

本振增强直视合成孔径激光成像雷达的二维成像实验

张国^{1,2}, 孙建锋¹, 周煜¹, 卢智勇¹, 李光远^{1,2}, 许蒙蒙^{1,2}, 张波^{1,2}, 劳陈哲^{1,2}, 贺红雨^{1,2}

¹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信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 本振增强直视合成孔径激光成像雷达(SAIL)发射两束同轴且偏振正交的光束,采用外差接收方式接收回波信号,在数据处理过程中对两束偏振正交回波光束携带的目标信号自差,以达到消除大气扰动、运动平台振动和雷达系统本身产生的相位扰动的目的。对该雷达系统的二维成像实验装置进行了描述,并给出了该雷达系统对二维目标成像的信号获取过程和数据处理过程。实验实现了 $3.6\text{ mm}\times 3.6\text{ mm}$ 的分辨率,并对两个二维点阵目标进行成像,取得了良好的成像对比度,证明了该雷达对二维目标成像的可行性。

关键词 遥感; 传感器; 激光雷达; 合成孔径雷达; 相干探测; 匹配滤波

中图分类号 TN958

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.062802

Two-Dimensional Imaging Experiments in Enhanced Self-Heterodyne Synthetic Aperture Imaging Ladar

Zhang Guo^{1,2}, Sun Jianfeng¹, Zhou Yu¹, Lu Zhiyong¹, Li Guangyuan^{1,2},

Xu Mengmeng^{1,2}, Zhang Bo^{1,2}, Lao Chenzhe^{1,2}, He Hongyu^{1,2}

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

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

Abstract Enhanced self-heterodyne synthetic aperture imaging ladar (SAIL) with a transmitter of two coaxial polarization-orthogonal beams, uses heterodyne receiver to receive echo signal, self-heterodynes the two polarization-orthogonal echo signals during signal processing to eliminate the phase error generated by atmospheric turbulence, mechanical trembling and ladar system. A laboratory demonstration of enhanced self-heterodyne SAIL for two-dimensional (2D) target is proposed, the data collection and the image processing of this demonstration is mathematically detailed, and its imaging experiments for 2D target are also presented. The achieved imaging resolutions are $3.6\text{ mm}\times 3.6\text{ mm}$, and two point-array targets are also reconstructed with high contrast. The experimental results prove that the enhanced self-heterodyne SAIL is feasible for 2D imaging.

Key words remote sensing; sensors; ladar; synthetic aperture radar; coherence detection; matched filtering

OCIS codes 280.3640; 280.6730; 100.3010; 100.2000

1 引言

合成孔径激光成像雷达(SAIL)来源于微波合成孔径激光雷达(SAR),可以用小口径光学天线实现远距离高分辨二维成像。侧视 SAIL 以侧视为必

要工作条件,实施距离向的测距成像,并在方位向实施孔径合成。目前,关于侧视 SAIL 在实验室^[1-11]以及机载^[12-13]方面的二维成像均有报道。侧视 SAIL 发射并接收单束信号光,受大气扰动、运动平台振动和雷达系统本身相位扰动的影响很大,严重

收稿日期: 2017-11-09; 收到修改稿日期: 2017-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(61605226,61505233)

作者简介: 张国(1991—),男,博士研究生,主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: zhangguo@siom.ac.cn

导师简介: 孙建锋(1978—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光雷达、激光通信、激光应用技术方面的研究。

E-mail: sunjianfengs@163.com(通信联系人)

降低了其性能。直视 SAIL 采用波前变换原理对目标投射两个偏振正交且同轴的光束,并能进行自差接收,同轴光束自差接收大大降低了大气、运动平台、雷达系统等相位扰动的影响^[14]。直视 SAIL 在实验室^[15-17]及机载^[18]方面的成像均有报道。在对远距离目标进行探测时,直视 SAIL 的回波信号弱,自差接收方式的接收信噪比低,成像质量差。提高激光器的输出功率可以在一定程度上提高回波信号的强度,但在对远距离目标进行探测时,需要很高的激光器输出功率,这会损坏直视 SAIL 内的光学元件。通过使用雪崩光电二极管等具有高光电转换系数的探测器可以提高对弱信号的探测能力,但在对远距离目标进行探测时,回波信号弱,容易受到背景光噪声的影响,接收信噪比低。因此,在对远距离目标进行探测时,直视 SAIL 的使用受限。外差接收方式使用强本振光与信号光干涉,可以提高信号光的强度,并且本振光不与背景光干涉,可以极大地提高接收信噪比,适用于接收远距离目标的回波信号^[19]。

本课题组^[20]提出了一种用于对远距离目标进行高分辨成像的本振增强直视 SAIL,其基本原理与直视 SAIL 相似,利用两个同轴且偏振正交的光束照明目标。与直视 SAIL 不同的是,本振增强直

视 SAIL 采用外差接收方式分别接收两个偏振正交的光束,用本振光与信号光进行干涉,提高了接收信噪比,并对采集到的两路信号在数据处理过程中进行相位相减,消除大气扰动、运动平台振动和雷达本身相位扰动的影响。按照本振增强直视 SAIL 的原理,设计了一个本振增强直视 SAIL 装置,并得到了单点目标的成像结果,与相同实验条件下的直视 SAIL 相比,成像信噪比得到了很大提高。报道了基于该装置的进一步的研究进展,不仅对二维目标的成像过程进行了描述,还在实验室条件下对二维目标进行了成像实验。

2 二维目标成像的基本原理

本振增强直视 SAIL 装置与文献[20]中的本振增强直视 SAIL 相似,如图 1 所示,不同的是发射装置只采用两个平凹柱面镜 L1 和 L2,它们仅对其中一束偏振光进行内光场调制(文献[20]中用 4 个柱面镜对两束偏振正交的光束均进行内光场调制)。激光器出射的激光经过 1×2 保偏光纤耦合器后分为信号光和本振光,信号光经光纤放大器放大后出射到发射装置上,本振光经声光移频器移频后出射到接收装置上。柱面镜 L1 与 L2 位于发射主镜前焦面上,L1 沿着 x 方向(交轨向)移动,产生正交方

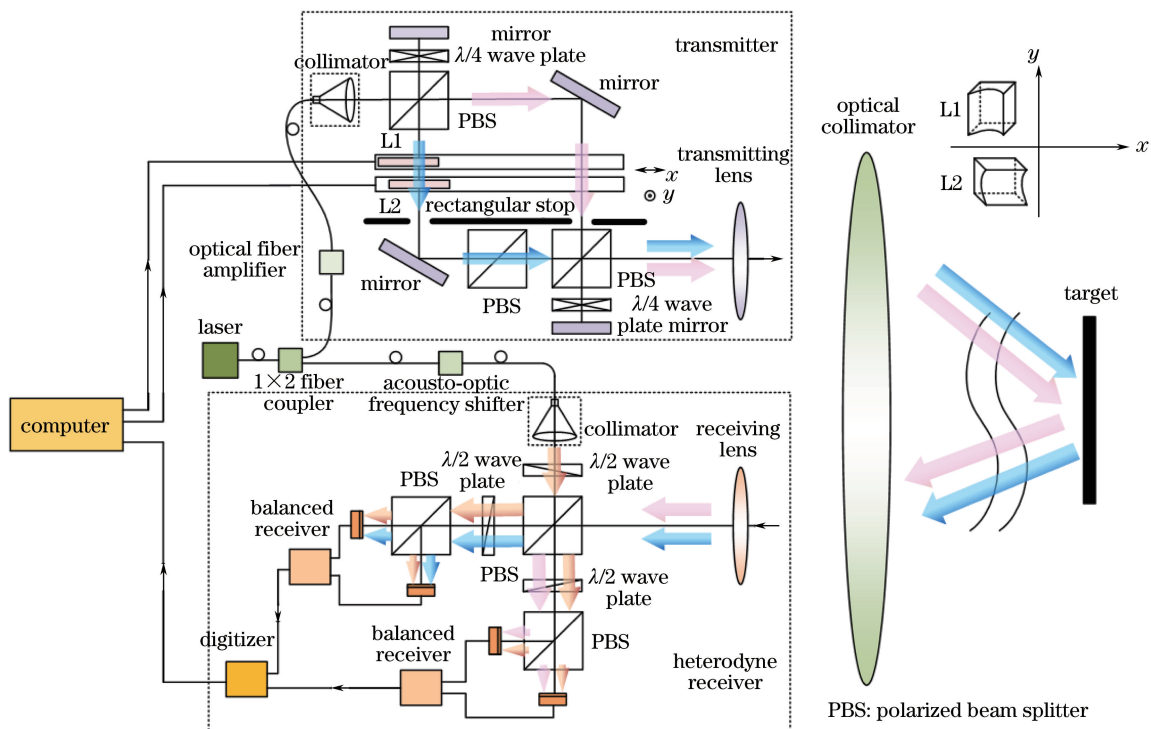


图 1 本振增强直视 SAIL 原理图

Fig. 1 Schematic of enhanced self-heterodyne SAIL

向的二次相位历程, L2 沿着 y 方向(顺轨向)移动, 产生顺轨向的二次相位历程。目标位于平行光管后焦面上, 其位置相对雷达平台不动, 雷达对目标进行二维扫描成像。

2.1 信号获取过程

在发射主镜前焦面处, 两束偏振正交的信号光的内光场可分别表示为^[14]

$$e_{\text{H}}^0(x, y) = C \times \text{rect} \frac{x}{L_x} \text{rect} \frac{y}{L_y} \cdot \exp \left\{ -j \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{(x - v_x t_f)^2}{R_1} + \frac{(y - v_y t_s)^2}{R_1} \right] \right\}, \quad (1)$$

$$e_{\text{V}}^0(x, y) = C \times \text{rect} \frac{x}{L_x} \text{rect} \frac{y}{L_y}, \quad (2)$$

式中: R_1 为柱面镜 L1 与 L2 的等效曲率半径; L_x 与 L_y 为矩形光阑的口径; t_f 为快时间; t_s 为慢时间; v_x 为交轨向扫描速度; v_y 为顺轨向扫描速度; C 为光场的场强因子及其传播因子; λ 为激光波长。

可以分析一个目标点 (x_p, y_p) 的成像来解释整个目标的成像过程, 目标点 (x_p, y_p) 反射信号光, 两束偏振正交的信号光在接收天线面上的回波接收信号分别为^[14]

$$e_{\text{H}}^r(x, y : x_p, y_p : t_f, t_s) = C_{\text{H}} \exp(j\varphi_{\text{H}}), \quad (3)$$

$$e_{\text{V}}^r(x, y : x_p, y_p : t_f, t_s) = C_{\text{V}} \exp(j\varphi_{\text{V}}), \quad (4)$$

其中

$$C_{\text{H}} = C \times \text{rect} \frac{x_p}{ML_x} \text{rect} \frac{y_p}{ML_y}, \quad (5)$$

$$C_{\text{V}} = C \times \text{rect} \frac{x_p}{ML_x} \text{rect} \frac{y_p}{ML_y}, \quad (6)$$

$$\varphi_{\text{H}} =$$

$$-\frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{(x_p - Mv_x t_f)^2}{M^2 R_1} + \frac{(y_p - Mv_y t_s)^2}{M^2 R_1} \right] + \Delta\varphi_{\text{H}}, \quad (7)$$

$$\varphi_{\text{V}} = \Delta\varphi_{\text{V}}, \quad (8)$$

式中: M 为放大倍数; $\Delta\varphi_{\text{H}}$ 与 $\Delta\varphi_{\text{V}}$ 分别为两束偏振正交的信号光受到大气、运动平台、雷达系统的相位干扰。发射主镜焦距为 f_t , 平行光管焦距为 f_c , 平行光管将发射主镜前焦面上的发射光场映射到目标面上, 产生的放大倍数为 $M = f_c / f_t$ 。假设本振光场在探测器光敏面上均匀分布, 本振光场可以表示为

$$e_{\text{LO}} = C_{\text{LO}} \exp[j(\varphi_{\text{LO}} + \omega_{\text{IF}} t)], \quad (9)$$

式中: C_{LO} 与 φ_{LO} 分别为本振光的振幅与初始相位; ω_{IF} 为经过移频器产生的频移。

回波信号光经过接收主镜聚焦到平衡探测器上与本振光干涉, 两个平衡探测器的输出信号分别为

$$U_{\text{H}}(x_p, y_p : t_f, t_s) =$$

$$C_{\text{HBD}} \cos[\varphi_{\text{H}} + \Delta\varphi_{\text{F}} - (\varphi_{\text{LO}} + \omega_{\text{IF}} t)], \quad (10)$$

$$U_{\text{V}}(x_p, y_p : t_f, t_s) =$$

$$C_{\text{VBD}} \cos[\varphi_{\text{V}} + \Delta\varphi_{\text{F}} - (\varphi_{\text{LO}} + \omega_{\text{IF}} t)], \quad (11)$$

式中: C_{HBD} 与 C_{VBD} 为考虑了所有积分和光电变换的系统常数, 包括信号光与本振光的振幅等常数; $\Delta\varphi_{\text{F}}$ 为接收主镜聚焦信号光到探测器上所产生的相位延迟。

2.2 数据处理过程

对两个平衡探测器上输出的信号进行采集, 在数字信号处理过程中, 对采集的信号进行移频, 消除频移 ω_{IF} , 并将复数化后的 $U_{\text{H}}(x_p, y_p : t_f, t_s)$ 与复数化后的 $U_{\text{V}}(x_p, y_p : t_f, t_s)$ 进行相位相减, 得到

$$U(x_p, y_p : t_f, t_s) = U_{\text{H}}(x_p, y_p : t_f, t_s) \times$$

$$U_{\text{V}}^*(x_p, y_p : t_f, t_s) = C_{\text{HBD}} C_{\text{VBD}} \exp \left\{ -j \frac{\pi}{\lambda} \times \left[\frac{(x_p - Mv_x t_f)^2}{M^2 R_1} + \frac{(y_p - Mv_y t_s)^2}{M^2 R_1} \right] \right\}. \quad (12)$$

两束同轴信号光具有相同的发射接收光路, 因此 $\Delta\varphi_{\text{H}} \approx \Delta\varphi_{\text{V}}$, 即具有自动消除相位干扰的能力。对相位相减后的信号在交轨向和顺轨向均进行二次项相位历程的共轭二次项相位匹配滤波成像^[8,14], 可以得到点目标的最终成像结果:

$$I_p(x_p, y_p) = C_{\text{HBD}} C_{\text{VBD}} \exp \left\{ -j \frac{\pi}{\lambda} \times \right.$$

$$\left. \left[\frac{(x_p - Mv_x t_f)^2}{M^2 R_1} + \frac{(y_p - Mv_y t_s)^2}{M^2 R_1} \right] \right\} \otimes$$

$$\exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{(Mv_x t_f)^2}{M^2 R_1} + \frac{(Mv_y t_s)^2}{M^2 R_1} \right] \right\} =$$

$$S(x, y) \delta(x - x_p, y - y_p), \quad (13)$$

式中: $S(x, y)$ 为相干点扩展函数。显然目标点成像中心位置为 (x_p, y_p) , 最终完成了目标点的成像。这样, 一个二维目标可以表示为

$$I(x, y) = \sum_p I_p(x_p, y_p). \quad (14)$$

本振增强直视 SAIL 的成像分辨率可以采用经匹配滤波后点目标的相干点扩展函数在交轨向和顺轨向的最小值全宽度表示^[14], 交轨向分辨率为

$$d_x = 2\lambda MR_1 / (v_x T_f), \quad (15)$$

顺轨向分辨率为

$$d_y = 2\lambda MR_1 / (v_y T_s), \quad (16)$$

式中: T_f 为交轨向扫描时间; T_s 为顺轨向扫描时间。

3 成像实验

根据图 1 所示光路搭建了实验室二维目标成像实验装置, 如图 2 所示。

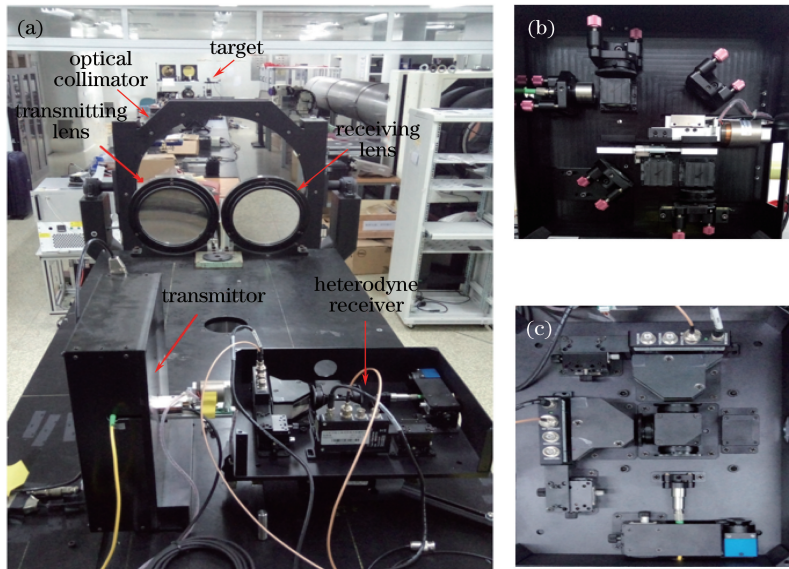


图 2 本振增强直视 SAIL 实验装置实物图。(a)实验系统总体图;(b)发射装置;(c)外差接收装置

Fig. 2 Structure diagram of built enhanced self-heterodyne SAIL.

(a) General view of experimental system; (b) transmitter; (c) heterodyne receiver

在实验中,激光器波长为 1550 nm,输出功率为 27 dBm。本振光功率为 3 dBm,频移为 10 kHz。发射主镜与接收主镜的口径均为 200 mm,焦距均为 1200 mm。矩形光阑的尺寸为 7 mm×7 mm。平衡探测器选用 Thorlabs 公司的 PDB210C,光敏面直径为 3 mm。实验中由于实验场地限制,使用口径为 600 mm、焦距为 15 m 的平行光管模拟远场成像。柱面镜 L1 与 L2 的焦距为 150 mm。柱面镜

L1 的扫描速度为 5 mm/s,扫描时间为 1 s,交轨向扫描长度为 5 mm,交轨向理论分辨率为 0.58 mm。柱面镜 L2 的扫描速度为 0.003 mm/s,扫描时间为 1600 s,合成孔径长度为 4.8 mm,顺轨向理论分辨率为 0.61 mm^[14]。

3.1 单点目标成像实验

实验中遮住反射镜只留下 0.3 mm 的孔作为点目标。图 3(a)为点目标在交轨向的二次相位历程,

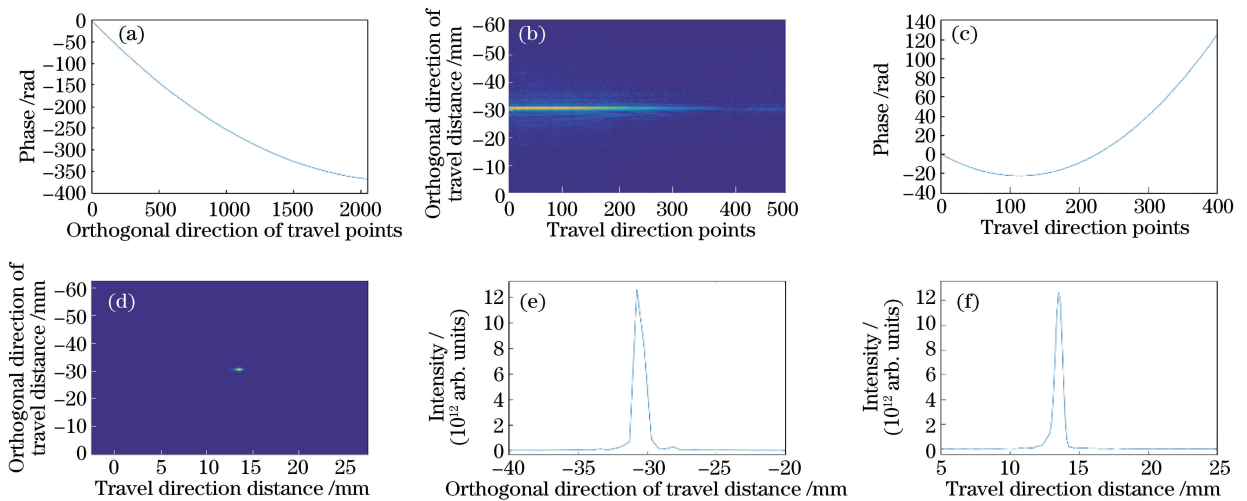


图 3 点目标的重构过程。(a)交轨向二次相位;(b)交轨向匹配滤波聚焦后图像;(c)顺轨向二次相位;

(d)顺轨向匹配滤波聚焦后的重构图像;(e)交轨向点扩展函数;(f)顺轨向点扩展函数

Fig. 3 Reconstructed process of a point target. (a) Quadratic phase in the orthogonal direction of travel;

(b) image compressed by a match filter in orthogonal direction of travel; (c) quadratic phase in the travel direction;

(d) reconstructed point image by a match filter in travel direction; (e) point spread function in the orthogonal direction of travel;

(f) point spread function in the travel direction

所得点目标回波数据经过交轨向匹配滤波后得到图 3(b)。图 3(c)为经过交轨向匹配滤波后点目标回波数据在顺轨向的二次相位历程,图 3(d)为经过顺轨向匹配滤波后点目标最终图像。该点目标图像在交轨向和顺轨向的最小全宽度均为 3.6 mm,即实验得到的分辨率为 $3.6 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$,如图 3(e)和图 3(f)所示。

3.2 二维点阵目标成像实验

增加目标点数,组成一个十字形状,如图 4(a)所

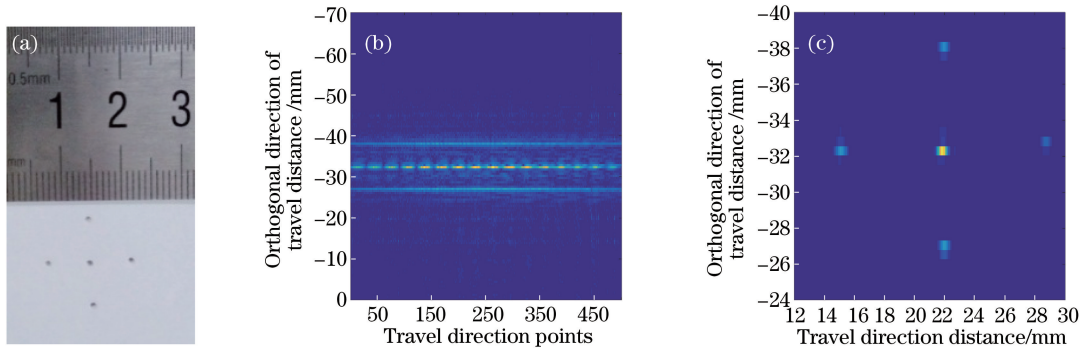


图 4 点阵十字目标重构过程。(a)实物图;(b)交轨向匹配滤波聚焦后图像;(c)顺轨向匹配滤波聚焦后得到的重构图像

Fig. 4 Reconstruction process of point-array plus sign. (a) Actual image; (b) image compressed by a match filter in orthogonal direction of travel; (c) reconstructed point-array plus image by a match filter in travel direction

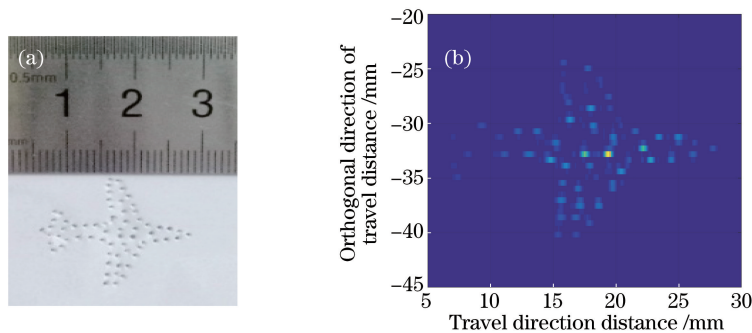


图 5 点阵飞机目标重构过程。(a)实物图;(b)重构图像

Fig. 5 Reconstruction process of planar point-array airplane. (a) Actual image; (b) reconstructed image

4 结 论

对本振增强直视 SAIL 进行了实验室二维目标成像实验,得到该系统的成像分辨率为 $3.6 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm}$,实验结果表明该方法对二维目标的成像是可行的,并且具有很高的成像对比度。本振增强直视 SAIL 具有自动消除大气、运动平台和雷达系统产生的相位扰动的能力,用外差接收方式提高接收信噪比对远距离目标进行高分辨率二维成像具有很广阔的应用前景。实验结果对本振增强直视 SAIL 的实用化具有重要的参考意义。

示。图 4(a)中相邻两点的水平和垂直间距均为 7 mm。图 4(b)为经过交轨向匹配滤波后所得图像。图 4(c)为经过顺轨向匹配滤波后所得目标最终图像,可以测得相邻两点的水平和垂直间距均为 7 mm,与实际目标一致。另外,还对一个点阵飞机目标进行二维成像实验,目标实物图如图 5(a)所示,所得最终成像结果如图 5(b)所示。在图 5(b)中,图像中央点的强度明显高于图像边缘点的强度,这主要是由探测器光敏面上外差效率不均匀导致的^[21]。

参 考 文 献

- [1] Bashkansky M, Lucke R L, Funk F, *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 lidar: laboratory demonstration and signal processing[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(35): 7621-7629.
- [3] Buell W, Marechal N, Buck J, *et al.* Demonstrations of synthetic aperture imaging lidar[C]. *SPIE*, 2005, 5791: 152-166.

- [4] Xing M D, Guo L, Tang Y, *et al.* Design on the experiment optical system of synthetic aperture imaging lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 290-294.
刑孟道, 郭亮, 唐禹, 等. 合成孔径成像激光雷达实验系统设计 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 290-294.
- [5] Zhou Y, Xu N, Luan Z, *et al.* Two-dimensional imaging experiment of a point target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 566-568.
周煜, 许楠, 栾竹, 等. 实验室合成孔径激光雷达点目标二维成像实验 [J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 566-568.
- [6] 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.
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.
- [7] Crouch S, Barber Z W. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture lidar techniques [J]. *Optics Express*, 2012, 20 (22): 24237-24236.
- [8] Dai E W, Sun J F, Yan A M, *et al.* Demonstration of a laboratory Fresnel telescope synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0528003.
戴恩文, 孙建锋, 闫爱民, 等. 菲涅耳望远镜合成孔径激光成像雷达实验室验证 [J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0528003.
- [9] Wu J, Yang Z S, Zhao Z L, *et al.* Synthetic aperture lidar imaging with one-way far-field diffraction [J]. *Journal of Infrared & Millimeter Waves*, 2013, 32 (6): 514-525.
吴谨, 杨兆省, 赵志龙, 等. 单程远场衍射合成孔径激光雷达成像实验室演示 [J]. *红外与毫米波学报*, 2013, 32(6): 514-525.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Krause B W, Buck J, Ryan C, *et al.* Synthetic aperture lidar flight demonstration [C]. *Conference on Laser Science to Photonic Applications*, 2011: 12135067.
- [13] Zhang K S, Pan J, Wang R, *et al.* Study of wide swath synthetic aperture lidar imaging technology [J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 1-10.
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.
- [14] Liu L R. 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.
- [15] Luan Z, Sun J F, Zhou Y, *et al.* Down-looking synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its experiments over 1.2 km outdoor [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(11): 111101.
- [16] 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.
- [17] Zhang N, Lu Z Y, Sun J F, *et al.* Laboratory demonstration of spotlight-mode down-looking synthetic aperture imaging lidar [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(9): 091001.
- [18] Lu Z 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.
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.
- [19] DeLange O E. Optical heterodyne detection [J]. *IEEE Spectrum*, 1968, 5(10): 77-85.
- [20] Zhang G, Sun J F, Zhou Y, *et al.* Imaging process and signal-to-noise ratio improvement of enhanced self-heterodyne synthetic aperture imaging lidar [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(10): 102801.
- [21] Cohen S C. Heterodyne detection: phase front alignment, beam spot size, and detector uniformity [J]. *Applied Optics*, 1975, 14(8): 1953-1959.