

12.9 m 高分辨率合成孔径激光雷达成像

吴 谨¹ 赵志龙^{1,2} 吴曙东^{1,2} 段洪成^{1,2} 唐永新¹ 黄文武¹

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

摘要 报道了一个条带模式合成孔径激光雷达(SAL)实验室高分辨率成像结果。以0.5 mm×0.5 mm的等效收发口径,在一个12.9 m距离上,实现了高分辨率SAL成像,获得了照片级的高质量图像。图像的方位合成孔径分辨率超过真实口径衍射极限分辨率的100倍。详细给出了合作目标和漫反射目标的距离压缩像、方位聚焦像和相位梯度自聚焦(PGA)处理像。实验数据展现了清晰的SAL图像形成过程,显示出了各处理步骤的典型聚焦效果。实验结果演示了PGA在SAL图像处理中的稳健聚焦能力,多次迭代能较大幅度地提高成像质量。

关键词 遥感; 激光雷达; 合成孔径; 成像; 相位梯度自聚焦

中图分类号 TN958 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.1228002

High Resolution Synthetic Aperture Ladar Imaging at 12.9 m Distance

Wu Jin¹ Zhao Zhilong^{1,2} Wu Shudong^{1,2} Duan Hongcheng^{1,2} Tang Yongxin¹ Huang Wenwu¹

¹*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract The high resolution imaging result of a laboratory-scale stripmap mode synthetic aperture ladar (SAL) is reported. The high resolution SAL imaging is realized utilizing an equivalent transmitting/receiving aperture of 0.5 mm×0.5 mm, and the high resolution images with picturesque high quality are generated at target distance of 12.9 m. The azimuth resolution synthetic aperture of the SAL images is over 100 times better than the real aperture diffraction limited resolution. The range compressed images of cooperative target and diffusive target, azimuth focused images and phase gradient autofocus (PGA) processed images are given in detail. Experimental figures display a clear SAL image formation process with the typical focused images of every processing step. Experimental results show that PGA has very robust focusing ability in SAL image processing, multiple iterations can greatly improve the imaging quality.

Key words remote sensing; ladar; synthetic aperture; imaging; phase gradient autofocus

OCIS codes 280.6730; 280.4750; 110.2990

1 引言

合成孔径激光雷达(SAL)是采用光学合成孔径技术和相干外差探测的高分辨率成像激光雷达,它能够突破传统光学系统中镜头尺寸对成像分辨率衍射极限的限制,对成百上千公里距离上的目标,能够实现厘米级分辨率的二维(2D)或三维(3D)成像。这种卓越成像能力,使SAL有望发展成为远距离目标高分辨率成像观测的新工具,在对地观测、对空监视和空间探测等领域中得到应用^[1-2]。

进入20世纪来,国内外报道了众多的SAL 2D/3D成像实验结果^[3-23]。在室内成像方面,小于5 m的目标距离上,文献[5]报道了干涉SAL 3D成像和聚束模式SAL 2D成像实验演示,其3D目标成像结果高程分布清晰可见,聚束SAL图像分辨率高,具有照片级图像质量;文献[8-9]独创了直视SAL体制成像理论,并实现了室内成像演示;文献[13-14]的条带模式SAL图像,简单依照SAL成像处理理论形成,分辨率优于350 μm(方位向)×170 μm(距离向)。目标距离超过10 m的,目前只有文献[15]中提出的大口径SAL演示样机并且在14m传

收稿日期: 2015-06-09; 收到修改稿日期: 2015-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(61178071)

作者简介: 吴 谨(1965—),男,博士,研究员,主要从事激光雷达及脉冲气体激光器等方面的研究。E-mail: jwu909@263.net

输距离上实现了二维成像验证,分辨率优于1.4 mm(方位向)×1.2 mm(距离向)。

在室外成像方面,美国 DARPA 支持的 SALT 项目 2006 年宣称实现了机载 SAL 高分辨率成像,该系统采用 CO₂ 气体激光器为辐射源,但是,图像至今没有公开^[16-17];文献[18-19]分别报道了采用 1.55 μm 波长的脉冲光纤激光实现 700 m 距离上的双点目标 SAL 成像和 1.6 km 斜距上的正侧视机载 SAL 成像;文献[20]给出了 1.2 km 距离上的直视 SAL 成像。

可见,在公开文献中,实验室近距离 5m 内,有高质量的合作目标或普通扩展目标的 SAL 2D/3D 图像;室外 SAL 图像相对较少,仅有小尺寸合作目标的一幅机载 SAL 图像^[19]和一幅直视 SAL 图像^[20]。高分辨率成像是 SAL 的根本目的,SAL 图像是反映系统性能最有价值的参考资料。本文详细报道了一个 12.9 m 距离上的室内 SAL 实验结果,给出详细的成像数据,包括原始数据、距离压缩像、方位聚焦像和经过相位梯度自聚焦(PGA)^[23]处理的高分辨率 SAL 成像。

2 SAL 系统参数与成像数据处理

文献[13-14]建立了一个目标距离为 2.4 m 的实验室 SAL 成像装置,可以简单依照基本 SAL 成像理论(傅里叶变换实现距离压缩,方位向匹配滤波实现合成孔径聚焦)实现近似理论预期的高分辨率 SAL 成像,无需辅助 PGA 处理。利用这个装置演示了多种合作目标和扩展目标高分辨率 SAL 成像(包括叠掩成像^[13])。通过对装置进行改进,建成了一个成像距离为 12.9 m 的条带模式 SAL 实验室成像装置,其成像实验参数如表 1 所示。

表 1 SAL 实验参数设置

Table 1 Experimental parameters of the SAL setup

Item	Parameter	Value
1	laser power /mW	36
2	wavelength scanning speed /(nm/s)	100
3	pulse length /ms	100
4	target distance /m	12.9
5	synthetic aperture length /mm	40
6	azimuth step length /μm	94
7	equivalent receiving aperture	0.5 mm×0.5 mm
8	SAL imaging mode	stripmap
9	sidelooking angle /(^o)	45

根据表 1 的数据,在 12.9m 的距离上,该正侧视条带模式 SAL 成像在目标平面上的理论分辨率为: $\rho_a \approx 250 \mu\text{m}$ (方位向); $\rho_r \approx 170 \mu\text{m}$ (距离向);其真实接收口径尺寸对应的衍射极限分辨率约为 40 mm。理论上,SAL 图像的方位向合成孔径分辨率比衍射极限分辨率约高 160 倍。

成像数据处理时,SAL 二维原始数据根据文献[13-14]的方法形成;将原始数据在距离向进行傅里叶变换得到距离压缩像,在方位向进行匹配滤波得到方位合成孔径聚焦像;将经过距离压缩、方位匹配滤波后获得的 SAL 2D 复图像在方位向应用 PGA 处理,获得 PGA 聚焦图像。为提高图像质量,PGA 处理需要进行多次迭代。

3 SAL 成像结果

图 1 为合作目标的 SAL 成像。目标为 3M 钻石反光材料经过激光雕刻形成的中国科学院电子学研究所徽标图案。3M 钻石反光材料回波强,是 SAL 研究中常用的合作目标制作材料。

图 1(a)为目标徽标的照片。照片下部放置一把钢尺用于显示目标尺寸。徽标大小约为 90 mm×60 mm (方位向×距离向),贴在一块黑色橡胶板上。图 1(b)~(e)为 SAL 成像结果,分别为原始数据幅度图、距离压缩像、方位合成孔径聚焦像和 PGA 聚焦像。可以看到,从图 1(b)到图 1(e),呈现出一个清晰的 SAL 成像聚焦过程。在图 1(b)的原始数据图中,还看不出图 1(a)目标的形象;经过距离压缩后,图 1(c)显示出目标的大致轮廓,中间可见两条明显的弱回波信号带,但没有目标内部细节,据此还不能对目标进行具体判断;经过匹配滤波实现方位聚焦后,图 1(d)已经将图 1(a)徽标图案显示出来,五个字母“IECAS”的细节不很清晰,但已经基本可以识别;进一步采取 PGA 处理后(迭代 20 次),图 1(e)中五个字母“IECAS”的细节已经清晰地显示出来,明显可见目标表面的条纹细节,展示了 SAL 成像的高分辨率,形成了照片级的高质量图像。

在 PGA 聚焦像图 1(e)中,距离向两边与中央相比较弱,这是因为探测光束具有横向分布,边缘光强较小。

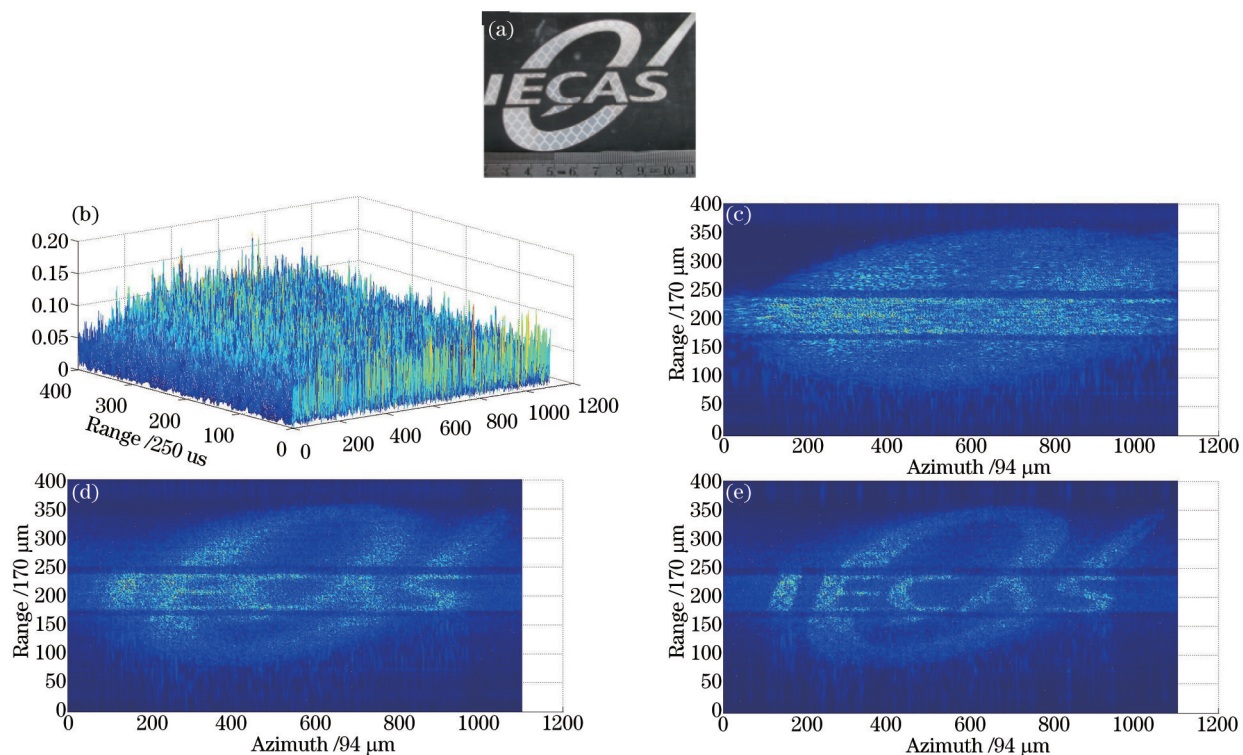


图1 合作目标 SAL 成像。(a)目标图像; (b)原始数据幅度图; (c)距离压缩像; (d)SAL 聚焦像; (e) PGA 聚焦像
 Fig.1 SAL images of cooperative target. (a) Target image; (b) raw data range image; (c) range compressed image;
 (d)SAL focus image; (e) PGA focus image

图 2 给出了一个漫反射目标的 SAL 成像结果。图 2(a)为目标的照片,是贴在玻璃上的三个英文字母

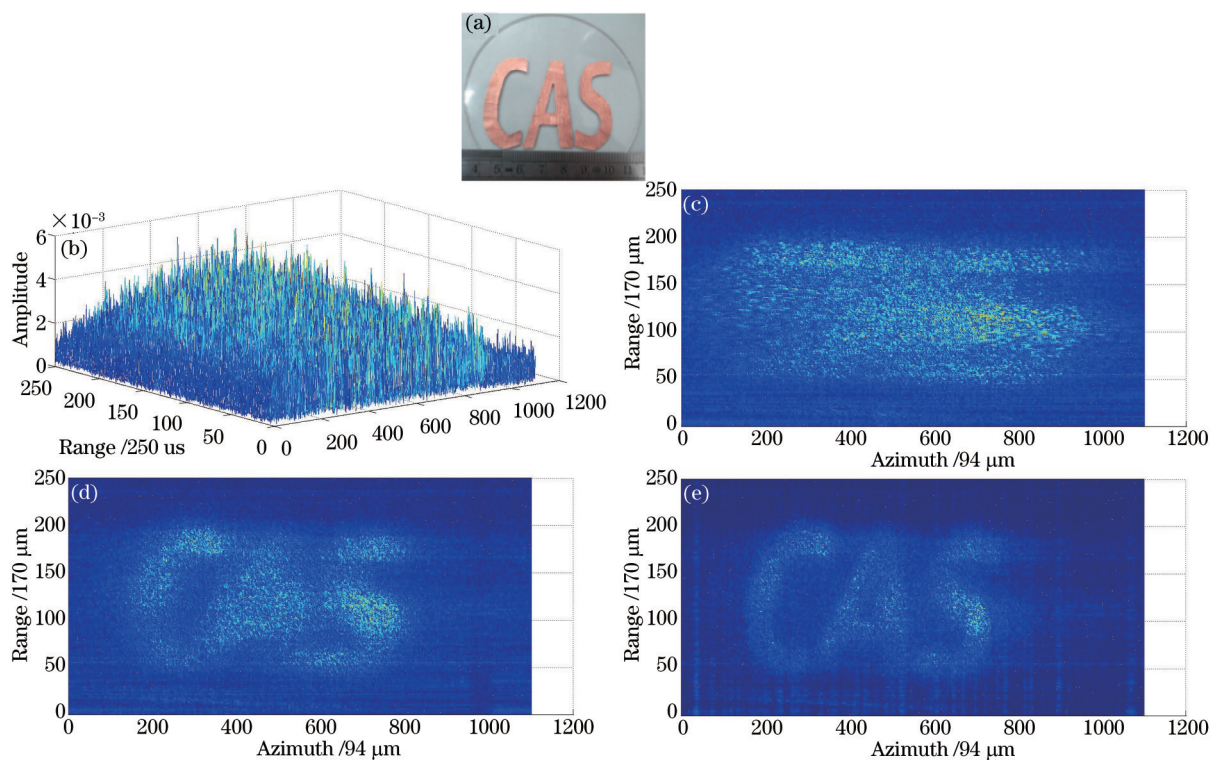


图 2 漫反射目标 SAL 成像。(a) 目标图像; (b) 原始数据幅度图; (c) 距离压缩像; (d) SAL 聚焦像; (e) PGA 聚焦像
 Fig. 2 SAL images of diffusive target. (a) Target image; (b) raw data range image; (c) range compressed image;
 (d) SAL focus image; (e) PGA focus image

“CAS”。从照片下方显示尺寸的钢尺可见三个字母总尺寸约为 60 mm×40 mm(方位向×距离向)。字母材料为铜箔,表面经过砂纸打磨,使其呈现漫反射特性。

图 2(b)~(e)为 SAL 成像结果,分别为原始数据幅度图、距离压缩像、方位合成孔径聚焦像和 PGA 聚焦像。同样,从图 2(b)到 2(e),呈现出一个清晰的 SAL 成像聚焦过程。仅进行距离压缩,图 2(c)还根本看不见三个字母;继续历经方位匹配滤波,图 2(d)依稀可见三个字母“CAS”;再进一步采取 PGA 处理后(20 次迭代),图 2(e)中,三个字母“CAS”已经清晰地显示出来。

此外,原始数据图 1(b)和图 2(b)均以 3D 形式呈现,是为了对比合作目标与漫反射目标回波的强弱。对于合作目标,图 1(b)的最大振幅约为 0.2 V,图 2(b)的最大振幅约为 5 mV,即漫反射扩展目标的回波约为合作目标的 2.5%。从图 2 结果可见,虽然漫反射目标回波弱,但是,SAL 是基于相位成像,成像依然清晰。

4 结果讨论

4.1 SAL 图像形成

SAL 2D 图像是通过原始数据从两个正交方向(分别称为距离向和方位向)进行压缩(或聚焦)而形成,当这两个压缩过程分两步分别进行时,不论是强回波的合作目标,还是弱回波的漫反射目标,都呈现出两步聚焦特性,如图 1(b)~(d)和图 2(b)~(d)所示。这是 SAL 图像的典型形成过程。

SAL 图像的两个压缩过程都依赖稳定的相位史数据。当相位数据不稳定(即存在相位误差)时,聚焦图像模糊。一般,探测激光脉冲持续时间较短,距离向相位史数据较易保持稳定,因此,距离压缩像图 1(c)和图 2(c)存在清晰的距离向边界,显示良好的距离压缩效果。由于探测激光波长很短,合成孔径数据获取时间较长(实验大约 1 h),方位向相位数据不容易保持稳定,会存在较大的相位误差,导致成像模糊,例如,方位合成孔径像图 1(d)和图 2(d),与目标照片图 1(a)和图 2(a)相比,存在较大的差距。

反过来,也可以说 SAL 图像反映了原始数据的相位误差特性。根据 SAL 图像特性,可以初步判断成像数据形成过程中系统的运转特性,分析引入相位误差的因素,采取有针对性的改进措施。因此,SAL 图像是反映系统性能最有价值的参考资料。

4.2 PGA 处理

PGA 算法采用数学手段去除 SAL 图像数据中的相位误差,提高图像质量,是一种纯数学处理方法^[23]。

SAL 采用相干激光作为探测光源,光学波长很短,微小的机械振动、光学相位与频率不稳定、大气湍流等都会产生相位噪声,因此,相位误差在任何实际 SAL 成像数据中都将不可避免地存在,这使得 PGA 将成为 SAL 成像处理中一个必不可少的步骤。

从图 1(d)~(e)和图 2(d)~(e)可以看出,不论是强回波的合作目标还是弱回波的漫反射目标,PGA 都呈现出稳健的聚焦能力。经过 PGA,尤其是多次迭代,SAL 图像质量得到大幅度提高。如图 1(e)所示,有清楚的内部细节,近似照片级图片。

图 1 的目标也曾应用在文献[14]的 SAL 成像实验中。在文献[14]中,目标距离只有 2.4 m,一幅完整的徽标 SAL 图像是将距离向 7 次成像的结果拼接而成,如文献[14]中图 5。本文实验中,目标距离为 12.9 m,目标处光斑足够大,图 1(e)和图 2(e)均一次形成,未经任何拼接。将图 1(e)与文献[11]的图 5 对比,目标距离从 2.4 m 变为 12.9 m,衍射极限分辨率下降 5 倍,但是,由于 SAL 成像分辨率与距离无关,两者分辨率理论上是一致的,而从 SAL 图像内部细节的清晰度看,符合 SAL 成像基本理论。在文献[14]中,SAL 成像合成孔径分辨率经点目标测量约为 0.35 mm,由此推算图 1(e)的合成孔径分辨率,应该具有相同的量级,超过真实接收口径衍射极限分辨率的 100 倍。

PGA 处理一般需要迭代进行,多次 PGA 迭代有利于提高成像质量。图 3 和图 4 分别是图 1 的合作目标和图 2 的扩散目标 PGA 迭代处理 1 次、5 次和 20 次的成像结果。当然,随着 PGA 次数的增多,运算时间也会相应增加。因此,在实际工作中,PGA 迭代次数需要根据图像质量判据和运算时间效率来设定。

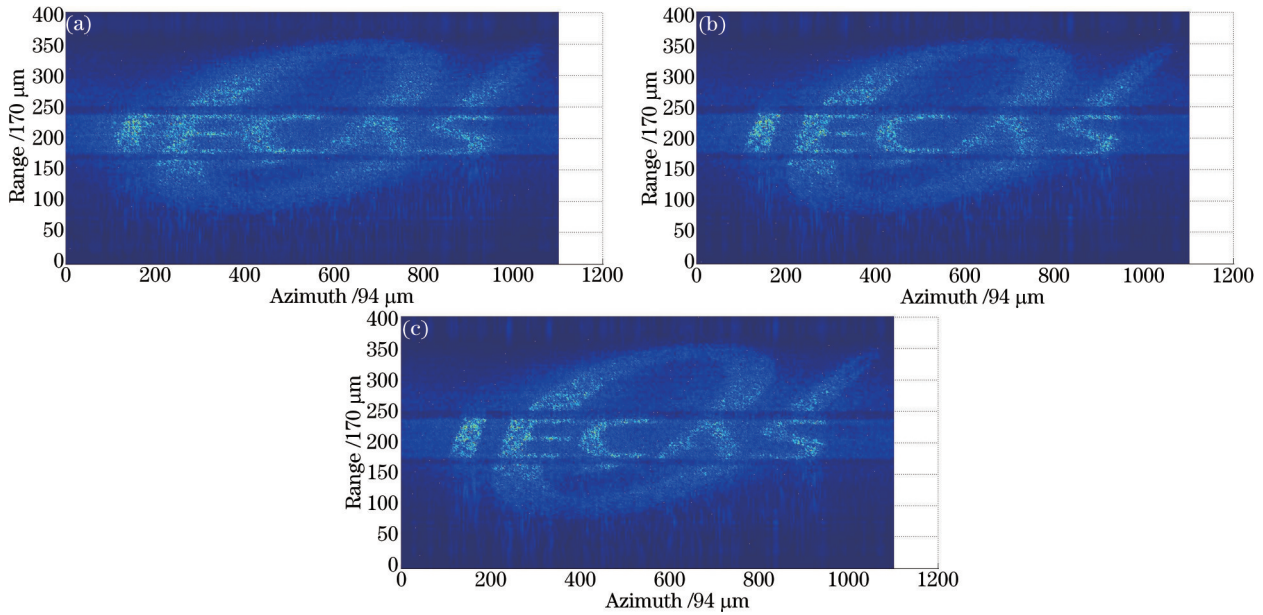


图3 合作目标的PGA迭代处理结果。(a) 1次; (b) 5次; (c) 20次

Fig.3 PGA iteration processing results of cooperative target. (a) 1 time; (b) 5 times; (c) 20 times

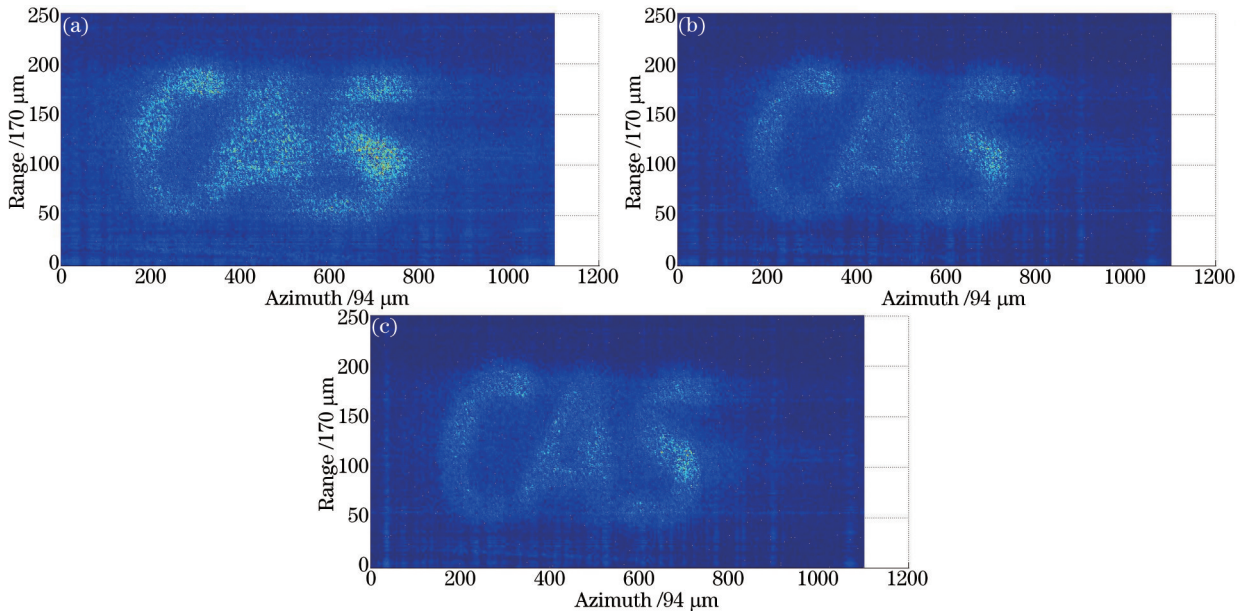


图4 漫反射目标的PGA迭代处理结果。(a) 1次; (b) 5次; (c) 20次

Fig.4 PGA iteration processing results of diffuse target. (a) 1 time; (b) 5 times; (c) 20 times

5 结 论

报道了一个 12.9 m 距离上的 SAL 实验室高分辨率成像结果, 获得了照片级的高质量图像。SAL 图像方位合成孔径分辨率超过衍射极限 100 倍。采用详细的图像数据真实演示了 SAL 图像的聚焦过程, 展示了原始数据、距离压缩像、方位合成孔径像和 PGA 聚焦像的不同特性, 尤其演示了 PGA 处理在高质量 SAL 图像聚焦中的重要作用。在十几米的目标距离上, 详细展示 SAL 高分辨率成像特性的实验结果还不多, 同时展示了合作目标和扩展目标的高分辨率 SAL 成像结果。

反光条制作的合作目标是测试 SAL 成像性能的一种常用实验目标, 在现实场景中, 一般不存在。实际应用中, SAL 面对的是具有复杂回波特性和运动特性的 3D 非合作目标, 获得的原始数据将具有更复杂的相位史特性, 因此, 在 SAL 的工程应用中, PGA 将是不可或缺的成像处理步骤。

实验室环境相对安静,没有大气干扰,成像质量应该是工程应用SAL成像的极限。因此,所报道的12.9 m目标距离的SAL成像数据,包括可能出现的更远距离的实验室SAL成像数据,对于SAL技术发展,都有参考价值。

参 考 文 献

- 1 P F McManamon. Review of lidar: A historic, yet emerging, sensor technology with rich phenomenology[J]. *Opt Eng*, 2012, 51(6): 060901.
- 2 Liu Liren. A new way of high resolution remote sensing—synthetic aperture imaging lidar[J]. *Science*, 2014, 66(6): 25–29.
刘立人. 高分辨率遥感新途径—合成孔径激光成像雷达[J]. *科学*, 2014, 66(6): 25–29.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 S Crouch, Z W Barber. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture lidar techniques[J]. *Opt Express*, 2012, 20(22): 24237–24246.
- 6 Z W Barber, J R Dahl. Synthetic aperture imaging demonstrations and information at very low return levels[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(24): 5531–5537.
- 7 S Turbide, L Marchese, M Terroux, *et al.*. An all-optronic synthetic aperture lidar[C]. *Proc SPIE*, 2012, 8542: 854213
- 8 Liren Liu. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging lidars and laboratory-space experimental demonstrations (Invited)[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(4): 579–599
- 9 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.
- 10 Liu Liren. Principle of self-interferometric synthetic aperture Lidar for 3D imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0528001
刘立人. 自干涉合成孔径激光三维成像雷达原理[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0528001
- 11 Sun Zhiwei, Hou Peipei, Zhi Yanan, *et al.*. Optical image processing for synthetic aperture imaging Lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0628004
孙志伟,侯培培,职亚楠,等. 合成孔径激光成像雷达的光学成像处理[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0628004
- 12 Lu Dong, Sun Jianfeng, Zhou Yu, *et al.*. Analysis on detection capability of wide field receiving synthetic aperture imaging Lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0728003
卢 栋,孙建锋,周 煜,等. 大视场接收合成孔径激光成像雷达探测能力分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0728003
- 13 Z Yang, J Wu, Z Zhao, *et al.*. Investigation on layover imaging in synthetic aperture lidar[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2013, 6(3): 251–260.
- 14 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.
- 15 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验证[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900112.
- 16 J Ricklin, M Dierking, S Fuhrer, *et al.*. Synthetic aperture lidar for tactical imaging [J]. *DARPA Strategic Technology Office*, 2007.
- 17 D Filgas, D Rockwell, K Spariosu. Raytheon achieves advanced radar functionality at optical wavelengths via coherent lidar[J]. *Raytheon Technology Today*, 2008, 1: 13–15.
- 18 J R Buck, B W Krause, A I Malm, *et al.*. Synthetic aperture imaging at optical wavelength[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*. Optical Society of America, 2009: PThB3.
- 19 Krause B, Buck J, Ryan C, *et al.*. Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]. *CLEO: Science and Innovations*. Optical Society of America, 2011: PDPB7.
- 20 Zhu Luan, Jianfeng Sun, Yu Zhou, *et al.*. Downlooking synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its experiments over 1.2km outdoor[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(11): 111101.
- 21 Zhilong Zhao, Jin Wu, Yuanyuan Su, *et al.*. Three-dimensional imaging interferometric synthetic aperture lidar[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(9): 091101.
- 22 S Turbide, L Marchese, M Terroux, *et al.*. Synthetic aperture lidar concept for infrastructure monitoring[C]. *SPIE*, 2014, 9250: 92500B.
- 23 P H Eichel, D E Wahl, D C Ghiglia, *et al.*. Phase gradient autofocus—a robust tool for high resolution SAR phase correction [J]. *Aerospace and Electronic Systems*, *IEEE Transactions on*, 1994, 30(3): 827–835.

栏目编辑: 苏 岑