

文章编号 1004-924X(2018)02-0276-08

微弱回波条件下差分合成孔径激光雷达成像实验演示

赵志龙^{1,2,3}, 吴 谨^{1*}, 王海涛³, 李明磊^{1,2}, 董 涛³, 国 辉³, 夏正欢³

(1. 中国科学院 电子学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 北京卫星信息工程研究所 天地一体化信息技术国家重点实验室, 北京 100086)

摘要: 本文针对差分合成孔径激光雷达(DSAL)未来应用场景具有回波信号微弱、平台与目标之间存在运动误差的特点, 在微弱回波条件下进行了随机活塞运动目标的 DSAL 成像演示实验。采用波长为 1 550 nm 的激光源, 搭建了 DSAL 成像系统, 接收孔径间距为 188 μm , 目标距离为 2.4 m。通过在发射端加入偏振片对发射功率进行衰减, 并利用步进线性平移台给目标到雷达之间的光程引入随机活塞运动误差。在激光发射功率约为 50 nW 和 20 nW 的情况下, 对光程变化在 $[-5 \mu\text{m}, 5 \mu\text{m}]$ 的随机活塞运动目标进行 DSAL 成像实验, 此时合成孔径激光雷达(SAL)图像由于随机相位误差而完全散焦, DSAL 图像则聚焦良好。实验结果表明, 在微弱回波条件下, DSAL 系统仍能较好地消除相位误差, 实现稳定成像。

关键词: 激光雷达; 差分合成孔径; 实验演示; 微弱回波; 随机活塞运动

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182602.0276

Experimental demonstration of differential synthetic aperture ladar imaging at very low return level

ZHAO Zhi-long^{1,2,3}, WU Jin^{1*}, WANG Hai-tao³, LI Ming-lei^{1,2},
DONG Tao³, GUO Hui³, XIA Zheng-huan³

(1. *Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
3. *State Key Laboratory of Space-Ground Integrated Information Technology,
Beijing Institute of Satellite Information Engineering, Beijing 100086, China*)

* *Corresponding author, E-mail: jwu909@263.net*

Abstract: Weak echo signal and motion errors are the features of differential synthetic aperture ladar (DSAL) that should be addressed in its future application scenarios. To achieve this, a laboratory DSAL demonstration of random piston motion target at very low return level is reported. Using 1 550 nm laser source, a DSAL imaging setup is built, with receiving apertures spacing of 188 μm and target distance of 2.4 m. The transmitted laser power is attenuated by adding a polarizer to the transmitter and random piston motion errors are introduced into the optical path between the target and the ladar, by using a stepping linear translation platform. At the transmitted power of approximately 20 nW and

收稿日期: 2017-06-27; 修订日期: 2017-08-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61178071)

50 nW, DSAL imaging experiments are carried out for random piston motion target with optical path variation range of $[-5 \mu\text{m}, 5 \mu\text{m}]$. Under these experimental conditions, the synthetic aperture radar (SAR) images are completely defocused due to random phase errors, but the DSAL images are well focused. The results indicate that the DSAL system could eliminate phase errors and achieve stable imaging at very low return levels.

Key words: lidar; differential synthetic aperture; experimental demonstration; weak echo; random piston motion

1 引言

合成孔径激光雷达(Synthetic Aperture Laser, SAL)是合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)在光波波段的推广,是一种采用相干探测体制的主动成像激光雷达,具有对远距离目标进行全天时高分辨率成像的能力。近二十年来,国内外在SAL成像理论与实验研究方面均取得了较大进展^[1-11]。

SAL图像沿方位向的高分辨率依赖于对回波相位史数据(Phase History Data, PHD)的合成孔径处理。因此,合成孔径时间内稳定的回波PHD是获得高分辨率SAL图像的根本保证。SAL工作于光波波段,其载波波长为微米量级,相比于SAR工作的微波波段小了三到四个数量级。在此条件下,PHD极易受到平台与目标之间的非规则运动、大气湍流等非理想因素的影响,使分辨率大大降低,甚至无法成像。因此,相位误差的有效校正成为SAL技术发展中一个至关重要的问题。

目前,SAR信号处理常用的相位梯度自聚焦(Phase Gradient Autofocus, PGA)技术^[12]已经在SAL成像研究中得到应用,并取得了比较有效的结果。然而,限于目前SAL的研究深度,已有的实验数据还不能证明PGA技术可以完全解决工程化SAL系统中的相位误差问题。

相对于纯数学的PGA技术,差分合成孔径

激光雷达(Differential Synthetic Aperture Laser, DSAL)技术^[13]是一种基于硬件结构的相位误差校正方法。理论上,这一方法可以有效地消除脉冲间的相位误差,与此同时,该方法还可以降低SAL系统对发射激光信号的线宽要求。

目前,针对DSAL技术的研究报道还较少^[14-17]。DSAL未来应用场景具有回波信号微弱、平台与目标之间存在运动误差的特点,本文针对这一应用条件对DSAL成像进行实验演示。

2 DSAL基本原理

图1为条带模式三孔径DSAL系统的方位采样位置关系图。其中 T_x 为发射孔径, R_{x_1} 和 R_{x_2} 为两个接收孔径。三个孔径沿方位向(X轴)排列, T_x 位于 R_{x_1} 和 R_{x_2} 的中点, R_{x_1} 和 R_{x_2} 的间距为 $2\Delta x$ 。此时, R_{x_1} 和 R_{x_2} 所接收到的回波信号具有不同的等效相位中心,两路信号可以等效视为两个收发合置的孔径 TR_{x_1} 和 TR_{x_2} 所获得的回波信号,等效孔径 TR_{x_1} 和 TR_{x_2} 的中心分别位于 T_x/R_{x_1} 和 T_x/R_{x_2} 的中点,其间距为 Δx 。 x_m 为 T_x 在第 m 个采样位置的方位向坐标。

当平台与目标之间存在运动导致的相位误差时,如果两个接收孔径 R_{x_1} 和 R_{x_2} 被安置在同一平台上相距较近的位置上,两路外差信号将经历近乎相同的相位误差。此时,若DSAL系统的方位向采样步长 Δx_m 满足条件 $\Delta x_m = \Delta x$,则完整的PHD可以按照表1所示的方式进行重建。

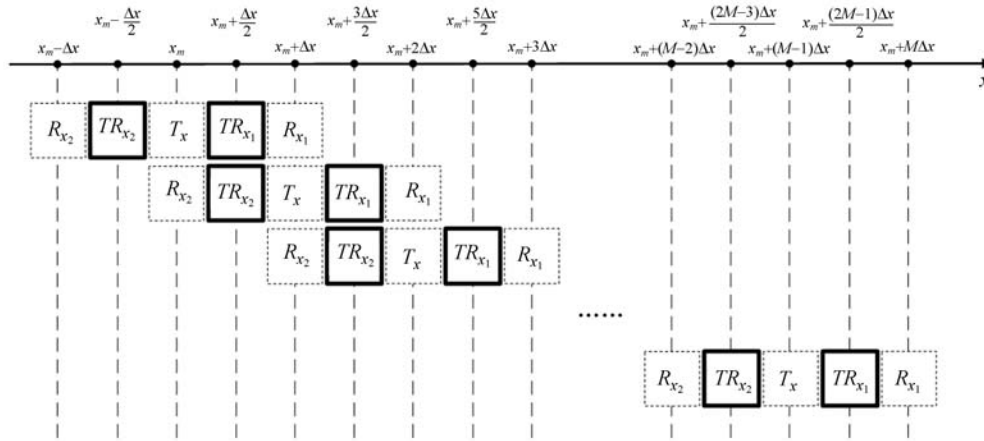


图 1 条带模式三孔径 DSAL 系统的方位采样位置关系

Fig. 1 Azimuth sampling position of strip-map tri-aperture DSAL

表 1 DSAL 的相位差分和重建相位

Tab. 1 Phase difference and reconstructed phase of DSAL

方位采样位置	相位差分	重建相位
1	$\Delta\varphi(x_1)$	$\varphi(x_1) = \Delta\varphi(x_1)$
2	$\Delta\varphi(x_2)$	$\varphi(x_2) = \varphi(x_1) + \Delta\varphi(x_2)$
3	$\Delta\varphi(x_3)$	$\varphi(x_3, f_r) = \varphi(x_2) + \Delta\varphi(x_3)$
...
m	$\Delta\varphi(x_m)$	$\varphi(x_m) = \varphi(x_{m-1}) + \Delta\varphi(x_m)$
$m+1$	$\Delta\varphi(x_{m+1})$	$\varphi(x_{m+1}) = \varphi(x_m) + \Delta\varphi(x_{m+1})$

3 DSAL 成像装置

可施加随机活塞运动误差的 DSAL 装置如图 2 所示,该系统采用“一步一停”的工作模式。

发射激光信号为中心波长为 1 550 nm 的线性调波长信号。信号经放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)将功率放大至 40 mW,并由 90/10 光纤分束器分束后,将 90% 的光功率(36 mW)由透镜准直发出,准直光束通过倒置的 10× 光学望远镜,并经过由偏振分光棱镜(Polarizing Beam-splitter, PBS)和四分之一波片(Quarter-Wave plate, QW)组成的光隔离器,照射在与光轴方向成 45° 夹角的目标平面上。目标的回向散射回波经过倒置的 10× 望远镜后,由接收透镜耦合入单模保偏光纤并在 50/50 光纤耦合器中与本征光进行混频,混频信号平衡外差探测器转换为电信号,再由数据采集卡进行 A/D 采样。倒置的 10× 望远镜是为了保证整个光束传播过程满

足夫琅禾费衍射条件,同时望远镜的存在也使发射/接收孔径尺寸由 5 mm× 5 mm 等效为 0.5 mm× 0.5 mm。两个接收孔径沿方位向排列,接收孔径中心间距为 1.88 mm,对应的接收孔径等效间距为 188 μm,发射孔径位于两个接收孔径的中点位置。

该 DSAL 系统共有 4 个信号采集通道,其中 CH₁ 和 CH₂ 采集含有目标回波信息的外差信号;CH₃ 采集激光信号经过 H¹³C¹⁴N 气体吸收池后的强度信号(吸收谱),用于同步方位向各个光脉冲之间的起始频率;CH₄ 采集经光纤延时外差得到的参考信号,用于锐化运算,以去除激光器非线性调频带来的距离向误差^[2]。

图 2 中, M₁ 和 M₂ 为插入光路中的光学反射镜,其中 M₁ 的位置固定; M₂ 被安装在步进线性平移台之上,其步进的步长为 0.5 μm。利用电机控制器进行步进控制,将每次步进的步数设置为 [-5, 5] 内的任意随机整数,每个脉冲采样结束后,电机位置归零并进行下一次随机步进,即 M₂ 在光轴方向做 [-2.5 μm, 2.5 μm] 的随机活塞运动。考虑到光路在 M₂ 处为双程折返,相当于整个系统的光程在光轴方向加入了 [-5 μm, 5 μm] 的随机活塞误差。由于激光波长为 1 550 nm,该运动误差会给 PHD 带来 [-6.45π, 6.45π] 的随机相位误差,大大超过了 SAL 系统稳定成像所需要的相位误差(小于 π/3)^[18]。

图 2 所示的实验装置由文献[17]中的 DSAL 装置调整而来。如文献[17]所述,在进行 DSAL 成像之前,需仔细调整两个接收孔径 R_{x1} 和 R_{x2} 的

位置和两路外差信号的本征光延时, 使两路外差信号的距离压缩像对齐, 避免由孔径偏差给相位差分带来的额外误差。

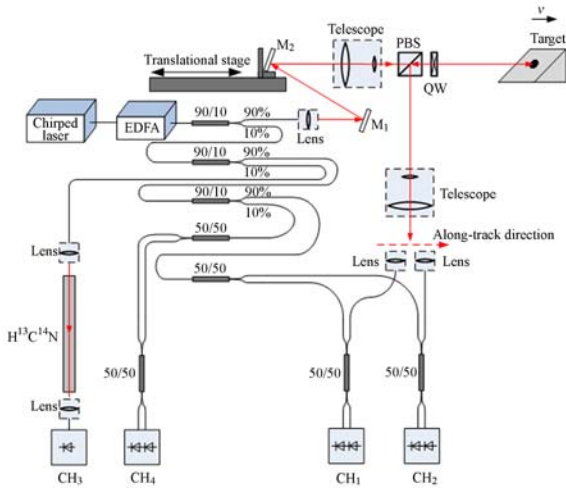


图 2 可施加随机活塞运动误差的条带模式 DSAL 装置原理图

Fig. 2 Schematic of strip-map DSAL setup with random piston motion

DSAL 成像实验的基本参数如表 2 所示。

表 2 DSAL 成像实验参数

Tab. 2 Parameters of DSAL setup

参数	值
载波波长/nm	1 550
波长扫描速度/(nm · s ⁻¹)	100
激光发射功率/mW	36
目标距离/m	2.4 m
等效发/收口径直径/mm	0.5 × 0.5
接收孔径间距 (2Δx)/μm	188
方位采样步长 (Δx _m)/μm	94
成像脉宽/ms	100
侧视角/(°)	45
光程随机误差/μm	[-5, 5]

4 DSAL 成像结果

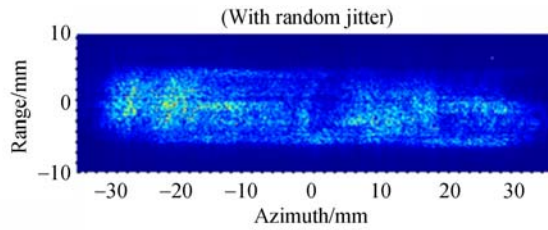
4.1 随机活塞运动目标的 DSAL 成像结果

图 3 为发射功率 $P_T = 36$ mW 时, 在加入 $[-5 \mu\text{m}, 5 \mu\text{m}]$ 随机活塞运动误差的条件下, 用“3M”反光材料切割而成的五个字母“IECAS”目标的 SAL 和 DSAL 成像结果, 探测距离为



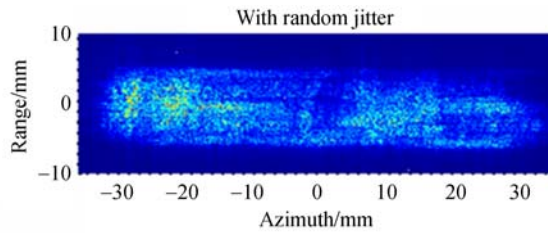
(a) 目标照片

(a) Photograph of target



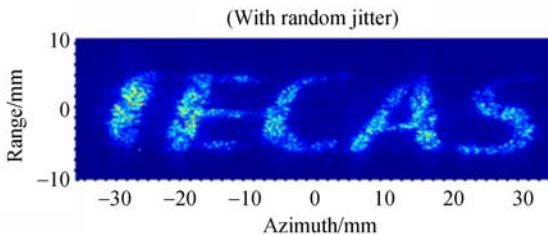
(b) SAL 成像结果(CH₁)

(b) SAL imaging result (CH₁)



(c) SAL 成像结果(CH₂)

(c) SAL imaging result (CH₂)



(d) DSAL 成像结果

(d) DSAL imaging result

图 3 “IECAS”目标的 SAL 和 DSAL 成像结果

(发射功率 $P_T = 36$ mW, 加入随机活塞误差)

Fig. 3 SAL and DSAL imaging results of “IECAS” target with P_T of 36 mW and random piston motion

2.4 m。“3M”反光材料可以为侧视 SAL 提供较高的激光信号反射率, 是 SAL 成像研究中常用的合作目标制作材料。图 3(a) 为目标照片, 目标固定在玻璃平板上, 其下方放置的钢尺用于标示目

标的尺寸,目标的整体尺寸约为 $60\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ (方位向 \times 距离向)。图 3(b)和图 3(c)分别为 CH_1 和 CH_2 的数据经距离多普勒算法(Range-Doppler Algorithm, RDA)处理后得到的 SAL 图像。可以看出,随机活塞运动带来的巨大相位误差使图 3(b)和图 3(c)中的 SAL 图像完全散焦。图 3(d)为 DSAL 图像,通过 DSAL 的差分处理后,两个通道信号共同的相位误差被很好的消除,图像聚焦效果良好,五个字母的边缘十分锐利,目标内部的“X”形结构也清晰可辨。

4.2 微弱目标回波的实现

4.2.1 系统接收孔径耦合效率的测量

在进行微弱回波信号条件下 DSAL 成像实验前,首先测量系统接收孔径处光纤的耦合效率。

在距离 2.4 m 处分别采用光学反射镜和 45° 正侧视的“3M”反光材料作为反射体,其面积均大于光斑足趾。采用德勤公司的 DS1001 型光功率计,测得发射端 T_x 的输出功率为 32.3 mW ,此时,由于接收端光纤耦合的功率过低,光功率计中没有示数,故采用灵敏度更高的 FGA04 型光电二极管和 PDA200C 型电流放大器(美国 Thorlabs 公司)对光电流进行测量(利用电流放大器的表头测量光电流)。经测量,当反射体为光学反射镜时,电流放大器的表头读数为 800 nA ;当反射体为“3M”反光材料时,电流放大器的表头读数约为 2 nA 。为测量光电二极管所测得的光电流所对应的光功率,降低光源的输出功率,并将输出光纤直接耦合进光功率计,测得光功率读数为 203 nW 。然后,将输出光纤直接耦合进光电二极管,测得光电流读数为 189 nA 。

由此计算可得:当 T_x 输出功率为 32.3 mW 时,采用光学反射镜作为反射体,耦合入外差平衡探测器的光功率为 859 nW ;采用 45° 正侧视的“3M”反光材料作为反射体,耦合入外差平衡探测器的光功率为 2.15 nW 。

4.2.2 发射功率衰减装置

实验中,微弱目标回波是通过衰减发射功率实现的。在 DSAL 成像装置的发射端望远镜前面加入线偏振片,系统的偏振态分析如图 4 所示(彩图见期刊电子版)。图中,短线表示偏振光平行于水平面的分量(即 p 偏振光),圆点表示偏振光垂直于水平面的分量(即 s 偏振光);红色标识表示发射光,黑色标识表示目标反射光。左端发

射透镜出射的激光偏振方向平行于水平面,功率为 P ;偏振片偏振方向与水平面的夹角为 α ,则根据马吕斯定律,通过偏振片后透射激光的偏振方向和偏振片一致,与水平面夹角为 α ,功率为 $P\cos^2\alpha$;在通过 PBS 之后,只有水平方向的偏振光可以透过 PBS 并照射在目标处,此时透射激光的偏振方向平行于水平面,功率为 $P_T = P\cos^4\alpha$ 。因此,通过调节偏振片偏振方向与水平面的夹角 α ,可以实现对发射激光功率的衰减控制。

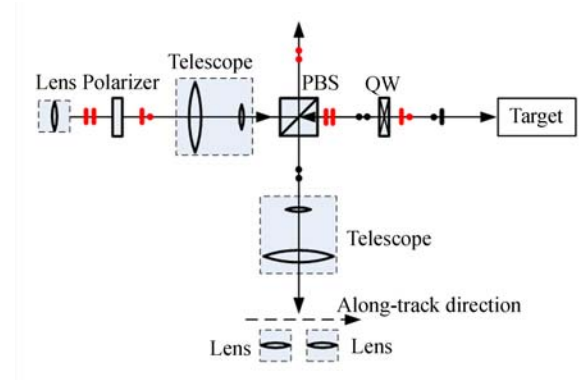
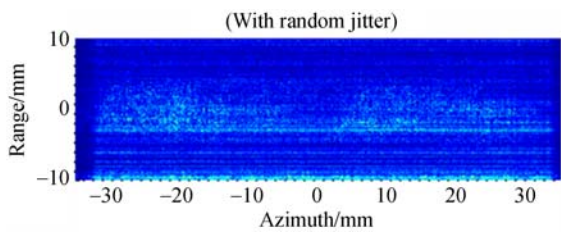


图 4 发射功率衰减的条带模式 DSAL 的偏振态分析
Fig. 4 Polarization analysis of strip-map DSAL setup with transmit power attenuation

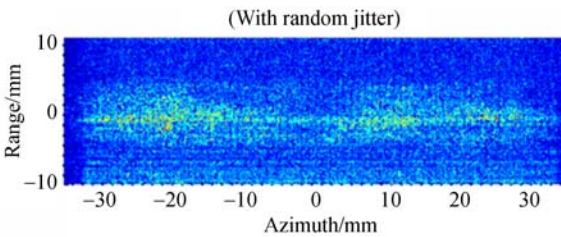
4.3 微弱回波条件下随机活塞运动目标的 DSAL 成像结果

图 5 和图 6 展示了 DSAL 系统在微弱回波条件下,在成像过程中加入随机误差的成像结果。发射功率 P_T 分别设置为 50 nW 和 20 nW ,反射体仍然采用“3M”反光材料切割而成的五个字母“IECAS”,探测距离为 2.4 m 。为避免微弱背景噪声对图像重建带来的影响,目标固定在平面反射镜上,以削弱背景回波。

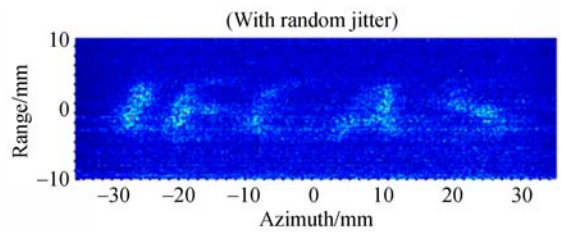
图 5 为发射功率 $P_T = 50\text{ nW}$ 时,在加入 $[-5\text{ }\mu\text{m}, 5\text{ }\mu\text{m}]$ 随机活塞运动误差的条件下,五个字母“IECAS”目标的 SAL 和 DSAL 成像结果。图 5(a)和图 5(b)分别为 CH_1 和 CH_2 的数据经方位向匹配滤波后得到的 SAL 图像。由图可以看出,由于随机运动误差带来了巨大的相位误差,导致 SAL 图像在方位向完全散焦,无法在图像中分辨五个字母。图 5(c)为 DSAL 图像,由图可以看出,与图 3(d)的成像结果相比,图像信噪比明显减低;与五个字母目标相比,系统噪声的相对强度已经很高,但是,差分处理消除了公共的相位误差,DSAL 图像在方位向聚焦良好,但此时目标内



(a) SAL 成像结果(CH₁)
(a) SAL imaging result (CH₁)



(b) SAL 成像结果(CH₂)
(b) SAL imaging result (CH₂)



(c) DSAL 成像结果
(c) DSAL imaging result

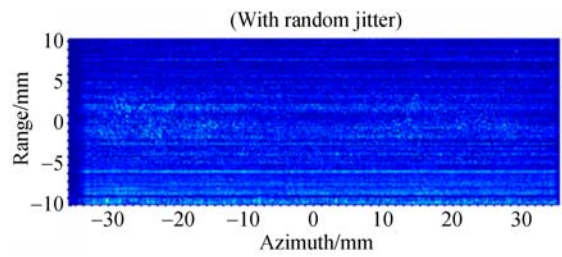
图 5 “IECAS”目标的 SAL 和 DSAL 成像结果
(发射功率 $P_T = 50$ nW, 加入随机活塞误差)

Fig. 5 SAL and DSAL imaging results of “IECAS” target with P_T of 50 nW and random piston motion

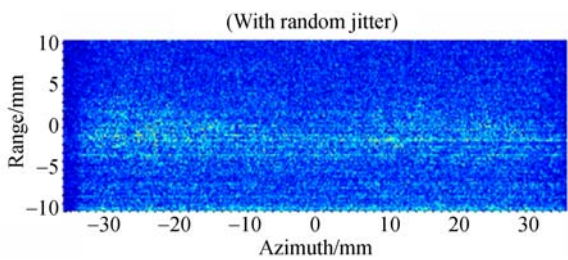
部的“X”形结构已经无法分辨。

图 6 为发射功率 $P_T = 20$ nW 时, 在加入 $[-5 \mu\text{m}, 5 \mu\text{m}]$ 随机活塞运动误差的条件下, 距离 2.4 m 处五个字母“IECAS”目标的 SAL 和 DSAL 成像结果。图 6(a) 和图 6(b) 分别为 CH₁ 和 CH₂ 的数据经方位向匹配滤波后得到的 SAL 图像, SAL 图像在方位向完全散焦; 图 6(c) 为 DSAL 图像, 由图可以看出, 与图 5(c) 的成像结果相比, 随着图像信噪比的进一步降低, 虽然 DSAL 图像中仍然可以勉强分辨五个字母, 但是字母边缘比较模糊。

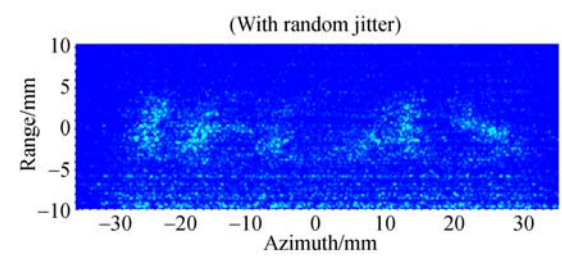
对系统接收孔径耦合效率的测量结果进行计算, 可知当发射孔径 T_x 的输出功率为 32.3 mW 时, 采用 45° 正侧视的“3M”反光材料作为反射体,



(a) SAL 成像结果(CH₁)
(a) SAL imaging result (CH₁)



(b) SAL 成像结果(CH₂)
(b) SAL imaging result (CH₂)



(c) DSAL 成像结果
(c) DSAL imaging result

图 6 “IECAS”目标的 SAL 和 DSAL 成像结果
(发射功率 $P_T = 20$ nW, 加入随机活塞误差)

Fig. 6 SAL and DSAL imaging results of “IECAS” target with P_T of 20 nW and random piston motion

耦合入外差平衡探测器的光功率为 2.15 nW。由此进一步计算, 当发射功率为 20 nW 时, 耦合入外差平衡探测器的光功率应在 10^{-15} W 量级。由上述成像结果可以看出, 即使进入探测器的光功率在 10^{-15} W 量级, DSAL 依然可以较好地消除公共相位误差, 实现稳定成像。

5 结 论

本文建立了一个可施加随机活塞运动误差的 DSAL 装置, 该装置能够通过差分处理很好地消

除两个通道数据中公共的相位误差,在光程被施加 $[-5\ \mu\text{m}, 5\ \mu\text{m}]$ 随机活塞运动误差的条件下,实现稳定的 DSAL 成像。通过在系统光路中插入线偏振片对发射功率进行衰减,并在发射功率分别为 50 nW 和 20 nW 时,在光程被施加 $[-5\ \mu\text{m}, 5\ \mu\text{m}]$ 随机活塞运动误差的条件下,获得了聚焦良好的 DSAL 成像。成像实验结果表明,在微弱回波条件下,DSAL 系统对随机活塞运动误差具有良好的抑制能力,可以较好地消除公共相

位误差,实现稳定成像。

从目前已公开发表的文献来看,关于 DSAL 的实验报道还很少,只有美国蒙大拿州立大学(Montana State University, MSU)和中国科学院电子学研究所开展了相关的实验探索^[14-15,17]。寻找有效的方位向相位误差校正方法,是当前 SAL 技术发展中一个至关重要的问题,而 DSAL 技术作为有望解决这一问题的方案之一,值得继续探索。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] BECK S M, BUCK J R, BUELL W F, *et al.*. Synthetic-aperture imaging laser radar: 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] TURBIDE S, MARCHESE L, TERROUX M, *et al.*. Synthetic aperture lidar concept for infrastructure monitoring [J]. *SPIE*, 2014, 9250: 92500B.
- [5] KRAUSE B W, BUCK J, RYAN C, *et al.*. Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]. *Proceedings of 2011 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), IEEE*, 2011.
- [6] 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.
LIU L R, ZHOU Y, ZHI Y N, *et al.*. A large-aperture synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its verification in laboratory space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900112. (in Chinese)
- [7] 卢智勇, 周煜, 孙建锋, 等. 机载直视合成孔径激光成像雷达外场及飞行实验[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0110001.
LU ZH Y, ZHOU Y, SUN J F, *et al.*. Airborne down-looking synthetic aperture imaging lidar field experiment and its flight testing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0110001. (in Chinese)
- [8] 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.
WU J, LI F F, ZHAO ZH L, *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. (in Chinese)
- [9] 吴曙东, 黄建余, 赵志龙, 等. 聚束模式合成孔径激光雷达实验演示[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0628001.
WU SH D, HUANG J Y, ZHAO ZH L, *et al.*. Experimental demonstration of spotlight mode synthetic aperture lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0628001. (in Chinese)
- [10] ZHAO ZH L, WU J, SU Y Y, *et al.*. Three-dimensional imaging interferometric synthetic aperture lidar [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(9): 091101.
- [11] 张珂殊, 潘洁, 王然, 等. 大幅宽激光合成孔径雷达成像技术研究[J]. *雷达学报*, 2017, 6(1): 1-10.
ZHANG K SH, PAN J, WANG R, *et al.*. Study of wide swath synthetic aperture lidar imaging technology[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 1-10. (in Chinese)
- [12] WAHL D E, EICHEL P H, GHIGLIA D C, *et al.*. Phase gradient autofocus—a robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(3): 827-835.
- [13] STAPPAERTS E A, SCHARLEMANN E T. Differential synthetic aperture lidar [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(18): 2385-2387.

- [14] BARBER Z W, DAHL J R. Experimental demonstration of differential synthetic aperture radar [C]. *Proceedings of 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), IEEE*, 2015.
- [15] BARBER Z, DAHL J, BLASZCZYK C R. FM-CW differential synthetic aperture radar for turbulence mitigation[C]. *Proceedings of the 18th Coherent Laser Radar Conference (CLRC 2016)*, CLRC, 2016.
- [16] 张鸿翼, 李飞, 徐卫明, 等. 经过改进的差分合成孔径激光雷达对振动的抑制[J]. *红外与毫米波学报*, 2015, 34(5): 576-582.
ZHANG H Y, LI F, XU W M, *et al.*. Suppression of the vibration effect in the ladar with differential synthetic aperture[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2015, 34(5): 576-582. (in Chinese)
- [17] ZHAO ZH L, HUANG J Y, WU SH D, *et al.*. Experimental demonstration of tri-aperture differential synthetic aperture radar[J]. *Optics Communications*, 2017, 389: 181-188.
- [18] LUCKE R L. Synthetic aperture radar simulations with phase screens and Fourier propagation[C]. *Proceedings of 2004 IEEE Aerospace Conference*, IEEE, 2004, 3: 1798.

作者简介:



赵志龙(1986—),男,黑龙江海伦人,博士,2009年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2017年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事激光雷达技术与系统方面的研究。E-mail: zhi-long5552003@163.com

导师简介:



吴 谨(1965—),男,湖南绥宁人,博士,研究员,1988年于清华大学获得学士学位,2001年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事激光雷达技术与系统、脉冲气体激光器等方面的研究。E-mail: jwu909@263.net