

直视逆合成孔径激光成像雷达外场实验

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

¹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;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 进行了 1.8 km 和 3.4 km 的直视逆合成孔径激光成像雷达外场实验, 给出了远距离成像模式下考虑相位延时的非线性校正算法。实验中, 目标为放置在无人机上的角锥和包裹有反射纸的无人机。通过交轨向包络对齐和顺轨向相位补偿算法, 先后得到了不同成像距离下的角锥目标图像和 1.8 km 成像距离下的无人机图像。成像距离为 1.8 km 时二维分辨率达到了 7.2 mm×5.8 mm, 成像距离为 3.4 km 时二维分辨率达到了 12.7 mm×9.2 mm。

关键词 大气光学; 直视逆合成孔径; 激光成像雷达; 空间相位调制; 外场实验

中图分类号 O438

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0401001

Outdoor Experiment of Down-Looking Inverse Synthetic Aperture Imaging Lidar

Li Guangyuan^{1,2}, Lu Zhiyong¹, Zhou Yu¹, Sun Jianfeng¹, Xu Qian¹,
Lao Chenzhe^{1,2}, He Hongyu^{1,2}, Zhang Guo^{1,2}

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing 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 Outdoor experiments of down-looking inverse synthetic aperture imaging lidar at 1.8 km and 3.4 km are processed. A nonlinear correction algorithm is given under the remote imaging mode, in which the phase delay cannot be neglected. In the experiment, the targets are pyramids put in the unmanned aerial vehicles and the unmanned aerial vehicles with retro-reflective material. The images of pyramids in different imaging distances and the unmanned aerial vehicles at 1.8 km are obtained through the range bin alignment algorithm in the orthogonal direction and phase compensation algorithm in the azimuthal direction. The two-dimensional resolutions reach 7.2 mm×5.8 mm at 1.8 km and 12.7 mm×9.2 mm at 3.4 km.

Key words atmospheric optics; down-looking inverse synthetic aperture; imaging lidar; spatial phase modulation; outdoor experiment

OCIS codes 010.0280; 280.6730; 100.3010

1 引 言

合成孔径激光成像雷达(SAIL)的成像原理来源于微波段的合成孔径雷达(SAR),它是一种高分辨率成像雷达,通过小天线合成大天线来获得高分辨率,在对地观测、对空监视和空间探测等领域具有

广泛的应用价值。SAIL自问世以来,取得了快速的发展,国内外都报道了众多的SAIL成像结果^[1-9]。

SAIL针对静止目标进行成像,而运动目标成像同样具有重要的军事应用价值。逆合成孔径雷达(ISAR)是在SAR技术基础上发展起来的另一种成

收稿日期: 2017-09-20; 收到修改稿日期: 2017-10-29

基金项目: 国家自然科学基金(61605226, 61505233)

作者简介: 李光远(1990—),男,博士研究生,主要从事合成孔径激光成像雷达数字信号处理方面的研究。

E-mail: ligy1990@163.com

导师简介: 孙建锋(1978—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事空间激光通信和合成孔径激光成像雷达技术方面的研究。E-mail: sunjianfengs@163.com(通信联系人)

像雷达机制^[10],是雷达成像的重点发展方向之一,旨在解决运动目标的成像问题,能从固定平台对飞机、导弹、卫星、舰船、天体等运动目标进行全天候、全天时、远距离精细成像,在战略防御、反卫星、战术武器以及雷达天文学中有着重要的应用价值。

逆合成孔径激光成像雷达(ISAIL)采用雷达位置固定不动的成像方式,通过物体的运动(旋转或平动)实现孔径合成。ISAIL存在SAIL的一些固有问題,比如:易受大气扰动的影响,需要采用氰化氢光谱滤波触发控制技术保证顺轨向初始相位稳定、匹配雷达激光发射角和接收视场匹配等。为了克服上述困难,中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息技术研究中心基于抛物波前差动扫描和自差探测复数化接收的方法,提出了一种直视SAIL,并进行了室内、室外机载实验以及聚束模式实验^[11-16]。直视ISAIL的成像原理与直视SAIL一致,主要是基于抛物波前差动扫描和自差探测接收原理提出的,具有大视场、克服大气湍流的优势^[16]。同时,由于直视SAIL利用转台模拟孔径合成,转台在转动过程中会存在转速不稳、平台振动等现象,依据直视SAIL的原理^[11],这些微小的振动误差作用到目标面上会被放大 M 倍,增加了算法处理的复杂度。但是,直视ISAIL由于平台保持静止,主要依靠目标的运动实现孔径合成,故其误差仅与目标的飞行姿态有关,与直视SAIL存在的误差相比,直视ISAIL存在的误差对成像的影响较小。

目前国内外关于ISAR的研究较多^[17-21],但是对光波段的外场远距离ISAIL报道相对较少^[22-23],2016年中国科学院电子学研究所进行了地面场外1.1 km的ISAIL实验,通过旋转目标的方式获得了角锥目标的成像结果^[22],得到的二维分辨率为 $4\text{ cm}\times 1.8\text{ cm}$ 。本文进行了远距离情况下目标平动的直视ISAIL外场实验验证,在更远的距离(1.8 km和3.4 km)进行了地对空成像,得到了合作目标成像结果和清晰的角锥图像结果。在距离为1.8 km的情况下,所得二维分辨率为 $7.2\text{ mm}\times 5.8\text{ mm}$;在距离为3.4 km的情况下,所得二维分辨率为 $12.7\text{ mm}\times 9.2\text{ mm}$ 。由于成像距离较远,接收相位相对于发射相位的时间延迟不能忽略,本文给出了存在相位延迟情况下的交轨向非线性校正算法。同时,通过交轨向包络对齐和顺轨向相位补偿,得到了清晰的角锥图像和无人机图像,验证了直视ISAIL广阔的应用前景。

2 直视 ISAIL 的原理结构

直视ISAIL的示意图和原理图分别如图1(a)和图1(b)所示。激光器发出的线偏振光经过 $1/2$ 波片(B1)以 45° 入射至波前变换模块,波前变换模块主要由2块偏振分光棱镜,2块柱面镜L1、L2,4块 $1/4$ 波片H1、H2、H3、H4,1块半波片B2,1块反射镜R以及1块高速振镜(M1)组成。线偏振光经波前变换模块后被调制成交轨向具有相反抛物波前差的两束正交偏振光束,其中交轨向的波前差由振镜进行调制,最后由发射主镜发射到远场处,交轨向调制为正弦相位调制。扫描振镜位于发射望远镜镜的前焦面位置。顺轨向相位由柱面镜(L1、L2)进行调制,并由发射主镜投射到远场目标面处。

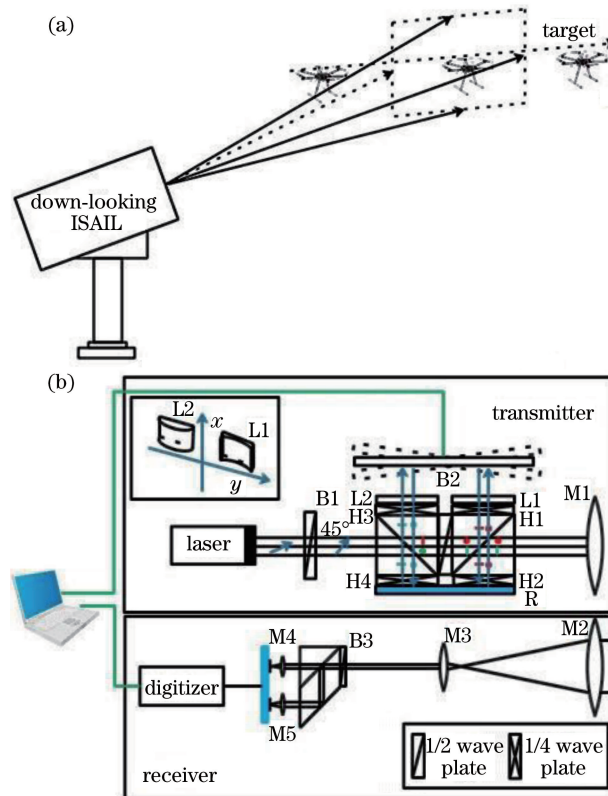


图1 直视ISAIL的(a)示意图和(b)原理图

Fig. 1 (a) Sketch map and (b) principle diagram of down-looking ISAIL

内发射光斑经过发射主镜,在远场物体处被放大了 M 倍, $M=Z/F_M$,其中 Z 为成像距离, F_M 为发射主镜的焦距。发射光斑经过远场物体上的一点 (x_p, y_p) 之后,由接收望远镜(M2、M3)接收,接着经过半波片B3旋转 45° ,再经 1×2 180° 光学桥接器,最后由光电探测器将光信号转换为电信号^[11]。

$$e(x_p, y_p; t_f, t_s) = c' \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{L_y}\right) \times \text{rect}\left(\frac{t_f + t_\tau}{T_f}\right) \text{rect}\left(\frac{t_s}{T_s}\right) \times \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda} \cdot 4(x_p + Mx_1)A \sin(2\pi f t_f)\right] \times \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda} \frac{(y_p - \beta t_s)^2}{R_1/2}\right], \quad (1)$$

式中 c' 为在发射、接收、光电转换中的系数; $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数; $L_x = ML_x^{\text{in}}, L_y = ML_y^{\text{in}}, L_x^{\text{in}} \times L_y^{\text{in}}$ 为内发射场光斑尺寸; $R_1 = M^2 R_1^{\text{in}}$, 其中 R_1^{in} 为等效二次曲率半径; $A = A^{\text{in}}/M^2, A^{\text{in}}$ 为振镜振动最大角度; β 为顺轨向目标移动速度; T_s 为顺轨向移动时间宽度; t_s 为顺轨向慢时间, 满足 $-T_s/2 \leq t_s \leq T_s/2$; t_f 为扫描快时间; t_τ 为远距离情况下的时间延时; T_f 为交轨向采样时间宽度; x_1 表示调制位移, 满足 $x_1 > L_x^{\text{in}}/2$; $(x_p + Mx_1)A \sin(2\pi f t_f)$ 表示与交轨向距离有关的相位, f 为振镜振动频率。

如图 2 所示, 其中蓝色相位表示发射光调制相位, 红色相位表示接收到的相位。由于光触发装置采用发射端振镜位置光触发, 故在采样时间宽度之内接收到的相位与发射光相位相比存在一定的延时。延时可以表示为

$$t_\tau = 2Z/c, \quad (2)$$

式中 c 为真空中的光速。对应的交轨向采样时间范围为

$$-\frac{T_f}{2} - t_\tau \leq t_f \leq \frac{T_f}{2} - t_\tau. \quad (3)$$

令 $-T_1 = -T_f/2 - t_\tau, T_2 = T_f/2 - t_\tau$, 则此时

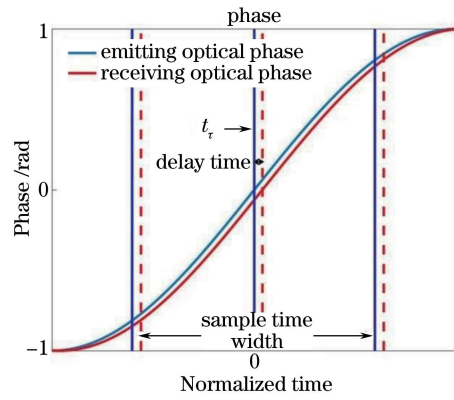


图 2 发射/接收相位对比

Fig. 2 Comparison of emitting/receiving phase 的线性相位斜率为

$$\zeta = A[\sin(\pi f T_2) + \sin(\pi f T_1)]/(T_1 + T_2). \quad (4)$$

因为采样率为 F_s , 则采样点数为 $F_s T_f$ 。采样时间为

$$t_{f,n} \in \left(-\frac{T_1}{2}, -\frac{T_1}{2} + \frac{1}{F_s}, \dots, \frac{T_2}{2} - \frac{1}{F_s}, \frac{T_2}{2}\right). \quad (5)$$

根据相位相等原理, 对时间进行变换, 得到线性相位下的非均匀时间。离散化后的采样时间为

$$t'_{f,n} \in \frac{T_f[\sin(2\pi f t_{f,n}) - \sin(\pi f T_2)]}{\sin(\pi f T_1) + \sin(\pi f T_2)} + T_2. \quad (6)$$

利用非线性插值算法对坐标进行处理, 可以得到与目标点位置有关的线性相位为

$$V[\phi(t_{f,n})] \xrightarrow{\text{resample}} V[\phi(t'_{f,n})], \quad (7)$$

式中 $V[\cdot]$ 为对应相位上的函数值, $\phi(t_{f,n})$ 为 $t_{f,n}$ 时对应的相位, $\phi(t'_{f,n})$ 为 $t'_{f,n}$ 时对应的相位。交轨向经过傅里叶变换、顺轨向经过匹配滤波后, 得到的目标图像^[24]为

$$I(\xi, y) = c' \mathcal{F}_{t_f \rightarrow \xi} \left\{ \text{rect}\left(\frac{t_f + t_\tau}{T_f}\right) \exp\left[j \frac{4\pi(x_p + Mx_1)A(\zeta t_f + \phi_s)}{\lambda}\right] \right\} \times \left\{ \text{rect}\left(\frac{t_s}{T_s}\right) \exp\left[j \frac{\pi(y_p - \beta t_s)^2}{\lambda R_1/2}\right] \otimes \text{rect}\left(\frac{t_s}{T_s}\right) \exp\left[-j\pi \frac{(\beta t_s)^2}{\lambda R_1/2}\right] \right\}, \quad (8)$$

式中 ζ 为变换后的频率线性相位斜率, ϕ_s 为线性变化过程中的常数, \otimes 表示卷积运算。

由(5)式可知, 当 $T_{f_1} = T_{f_2}$ 时, 在 F_s 下, 时间延迟对应的交轨向采样点数小于 1 时, 不需要考虑传输延迟的影响。此时满足条件

$$t_\tau F_s < 1. \quad (9)$$

3 直视 ISAIL 外场实验及成像结果

3.1 雷达装置及目标

雷达装置示意图如图 3(a)所示, 当时的成像天

气如图 3(b)所示, 实验时间选择在北京时间 18:00 左右。雷达放置在中国科学院上海天文台观测站, 目标为位于 1.8 km 和 3.4 km 处的无人机。无人机飞行时, 与雷达光束传播方向垂直。

3.2 雷达参数设计

此次实验中, 扫描振镜为正弦驱动扫描, 振镜的扫描频率为 760 Hz, 且进行正反两方向采样, 顺轨向采样率为 1.52 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, 由平衡接收机进行信号的光电转换, 并由高速的现场可编程门阵列进行信号

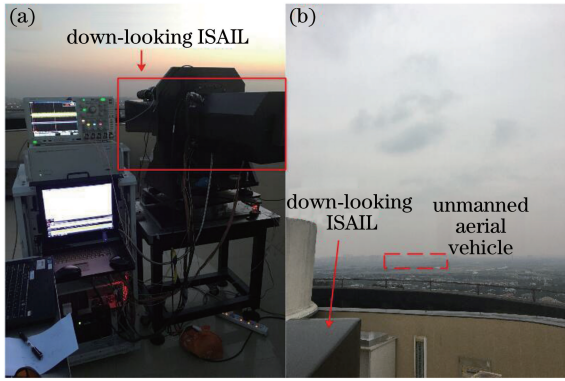


图 3 直视 ISAIL 外场实验。(a)雷达装置图；(b)成像环境
Fig. 3 Outdoor experiment photo of down-looking ISAIL.

(a) Radar setup; (b) imaging environment

采集,利用计算机进行后处理成像。该直视 ISAIL 装置的主要参数如表 1 所示。直视 ISAIL 放置的位置经纬度为 $(121.1913504791^{\circ}, 31.0938083209^{\circ})$ (其中 121.1913504791° 代表经度, 31.0938083209° 代表纬度,下同)。成像距离为 1.8 km 时,无人机从经纬度为 $(121.1880639195^{\circ}, 31.0826080592^{\circ})$ 的位置以 3 m/s 的速度飞行至 $(121.1873263121^{\circ}, 31.0825598199^{\circ})$ 位置,角锥目标的激光发射功率为 3 W,无人机目标的激光发射功率为 20 W。成像距离为 3.4 km 时,无人机从经纬度为 $(121.2032790000^{\circ}, 31.0715020000^{\circ})$ 的位置以 5 m/s 的速度飞行至 $(121.2025830000^{\circ}, 31.0711700000^{\circ})$ 位置,激光发射功率为 3 W。

表 1 直视 ISAIL 系统参数

Table 1 System parameters of down-looking ISAIL

Parameter	Value
Wavelength λ /nm	1030
Vibrant angle /($^{\circ}$)	± 7
Beam size /mm \times mm	8 \times 8
Vibrant frequency /Hz	760
Focus length of launching or receiving lens /m	1.2
Imaging distance /km	1.8, 3.4
Speed of unmanned aerial vehicle /($m \cdot s^{-1}$)	3, 5
Modulation length /mm	6
Sampled frequency in orthogonal direction /MHz	31.25
Sampled frequency in azimuthal direction /Hz	1520
Focal length of cylindrical lens /mm	60, -60
Range \times azimuthal resolution /mm \times mm	7.2 \times 5.8,
	12.7 \times 9.2

利用该直视 SAIL 系统进行了成像距离为 1.8 km 和 3.4 km 的地面演示实验。由于振镜与顺轨向柱面镜(L1 和 L2)距离较近,激光往返两次经过柱面镜,所以匹配滤波半径 R_1 等于柱面镜焦距的 1/4。由于发射端孔径光阑的限制,直视 ISAIL 的

内发射光场的顺轨向等效孔径为 4 mm。因此,内发射场光斑在 1.8 km 目标面处被放大了 1500 倍,光斑面积达到了 6 m \times 6 m;在 3.4 km 目标面处被放大了 2833 倍,光斑面积达到了 11.3 m \times 11.3 m。交轨向采用正弦调制,采样时间占半个振镜周期的 62.89%。数据采集之后,利用计算机进行补偿并成像。

3.3 补偿算法

直视 ISAIL 在顺轨向通过相位匹配滤波实现压缩成像,而顺轨向二次相位的获得则通过目标匀速移动来实现。当两者存在一些位置上的偏差以及速度的不均匀时,会对二次相位造成影响,进一步影响成像质量。直视 SAIL、侧视 SAIL 等通过雷达自身的移动进行成像的方法,可以通过惯性导航系统实时监测自身的移动,进而对其姿态、速度进行补偿。直视 ISAIL、侧视 ISAIL 等对移动目标成像的雷达,因无法准确获取目标的运动状态,使得补偿变得更加困难。在 ISAR 成像方面有许多距离向包络对齐算法,常见的运动补偿技术有互相关法、最小范数法和最小熵法等^[25-27];顺轨向的相位补偿算法主要包括子孔径相关法和相位梯度自聚焦算法(PGA)^[27]等。直视 ISAIL 的目标为无人机,其飞行时存在速度不均匀、航向偏离以及上下抖动等问题,因此这里针对直视 ISAIL 采用了基于空间域的包络对齐方法^[25]以及顺轨向的 PGA 算法^[27]。

3.4 成像结果

根据直视 ISAIL 的成像原理,目标面处的光斑相位为内光场光斑的 M 倍, $M = Z/F_M$ 。直视 ISAIL 要求物体匀速飞行,且飞行方向与光束保持垂直,但是无人机在飞行过程中很难保证这两点。同时,大气的剧烈扰动会造成交轨向压缩之后目标位置的漂移,这对顺轨向的压缩聚焦有很大的影响。

角锥目标如图 4 所示,雷达成像距离为 1.8 km,交轨向压缩之后的图像如图 5(a)所示,由于采用正弦相位调制,接收信号经傅里叶变换后存在单边带展宽现象。图 5(b)为未考虑延时情况下的成像结果,成像距离为 1.8 km,通过计算得到相应的光相

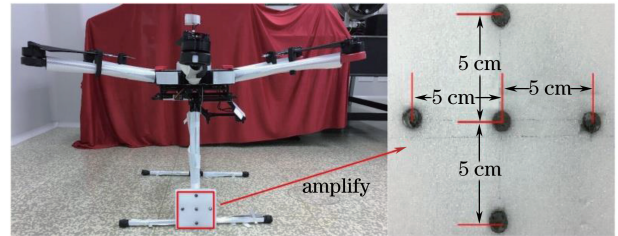


图 4 角锥目标

Fig. 4 Pyramid target

位延迟时间为 $1.20 \mu\text{s}$, 对应的交轨向采样点数为 375, 不满足(9)式, 因此如果不考虑延时, 则不能恢复理想交轨向压缩图像。图 5(c) 为考虑延时情况下的成像结果, 可以看出考虑延时情况下能很好地恢复交轨向压缩图像, 但是飞行姿态误差等问题会导致交轨向压缩后的图像存在一个抖动, 从而对顺轨向匹配滤波造成一定的影响, 因此需要进行校正。图 5(d) 为经图像非线性校正之后再通过交轨向包络对齐的结果, 可以看出图像在很大程度上对齐到了一条直线上。图 5(e) 为未进行顺轨向补偿的成像结果, 目标移动速度的不均匀以及姿态的改变等使得顺轨向二次相位存在误差, 从而影响到成像质量。图 5(f) 为顺轨向相位补偿后的成像结果, 补偿后可很好地恢复图像。图 5 所示结果验证了系统及原理的可行性。

在 3.4 km 成像距离情况下计算得到相应的光相位延迟时间为 $2.27 \mu\text{s}$, 对应的交轨向采样点数为 708, 同样不满足(9)式, 因此交轨向非线性校正时同

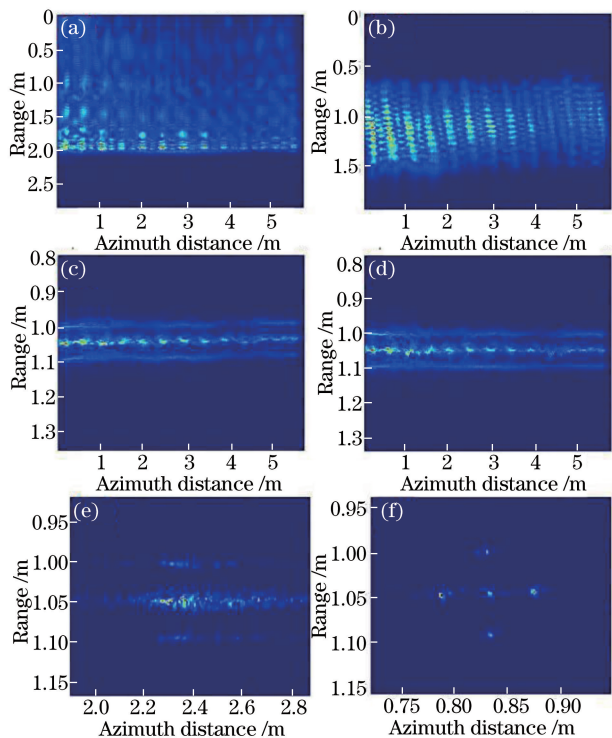


图 5 1.8 km 处角锥目标交轨向成像结果。(a)原始图像; (b)未考虑延时; (c)考虑延时; (d)交轨向对齐; (e)顺轨向相位未补偿; (f)顺轨向相位补偿

Fig. 5 Imaging results of pyramid targets in orthogonal direction at 1.8 km. (a) Original image; (b) without time delay; (c) with time delay; (d) aligning in orthogonal direction; (e) without phase compensation in azimuthal direction; (f) with phase compensation in azimuthal direction

样需要考虑相位延时。对接收信号进行处理, 得到交轨向压缩之后的图像如图 6(a) 所示, 可以看出成像结果存在明显的正弦相位调制导致的单边带展宽现象。图 6(b) 为未考虑延时情况下的成像结果。图 6(c) 为考虑延时情况下的成像结果, 可以看出在考虑延时情况下可很好地恢复交轨向压缩图像, 但是飞行姿态的误差导致图像出现明显的偏移现象。图 6(d) 为非线性校正之后基于交轨向包络对齐的成像结果。图 6(e) 为未进行顺轨向补偿的结果, 顺轨向误差导致图像涣散。图 6(f) 为进行顺轨向相位补偿后的结果, 可以看出这种情况下可很好地恢复原始图像。

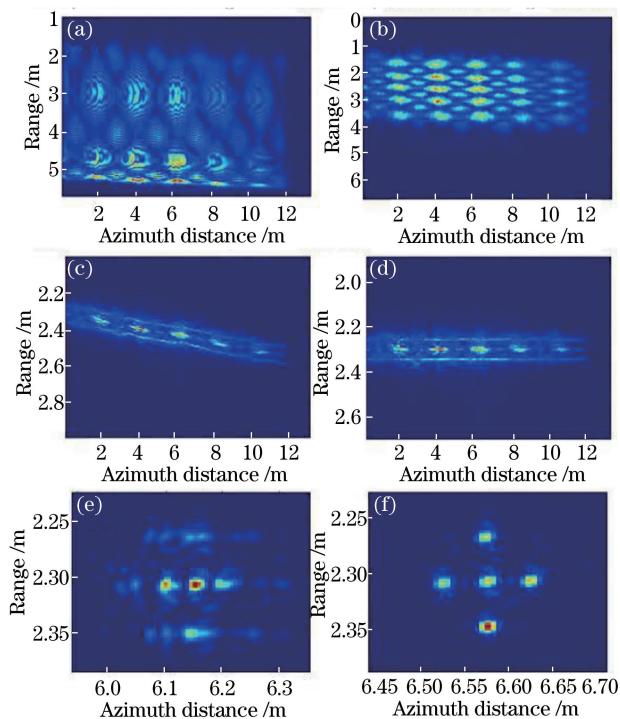


图 6 3.4 km 处角锥目标交轨向成像结果。(a)原始图像; (b)未考虑延时; (c)考虑延时; (d)交轨向对齐; (e)顺轨向相位未补偿; (f)顺轨向相位补偿

Fig. 6 Imaging results of pyramid targets in orthogonal direction at 3.4 km. (a) Original image; (b) without time delay; (c) with time delay; (d) aligning in orthogonal direction; (e) without phase compensation in azimuthal direction; (f) with phase compensation in azimuthal direction

无人机由反射纸覆盖, 为三维结构, 入射角度不同导致雷达接收到的信号强弱分布不均匀, 所以只能进行部分成像。无人机目标如图 7(a) 所示。无人机飞行时, 雷达光斑照射到无人机侧面, 得到无人机的侧面成像图如图 7(b) 所示。成像距离为 1.8 km, 交轨向非线性校正时考虑相位延时。

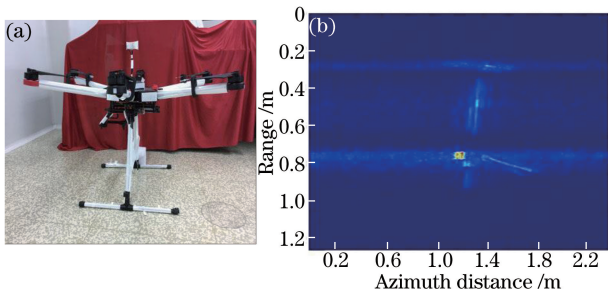


图 7 (a)无人机目标; (b)无人机侧面成像结果

Fig. 7 (a) Unmanned aerial vehicle target;
(b) side imaging result of unmanned aerial vehicle

4 结 论

直视 ISAIL 在战略防御、反卫星、战术武器以及雷达天文学中有着广阔的应用前景,但实现直视 ISAIL 成像却存在诸多难点。首先,虽然直视 ISAIL 在原理上与 ISAIL、ISAR 存在一定的区别,但是均要求目标以一种匀速的状态移动,并且移动方向需与雷达保持一定的角度。由于直视 ISAIL 要求目标与雷达发射光束保持 90° ,并要求目标做水平移动,目标的移动轨迹出现偏差或者移动速度不均匀等都会造成顺轨向二次相位不理想,从而对成像造成一定的影响。其次,由于目标的姿态无法获知,在不存在特显点的情况下,图像补偿困难。基于以上两点,提出一种不基于参数的图像补偿算法十分必要。

此外,由于 ISAIL 等主动成像雷达均采用目标的反射光进行成像,因此目标的某些部分回波较弱,造成图像对比度过大,使回波较弱的部分成像不明显,这也是主动式成像雷达一个相对较难克服、有待改善的问题。

进行了直视 ISAIL 外场实验,得到了室外地对空 1.8 km 和 3.4 km 处的高分辨成像结果,1.8 km 和 3.4 km 成像距离下的二维分辨率分别为 $7.2 \text{ mm} \times 5.8 \text{ mm}$ 和 $12.7 \text{ mm} \times 9.2 \text{ mm}$ 。直视 ISAIL 在战略防御、反卫星、战术武器等方面具有重要的应用价值。

致谢 感谢中国科学院上海天文台提供的场地支持,感谢中国科学院上海天文台张忠萍研究员等提供的技术支持与帮助。

参 考 文 献

[1] Lucke R L, Bashkansky M, Reintjes J, *et al.* Synthetic aperture lidar (SAL): Fundamental

theory, design equations for a satellite system, and laboratory demonstration[R]. Washington: Naval Research Laboratory, 2002: 1-28.

- [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] 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.
- [5] Zhou Y, Xu N, Luan Z, *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.
- [6] Wu J, Zhao Z L, Wu S D, *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.
- [7] Krause B, Buck J, Ryan C, *et al.* Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2011: 12135067.
- [8] 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.
- [9] Du J B, Li D J, Ma M, *et al.* Vibration estimation and imaging of airborne synthetic aperture lidar based on interferometry processing [J]. Chinese Journal of 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.
- [10] Prickect M J, Chen C C. Principle of inverse synthetic aperture radar /ISAR/ imaging[C]. Electronics and Aerospace Systems Conference, 1980: 340-345.
- [11] 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.

- [12] Liu L. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 579-599.
- [13] Luan Z, Sun J F, Zhi Y N, *et al.* Two-dimensional imaging experiment of down-looking synthetic aperture ladar under simulated far-field condition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0710003.
栾竹, 孙建锋, 职亚楠, 等. 直视合成孔径激光成像雷达模拟远场条件下的二维成像实验[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0710003.
- [14] Luan Z, Sun J F, Zhou Y, *et al.* Down-looking synthetic aperture imaging ladar demonstrator and its experiments over 1.2 km outdoor[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(11): 111101.
- [15] Lu Z Y, Zhou Y, Sun J F, *et al.* Airborne down-looking synthetic aperture imaging ladar 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试验[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0110001.
- [16] Zhang N, Lu Z Y, Sun J F, *et al.* Research on the signal-to-noise ratio in sliding spotlight mode down-looking synthetic aperture imaging ladar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0828001.
张宁, 卢智勇, 孙建锋, 等. 直视合成孔径激光成像雷达滑动聚束模式下图像信噪比研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0828001.
- [17] Wang K, Luo L, Bao Z H. Global optimum method for motion compensation in ISAR imagery[C]. *Radar 97*, 1997: 5759827.
- [18] Klass D J. Inverse synthetic aperture technology aids radar identification of ships [J]. *Aviation Week & Space Technology*, 1987, 127(10): 88-92.
- [19] Zhang Y H, Zhai W S, Zhang X K. Ground moving train imaging by Ku-band radar with two receiving channels[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2012, 130(19): 493-512.
- [20] Liu B, Li D J, Li L C. Moving target InISAR imaging and location based on compressed sensing[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, 29(1): 19-25.
刘波, 李道京, 李烈辰. 基于压缩感知的干涉逆合成孔径雷达成像研究[J]. *电波科学学报*, 2014, 29(1): 19-25.
- [21] Zhang L, Qiao Z J, Xing M D, *et al.* High-resolution ISAR imaging by exploiting sparse apertures[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(2): 997-1008.
- [22] Wang N, Wang R, Li G Z, *et al.* Experiment of inverse synthetic aperture ladar at 1.1 km[C]. *SPIE*, 2016, 10155: 101551G.
- [23] Huang Y X, Song S, Xu W M, *et al.* Real-time inverse synthetic aperture ladar system based on continuous m -sequence phase modulation method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 072801.
黄宇翔, 宋盛, 徐卫明, 等. 连续 m 序列相位调制的实时逆合成孔径激光雷达系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 072801.
- [24] Li G Y, Sun J F, Lu Z Y, *et al.* Resampling technique in the orthogonal direction for down-looking synthetic aperture imaging ladar [C]. *SPIE*, 2015, 9617: 96170N.
- [25] Chen C C, Andrews H C. Target-motion-induced radar imaging [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1980, AES-16(1): 2-14.
- [26] Wang G Y, Bao Z. A new algorithm of range alignment in ISAR motion compensation [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1998, 26(6): 5-8.
王根原, 保铮. 逆合成孔径雷达运动补偿中包络对齐的新方法[J]. *电子学报*, 1998, 26(6): 5-8.
- [27] 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 Transaction on Aerospace and Electronics Systems*, 1994, 30(3): 827-835.