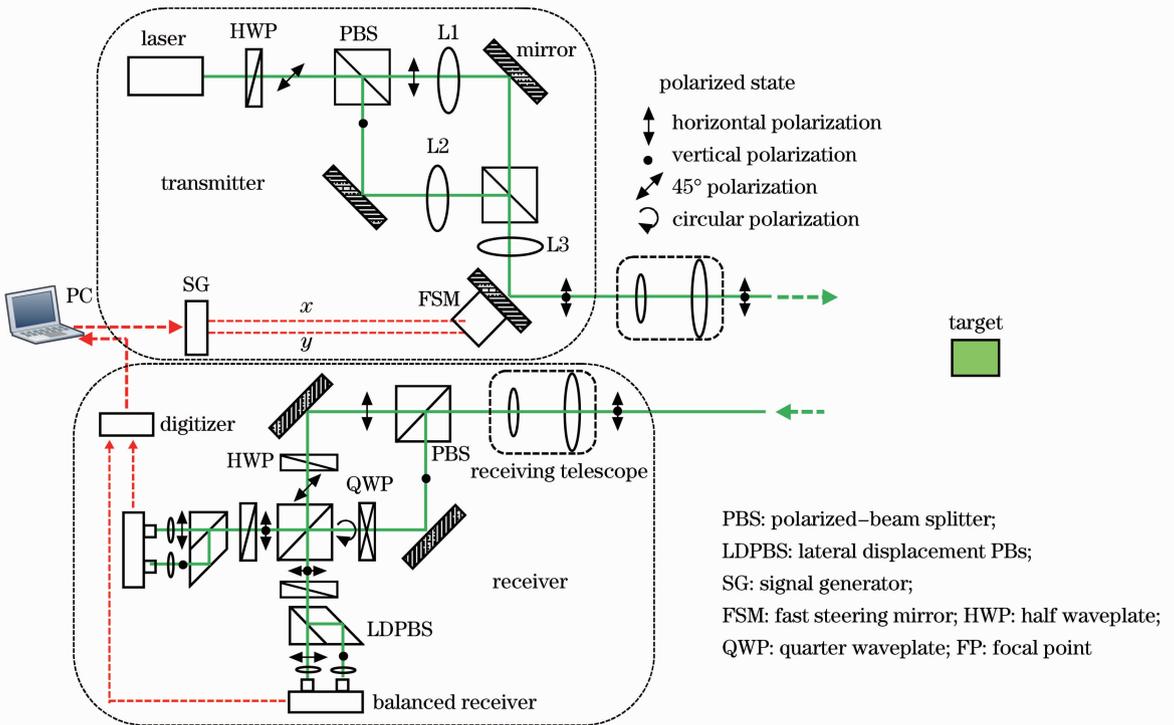


图1 非涅耳望远镜SAIL原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Fresnel telescope SAIL

2.1 发射装置

激光器发出的线偏光经偏振分束棱镜分成透射的p偏振光和反射的s偏振光并分别被反射镜反射后由另一个偏振分束棱镜合成一束。p光经过透

镜L1、L3和扫描振镜后会聚在点LP1,LP1与目标距离为 R_1 。s光经过透镜L2、L3和扫描振镜后会聚在点LP2,LP2与目标距离为 R_2 。即,目标被两个曲率半径分别为 R_1 和 R_2 的同轴同心正交偏振

的球面波通过 2D 扫描的方式照明。旋转 $\lambda/2$ 波片角度可以使 p 光和 s 光等强度。

若采用球面波照明,则理想的目标面照明光可以表示为(忽略常数系数)

$$\begin{cases} E_p(x, y, t) = S(x - x_t, y - y_t) \times \\ \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda} \frac{(x - x_t)^2 + (y - y_t)^2}{R_1}\right] \exp(j2\pi f_0 t) \mathbf{i} \\ E_s(x, y, t) = S(x - x_t, y - y_t) \times \\ \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda} \frac{(x - x_t)^2 + (y - y_t)^2}{R_2}\right] \exp(j2\pi f_0 t) \mathbf{j} \end{cases}, \quad (1a)$$

$$\begin{cases} x_t = x_0 + \omega_x z t \\ y_t = y_0 + \omega_y z t \end{cases}, \quad (1b)$$

式中 S 为照明光束场强分布函数, (x_t, y_t) 为扫描光斑中心参数坐标, (x_0, y_0) 为扫描光斑初始中心坐标, ω_x, ω_y 分别为 2D 扫描时对应的扫描振镜的角速度, z 为振镜与目标之间的距离, f_0 为照明光频率。 \mathbf{i}, \mathbf{j} 为偏振矢量。

对于图 2^[11] 所示的运动速度 v , 运动方向 θ , 振幅

反射率 $f(x_i, y_i)$ 的点目标 (x_i, y_i) , 其运动轨迹可以表示为

$$f_i(x, y, t) = f(x_i, y_i) \delta[x - (x_i + vt \cos \theta), y - (y_i + vt \sin \theta)]. \quad (2)$$

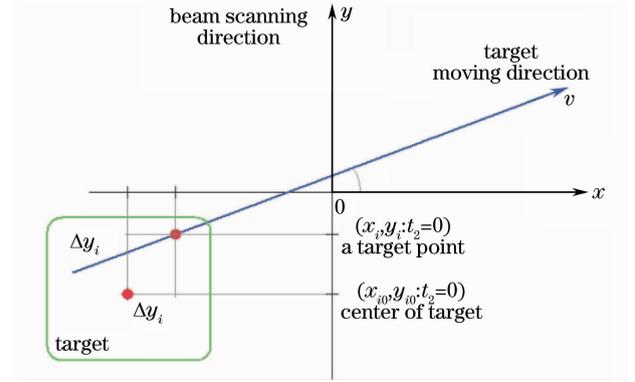


图 2 目标运动轨迹

Fig. 2 Movement trajectory of the target

2.2 接收装置

由于采用正交偏振照明光, 目标回波光也包含两个正交偏振态, 经接收望远镜接收后被偏振分光棱镜分成 p 偏振和 s 偏振光, 可以表示为

$$\begin{aligned} E_{rp}(t) &= f(x_i, y_i) S(x_i + vt \cos \theta - x_t, y_i + vt \sin \theta - y_t) \times \\ &\exp\left[\frac{j\pi}{\lambda} \frac{(x_i + vt \cos \theta - x_t)^2 + (y_i + vt \sin \theta - y_t)^2}{R_1}\right] \exp[j2\pi f_0 t + \phi_1 + \phi_{s1}(t)] \mathbf{i} \\ E_{rs}(t) &= f(x_i, y_i) S(x_i + vt \cos \theta - x_t, y_i + vt \sin \theta - y_t) \times \\ &\exp\left[\frac{j\pi}{\lambda} \frac{(x_i + vt \cos \theta - x_t)^2 + (y_i + vt \sin \theta - y_t)^2}{R_2}\right] \exp[j2\pi f_0 t + \phi_2 + \phi_{s2}(t)] \mathbf{j}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 ϕ_1 和 ϕ_2 分别为 p 光和 s 光对应的系统固定双程位相延时, $\phi_{s1}(t)$ 和 $\phi_{s2}(t)$ 分别为 p 光和 s 光对应的双程位相延时波动。

p 光经过 $\lambda/2$ 波片后偏振态旋转 45° 作为信号光输入到 $2 \times 4 90^\circ$ 光学桥接器。s 光经过 $\lambda/4$ 波片将线偏光转换成圆偏光后作为本振光输入到光学桥

接器, 利用两个平衡探测器将桥接器输出的 4 路光信号转换成两路具有 $\pi/2$ 位相差的时间信号, 理想 $2 \times 4 90^\circ$ 光学桥接器原理^[12] 如图 3 所示。

根据图 3, 两个平衡探测器对同相 \cos 通道和 $90^\circ \sin$ 通道的输出电流信号可以分别表示为

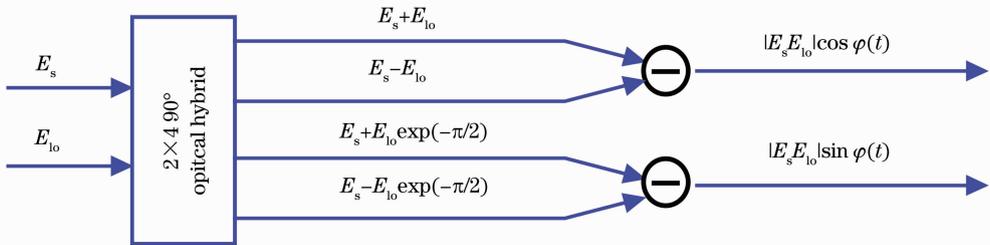


图 3 理想 $2 \times 4 90^\circ$ 光学桥接器原理示意图

Fig. 3 Principle of ideal $2 \times 4 90^\circ$ optical hybrid

$$\begin{aligned}
 i_{\text{icos}}(t) &= f^2(x_i, y_i) S^2(x_i + vt \cos \theta - x_t, y_i + vt \sin \theta - y_t) \times \\
 &\quad \cos \left[\frac{\pi}{\lambda} \frac{(x_i + vt \cos \theta - x_t)^2 + (y_i + vt \sin \theta - y_t)^2}{R_{\text{eff}}} + \Delta\phi + \delta\phi_s(t) \right] \\
 i_{\text{isin}}(t) &= f^2(x_i, y_i) S^2(x_i + vt \cos \theta - x_t, y_i + vt \sin \theta - y_t) \times \\
 &\quad \sin \left[\frac{\pi}{\lambda} \frac{(x_i + vt \cos \theta - x_t)^2 + (y_i + vt \sin \theta - y_t)^2}{R_{\text{eff}}} + \Delta\phi + \delta\phi_s(t) \right], \quad (4a)
 \end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{R_{\text{eff}}} &= \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \\
 \Delta\phi &= \phi_1 - \phi_2 \\
 \delta\phi_s(t) &= \phi_{s1}(t) - \phi_{s2}(t), \quad (4b)
 \end{aligned}$$

对上述信号复数化可以得到

$$\begin{aligned}
 i_{\text{icomplex}}(t) &= i_{\text{icos}}(t) + j i_{\text{isin}}(t) = f^2(x_i, y_i) S^2(x_i - x_u, y_i - y_u) \times \\
 &\quad \exp \left[\frac{j\pi}{\lambda} \frac{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2}{R_{\text{eff}}} + \Delta\phi + \delta\phi_s(t) \right], \quad (5a)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_u &= x_0 + \omega_x z t - vt \cos \theta \\
 y_u &= y_0 + \omega_y z t - vt \sin \theta. \quad (5b)
 \end{aligned}$$

固定差动相位 $\Delta\phi$ 对下述的匹配滤波成像不起作用, 随机差动相位变化 $\delta\phi(t)$ 来自于大气扰动、运动平台振动、目标散斑效应和 SAIL 本身相位扰动等, 由于两个光束同心同轴传输, 其经受的相位扰动应当是相同的, 因此 $\delta\phi(t) \approx 0$, 差动导致相位扰动自动被抑制。

采用球面波照明时, $S(x, y) = 1$, 对复数信号 $i_{\text{icomplex}}(t)$ 进行匹配滤波后可以再现出点 $f(x_i, y_i)$ 的像

$$\begin{aligned}
 E_i(x_i, y_i) &= i_{\text{icomplex}}(t) \otimes \exp \left(-\frac{j\pi}{\lambda} \frac{x_u^2 + y_u^2}{R_{\text{eff}}} \right) = \\
 &\quad f^2(x_i, y_i) \delta(x - x_i, y - y_i), \quad (6)
 \end{aligned}$$

式中 \otimes 表示相关运算。

面目标可以表示为点目标的叠加:

$$E_i(x, y) = \sum_i E_i(x_i, y_i), \quad (7)$$

菲涅耳望远镜 SAIL 的成像分辨率可以用下式的点扩散函数直径表示:

$$d = 2.44 \frac{\lambda}{D} R_{\text{eff}}, \quad (8)$$

式中 D 为照明光斑直径。

3 成像实验

根据图 1 所示光路搭建了实验室原理验证装置, 目标为静态目标, 工作模式采用 2D 扫描方式。

发射装置: 照明光源为 532 nm 的单频单模线偏振激光, 输出功率 300 mW, 目标面光斑直径 30 mm,

照明半径分别为 $R_1 = 2$ m 和 $R_2 = 3$ m 即等效曲率半径为 $R_{\text{eff}} = 6$ m。2D 扫描振镜(Newport FSM 300)采用三角波作为驱动信号以实现照明光斑 2D 匀速扫描, 光斑水平方向扫描频率为 20 Hz, 竖直方向扫描频率为 10 mHz。

接收装置: 接收望远镜口径 50 mm。两路平衡接收机输出电信号经过数字采样后存入计算机并进行处理。

目标: 目标面距离 4.3 m。

3.1 点目标成像实验

对 0.3 mm × 0.3 mm 尺寸的点目标进行了成像实验。结果如图 4 所示, 其中图 4(a) 和 (b) 分别对应点目标回波信号的同相通道、90°相移通道振幅分布。图 4(c) 为经过匹配滤波之后重构出的目标图像, 图像尺寸为 0.4 mm × 0.35 mm。

由(8)式, 本雷达的理论成像分辨率(圆照明光斑)为 $d = 0.26$ mm。因此目标点从 0.3 mm × 0.3 mm 成像为 0.4 mm × 0.35 mm 是合理的。

3.2 字符目标成像实验

同样实验条件下对字符目标进行了成像实验, 字符尺寸 5 mm × 5 mm, 线宽约为 1 mm, 材料为反光纸。结果如图 5 所示, 其中图 5(a) 和 (b) 分别对应目标回波信号的同相通道、90°相移通道振幅分布, 图 5(c) 为目标图像, 图 5(d) 为经过匹配滤波之后重构出的目标图像。

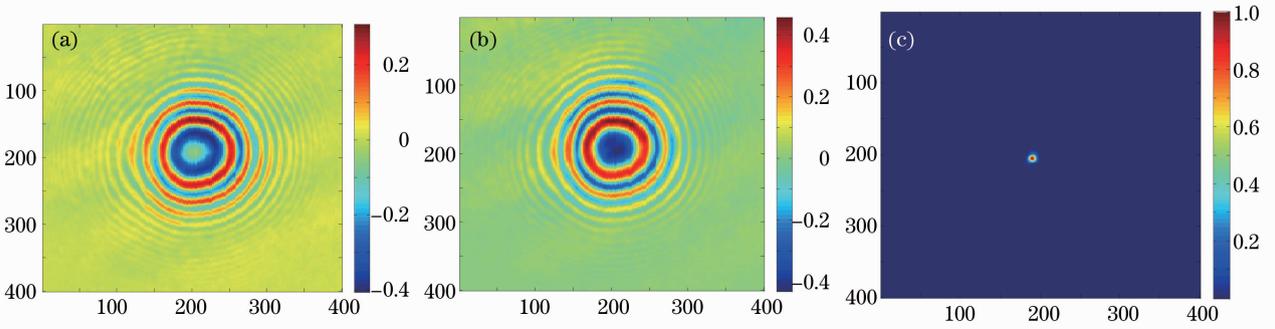


图4 (a)点目标反射回波同相通道振幅分布;(b)点目标反射回波 90° 相移通道振幅分布;
(c)复数化振幅分布经匹配滤波后得到的目标图像

Fig. 4 (a) Cosine-channel amplitude distribution of reflected echo from the point target; (b) sine-channel amplitude distribution of reflected echo from the point target; (c) reconstructed image from the complex hologram by matching filtering

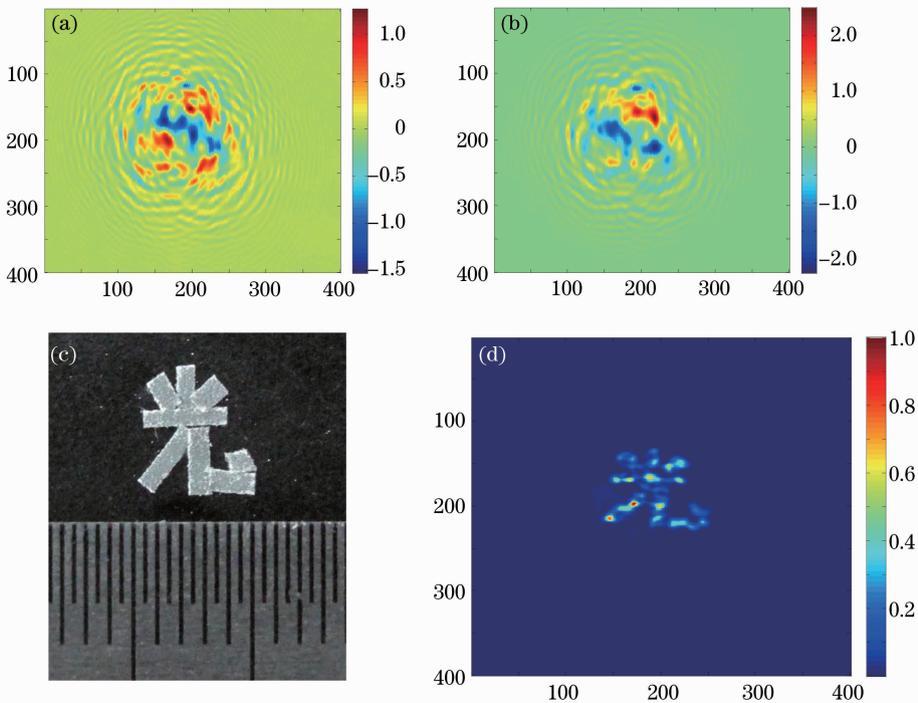


图5 字符“光”。(a)反射回波同相通道振幅分布;(b)反射回波 90° 相移通道振幅分布;(c)目标图像;
(d)复数化振幅分布经匹配滤波后得到的目标图像

Fig. 5 (a) Cosine-channel amplitude distribution of reflected echo “Guang”; (b) sine-channel amplitude distribution of the Chinese character; (c) target image; (d) reconstructed image from the complex hologram by matching filtering

实验中字符“光”的像上出现较强的光强不均匀现象,一个直接的原因是目标反射纸表面反射率不均匀,但是主要是由漫反射目标的激光散斑效应导致的^[15]。一般而言散斑导致接收回波的振幅分布和相位分布的随机性,由于本雷达的波面差动特性其相位随机性能够被抑制,而只存在振幅随机性的影响。

本实验条件下对于 $0.26\text{ mm}\times 0.26\text{ mm}$ 的目标分辨单元的平均散斑尺度为 $S=9\text{ mm}\times 9\text{ mm}$,相当于在光学接收直径 50 mm 上平均有两个散斑,

散斑造成的接收光强波动是明显的^[15]。

4 结 论

对菲涅耳望远镜 SAIL 进行了实验室原理验证实验,大量实验结果表明该方法的成像分辨率可以达到理论上预期的高分辨率,具有很高的成像对比度(信号对暗背景噪音比高),呈现明显的激光散斑效应,这些都与条带扫描式 SAIL 的结果基本相同^[9],因此具有明确的 SAIL 的成像特性。采用 2D 周期扫描方式对静止目标进行成像实验,对于运动

目标可以采用1D周期扫描方式实现成像。

由于信号光与本振光经过相同的光学路径,可以降低大气对于激光传输的影响。另外,由于采用 $2 \times 4 \ 90^\circ$ 空间光桥接器实现复数相位合成,不需要复杂的电子设备,降低了系统复杂性。

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 Liren Liu. Optical antenna of telescope for synthetic aperture lidar[C]. *SPIE*, 2008, **7094**: 70940F
- 3 Liu Liren. Synthetic aperture lidar (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(IV):成像分辨率和天线孔径函数[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1408~1415
- 4 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging lidar (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
- 5 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
- 6 J. Buck, B. W. Krause, A. I. Malm *et al.*. Synthetic aperture imaging at optical wavelengths [C] Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2009), paper PThB3
- 7 B. Krause, J. Buck, C. Ryan *et al.*. Synthetic aperture lidar flight demonstration [C]. CLEO:2011-Laser Applications to Photonic Applications, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper PDPB7
- 8 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
- 9 Liu Liren, 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): 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
- 10 R. L. Lucke, M. Bashkansky, J. Reintjes *et al.*. Synthetic aperture lidar (SAL): fundamental theory, design equations for a satellite system, and laboratory demonstration [R]. Naval Research Laboratory Report NRL/FR/7218-02-10, 051 (2002)
- 11 Liu Liren. Fresnel telescope full-aperture synthesized imaging lidar: principle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0128001
刘立人. 菲涅耳望远镜全口径合成成像激光雷达:原理[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0128001
- 12 R. Garreis Carl Zeiss. 90° optical hybrid for coherent receivers [C]. *SPIE*, 1991, **1522**: 210~219
- 13 Zhou Yu, Wan Lingyu, Zhi Ya'nan *et al.*. Polarization-splitting $2 \times 4 \ 90^\circ$ free-space optical hybrid with phase compensation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3291~3294
周煜, 万玲玉, 职亚楠等. 相位补偿偏振分光 $2 \times 4 \ 90^\circ$ 自由空间光学桥接器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3291~3294
- 14 Eddy A. Stappaerts, E. T. Scharlemann. Differential synthetic aperture lidar [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**: 2385~2387
- 15 Liu Liren. Structure and operating mode of synthetic aperture laser imaging lidar for speckle reduction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1028001
刘立人. 基于散斑抑制的合成孔径激光成像雷达的结构和工作模式[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1028001

栏目编辑: 李文喆