

距离向扫描合成孔径激光雷达目标三维重建

张珂殊^{1,2}, 吴一戎^{1,2}

- (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: 合成孔径激光雷达(SAL)能够实现远距离目标的精细成像。由于 SAL 基于距离多普勒原理成像, 将地面场景映射到成像平面上会引起高程信息的丢失。提出了一种基于距离向扫描的 SAL 目标三维重建方法, 通过距离向扫描体制 SAL 得到一定扫描角度范围内的多条合成孔径图像, 利用相邻条带图像目标的重叠成像实现三维重建。基于 TerraSAR 图像仿真计算结果表明: 距离向扫描体制 SAL 可以实现目标的三维重建。

关键词: 合成孔径激光雷达; 距离向扫描; 多条带重叠图像; 目标三维重建

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0330001

3D reconstruction of range scanning synthetic aperture lidar targets

Zhang Keshu^{1,2}, Wu Yirong^{1,2}

- (1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Fine imaging of long distance targets can be achieved by the synthetic aperture lidar (SAL). Due to the principle of range Doppler for SAL imaging, loss of altitude information is caused by the mapping for ground scenes to the imaging plane. A 3D reconstruction method of range scanning SAL was proposed in the paper. Multi synthetic aperture images in a certain scanning angle range were obtained by the range scanning SAL. Then, the 3D reconstruction was conducted through the overlap imaging of adjacent strip images for targets. On the basis of results simulated by TerraSAR, the 3D reconstruction for targets was realized using the range scanning SAL.

Key words: synthetic aperture lidar; range scanning; multi-stripes overlap imaging;
3D reconstruction for targets

收稿日期: 2018-10-10; 修订日期: 2018-11-20

基金项目: 中国科学院电子学研究所创新前沿项目(Y3Z0150102)

作者简介: 张珂殊(1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 硕士, 主要从事激光雷达和激光探测技术方面的研究。Email: kszhang@mail.ie.ac.cn

0 引言

合成孔径激光雷达(SAL)技术的研究始于 20 世纪 60 年代末 70 年代初^[1],直到 90 年代,美国 MIT 林肯实验室首次设计了波长为 1.06 μm 的合成孔径实验装置,并获得了物体的二维像^[2]。2006 年 2 月,美国雷声公司报导了 SAL 机载实验结果,该样机采用 1.5 μm 激光光源和光纤器件^[3]。2011 年美国洛克希德-马丁公司独立完成了 SAL 演示样机的机载实验,其机载样机系统对距离 1.6 km 的地面目标实现了幅宽 1 m、方位向分辨率 3.3 cm 的成像^[4-6]。

国内 SAL 技术研究起步较晚。2009 年,西安电子科技大学搭建了 SAL 成像系统,在 25 cm 距离上获得订书钉的二维图像^[7]。同年,中国科学院电子学研究所(下称电子所)开始 SAL 关键技术的研究工作,并于 2011 年成功完成了 SAL 的室内成像验证;2014 年获得干涉 SAL 的成像结果,进一步验证了干涉 SAL 可实现目标高分辨率三维成像^[8]。2016 年 4 月,电子所在国内首次进行了机载飞行实验,实验中机载平台针对斜视距离 3 km 完成了机载成像,3 km 下成像幅宽 1.7 m,距离向地距分辨率 45 mm,方位向全孔径分辨率 2.1 mm^[9-10]。此外,国内还有中国科学院上海光学精密机械研究所等单位先后开展了 SAL 技术的研究和实验工作。

目前的 SAL 研究体制主要为固定指向角度收发体制,干涉 SAL 尽管可以实现目标高分辨率三维成像,实际应用尚面临很多困难。而固定指向角度收发体制的 SAL,在高分辨率成像模式下测绘带宽太窄,且无法实现目标的三维成像,制约了 SAL 的实际应用^[11]。文中提出一种距离向扫描体制的 SAL 目标三维重建方法,激光雷达在距离向以一定的固定角度范围扫描,经成像处理后,得到距离向的多幅重叠的条带图像,在保证脉冲重复频率(PRF)条件下,获取方位和距离向高分辨率的图像。一方面,通过距离向扫描的多条带图像融合提高了 SAL 距离向的成像带宽;另一方面,相互重叠的条带图像为目标的三维重建创造了条件。

1 SAL 扫描成像原理及解算模型

1.1 成像原理

距离向扫描体制的 SAL(Scan-SAL)如图 1 所示,通过在垂直于飞行方向上快速调节扫描镜指向,在距离向实现宽测绘带扫描;方位向依然通过飞行平台与光斑照射目标区域的相对运动实现。

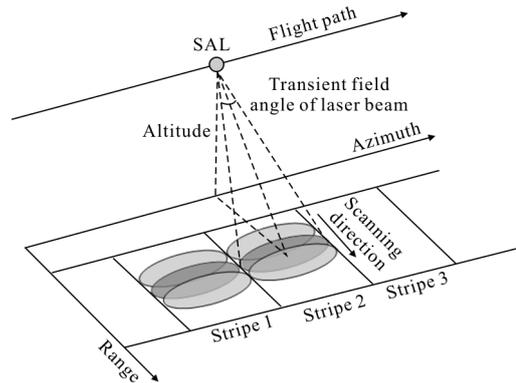


图 1 Scan-SAL 成像原理图

Fig.1 Principle of Scan-SAL imaging

若飞行速度为 v ,测绘带宽度为 H ,光斑方位向发散角为 θ_x 、距离向发散角为 θ_y ,Scan-SAL 至扫描带测绘中心斜距为 R 。由于 Scan-SAL 扫描带需要相互重合,Scan-SAL 在完成子测绘带扫描中沿飞行方向运动距离应满足 $LS < R\theta_x$,因此 Scan-SAL 扫描转镜最低扫描角速度为:

$$\omega = \frac{H}{R \frac{L_s}{v}} = \frac{Hv}{\theta_x R^2} \quad (1)$$

1.2 距离多普勒模型

SAL 成像几何关系满足距离-多普勒条件。如图 2 所示, P 为地面任意一点,空间坐标为 (X_p, Y_p, Z_p) ,SAL 光学接收中心成像时刻的空间坐标为 (X_s, Y_s, Z_s) ,通过定标后的平台 GPS 坐标可以得到; R_s 是空间点 P 的斜距,则成像时刻的距离条件方程为^[12]:

$$(X_s - X_p)^2 + (Y_s - Y_p)^2 + (Z_s - Z_p)^2 = R_s^2 \quad (2)$$

在平台平稳运动状态下,瞬时位置 S 是瞬时速度、加速度和时间的函数,则瞬时位置和时间关系表示为:

$$\begin{cases} X_s = X_{s0} + V_x t + a_x t^2 \\ Y_s = Y_{s0} + V_y t + a_y t^2 \\ Z_s = Z_{s0} + V_z t + a_z t^2 \end{cases} \quad (3)$$

对上式进行微分后,可以得到任意时刻瞬时速度(V_x, V_y, V_z)和加速度(a_x, a_y, a_z),通过多组 GPS 坐标和对应时刻求解得到。

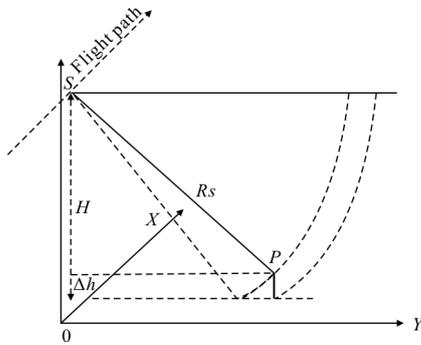


图 2 SAL 侧视成像几何关系

Fig.2 Geometric relationship of SAL side-looking imaging

SAL 成像过程中,平台速度分量与斜距分量的乘积是关于多普勒频率的函数,即多普勒频移条件方程:

$$V_x(X_p - X_s) + V_y(Y_p - Y_s) + V_z(Z_p - Z_s) = -\frac{\lambda R_s}{2} f_{dc} \quad (4)$$

式中: λ 为波长; f_{dc} 为多普勒频移参数。

1.3 目标高程恢复模型

SAL 目标成像是将空间目标投影到某一高度的水平面上,高于或低于投影面的目标,在 SAL 图像上产生距离向位移^[13-14],如图 3 所示,图 3(a)为高于投影面的目标 P 在扫描角度 θ_1 状态下,P 成像后投影在图像 P' 位置,成像点朝向底点平移 ΔX_1 ;图 3(b)为低于投影面的目标 P 在扫描角度 θ_2 状态下,P 成像后投影在图像 P'' 位置,成像点背向底点平移 ΔX_2 。

由图 3(a)可以得到:

$$H^2 + X_1^2 = (H - \Delta h)^2 + (X_1 - \Delta X_1)^2 \quad (5)$$

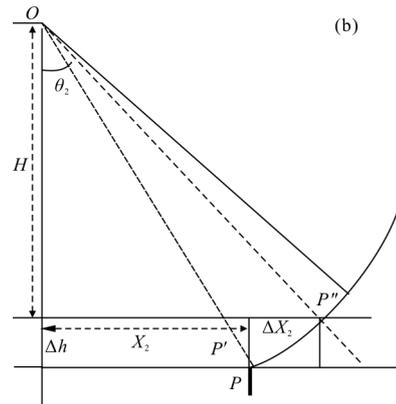
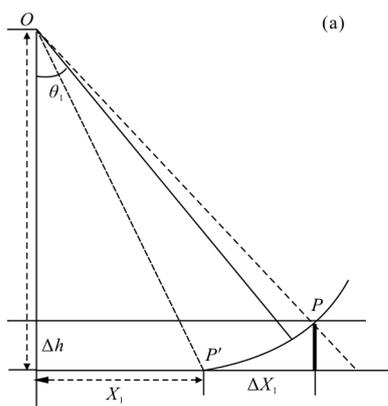


图 3 SAL 目标点成像投影关系

Fig.3 Projection relationship of SAL imaging for the target point

即:

$$\Delta X_1 = \sqrt{H^2 + X_1^2 - (H - \Delta h)^2} - X_1 \quad (6)$$

若 SAL 成像面大地高为 Z_p ,P 点成像坐标 Z_p 与目标高度 Δh 关系为:

$$\Delta h = Z_p + H - Z_{si} \quad (7)$$

目标 P 到 SAL 底点的平距为:

$$X_1 = \sqrt{(X_{si} - X_{p'})^2 + (Y_{si} - Y_{p'})^2} \quad (8)$$

其中, $X_{p'}$ 和 $Y_{p'}$ 为 SAL 目标点 P 成像平面坐标,整理可得:

$$\Delta X_1 = \sqrt{H^2 + (X_{si} - X_{p'})^2 + (Y_{si} - Y_{p'})^2 - (Z_{si} - Z_p)^2} - \sqrt{(X_{si} - X_{p'})^2 + (Y_{si} - Y_{p'})^2} \quad (9)$$

式中: X_{si} 、 Y_{si} 和 Z_{si} 为目标点 P 的空间坐标。

在图 3(b)中,若 P 点 Z 坐标为 Z_p ,SAL 成像面大地高为 $Z_p + \Delta h$,可得:

$$\Delta X_2 = \sqrt{(X_{si} - X_{p''})^2 + (Y_{si} - Y_{p''})^2} - \sqrt{(X_{si} - X_p)^2 + (Y_{si} - Y_p)^2 + (Z_{si} - H)^2} \quad (10)$$

为了便于建立目标高程模型,取 SAL 成像面低于成像目标,SAL 在不同激光扫描指向角下,获取至少两幅目标点 P 的图像,由公式(8)得到 ΔX_1 和 $\Delta X_1'$ 。两幅图像同名目标点通过最小二乘影像匹配得到,假设因激光扫描指向角不同产生的投影位移为 ΔX ,通过像点位移量和图像距离分辨率得到,则:

$$\Delta X = \Delta X_1 - \Delta X_1' \quad (11)$$

公式(8)、(10)构成 SAL 成像目标的高程模型。

1.4 三维成像解算模型

SAL 在距离向连续扫描成像, 相邻成像可以建立两组距离多普勒方程, 考虑两组方程的相关性, 解算时选择一组距离多普勒方程作为目标点的三维空间坐标解算模型, 由公式(2)、(4)和(10)构成任意一目标点 P 的三维空间坐标解算模型:

$$\begin{cases} (X_{si}-X_p)^2+(Y_{si}-Y_p)^2+(Z_{si}-Z_p)^2=R_{si}^2 \\ V_{xi}(X_p-X_{si})+V_{yi}(Y_p-Y_{si})+V_{zi}(Z_p-Z_{si})=-\frac{\lambda R_{si}}{2}f_{dc} \end{cases} \quad (12)$$

对公式(12)进行线性化, 可以解算目标点 P 的空间坐标, 线性化解算模型为:

$$\begin{cases} \frac{\partial f_1}{\partial X}dX+\frac{\partial f_1}{\partial Y}dY+\frac{\partial f_1}{\partial Z}dZ+w_1=0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial X}dX+\frac{\partial f_2}{\partial Y}dY+\frac{\partial f_2}{\partial Z}dZ+w_2=0 \\ \frac{\partial f_3}{\partial Z}dZ+w_3=0 \end{cases} \quad (13)$$

1.5 目标三维重建流程

目标三维重建的处理流程如图 4 所示。首先获取相互重叠的 SAL 条带图像数据, 并提取条带图像成像的设备位姿参数和成像参数; 然后对条带图像进行特征提取和检测, 提取目标的特征信息, 通过特征匹配获取同名目标的初始位置, 再经原始条带图像的最小二乘匹配得到目标的精确同名像点位置; 选择两幅图像配准的基准点, 计算目标的像点位移和位移偏差; 最后通过目标在图像上的像点位置计算 SAL 成像时刻的设备空间位置、平台运动速度和目标的初始空间位置, 由公式(13)解算目标的精确空间位置。

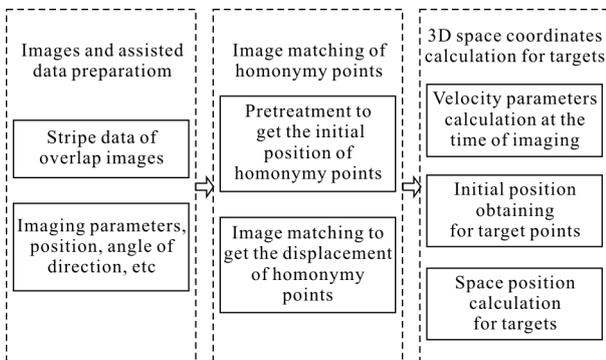


图 4 SAL 目标点三维重建处理流程

Fig.4 Process of 3D reconstruction for SAL target points

2 仿真实验和分析

2.1 SAL 仿真实验

SAL 与 SAR 具有相同的成像原理——通过距离多普勒成像, 将空间目标投影于某一平面。因此, 课题组选取同区域不同时段过境的两景升轨 TerraSAR 图像, 仿真 SAL 成像目标的空间坐标完成解算。TerraSAR 卫星轨道高度为 514 km, 重访周期 11 天, 载波频率 9.65 GHz。图 5 为 2015 年不同过境时段的两景升轨 TerraSAR 图像, 图 5(a)、(b)为一组图像及其同名像点, (c)、(d) 为另一组图像及其同名像点。轨道号 31717 图像的近距离侧视角为 31.7° , 轨道号 31733 图像的近距离侧视角为 29.5° , Scan-SAR 成像可得到类似不同扫描角的条带图像。

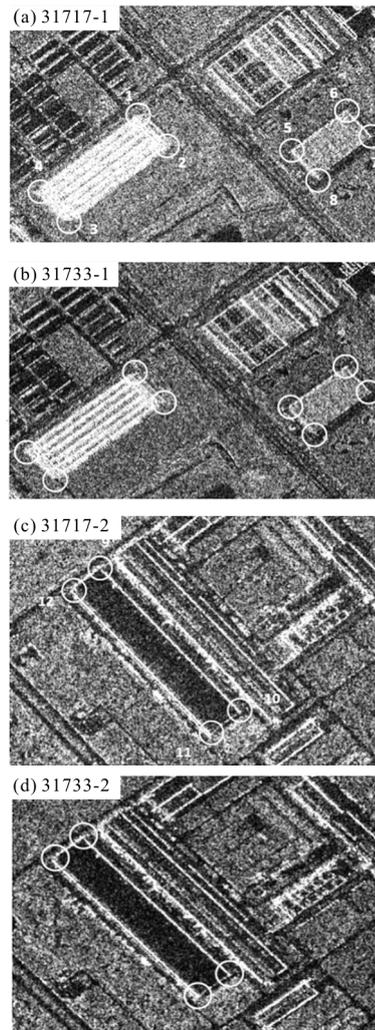


图 5 图像匹配的同名像点

Fig.5 Homonymy points of image matching

选择某一高程投影面 (如某一目标高程面或 SAR 图像成像平均投影面, 高程 46.410 m) 的地物进行图像配准, 如图 6 所示, 配准的图像重叠后, 不同高程的相同目标在两幅图像中, 因侧视角和成像位置变化引起目标成像投影位置的偏差不同。以图像配准的目标点为基准, 可以计算匹配同名点之间的像点坐标偏差, 通过图像距离向分辨率可以得到目标的投影位置偏差 ΔX 。

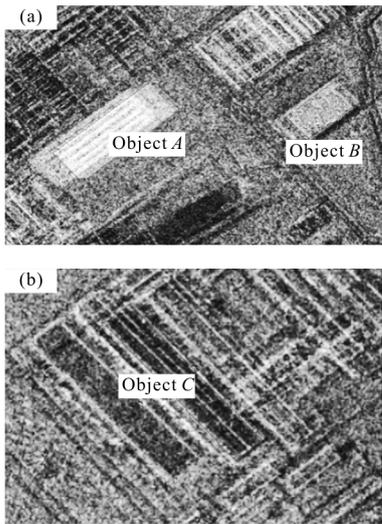


图 6 相对于成像平面的目标投影位移

Fig.6 Projection displacement of targets relative to imaging plane

对于平顶目标, 通过方位向目标像素的累积, 可计算目标的投影位移偏差。如图 7 所示, 将图像匹配的目标角点连接, 形成闭合的目标区域, 以距离向为横坐标, 统计闭合区域方位向上的像素累积, 得到目标方位向像素分布, 不规则目标会形成像素分布的峰值点, 更有利于像点坐标偏差计算, 图中规则目标形成了近似对称的像素分布曲线, 可以计算目标投影像点坐标的偏差 ΔX 。

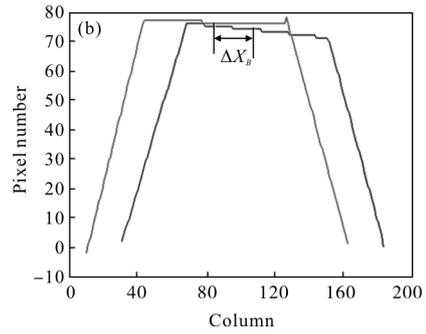
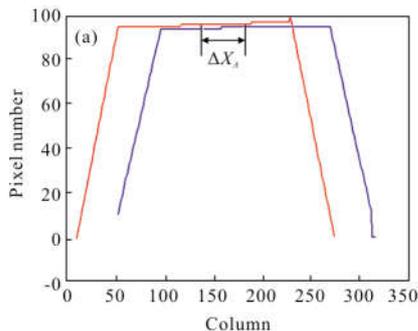


图 7 目标 A 和 B 方位向像素统计的位移偏差

Fig.7 Displacement deviation of azimuth pixels statistics for target A and B

计算得同名像点的位移偏差后, 利用公式(12)线性化的方程(13), 结合成像的轨道参数, 解算得到各目标角点的空间坐标。在足够多余观测条件下, 目标整体的像点坐标偏差作为观测值, 规则目标的几何关系可作为条件方程, 可以整体平差解算目标点的空间坐标。如表 1 所示。

表 1 解算得到目标点空间坐标

Tab.1 Space coordinates of target points after calculation

Point number	X coordinate/m	Y coordinate/m	Z coordinate/m
1	614 340.668	3 455 441.762	58.816
2	614 440.240	3 455 329.245	58.348
3	614 115.634	3 455 041.481	59.772
4	614 014.071	3 455 151.011	59.582
5	614 840.452	3 455 317.399	53.894
6	615 015.637	3 455 469.875	52.199
7	615 099.336	3 455 380.336	53.066
8	614 921.556	3 455 224.616	54.885
9	612 246.266	3 457 080.933	78.261
10	612 577.079	3 456 693.228	77.966
11	612 504.385	3 456 632.123	78.116
12	612 172.518	3 457 017.720	78.090

对地观测目标的三维重建, 可以通过目标格网化的空间坐标计算实现。如图 8 所示, 通过对目标 A、B 和 C 角点空间坐标的解算 (可根据图像分辨率细化匹配计算的网格), 重建地面目标的三维模型。

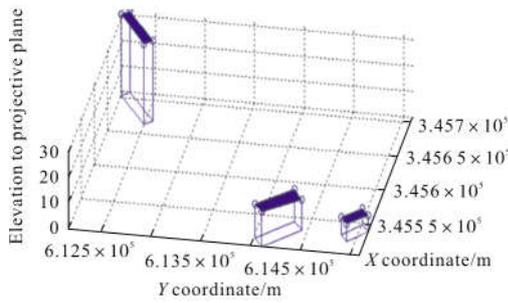


图 8 目标三维重建结果

Fig.8 Results of 3D reconstruction for targets

2.2 SAL 成像目标高程误差分析

2.2.1 SAL 成像侧视角影响

设SAL 系统激光发散角为 0.8 mrad, 固定指向 SAL 成像条带宽度取决于平台成像高度; SAL 成像分辨率与距离无关, 远距离成像分辨率可达到 3~5 cm。因此, SAL 更适于远距离观测成像。SAL 成像目标的高程位移与目标高度、激光束指向角有关, 由图 3(a)可得:

$$\Delta X_1 = \sqrt{H^2 + X_1^2 - (H - \Delta h)^2} - X_1 \approx \frac{H}{X_1} \cdot \Delta h = \Delta h \text{ctg} \theta_1 \quad (15)$$

式中: ΔX_1 为目标的位置平移量; Δh 为目标的相对高度; θ_1 为激光束相对于底点的指向角度/侧视角。

设距离向扫描 SAL 的激光光斑重叠 50%, 即扫描指向角度变化 0.4 mrad, 同名目标图像匹配精度 0.5 pixel, 通过图像匹配可识别目标位移距离 2.5 cm, 目标相对于成像投影面的高差为:

$$\Delta h = \frac{0.025}{(\text{ctg} \theta_1 - \text{ctg} \theta_2)} \quad (14)$$

表 2 列出了不同侧视角下, SAL 可识别的目标最小高度, 以及 SAL 图像上识别同名目标的成像投影面高差关系。由表 2 可知, 小侧视角的 SAL 成

表 2 不同侧视角与可分辨目标高度、投影面高差关系

Tab.2 Relationship between different side-looking angle and resolved target altitude and elevation to projective plane

Side-looking angle/(°)	Resolved target altitude/m	Elevation to projective plane/m
10	0.009	1.889
15	0.013	4.193
20	0.018	7.319
25	0.023	11.172
30	0.029	15.636

像条件下, 有利于提高目标的高程解算精度。

2.2.2 目标高程误差分析

由公式(11)可知, 影响 SAL 成像目标三维重建精度的因素有: 平台 GPS 坐标精度、SAL 激光指向角精度、图像匹配精度、侧视角度和图像分辨率(不考虑平台姿态变化影响)。假设差分 GPS 坐标高程精度 10 cm, 激光指向精度 0.1 mrad, 成像侧视角 10°, 图像匹配精度 0.5 pixel, 成像分辨率 5 cm, 设备成像高度 1 km 时得到的目标高程相对精度大约为:

$$m_h = \sqrt{m_{z_{\text{GPS}}}^2 + m_{\theta}^2 + m_{\text{match}}^2 + m_{\alpha}^2} = \sqrt{0.1^2 + 0.018^2 + 0.004^2 + 0.009^2} = 0.102 \text{ m}$$

式中: $m_{z_{\text{GPS}}}$ 、 m_{θ} 和 m_{match} 分别为 GPS 坐标高程精度、激光指向和图像匹配引起的高程误差; m_{α} 为成像侧视角 10° 和分辨率 5 cm 时可分辨目标高程精度(见表 2)。

3 结论

文中提出利用距离向扫描 SAL 的重叠图像实现目标的三维重建方法, 经过目标三维空间坐标解算模型的推导, 同向同区域两景 TerraSAR 图像的仿真计算, 以及成像目标高程误差的分析, 表明距离向扫描体制 SAL 可以实现空间目标的三维重建。

参考文献:

[1] Kyle T G. High resolution laser imaging system[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(13): 2651-2656.
 [2] Green T J, Marcus S, Colella B D. Synthetic-aperture-radar imaging with a solid-state laser [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(30): 6941-6949.
 [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] Zhao Zhilong, Wu Jin, Su Yuanyuan, et al. Three-dimensional imaging interferometric synthetic aperture lidar[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(9): 33-36.
 [5] Marchese L, Turbide S, Terroux M, et al. All optical synthetic aperture lidar sensing-to-processing chain based on sar technology [C]//International geoscience and remote sensing symposium (IGARSS), 2012: 5006-

- 5008.
- [6] 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.
- [7] Guo Liang, Xing Mengdao, Zhang Long, et al. Research on indoor experimentation of range SAL imaging system [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 39(10): 1678–1684.. (in Chinese)
郭亮, 邢孟道, 张龙, 等. 室内距离向合成孔径激光雷达成像的实验研究 [J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39 (10): 1678–1684.
- [8] Ma Meng, Li Daojing, Du Jianbo. Imaging of airborne synthetic aperture lidar under platform vibration condition[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(5): 591–602. (in Chinese)
马萌, 李道京, 杜剑波. 振动条件下机载合成孔径激光雷达成像处理[J]. 雷达学报, 2014, 3(5): 591–602.
- [9] Zhang Keshu, Pan Jie, Wang Ran, et al. Study of wide swath synthetic aperture lidar imaging technology [J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 1–10. (in Chinese)
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.
- [10] Li Guangzuo, Wang Ran, Wang Peisi, et al. Synthetic aperture LADAR at 1 550 nm: system demonstration, imaging processing and experimental result [C]// *Proceedings of the SPIE*, 2016, 10155: 101553G.
- [11] Tang Yu, Qin Bao, Yan Yun, et al. High-resolution and wide-swath imaging of the multiple-transmitter-multiple-receiver synthetic aperture lidar system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (8): 0830001. (in Chinese)
唐禹, 秦宝, 晏芸, 等. 多发多收合成孔径激光雷达高分辨率宽测绘带成像 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 0830001.
- [12] Zhang Yonghong, Zhang Jixian, Liu Mingjun, et al. Imaging model for space-borne SAR and its application in orbit refinement [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(6): 771–777. (in Chinese)
张永红, 张继贤, 刘明军, 等. 星载合成孔径雷达构像方程及其应用于轨道精化的研究 [J]. 遥感学报, 2007, 11(6): 771–777.
- [13] Liu Yan, Tan Weixian, Lin Bin, et al. An approach of the outlines extraction of building footprints from the circular SAR data [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 946–952. (in Chinese)
刘燕, 谭维贤, 林贇, 等. 基于圆迹 SAR 的建筑物轮廓信息提取[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 946–952.
- [14] Hou Liying, Lin Yun, Hong Wen. Three-dimensional reconstruction method study based on interferometric circular SAR[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(5): 538–547. (in Chinese)
侯丽英, 林贇, 洪文. 干涉圆迹 SAR 的目标三维重建方法研究[J]. 雷达学报, 2016, 5(5): 538–547.