

# 机载直视合成孔径激光成像雷达外场及飞行实验

卢智勇, 周煜\*, 孙建峰, 栾竹, 王利娟, 许倩, 李光远, 张国, 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** 报道了一个正弦相位调制的大视场机载直视合成孔径激光成像雷达。在室外 3.8 km 进行了视场扫描并获得了高分辨率合成孔径成像。同时给出了该机载直视合成孔径激光成像雷达的 3 km 飞行试验结果, 获得了高质量大视场图像, 其成像视场提高了一个量级, 达到了 4.8 mrad。

**关键词** 遥感; 激光雷达; 机载直视合成孔径激光成像雷达; 大视场; 正弦相位调制

中图分类号 TN958

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0110001

## Airborne Down-Looking Synthetic Aperture Imaging Ladar Field Experiment and Its Flight Testing

Lu Zhiyong, Zhou Yu, Sun Jianfeng, Luan Zhu, Wang Lijuan, Xu Qian,  
Li Guangyuan, Zhang Guo, 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** Large field of view airborne down-looking synthetic aperture imaging ladar with sine phase modulation is reported. The high resolution and high quality synthetic aperture imaging is realized at target distance of 3.8 km outdoors. Then the airborne down-looking synthetic aperture imaging ladar is used for flight demonstration. The height of the flight is 3 km. High quality and large field of view is achieved. The field of view is enhanced by over an order of magnitude, which is up to 4.8 mrad.

**Key words** remote sensing; ladar; airborne down-looking synthetic aperture imaging ladar; large field of view; sine phase modulation

**OCIS codes** 280.6730; 230.2090; 130.4110; 110.3175

## 1 引言

合成孔径激光成像雷达(SAIL)是一种采用孔径合成技术和相干探测的高分辨率成像激光雷达,能够提供远距离厘米量级成像分辨率的光学成像方法,在对地观测、对空监视和空间探测等领域具有广泛应用价值。

近年来,SAIL 获得了快速的发展,国内外报道了众多的 SAIL 成像结果<sup>[1-24]</sup>。在室内成像方面,有 2002 年实现的第一个移动目标的 30 cm 近距离二维成像结果<sup>[1]</sup>和 2005 年采用移动孔径实现 2 m 距离的漫反射目标的二维成像<sup>[2]</sup>,也有成像距离为 2 m 的干涉 SAIL 3D 成像和聚束模式 SAIL 2D 成像演示<sup>[3]</sup>,其 3D 目标成像结果高程分布清晰可见,聚束 SAIL 图像分辨率高;文献[14]依照 SAIL 成像理论获得条带模式 SAIL 图像,在 2.4 m 距离处获得分辨率优于 350  $\mu\text{m}$ (方位向) $\times$ 170  $\mu\text{m}$ (距离向)。文献[15]给出了 12.9 m 的高分辨率成像结果和相位梯度自聚焦算法(PGA)处理结果,文献[9]中提出了大口径 SAIL 演示样机并且在 14 m 传输距离上实现了二维成像验证,分辨率优于 1.4 mm(方位向) $\times$ 1.2 mm(距离向)。在室外成像方面,2006 年,美国

收稿日期: 2016-10-18; 收到修改稿日期: 2016-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(61605226,61505233)

作者简介: 卢智勇(1987—),男,博士,助理研究员,主要从事空间信息光学和激光雷达方面的研究。

E-mail: luzhiyong15@126.com

\* 通信联系人。E-mail: sunny@siom.ac.cn

国防部先进研究计划局(DARPA)支持的 SALT I 项目宣称实现了机载 SAIL 高分辨成像,但是至今没有图像公开<sup>[15-16]</sup>;文献[17-18]采用 1.55  $\mu\text{m}$  波长的脉冲光纤激光在 700 m 距离上实现了双点目标 SAIL 成像和 1.6 km 斜距上的正侧视机载 SAIL 成像验证;文献[19]给出了室外 1.2 km 距离上的直视 SAIL 高分辨成像。

文献中几十米的距离内,SAIL 成像图片已经相对比较丰富,有高质量的合作目标或普通扩展目标的 SAIL 图像;而室外 SAIL 图像依然较少,仅有小尺寸合作目标的一幅机载 SAIL 图像<sup>[18]</sup>和一幅直视 SAIL 图像<sup>[19]</sup>。同时,这些文献的成像视场都相对较小,文献[18]中机载 1.6 km 斜距的目标面光斑大小为 1 m,等效成像视场为 0.625 mrad,室外 1.2 km 的直视 SAIL 成像视场也仅为 1.67 mrad。而高分辨率大视场成像在 SAIL 的实际应用中更具优势,其远距离的大视场 SAIL 图像在未来远距离目标探测成像中具有重要的实用价值。本文报道了一个大视场机载直视合成孔径激光成像雷达系统及其外场实验和飞行验证,在地面 3.8 km 距离上进行了视场扫描和成像,同时给出了该机载直视 SAIL 的 3 km 飞行实验结果。

## 2 机载直视 SAIL 原理结构与系统参数

图 1 为机载直视 SAIL 的原理结构图,激光器发出的线偏振光经过  $1/2$  波片、波前变换模块和发射主镜发射到远场目标处,波前变换模块由偏振分束器(PBS)、 $1/4$  波片、 $1/2$  波片、柱面镜、扫描振镜和偏振合束器组成,最终从波前变换器出射两束不同曲率半径且偏振正交的同轴同心光束,然后由发射望远镜主镜放大投射到远场目标位置,其中扫描振镜位于发射望远镜主镜的前焦面位置。波前变换模块的原理结构如图 2 所示,图中略去了用于偏振正交分束和合束的偏振分束器,箭头为光束的传播方向,偏振正交的两光束经过  $1/4$  波片、柱面镜(顺轨向  $y$  方向)和扫描振镜并反射返回最终合束为同轴同心偏振正交的发射光束,其中两光束从柱面镜到发射主镜的光程相等,扫描振镜为正弦驱动扫描,振镜的扫描频率为 650 Hz,正反两方向采样,即顺轨向采样率为 1.3 kHz。接收信号经过接收望远镜后进入光学桥接器实现自差相干后,由平衡接收机进行信号的光电转化,并由高速的现场可编程门阵列(FPGA)进行信号采集和处理,该直视 SAIL 装置的主要实验参数如表 1 所示。

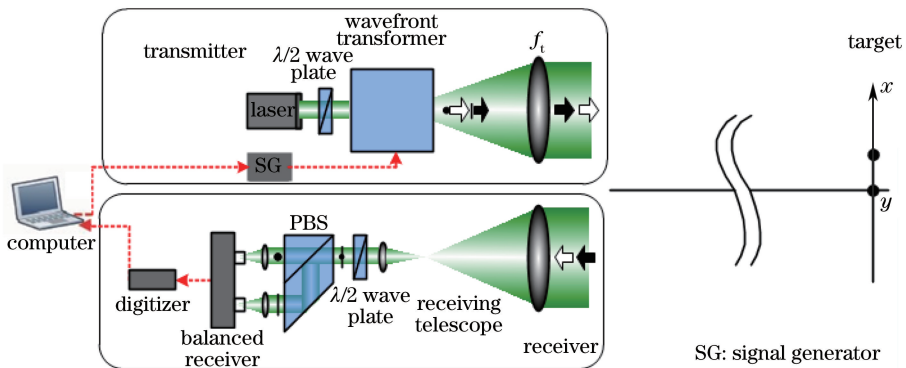


图 1 机载直视合成孔径激光成像雷达的原理结构

Fig. 1 Structure of airborne down-looking SAIL demonstrator

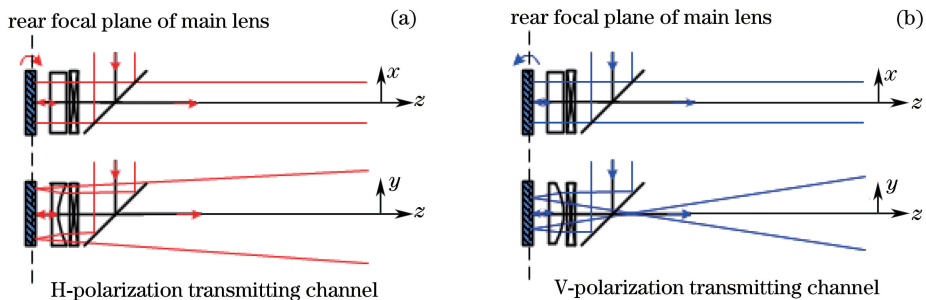


图 2 利用振镜和柱面镜的波前相位变换结构

Fig. 2 Configuration to translate the wavefront using galvanometer and cylindrical lens

表 1 机载直视 SAIL 系统参数

Table 1 System parameters of the airborne down-looking SAIL

Parameter	Value
Laser power /W	20
Laser wavelength /nm	1030
Main lens focal length /mm	1200
Laser beam diameter /mm	8
Equivalent inner stop aperture /(mm×mm)	6×3
Emission aperture /(mm×mm)	200×200
Receiving aperture /(mm×mm)	300×200
Cylindrical lens /mm	±46
Galvanometer frequency /Hz	650

表 1 为本机载直视 SAIL 的基本参数,利用该直视 SAIL 系统,分别在地面的外场 3.8 km 距离和机载 3 km 的距离进行了成像验证。在 3.8 km 的成像距离上,内发射场到目标面的放大倍数为 3167 倍,对于等效的内发射光场 6 mm×3.5 mm 在目标面的光斑尺寸为 19 m×11 m。实验中振镜的扫描范围为[-7.5°, +7.5°],实际成像所用的信号长度占正弦半周期的 43%,采用转台转动实现目标与雷达的相对运动,其中转台扫描速度为 0.0716(°)/s,水平观测成像,并采用连续扫描的方式采集。在 3 km 的飞行成像验证中,采用同一套直视 SAIL 系统,除成像距离、成像的观测方向和飞机飞行速度不同外,其他参数与地面成像相同。

由于直视 SAIL 对照明光斑尺寸及空间相位二次项的设计具有很大的控制和调整范围,本机载直视 SAIL 的内发射光场的交轨向有效光斑尺寸为 6 mm,其主镜的焦距为 1.2 m,可获得 5 mrad 的大发射视场;接收采用自由空间探测,探测器的感光面尺寸为 3 mm,并采用 18 mm 焦距的小透镜聚焦,接收望远镜的次镜焦距为 50 mm,因此理论接收视场为 7 mrad。最终的成像视场为发射和接收视场的较小者,即 5 mrad。

对接收的回波进行成像数据处理时,将采集到的 SAIL 二维原始回波数据经过交轨向的傅里叶变换得到交轨向的压缩像,在顺轨向(方位向)进行匹配滤波得到方位向合成孔径的聚焦像。

### 3 机载直视 SAIL 外场与飞行实验

#### 3.1 3.8 km 的地面外场实验

图 3 为 3.8 km 成像的直视 SAIL 的地面外场实验装置照片,整个 SAIL 水平固定在旋转平台上,通过旋转平台对目标进行转动扫描,等效获得远场目标与雷达的相对平动扫描。图 4 为 3.8 km 的目标场景,图 4 (a)为白天拍摄的目标位置高楼,由普通的 CCD 相机观测图像,图中箭头为角锥目标所在的位置,角锥如图 4(b)所示。图 5 为夜晚拍摄的 SAIL 雷达俯仰指向经过扫描的像素亮点(角锥回波)变化情况,通过扫描得到交轨向和顺轨向的像素点移动了 307×165(交轨向×顺轨向)个,CCD 的像素尺寸为 5.4 μm,接收望远镜的焦距为 300 mm,等效 3.8 km 距离的像素点实际尺寸为 6.8 cm,即发射目标面的光斑大小为 20.8 m×11 m,因此,可获得发射视场为 5.5 mrad×3 mrad。采用同样的扫描方法,观测接收的角锥回波频

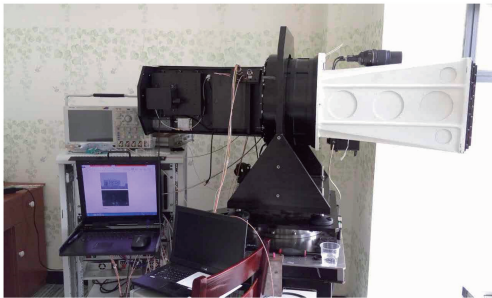


图 3 直视 SAIL 的地面外场实验照片

Fig. 3 Field experimental photo of down-looking SAIL.

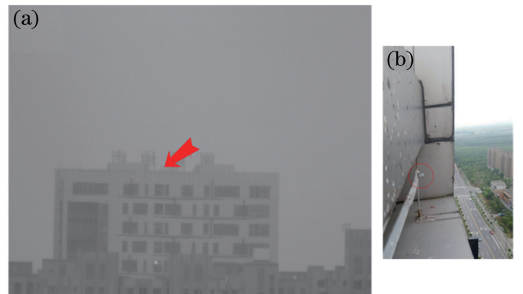


图 4 目标照片。(a)放置目标位置;(b)角锥目标  
Fig. 4 Photograph of target. (a) Position of target; (b) pyramid target

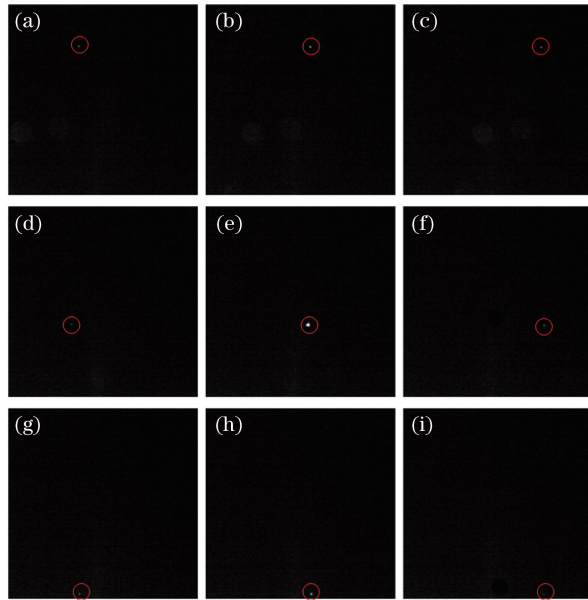


图 5 视场扫描的角锥位置变化情况

Fig. 5 Position changing of the pyramid target by the emission field of view scanning

谱信号,通过扫描收集回波频谱信号,可获得接收视场为  $5 \text{ mrad} \times 3 \text{ mrad}$ ,最终等效的成像视场为  $5 \text{ mrad} \times 3 \text{ mrad}$ 。

在  $3.8 \text{ km}$  的成像实验中,采用  $10 \text{ mm}$  直径的角锥点目标[图 4(b)],角锥目标的回波经过交轨向压缩后的图像如图 6(a)所示,由于是正弦相位调制,其频谱具有周期性的条纹分布,除主峰外,其旁瓣强度逐渐降低,从距离向的压缩图像中便可以看到明显的周期性拖尾现象。傅里叶变换后再经过方位向的匹配滤波,匹配滤波后的成像结果如图 6(b)所示,依然带有周期性的单边带拖尾。图 6(c)和图 6(d)分别为经过重采样插值<sup>[22]</sup>处理后的距离向压缩和二维聚焦像,从图上可以看出经过重采样插值的交轨向旁瓣得到明显的抑制。以目标点的回波点扩展函数的极小值半宽度可得该目标点的成像分辨率为  $3.5 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ ,与理论分辨率基本一致<sup>[10]</sup>,其主要的误差来源于转台的振动造成的相位畸变,进而降低了成像分辨率。

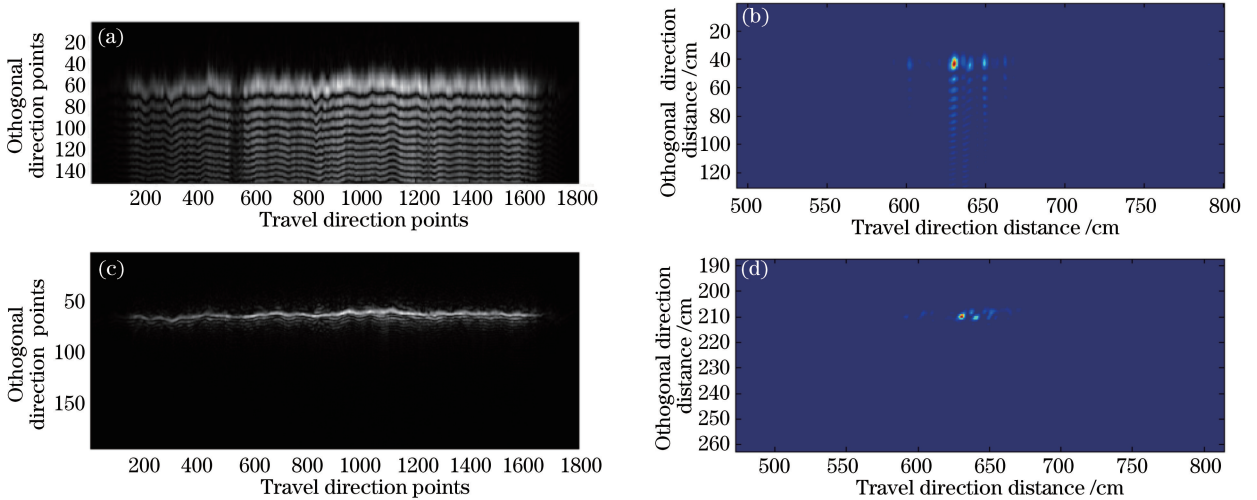


图 6 角锥目标的成像。(a)距离向压缩像;(b)SAIL 聚焦像;(c)重采样插值后距离向压缩;(d)重采样插值后的 SAIL 聚焦像

Fig. 6 SAIL images of pyramid target. (a) Range compressed image; (b) SAIL focus image; (c) range compressed image using resampling interpolation; (d) SAIL focus image using resampling interpolation

### 3.2 3 km 的机载飞行实验

上述室外  $3.8 \text{ km}$  的直视 SAIL 成像中,由于目标较小,通过扫描的方式未能直观地反映大视场的成像

场景。此后,对上述直视 SAIL 又进行了后续 3 km 的机载飞行实验,并铺设了大条幅的目标图像进行成像验证,直视 SAIL 系统被安装在 Y-12 飞机上,如图 7 所示。图 7(a)为飞机飞行至目标上空的情况,图 7(b)为 Y-12 飞机外形图,图 7(c)为机舱内安装的直视 SAIL 系统。直视 SAIL 被安装在机腹位置,光束垂直于机舱底部照射目标,飞行试验的高度为 3 km,实验过程中飞机飞过目标的速度为 48 m/s,成像的方式为条带扫描模式。

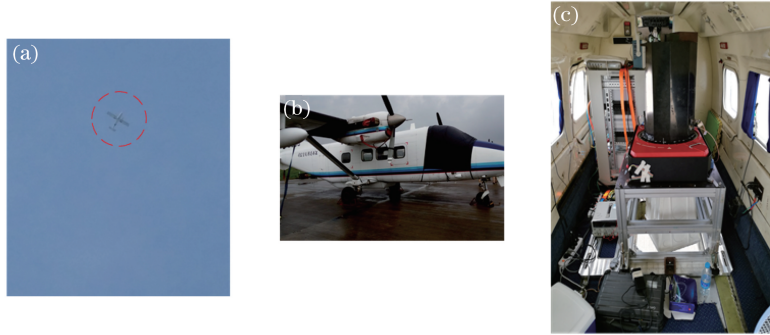


图 7 SAIL 系统安装。(a) Y-12 飞机;(b)地面飞机外视图和(c)内部的 SAIL 系统

Fig. 7 Installed SAIL system. (a) Y-12 aircraft; (b) installed system viewed outside and (c) inside

机载直视 SAIL 的目标成像结果如图 8 所示。图 8(a)为铺设在地面的合作目标,该目标是由 3M 钻石反光材料制作的 10 组“中国科学院”,并粘贴在 2.4 m×2.4 m 的方形木板上(一块方形木板粘贴两个字),最终拼接成约 80 m 长、2.4 m 宽的长条形条带目标,同时在“中国科学院”的“院”字右下方间隔两组放置一个 5 cm 的三线板目标。飞行实验时,飞机垂直飞过条带目标,如图 8(a)的箭头所示。图 8(b)为经过交轨向非线性插值算法处理和初步姿态补偿的二维成像聚焦结果,从图中可以看出,最终获得了清晰的“中国科学院”图像结果,其成像在交轨向大约有 2 组“中国科学院”目标,即条幅宽度约为 14.5 m,对应的 3 km 距离的成像视场为 4.8 mrad,与设计理论值基本一致,具有大视场的成像条幅。

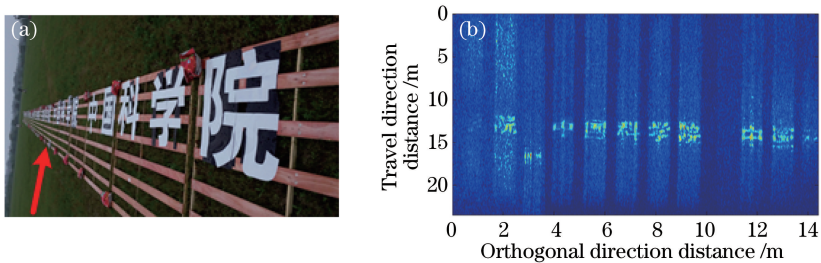


图 8 机载直视 SAIL 的目标成像。(a)地面目标照片;(b) SAIL 二维聚焦像

Fig. 8 Airborne down-looking SAIL image. (a) Photograph of the target; (b) 2D SAIL focus image

## 4 讨 论

原始的回波数据通过两个正交方向(交轨向和顺轨向)的压缩或聚焦形成 SAIL 的二维成像图像。其二维压缩/聚焦均依赖于稳定的相位历程数据,当相位数据不稳定时(即存在相位误差)时,聚焦的图像就会模糊。大视场机载直视 SAIL 采用反射式振镜扫描进行交轨向的相位调制,反射镜面每秒振荡 650 次,在一个周期内都要经历加速、减速等步骤,使得振镜的速度、角速度非均匀变化,速度的非均匀性使得采样分布呈现中间稀疏、两端密集的特点,其回波的交轨向时间相位历程为正弦变化。其正弦相位调制呈现单边带的拖尾现象,导致成像模糊,除主瓣外,旁瓣出现周期性的条纹,其强度逐渐减弱条纹变暗,如图 6(a)、(b)所示。重采样插值方法可以对正弦扫描的非均匀性进行处理,重采样插值方法<sup>[22]</sup>是正弦相位从非均匀坐标分布变换到均匀坐标分布的原始数据处理后,再进行交轨向傅里叶聚焦和方向匹配滤波成像。图 6(c)和图 6(d)以及机载成像图 8(b)为经过重采样插值的成像结果,经过了重采样插值,SAIL 图像质量得到大幅度提高,成像的拖尾现象得到抑制,主要能量基本都压缩到了交轨向的主瓣中,有效地提高成像信噪比和成像质量。

合成孔径激光成像雷达的方位向匹配滤波要求顺轨向的相位具有二次相位,由于探测激光波长短,其回波的相位历史极易受到外界环境的干扰,从图 6(a)可以看出直视 SAIL 在大惯量转动平台受到振动影响,交轨向聚焦后的强度带有波浪起伏振动;在机载实验中,其方位向相位同样受飞机的飞行姿态、飞机的振动影响,其视场范围内并未充分合成,有大部分的能量分散在顺轨向上而无法获得理想的能量聚焦,图 8(b)中的明亮长条带即为聚焦不充分的能量分散。同时,在视场边缘,激光能量较弱且存在高频相位误差,导致直视 SAIL 的图像边缘较暗、对比度差,产生畸变。

## 5 结 论

报道了一个正弦相位调制的大视场机载直视合成孔径激光成像雷达。在室外 3.8 km 进行了视场扫描并获得了高分辨率合成孔径成像。同时给出了该直视合成孔径激光成像雷达的机载飞行试验结果,获得了高质量大视场图像,与现有机载成像相比,其成像视场提高了一个量级,达到 4.8 mrad。

进行了高反射率的合作目标的机载试验,在现实的实际场景中,SAIL 面对的是具有复杂回波特性和运动特性的非合作目标,同时受到实际搭载平台姿态、振动等的严重影响,原始的回波数据将具有更复杂的相位历程特性。后续将深入研究如何校正振动、姿态及复杂目标回波带来的影响,消除视场边缘的高频相位畸变,获得整个视场的高分辨率成像,最终获得自然目标成像。

## 参 考 文 献

- [1] Lucke R L, Richard L J, Bashkansky M, *et al.* Synthetic aperture lidar (SAL): fundamental theory, design equations for a satellite system, and laboratory demonstration[R]. Washington D C: Naval Research Laboratory, 2002: NRL/FR/7218-02-10.
- [2] Beck S M, Buck J R, Buell W F, *et al.* Synthetic aperture imaging lidar: laboratory demonstration and signal processing[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(35): 7621-7629.
- [3] Crouch S, Barber Z W. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture lidar techniques [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24237-24246.
- [4] Barber Z W, Dahl J R. Synthetic aperture lidar imaging demonstrations and information at very low return levels[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(24): 5531-5537.
- [5] Turbide S, Marchese L, Terroux M, *et al.* An all-optronic synthetic aperture lidar[C]. *SPIE*, 2012, 8542: 854213.
- [6] Bashkansky M, Lucke R L, Funk E, *et al.* Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(22): 1983-1985.
- [7] Liu L R. Optical antenna of telescope for synthetic aperture lidar[C]. *SPIE*, 2008, 7094: 70940F.
- [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 Yanan, *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] 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.
- [11] Liu L R. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging lidars and laboratory-space experimental demonstrations [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 579-599.
- [12] Lu Zhiyong, Sun Jianfeng, Zhi Yanan, *et al.* Influence of inner wave-front aberration on down-looking synthetic aperture imaging lidar imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0728001.  
卢智勇, 孙建锋, 职亚楠, 等. 直视合成孔径激光成像雷达内发射场波前像差对成像的影响[J]. *光学学报*. 2014, 34(7): 0728001
- [13] Wu Jin, Li Feifei, Zhao Zhilong, *et al.* Demonstration of stripmap mode synthetic aperture lidar with PGA-independent high resolution images[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3559-3564.  
吴谨, 李斐斐, 赵志龙, 等. 条带模式合成孔径激光雷达不依赖 PGA 的高分辨率成像演示[J]. *红外与激光工程*,

- 2014, 43(11): 3559-3564.
- [14] Wu Jin, Zhao Zhilong, Wu Shudong, *et al.* High resolution synthetic aperture lidar imaging at 12.9 m distance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1228002.  
吴 谨, 赵志龙, 吴曙东, 等. 12.9 m 高分辨率合成孔径激光雷达成像[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1228002.
- [15] Ricklin J, Schumm B, Dierking M, *et al.* Synthetic aperture lidar for tactical imaging (SALTI) (briefing charts)[R]. DARPA Strategic Technology Office, 2007.
- [16] Filgas D, Rockwell D, Spariosu K. Raytheon achieves advanced radar functionality at optical wavelengths via coherent lidar[J]. *Raytheon Technology Today*, 2008(1): 13-15.
- [17] Buck J R, Krause B W, Malm A I, *et al.* Synthetic aperture imaging at optical wavelength[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2009: PThB3.
- [18] Krause B, Buck J, Ryan C, *et al.* Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2011: PDPB7.
- [19] Luan Z, Sun J F, Zhou Y, *et al.* Downlooking synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its experiments over 1.2 km outdoor[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(11): 111101.
- [20] Zhao Z L, Wu J, Su Y Y, *et al.* Three-dimensional imaging interferometric synthetic aperture lidar[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(9): 091101.
- [21] Turbide T, Marchese L, Terroux M, *et al.* Synthetic aperture lidar concept for infrastructure monitoring[C]. *SPIE*, 2014, 9250: 92500B.
- [22] Li G Y, Sun J F, Lu Z Y, *et al.* Resampling technique in the orthogonal direction for down-looking synthetic aperture imaging lidar[C]. *SPIE*, 2015, 9617: 96170N.
- [23] Lu Z Y, Zhang N, Sun J F, *et al.* Laboratory demonstration of static-mode down-looking synthetic aperture imaging lidar[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(4): 042801.
- [24] Du Jianbo, Li Daojing, Ma Meng, *et al.* Vibration estimation and imaging of airborne synthetic aperture lidar based on interferometry processing[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(9): 0910003.  
杜剑波, 李道京, 马 萌, 等. 基于干涉处理的机载合成孔径激光雷达振动估计和成像[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0910003.