

差分合成孔径激光雷达高分辨率成像实验

吴 谨¹, 赵志龙², 白 涛³, 李明磊³, 李丹阳³, 万 磊³, 唐永新¹, 刁伟伦¹

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 2. 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; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 利用 1 550 nm 波长的可调谐光纤激光器, 建立了 DSAL(Differential synthetic aperture lidar) 高分辨率成像演示实验装置。在 1.85 m 的目标距离上, 开展了合作目标的 DSAL 成像实验。利用基本的 DSAL 成像理论, 重构了目标回波的相位史数据, 实现了高分辨率合成孔径成像。详细给出了不同方位运动条件下获得的 DSAL 图像。实验结果表明: 利用经过 DSAL 技术重建后的目标回波相位史数据, 能够形成聚焦良好的高分辨率 DSAL 图像。这显示了 DSAL 技术对共模相位误差的稳健消除能力。此外, 不同方位运动条件下的 DSAL 成像结果表明, 在超过规定方位运动速度 30% 的范围内, 均可观察到良好聚焦或至少可接受的 DSAL 图像, 表明 DSAL 系统对方位运动速度变化有一定范围的适应能力。

关键词: 差分合成孔径激光雷达; 相位史数据; 成像; 方位运动速度

中图分类号: TN958 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1230003

High resolution imaging experiment on differential synthetic aperture lidar

Wu Jin¹, Zhao Zhilong², Bai Tao³, Li Minglei³, Li Danyang³, Wan Lei³, Tang Yongxin¹, Diao Weilun¹

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. State Key Laboratory of Space-Ground Integrated Information Technology, Beijing Institute of Satellite Information Engineering, Beijing 100086, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Using a tunable fiber laser of 1 550 nm wavelength, a high resolution imaging differential synthetic aperture lidar(DSAL) was set up in the laboratory. DSAL imaging experiments were carried out using a cooperative target at distance of 1.85 m. The phase history data (PHD) of the target returns were reconstructed and high resolution synthetic aperture images were generated by straightforwardly following standard DSAL image formation theory. High resolution DSAL images at various azimuth moving conditions were given in detail. Experimental data show that using the reconstructed PHD by DSAL technique, much better focused images can be produced, which demonstrates that the DSAL technique can robustly remove the common phase errors in the PHD. Moreover, DSAL images with various azimuth moving conditions show that even if the azimuth speed is 30% longer or shorter than its ideal value, the

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2018-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(61178071)

作者简介: 吴谨(1965-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光雷达及脉冲气体激光器技术研究。Email: jwu@mail.ie.ac.cn

DSAL images are all well or at least acceptably focused, which means that a DSAL system is possibly well adaptive to the variation of its azimuth speed.

Key words: differential synthetic aperture lidar; phase history data; imaging; azimuth speed

0 引言

合成孔径激光雷达(Synthetic Aperture Ladar, SAL)是采用相干光学外差探测与合成孔径技术的主动成像激光雷达,是微波合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)技术在光学波段的类推,具有成像分辨率能够突破光学接收口径衍射极限、与目标距离、探测波长无关等特点,在远距离目标高分辨率成像探测领域有良好的应用前景。

进入 21 世纪以来, SAL 成像技术研究取得了很大的进展,国内外均完成了在实验室甚至机载平台的 SAL 高分辨率成像实验演示^[1-17]。例如,2012 年,美国蒙大拿州立大学的聚束模式 SAL 实验室成像^[5],在约 2 m 的距离上,蜻蜓标本的成像分辨率超过系统真实光学接收口径衍射极限的 1 000 多倍;2015 年,中国科学院电子学研究所的条带模式 SAL 实验室成像^[13],在 12.9 m 的距离上,合作目标与非合作目标的成像分辨率超过系统真实口径衍射极限的 100 多倍。这些 SAL 图像,分辨率高、对比度强和细节清晰度高,完全媲美常规光学图像,显示出 SAL 技术的高分辨率成像能力和深入发展的潜力。

高分辨率 SAL 成像的实现依赖于能够获得目标回波的稳定相位史数据(Phase History Data, PHD)。由于激光波长很短, PHD 形成过程中,很难避免相位误差,因此,相位误差处理是实现 SAL 高分辨率成像的关键。最常用的,在 SAR 成像中被证明是非常有效的相位误差处理方法是相位梯度自聚焦算法(Phase Gradient Autofocus, PGA)^[18]。在诸多 SAL 成像演示实验中, PGA 也表现出了良好的鲁棒性^[2, 4-7, 13-14, 16]。理论上, PGA 技术适用于图像存在强散射点的情形^[18]。由于实际环境中, SAL 成像数据中的相位误差一般很大,图像散焦严重,常常难以找到强散射点,因此, PGA 技术在 SAL 中的应用方法以及有效性,仍有待进一步研究。

相比较基于软件的 PGA 技术,2005 年,美国劳伦斯利夫莫尔实验室的 E. A. Stappaerts 和 E. T.

Scharlemann 提出的差分合成孔径激光雷达(Differential Synthetic Aperture Ladar, DSAL)技术是基于硬件的相位误差校正方法^[19]。理论上, DSAL 技术可以有效地消除脉冲间的共模相位误差,重构无相位误差的成像 PHD^[19]。2015 年,美国蒙大拿州立大学的 Z. W. Barber 和 J. R. Dahl 首次采用带宽 40 GHz 的 DFB 线性调频激光器,对 1.83 m 距离上的点阵目标进行了 DSAL 成像实验^[20];2016 年,他们继续报道了大气湍流影响 DSAL 成像的实验室研究结果^[21]。

基于多年的 SAL 技术研究基础,中国科学院电子学研究所也开展了 DSAL 成像实验研究,并于 2017 年获得了聚焦良好的 DSAL 图像^[22]。文中进一步报道 DSAL 技术探索的进展。

1 实验装置

DSAL 实验装置示意图如图 1 所示。发射口径(Tr)输出的线偏振激光经过偏振分束器(PBS)和四分之一波片(QW)变为圆偏振激光,照明目标;目标散射回波经过 QW 变为线偏振激光,再经 PBS 后由两

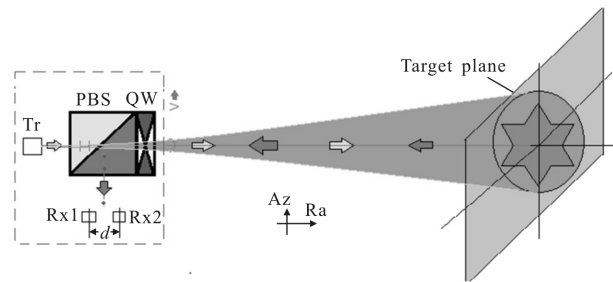


图 1 DSAL Tx/Tr 光学原理图

Fig.1 Schematic of DSAL Tx/Tr Optics

个接收口径(Rx1、Rx2)接收。经过严格的光路调整,使发射口径、两个接收口径三者处在一条垂直与发射光束光轴的虚拟直线上,构成中央口径发射、左右两侧接收的“三口径”DSAL 收发光学系统^[22]。实验目标放置在与发射光束光轴成一定夹角(正侧视时为 45°)的平面上,目标平面与收发孔径之间之间的相对运动由步进电机控制,速度为 V 。方位运动速度

V 的方向为 Az(Azimuth)向,探测光束光轴方向为距离 Ra(Range)向。

表 1 给出了 DSAL 成像实验参数。

表 1 DSAL 实验参数

Tab.1 Parameters of DSAL experiment

Parameter	Value
Carrier wavelength λ_0/nm	1 550
Tuning speed/ $\text{nm} \cdot \text{s}^{-1}$	100
Transmitting beam divergence angle/ mrad	3.0
Target distance L_0/m	1.85
Rx aperture space $d/\mu\text{m}$	200
Pulse length $\tau_{\text{pul}}/\text{ms}$	100
Sidelooking angle $\phi/(\circ)$	45
Imaging mode	Stripmap

根据表 1 的数据,该 DSAL 方位向的采样步长理论值为:

$$\Delta x = \frac{d}{2} = 100 \mu\text{m} \quad (1)$$

采用 DSAL 技术重构 PHD 后,DSAL 成像的方位和距离分辨率分别为:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_r &= \frac{\lambda_0}{2D_{\text{sa}}} L_0 = \frac{1.55 \mu\text{m}}{2 \times 1.85 \text{m} \times 3 \text{mrad}} \times 1.85 \text{m} \approx 259 \mu\text{m} \\ \rho_a &= \frac{c}{2B \cos \phi} = \frac{\lambda_0^2}{2 \cdot \Delta \lambda \cos \phi} = \frac{(1.55 \mu\text{m})^2}{2 \times 10 \text{nm} \times \cos 45^\circ} \approx 170 \mu\text{m} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

2 DSAL 成像实验结果

实验目标采用“3M”钻石反光材料制作,为“IECAS”五个大写的英文字母,如图 2 所示。“3M”钻石反光材料是 SAL 成像实验研究中常用的合作目标制作材料,用它设计的合作目标回波强,成像

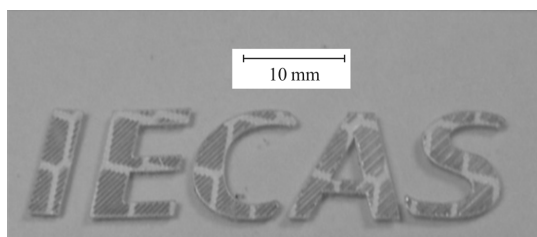


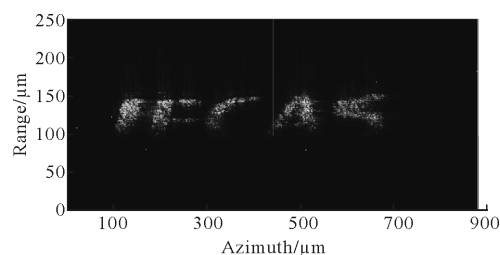
图 2 五个字母“IECAS”的目标图

Fig.2 Target photograph of five letters "IECAS"

清晰,便于观察和分析实验现象。图 3~5 给出了在不同方位采样步长条件下获得的 DSAL 图像。

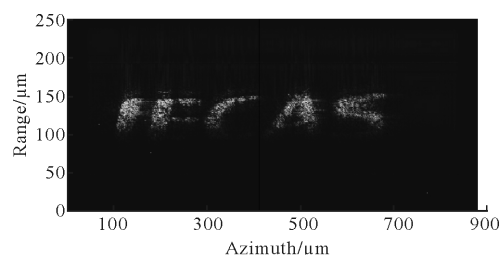
图 3 为方位采样步长 $\Delta x = \frac{d}{2}$ 条件下获得的

DSAL 图像,其中,图 3(a)和图 3(b)分别为左、右子口径的 PHD 独立生成的 SAL 图像,图 3(c)为采用 DSAL 技术重构 PHD 后所获得的 DSAL 图像。图 3 (包括图 4、图 5)中,Az 向坐标单位为 0.1 mm,距离 Ra 向坐标单位为 0.17 mm。



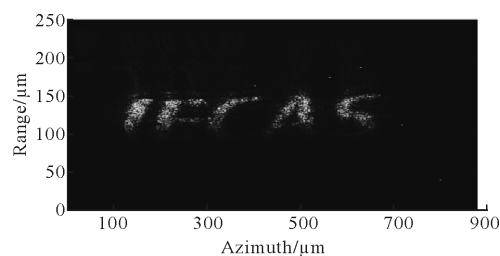
(a) 左接收口径 SAL 图像

(a) SAL image by left sub Rx aperture



(b) 右接收口径 SAL 图像

(b) SAL image by right Rx aperture



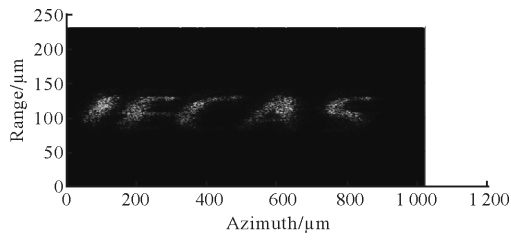
(c) DSAL 图像

(c) DSAL image

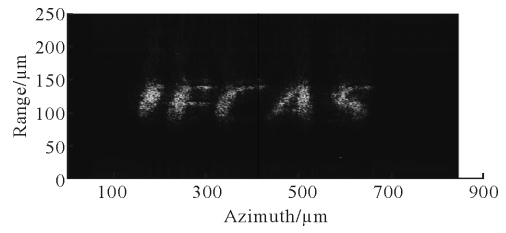
图 3 $\Delta x = \frac{d}{2}$ 的 DSAL 图像

Fig.3 DSAL images at $\Delta x = \frac{d}{2}$

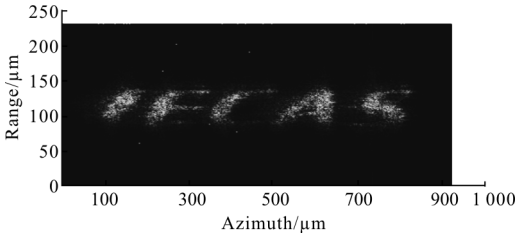
图 4 为 $\Delta x < \frac{d}{2}$ 的几种条件下获取的 DSAL 图像。



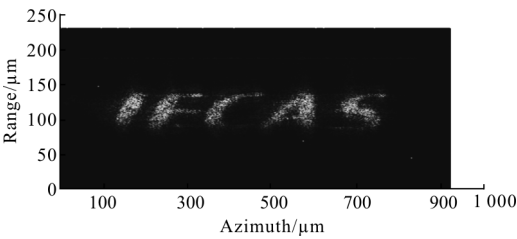
(a) $\Delta x = 70\% \cdot \left(\frac{d}{2}\right)$



(c) $\Delta x = 130\% \cdot \left(\frac{d}{2}\right)$



(b) $\Delta x = 80\% \cdot \left(\frac{d}{2}\right)$

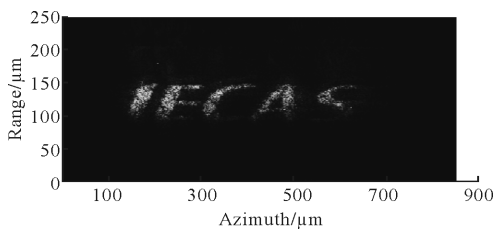


(c) $\Delta x = 90\% \cdot \left(\frac{d}{2}\right)$

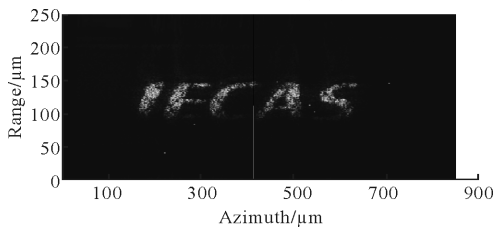
图 4 $\Delta x < \frac{d}{2}$ 的 DSAL 图像

Fig.4 DSAL images at $\Delta x < \frac{d}{2}$

图 5 为 $\Delta x > \frac{d}{2}$ 的几种条件下获取的 DSAL 图像。



(a) $\Delta x = 110\% \cdot \left(\frac{d}{2}\right)$



(b) $\Delta x = 120\% \cdot \left(\frac{d}{2}\right)$

图 5 $\Delta x > \frac{d}{2}$ 的 DSAL 图像

Fig.5 DSAL images at $\Delta x > \frac{d}{2}$

3 分析与讨论

3.1 关于 $\Delta x = \frac{d}{2}$ 情形

此时,方位采样步长完全满足公式(1)规定,相邻两次方位采样的位置具有物理上的重叠关系,如图 6 所示。图 6 中,画出了三个相邻的方位采样位置中等效接收口径的方位位置关系。可以看到,由于方位采样满足 $\Delta x = \frac{d}{2}$ 条件,所以,一个方位采样位置的右口径与下一个位置的左口径在方位坐标上是完全重合的,它们面对同一目标的散射回波,只是采样时刻的不同。可见,DSAL 技术通过物理的方式实现方位位置的重叠采样,理论上,通过差分处理可以消除两次采样间的共模相位误差。对全部合成孔径长度内的 PHD 进行处理,可重建无相位误差的 PHD。

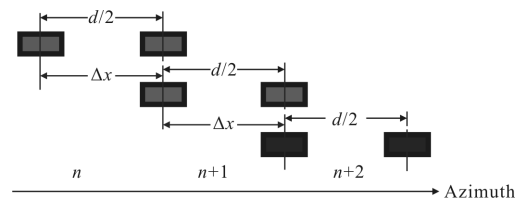


图 6 $\Delta x = \frac{d}{2}$ 的 DSAL 方位采样位置

Fig.6 Azimuth sampling positions in DSAL at $\Delta x = \frac{d}{2}$

图 3 中,三幅 SAL 图像都清晰显示五个字母,表明所建立的 DSAL 系统工作稳定,每个接收子口径的 PHD 均可以独立形成高分辨率 SAL 图像。这样稳定运转的实验装置为 DSAL 技术研究提供了优越的实验条件。

图 3(c)是利用两个接收子口径的 PHD 经过 DSAL 处理,重构 PHD 后获得的 DSAL 图像。与图 3(a)

和(b)仔细比较,DSAL 图像聚焦更好。以图 3 中的“S”字母为例,DSAL 图像比两个子口径独自形成的图像更加清晰。这表明经过 DSAL 重建 PHD,相位误差得到了进一步消除,因此,DSAL 图像聚焦质量更好。

3.2 关于 $\Delta x \neq \frac{d}{2}$ 情形

DSAL 中收发口径的位置是固定的,即两个接收子口径的间距(参数 d)属于硬件结构参数。而方位采样间隔则与装载平台的方位运动速度 V 有关。方位运动速度为 V 、探测激光脉冲重复频率为 PRF、方位采样间隔 Δx 等三者的关系为:

$$\Delta x = V \cdot \frac{1}{\text{PRF}} = \frac{d}{2} \quad (3)$$

可见,PRF 确定后, V 是一个确定值。因此,DSAL 技术对方位运动速度 V 有严格的限制。不过,DSAL 概念创立者 E. A. Stappaerts 和 E.T. Scharlemann 认为,方位采样位置可偏离理论要求的 10%而对 DSAL 成像没有严重影响^[9]。

对方位运动速度对 DSAL 成像的影响,开展了不同的实验观察。

图 4(c)和图 5(a)对应于 $\Delta x = 90\% \cdot \left(\frac{d}{2}\right)$ 或 $\Delta x = 110\% \cdot \left(\frac{d}{2}\right)$,即偏离公式(3)要求 10%的情形。直观地从成像质量看,图 4(c)和图 5(a)与图 3(c)相比确实没有明显的差别。这表明,E. A. Stappaerts 和 E. T. Scharlemann 的观点是有道理的。

图 4(b)和图 5(b)的 DSAL 成像结果对应偏离 20%的情形,图 4(a)和图 5(c)的 DSAL 成像结果对应偏离 30%的情形。可以看到,两种情况下,均实现了 DSAL 成像。虽然,仔细比较,图 4(a)和图 5(c)的成像质量比图 4(b)和图 5(b)的差,但是,图 4(a)和图 5(c)的聚焦还是相当明显的。这表明对于 DSAL,方位运动速度偏离理论值的 30%,仍可获得聚焦的图像。这是一个颇为积极正面的实验演示结果。

另外,当 $\Delta x \neq \frac{d}{2}$ 时,一个可考虑的处理方法是利用两个接收口径的数据进行内插或外延,以构建符合图 6 严格要求的 DSAL 数据,如图 7 所示。

采用简单的线性插值,可获得新位置的外差数据 U_R' 为:

$$U_R' = U_L + \frac{U_R - U_L}{(d/2)} \cdot \Delta x \quad (4)$$

式中: (U_R, U_L) 分别为任一个方位采样位置左、右接收口径获得的回波外差数据; Δx 为实际的方位采样步长。

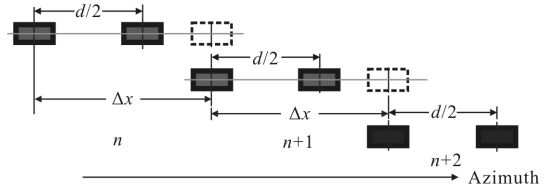
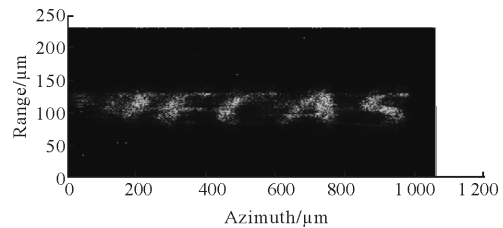


图 7 $\Delta x \neq \frac{d}{2}$ 的 DSAL 方位采样位置

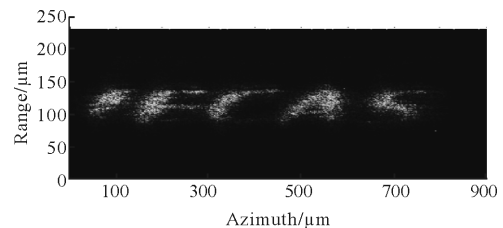
Fig.7 Azimuth sampling positions in DSAL at $\Delta x \neq \frac{d}{2}$

图 8 为采用公式(4)方法插值后,得到的有关的 DSAL 图像。

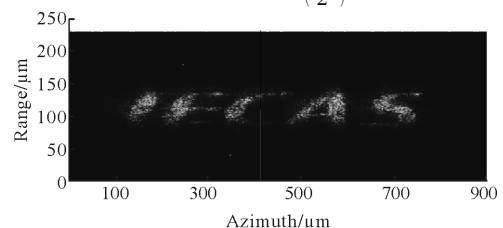
从图 8 可以看出,经过插值处理得到的六幅 $\Delta x \neq \left(\frac{d}{2}\right)$ 时的 DSAL 图像,均有良好的聚焦。不过,从图像质量看,这六幅图像与图 4、图 5 对应的图像相比,变化不明显,没有达到图 3(c)的完全聚焦效果。这说明,公式(4)的插值方法可能不能完全解决 $\Delta x \neq \left(\frac{d}{2}\right)$ 带来的全部问题。



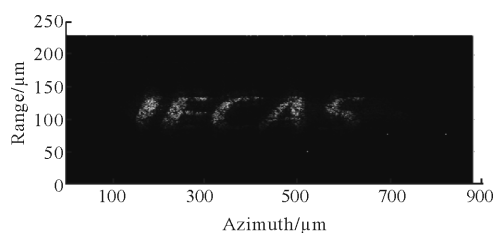
(a) $\Delta x = 70\% \cdot \left(\frac{d}{2}\right)$



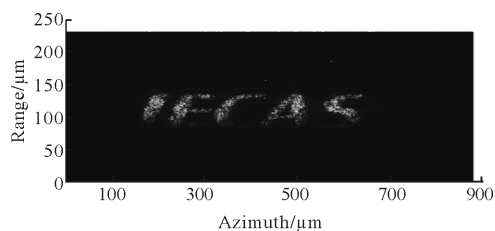
(b) $\Delta x = 80\% \cdot \left(\frac{d}{2}\right)$



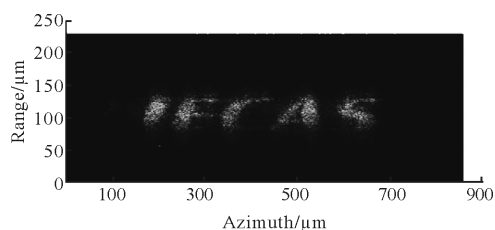
(c) $\Delta x = 90\% \cdot \left(\frac{d}{2}\right)$



$$(d) \Delta x = 110\% \cdot \left(\frac{d}{2}\right)$$



$$(e) \Delta x = 120\% \cdot \left(\frac{d}{2}\right)$$



$$(f) \Delta x = 130\% \cdot \left(\frac{d}{2}\right)$$

图 8 $\Delta x \neq \left(\frac{d}{2}\right)$ 时线性插值后的 DSAL 图像

Fig.8 DSAL images at $\Delta x \neq \left(\frac{d}{2}\right)$ after linear interpolation

4 结论

利用 1 550 nm 波长的光纤激光器建立 DSAL 实验装置,开展了 DSAL 成像实验研究,给出了不同方位采样条件下的 DSAL 成像。实验成像结果表明,DSAL 技术确实具有一定的共模相位误差消除能力。通过 DSAL 处理,无需 PGA,就能获得良好聚焦的 SAL 图像。另外,在超过规定方位运动速度±30%的范围内,利用 DSAL 技术,仍可实现稳定聚焦成像。这表明,DSAL 技术对方位运动速度有一定的容忍范围。这一实验结果,对于 DSAL 技术的实际应用,具有参考价值。

DSAL 技术是从硬件设计上来重建目标回波 PHD,从而实现高分辨率 SAL 成像的方法。国内外关于 DSAL 技术实验研究的公开报道还非常有限。文中关于 DSAL 成像实验研究的结果,尤其是对方

位运动速度的适应性结果,还属国内外还未曾有过的首次报道。事实上,SAL 成像技术发展到今天,虽然成功实现了机载成像演示,但是,距离实际工程应用,仍需探索。DSAL 技术研究,正是为此目标而付出的努力。

参考文献:

- [1] Mark Bashkansky, Robert L Lucke, Funk E E, et al. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(22): 1983-1985.
- [2] Steven M Beck, Joseph R Buck, Walter F Buell, et al. Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing [J]. *Appl Opt*, 2005,44 (35): 7621-7629.
- [3] Jennifer C Ricklin, Bryce Schumm, Matt Dierking, et al. Synthetic aperture radar for tactical imaging (SALTI) flight test results and path forward [C]// Proceedings of the The 14th Coherent Laser Radar Conference, 2007: 8-13.
- [4] Brian Krause, Joseph Buck, Christopher Ryan, et al. Synthetic aperture radar flight demonstration [C]// 2011 Conference on Laser and Electro-optics, 2011: PDPB7.
- [5] Stephen Crouch, Barber Z W. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture radar techniques [J]. *Opt Exp*, 2012, 20(22): 24237-24246.
- [6] Simon Turbide, Linda Marchese, Alain Bergeron, et al. Synthetic aperture radar based on a MOPAW laser[C]//SPIE, 2016, 10005: 1000502.
- [7] Russell Trahan, Bijan Nemati, Hanying Zhou, et al. Low-CNR inverse synthetic aperture radar imaging demonstration with atmospheric turbulence[C]//SPIE, 2016, 9846: 98460E.
- [8] Li Fei, Zhang Hongyi, Wu Jun, et al. Mechanism and experiment of code intensity-modulation on synthetic aperture radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 45 (9): 2575-2582. (in Chinese)
- [9] Zhu Luan, Sun Jianfeng, Yu Zhou, et al. Down-looking synthetic aperture imaging radar demonstrator and its experiments over 1.2 km outdoor [J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(11): 111101.
- [10] Zhao Zhilong, Wu Jin, Su Yuanyuan, et al. Three-dimensional imaging interferometric synthetic aperture radar [J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(9): 091101.
- [11] Wu Jin, Li Feifei, Zhao Zhilong, et al. Demonstration of stripmap mode synthetic aperture radar with PGA -

- independenthigh resolution images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3559–3564. (in Chinese)
- [12] Li Fei, Zhang Hongyi, Wu Jun, et al. Mechanism and experiment of code intensity-modulation on synthetic aperture ladar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (9): 2575–2582. (in Chinese)
- [13] Wu Jin, Zhao Zhilong, Wu Shudong, et al. High resolution synthetic aperture ladar imaging at 12.9 m distance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 273–278. (in Chinese)
- [14] Wang Ning, Wang Ran, Li Guangzuo, et al. Experiment of inverse synthetic aperture ladar at 1.1 km [C]//SPIE, 2016, 10155: 101551G.
- [15] Lu Zhiyong, Zhou Yu, Sun Jianfeng, et al. Airborne down-looking synthetic aperture imaging ladar field experiment and its flight testing [J]. *Chin J Lasers*, 2017, 44 (1): 0110001. (in Chinese)
- [16] Li Guangzuo, Wang Ran, Song Ziqi, et al. Linear frequency-modulated continuous-wave ladar system for synthetic aperture imaging [J]. *Appl Opt*, 2017, 56(12): 3257–3262.
- [17] Yu Tang, Bao Qin, Yun Yan, et al. Multiple-input multiple-output synthetic aperture ladar system for wide-range swath with high azimuth resolution [J]. *Appl Opt*, 2016, 55 (6): 1401–1405.
- [18] Wahl D E, Eichel P H, Ghigli D C, et al. Phase gradient autofocus –a robust tool for high resolution SAR phase correction [J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(3): 827–834.
- [19] Stappaerts E A, Scharlemann E T. Differential synthetic aperture ladar[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(18): 2385–2387.
- [20] Barber Z W, Dahl J R. Experimental demonstration of differential synthetic aperture ladar[C]//OSA/CLEO, 2015.
- [21] Barber Z W, Dahl J R, Blaszczyk C R. FMCW differential synthetic aperture ladar for turbulence mitigation [C]//18th Coherent Laser Radar Conference, 2016.
- [22] Zhao Zhilong, Huang Jianyu, Wu Shudong, et al. Experimental demonstration of tri-aperture differential synthetic aperture ladar[J]. *Opt Commun*, 2017, 389(4): 181–188.