

基于改进三维后向投影的多圈圆迹SAR相干三维成像方法

韩冬^{①②③} 周良将^{*①②③} 焦泽坤^{①②} 吴一戎^{①②③}

^①(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100190)

^②(微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

^③(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 圆迹SAR(CSAR)因其特殊曲线运动轨迹而具备3维成像能力。单圈CSAR理论上可以获得距离方位平面亚波长级的分辨率,但是高程向分辨率却很低。同时,利用后向投影(BP)算法进行CSAR 3维成像的算法复杂度高,成像效率低。该文提出一种基于改进3维后向投影的多圈CSAR相干3维成像方法,针对现有成像算法时间复杂度高的问题,提出一种构造几何插值核的CSAR改进3维后向投影算法,可将3维插值操作转化为1维插值操作和距离向量搜索操作,通过多圈CSAR改进3维后向投影成像结果相干积累的方式得到最终3维图像。该文所提方法可有效解决单圈CSAR 3维成像高程向分辨率低的问题,改善3维成像细节,同时能够大幅降低CSAR 3维成像时间。仿真圆锥目标和美国空军实验室GOTCHA数据3维成像结果验证了该文所提方法的有效性。

关键词: 圆迹SAR; 多圈CSAR; 相干3维成像; 改进3维后向投影算法; 几何插值核

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)01-0131-07

DOI: 10.11999/JEIT190945

A Coherent 3-D Imaging Method for Multi-circular SAR Based on an Improved 3-D Back Projection Algorithm

HAN Dong^{①②③} ZHOU Liangjiang^{①②③} JIAO Zekun^{①②} WU Yirong^{①②③}

^①(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Beijing 100190, China)

^③(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Circular SAR (CSAR) has the ability of 3-D imaging due to its special curve trajectory. Single-pass CSAR can theoretically obtain the resolution of the sub-wavelength level on the distance-azimuth plane, but its resolution at the elevation direction is very low. At the same time, CSAR 3-D imaging with Back Projection(BP) has high algorithm complexity and low imaging efficiency. A coherent 3-D imaging method for multi-circular SAR based on an improved 3-D back projection algorithm is proposed. For the problem of high time complexity of the imaging algorithm, an improved 3-D BP algorithm for CSAR based on constructing geometric interpolation kernel is proposed. 3-D interpolation operations are transformed into 1-D interpolation operations and distance vector searching operations. The final imaging result is obtained by coherently accumulating the improved 3-D BP results of multi-circular SAR. The proposed method solves effectively the problem of low elevation resolution of single-pass CSAR, improves 3-D imaging details, and reduces greatly the time of CSAR 3-D imaging simultaneously. The simulated 3-D imaging results of the conical target and GOTCHA data set from the US Air Force Laboratory verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: Circular SAR(CSAR); Multi-circular SAR; Coherent 3-D imaging; Improved 3-D Back Projection (BP) algorithm; Geometric interpolation kernel

1 引言

直线合成孔径雷达 (Linear Synthetic Aperture Radar, LSAR)在一个合成孔径时间内对目标的观

测角度变化有限,因此其2维成像结果中存在叠掩、阴影和透视缩短等常见问题,利用阵列或重航过的观测方式可具备3维成像能力^[1,2]。圆周合成孔径雷达(Circular Synthetic Aperture Radar, CSAR)^[3]利用雷达平台的曲线运动可以实现目标的360°全方位观测,也是一种经典的雷达3维成像模型^[4]。

收稿日期: 2019-11-27; 改回日期: 2020-06-19; 网络出版: 2020-07-20

*通信作者: 周良将 ljzhou@mail.ie.ac.cn

后向投影(Back Projection, BP)算法是常用的CSAR时域成像算法。然而, BP算法逐方位脉冲逐成像网格处理的本质导致其算法复杂度高, 成像效率低。针对BP算法成像效率低的问题, 国内外相关学者提出了一系列快速BP算法, 如局部后向投影(Locality Back Projection, LBP)算法^[5], 极坐标子孔径处理的快速后向投影(Fast Back Projection, FBP)算法^[6], 快速分解后向投影(Fast Factorized BP, FFBP)算法^[7]等。同时, 3维BP算法要对3维网格做成像处理, 算法复杂度更高, 耗时更长。因此, 改进CSAR 3维BP成像算法、提升3维成像效率具有重要意义。

1998年, Ishimaru等学者^[8]提出了CSAR共焦3维成像理论(CIA)。CSAR的2维成像结果取决于成像平面高度设置。当目标处于正确成像高度时会精确聚焦, 而处于错误成像高度时会散焦成圆环。利用该原理逐高度面成像, 可以得到CSAR的3维成像结果。虽然CSAR在距离方位平面内可以得到亚波长级的分辨率, 但是高程向有效带宽的限制导致其高程向分辨率很低^[9]。通过不同入射角轨道的多圈CSAR观测, 可以达到拓宽高程向信号带宽的目的, 提升高程向分辨率^[10,11]。

综上所述, 3维BP算法效率低下和高程向分辨率低下这两种弊端严重限制了单圈CSAR 3维成像的实际工程应用。因此, 本文提出一种基于改进3维后向投影的多圈CSAR相干3维成像方法。可以在保证3维成像精度的前提下, 达到提升CSAR 3维

成像效率和提升高程向分辨率的目的。仿真的圆锥和GOTCHA数据3维成像结果表明本文所提方法为多圈CSAR联合高分辨、高效率3维成像提供了一种新的实现方案。

2 多圈CSAR相干3维成像理论分析

单圈CSAR和多圈CSAR 3维成像几何模型示意如图1所示, 雷达运动平台高程为 H , 绕 z 轴做匀速圆周运动, 圆周半径为 R , 雷达入射角为 α , 方位角为 θ 。

如图1(a)所示, 观测目标的2维成像结果理论上由设置的成像高度决定。当成像高度为目标真实高度时, 目标可以精确聚焦, 如图1(a)中的A点所示。当成像高度与目标的真实高度不一致时, 目标在该高度面的成像结果会散焦成圆环, 如图1(a)中的B点和C点所示。

CSAR成像场景中目标的3维点扩展函数(Point Spread Function, PSF)^[12]表达式如式(1)

$$\text{PSF}(x, y, z) = 2\pi \int_K K_r \exp(jK_z z) J_0(K_r R_{xy}) dK_r \quad (1)$$

其中, $K_r = \sqrt{K_x^2 + K_y^2} = K \sin \alpha$, $K_z = K \cos \alpha$, $R_{xy} = \sqrt{x^2 + y^2}$, $J_0(\cdot)$ 表示第1类零阶Bessel函数。 K_x , K_y 和 K_z 表示CSAR 3维波数分量, $K = 4\pi f/c$ 为雷达信号的双程波数。

当 $x = 0$, $y = 0$ 时, $J_0(K_r R_{xy}) = 1$, 可以得到单圈CSAR 3维成像高程向PSF为

$$\begin{aligned} \text{PSF}(0, 0, z) &= 2\pi \int_{K_{r1}}^{K_{r2}} K_r \exp(jK_z z) dK_r = 2\pi \sin^2 \alpha \int_{K_{r1}}^{K_{r2}} K \exp(jK \cos \alpha \cdot z) dK \\ &= \frac{2\pi \cdot \tan^2 \alpha \cdot [(1 - jK_{\max} \cos \alpha \cdot z) \exp(jK_{\max} \cos \alpha \cdot z) - (1 - jK_{\min} \cos \alpha \cdot z) \exp(jK_{\min} \cos \alpha \cdot z)]}{z^2} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $K_{r1} = K_{\min} \sin \alpha$, $K_{r2} = K_{\max} \sin \alpha$, CSAR高程向有效带宽与信号载频、带宽等系统参数有关。

改变入射角 α , 将CSAR的高程向PSF相干积累, 得到多圈CSAR模型的高程向PSF为

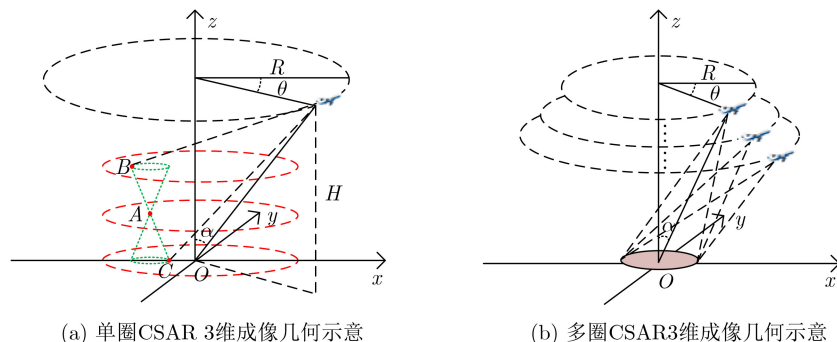


图1 CSAR 3维成像几何模型示意

$$\begin{aligned}
\text{PSF}(0, 0, z) &= 2\pi \sum_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} \left\{ \int_{K_{r,1}}^{K_{r,2}} K_r \exp(jK_z z) dK_r \right\} = 2\pi \sum_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} \left\{ \sin^2 \alpha \int_{K_{\min}}^{K_{\max}} K \exp(jK \cos \alpha \cdot z) dK \right\} \\
&= 2\pi \sum_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} \left\{ \frac{\tan^2 \alpha \cdot [(1 - jK_{\max} \cos \alpha \cdot z) \exp(jK_{\max} \cos \alpha \cdot z) - (1 - jK_{\min} \cos \alpha \cdot z) \exp(jK_{\min} \cos \alpha \cdot z)]}{z^2} \right\}
\end{aligned} \quad (3)$$

多圈CSAR观测场景中心点目标的高程向分辨率表达式^[10,11]为

$$\begin{aligned}
\delta_z &= \frac{c}{\sqrt{2\pi} (B_r \cos \bar{\alpha} + \Delta f_z)} \\
&= \frac{c}{\sqrt{2\pi} \left(B_r \cos \bar{\alpha} - \frac{c \cdot E_{\perp}}{\lambda \cdot R_p \sin(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})} \right)} \quad (4)
\end{aligned}$$

其中, Δf_z 为高程向频谱偏移, E_{\perp} 为高程向基线大小, $\bar{\alpha}$ 为入射角均值, α_{\min} 和 α_{\max} 分别表示最小入射角和最大入射角, B_r 为雷达信号带宽, R_p 为目标与雷达平台间的距离。因此多圈CSAR成像结果在高程向的分辨率不仅与雷达系统参数有关, 还与高程向的基线大小和分布情况有关。

3 改进3维后向投影算法

3.1 算法原理

规定CSAR全孔径脉冲数为 N_a , 3维成像网格大小为 $N_x \times N_y \times N_z$ 。传统3维BP成像逐方位脉冲逐网格点做插值操作和相位补偿操作, 相干积累各方位脉冲的3维成像结果后得到最终3维图像^[13]。

当雷达方位角为 θ , 入射角为 α 时, (x_p, y_p, z_p) 处目标距离压缩后的时域信号表达式为

$$\begin{aligned}
s(\sigma_p, \theta, \alpha) &= A_p \cdot \text{sinc} \left(\tau - \frac{2(R_p - R_0)}{c} \right) \\
&\quad \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} (R_p - R_0) \right) \quad (5)
\end{aligned}$$

其中, R_p 为雷达与目标的距离, R_0 为雷达与成像场景中心 O 的距离。式(5)乘以补偿相位 $\exp(j4\pi(R_p - R_0)/\lambda)$ 后得到方位角 θ , 入射角 α 时网格 (x_p, y_p, z_p) 处的成像结果。

然而, 逐方位脉冲逐网格点做插值和相位补偿操作效率很低。因此, 可通过构造距离向量 $\mathbf{r}_{\text{ref}} = [r_i]_{M \times 1}$ 和几何插值核 $\mathbf{k}_{\text{ref}} = [k_i]_{M \times 1}$ 对3维成像网格一致处理, 将3维插值和相位补偿操作转化为1维插值和相位补偿操作以及距离向量搜索操作。

几何插值核的构造示意如图2所示, 距离向量 \mathbf{r}_{ref} 的长度为 M , 元素间隔为 Δr

$$\begin{aligned}
\mathbf{r}_{\text{ref}} &= [r_i]_{M \times 1} \\
&= R_{\min} R_{\min} + \Delta r R_{\min} + 2\Delta r \cdots R_{\max} \quad (6)
\end{aligned}$$

根据距离向量 \mathbf{r}_{ref} 和方位脉冲距离压缩后的时域信号做1维插值操作, 可得距离 r_i 处的插值结果

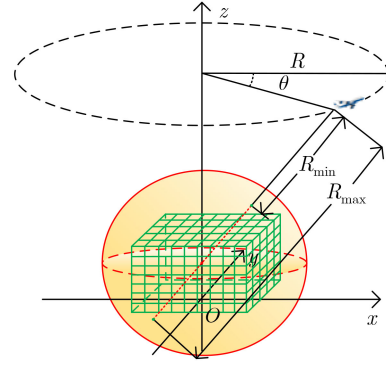


图2 CSAR改进3维BP几何插值核构造示意

$$\begin{aligned}
s(\sigma_i, \theta, \alpha) &= A_i \cdot \text{sinc} \left(\tau - \frac{2(r_i - R_0)}{c} \right) \\
&\quad \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} (r_i - R_0) \right) \quad (7)
\end{aligned}$$

式(7)乘以补偿相位 $\exp(j4\pi(r_i - R_0)/\lambda)$ 后, 可得几何插值核的元素 k_i

$$k_i = A_i \cdot \text{sinc} \left(\tau - \frac{2(r_i - R_0)}{c} \right) \quad (8)$$

网格 (x_p, y_p, z_p) 与雷达平台距离为 R_p , 计算 $R_p - R_{\min}$ 与距离向量 \mathbf{r}_{ref} 中元素间隔的比值 $(R_p - R_{\min})/\Delta r$, 得到网格 (x_p, y_p, z_p) 对应距离向量中的元素序号 l , 从而完成距离向量搜索操作。最终, 将几何插值核 \mathbf{k}_{ref} 中对应元素 k_l 作为成像结果相干积累到3维成像结果矩阵中。

因此, 网格 (x_p, y_p, z_p) 在该方位脉冲下所得的成像结果与实际成像结果会存在距离误差 $\Delta R = |R_p - r_l|$ 与相位误差 $\exp(j4\pi\Delta R/\lambda)$, 误差大小取决于距离向量 \mathbf{r}_{ref} 的长度大小。理论上, M 取值越大, 距离向量 \mathbf{r}_{ref} 的元素间隔越小, 所导致的成像结果误差越小。

本文所提CSAR改进3维BP成像算法流程如下所示:

步骤1 构造3维成像网格的外接球体, 规定1维距离向量的长度 M ;

步骤2 将雷达到外接球体的最近最远距离 R_{\min} 和 R_{\max} 划分为长度为 M 的距离向量 $\mathbf{r}_{\text{ref}} = [r_i]_{M \times 1}$; 循环1 遍历方位角 θ_i , 若 $i \leq N_a$:

步骤3 根据回波信号与距离向量元素 r_i 做插值和相位补偿, 得到几何插值核 $\mathbf{k}_{\text{ref}} = [k_i]_{M \times 1}$;

循环2 遍历成像网格点 (x_p, y_p, z_p) , 若 $p \leq N_x \times N_y \times N_z$:

步骤4 计算方位角 θ_i 处雷达与网格点 (x_p, y_p, z_p) 距离 R_p ;

步骤5 搜索距离向量 \mathbf{r}_{ref} , 确定与 R_p 的最近元素坐标 l ;

步骤6 将几何插值核中对应 k_l 相干积累到成像结果矩阵 \mathbf{I} 的 (x_p, y_p, z_p) 处;

循环2结束;

循环1结束。

3.2 算法复杂度分析

传统3维BP算法逐方位脉冲逐网格点做插值和相位补偿操作, 虽然成像结果精确, 但是成像效率低下。本文基于构造几何插值核的CSAR改进3维BP算法减少了插值和相位补偿操作, 转化为1维向量搜索操作, 能够实现可接受误差范围内的更高效3维BP成像。

规定BP算法1次插值和相位补偿操作耗时为 t_1 , 距离向量构造耗时为 t_2 , 距离向量搜索耗时为 t_3 。

(1) 传统3维BP算法: 传统3维BP算法需要做 $N_x \times N_y \times N_z \times N_a$ 次插值和相位补偿操作, 算法耗时为

$$T_1 = N_x \times N_y \times N_z \times N_a \times t_1 \quad (9)$$

(2) 构造几何插值核的改进3维BP算法: 改进3维BP算法需要做1次距离向量构造, $M \times N_a$ 次插值和相位补偿操作, 以及 $N_x \times N_y \times N_z \times N_a$ 次向量搜索操作, 算法耗时为

$$T_2 = M \times N_a \times t_1 + N_x \times N_y \times N_z \times N_a \times t_3 + t_2 \quad (10)$$

因此, 传统3维BP算法与本文所提改进3维BP算法的耗时比为

$$\begin{aligned} \frac{T_1}{T_2} &= \frac{N_x \times N_y \times N_z \times N_a \times t_1}{M \times N_a \times t_1 + N_x \times N_y \times N_z \times N_a \times t_3 + t_2} \\ &\approx \frac{1}{\frac{M}{N_x \times N_y \times N_z} + \frac{t_3}{t_1}} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $M \ll N_x \times N_y \times N_z$, $t_3 < t_1$, 算法耗时比主要与 t_3/t_1 有关, 两种算法耗时比变化曲线如图3所示。

4 仿真实验结果

4.1 圆锥目标改进3维BP成像仿真

仿真圆锥目标如图4所示, 圆锥底面半径为

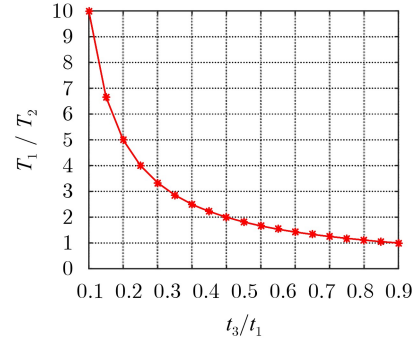


图3 算法耗时比变化曲线

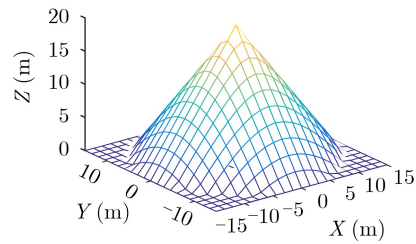


图4 仿真圆锥目标

15 m, 高度为20 m。成像场景大小为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 20 \text{ m}$, 均匀划分成大小为 $501 \times 501 \times 101$ 的3维成像网格, 构造几何插值核长度为5001。雷达信号载频为1.5 GHz, 带宽为200 MHz, 分别在入射角为 30° , 40° , 50° 和 60° 的条件下进行3维成像。

采用MATLAB软件, 处理器为i5-2400, 圆锥目标单圈CSAR传统3维BP成像耗时和所提改进3维BP成像耗时有对比如表1所示, 传统3维BP成像算法耗时是所提算法耗时的2.8970倍。

表1 圆锥目标传统3维BP成像与改进3维BP成像耗时对比(s)

传统3维BP耗时	改进3维BP耗时	算法耗时比
30505	10530	2.8970

圆锥目标单圈CSAR改进3维BP成像结果与切片, 以及多圈CSAR改进3维BP成像相干积累结果与切片如图5所示。相比于单圈CSAR, 多圈CSAR相干3维成像结果具有更优的高程分辨能力。

4.2 GOTCHA数据改进3维BP成像结果

GOTCHA数据仿真所用Toyota Camry汽车光学图像及其回波信号生成模型示意如图6所示。

成像场景大小为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$, 均匀划分成大小为 $501 \times 501 \times 21$ 的3维成像网格, 构造几何插值核长度为5001, 360° 全孔径均匀划分为60个互不重叠的子孔径。雷达信号载频为9.6 GHz, 带宽为669 MHz, 分别在入射角为 30° , 40° , 50° 和 60° 的条件下进行3维成像。

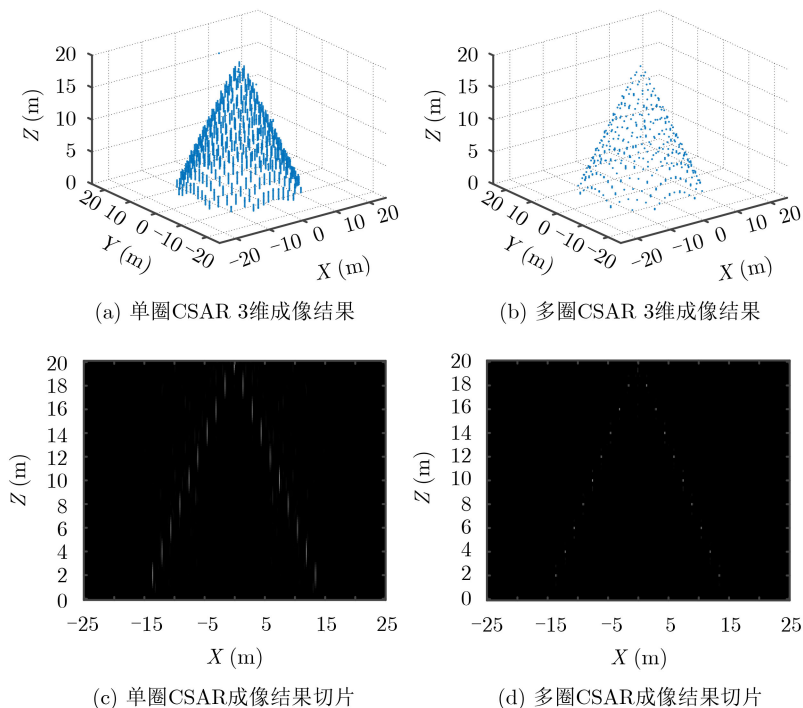


图5 圆锥目标CSAR改进3维BP成像结果与切片



图6 Camry汽车光学图像与回波信号生成模型示意

汽车属于散射特性随着观测角度变化较大的各向异性目标。因此，子孔径成像结果之间做广义似然比检验(Test of Generalized Likelihood Ratio, GLRT)可以得到较好的3维成像结果^[14,15]。对每个子孔径回波进行改进3维BP成像，将每个子孔径不同轨道的改进3维BP成像结果相干积累后得到该子孔径下的改进3维BP成像结果。选取各子孔径3维成像结果中对应网格位置的强度最大值作为该网格处的最终成像结果。

仿真采用MATLAB软件，处理器为i5-2400，GOTCHA数据单圈CSAR传统3维BP成像耗时和所提改进3维BP成像耗时有对比如表2所示，传统3维BP成像算法耗时是所提算法耗时的2.9598倍。

表2 GOTCHA数据传统3维BP成像与改进3维BP成像耗时对比(s)

传统3维BP耗时	改进3维BP耗时	算法耗时比
64427	21767	2.9598

雷达入射角为30°的GOTCHA数据单圈CSAR改进3维BP成像结果与切片，以及多圈CSAR改进3维BP成像相干积累结果与切片如图7所示。相比于单圈CSAR，多圈CSAR相干3维成像结果具有更优的高程分辨能力。

5 结束语

圆迹SAR对目标进行360°全方位观测，有效地解决了条带SAR存在的叠掩问题，是一种典型的合成孔径雷达3维成像模型。然而，高程向的低分辨率以及3维BP成像算法的低效率严重限制了单圈CSAR 3维成像的实际工程应用。因此，本文提出一种基于改进3维后向投影的多圈CSAR相干3维成像方法。针对单圈CSAR 3维成像的局限性，提供了一种新的解决思路。仿真的圆锥目标和GOTCHA数据3维成像结果验证了本文所提方法的正确性和有效性。

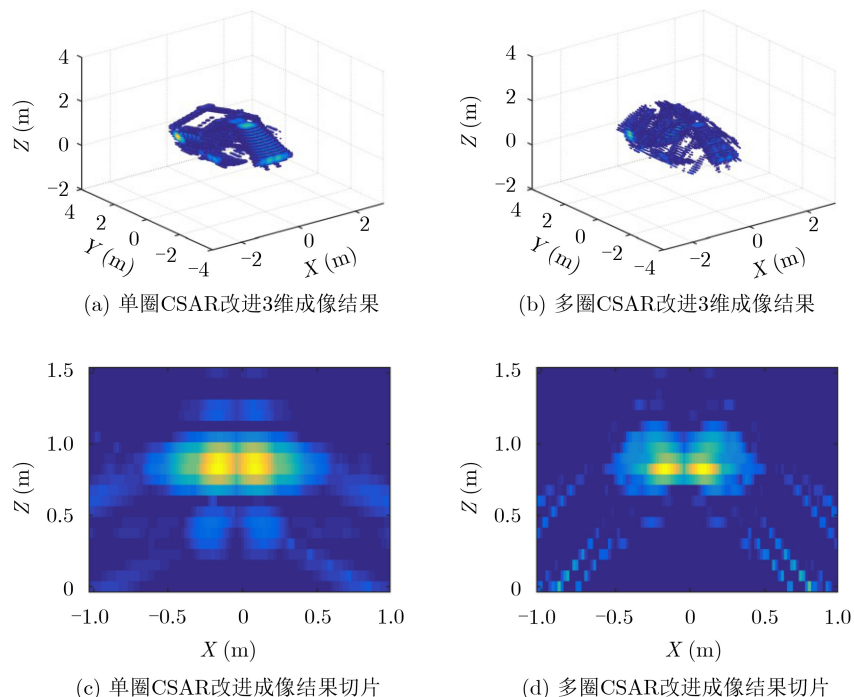


图7 GOTCHA数据CSAR改进3维BP成像结果与切片

参考文献

- [1] 王伟, 胡子英, 龚琳舒. MIMO雷达三维成像自适应Off-grid校正方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(6): 1294–1301. doi: [10.11999/JEIT180145](https://doi.org/10.11999/JEIT180145).
WANG Wei, HU Ziyang, and GONG Linshu. Adaptive off-grid calibration method for MIMO radar 3D imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(6): 1294–1301. doi: [10.11999/JEIT180145](https://doi.org/10.11999/JEIT180145).
- [2] 田鹤, 于海峰, 朱宇, 等. 基于频域稀疏压缩感知的星载SAR稀疏重航过3维成像[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(8): 2021–2028. doi: [10.11999/JEIT190638](https://doi.org/10.11999/JEIT190638).
TIAN He, YU Haifeng, ZHU Yu, *et al.* Sparse flight 3-D imaging of spaceborne SAR based on frequency domain sparse compressed sensing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(8): 2021–2028. doi: [10.11999/JEIT190638](https://doi.org/10.11999/JEIT190638).
- [3] 洪文. 圆迹SAR成像技术研究进展[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 124–135. doi: [10.3724/SP.J.1300.2012.20046](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2012.20046).
HONG Wen. Progress in circular SAR imaging technique[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 124–135. doi: [10.3724/SP.J.1300.2012.20046](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2012.20046).
- [4] 洪文, 王彦平, 林赞, 等. 新体制SAR三维成像技术研究进展[J]. 雷达学报, 2018, 7(6): 633–654. doi: [10.12000/JR18109](https://doi.org/10.12000/JR18109).
HONG Wen, WANG Yanping, LIN Yun, *et al.* Research progress on three-dimensional SAR imaging techniques[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(6): 633–654. doi: [10.12000/JR18109](https://doi.org/10.12000/JR18109).
- [5] AHMED I. Study of the local backprojection algorithm for image formation in ultra wideband synthetic aperture radar[D]. [Master dissertation], Sweden: Blekinge Institute of Technology, 2008: 45–52.
- [6] 杨泽民, 孙光才, 吴玉峰, 等. 一种新的基于极坐标格式的快速后向投影算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(3): 537–544. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.00613](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.00613).
YANG Zemin, SUN Guangcai, WU Yufeng, *et al.* A new fast back projection algorithm based on polar format algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(3): 537–544. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.00613](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.00613).
- [7] ULANDER L M H, HELSTEN H, and STENSTROM G. Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(3): 760–776. doi: [10.1109/TAES.2003.1238734](https://doi.org/10.1109/TAES.2003.1238734).
- [8] ISHIMARU A, CHAN T K, and KUGA Y. An imaging technique using confocal circular synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1524–1530. doi: [10.1109/36.718856](https://doi.org/10.1109/36.718856).
- [9] 林赞. 圆迹合成孔径雷达成像算法研究[D]. [博士论文], 中国科学院大学, 2011: 15–29.
LIN Yun. Study on algorithms for circular synthetic aperture radar imaging[D]. [Ph.D.dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2011: 15–29.
- [10] 鲍谦. 三维合成孔径雷达稀疏成像方法研究[D]. [博士论文], 中国科学院大学, 2017: 49–61.
BAO Qian. Study on sparse imaging algorithms for three-dimensional synthetic aperture radar[D]. [Ph. D. dissertation], University of Chinese Academy of Sciences,

- 2017: 49–61.
- [11] PONCE O, PRATS P, SCHEIBER R, *et al.* Study of the 3-D impulse response function of holographic SAR tomography with multicircular acquisitions[C]. The 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), Berlin, Germany, 2014: 1433–1436.
- [12] PONCE O, PRATS-IRAOLA P, PINHEIRO M, *et al.* Fully polarimetric high-resolution 3-D imaging with circular SAR at L-band[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(6): 3074–3090. doi: [10.1109/TGRS.2013.2269194](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2269194).
- [13] 阚学超,李银伟,王海涛,等. 一种新的圆迹SAR快速后向投影算法[J]. 制导与引信, 2018, 39(4): 10–14, 53.
KAN Xuechao, LI Yinwei, WANG Haitao, *et al.* A new algorithm of fast back projection in circular SAR[J]. *Guidance & Fuze*, 2018, 39(4): 10–14, 53.
- [14] VOCCOLA K, YAZICI B, FERRARA M, *et al.* On the relationship between the generalized likelihood ratio test and backprojection for synthetic aperture radar imaging[C]. SPIE 7335, Automatic Target Recognition XIX, Orlando, USA, 2009: 1–10. doi: [10.1117/12.818554](https://doi.org/10.1117/12.818554).
- [15] CHEN Leping, AN Daoxiang, HUANG Xiaotao, *et al.* A 3D reconstruction strategy of vehicle outline based on single-pass single-polarization CSAR data[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, 26(11): 5545–5554. doi: [10.1109/TIP.2017.2738566](https://doi.org/10.1109/TIP.2017.2738566).
- 韩冬: 男, 1994年生, 博士生, 研究方向为基于多角度观测的SAR 3维成像技术.
- 周良将: 男, 1981年生, 研究员, 研究方向为合成孔径雷达系统设计、系统误差补偿及其相关信号处理技术.
- 焦泽坤: 男, 1991年生, 助理研究员, 研究方向为SAR 3维成像技术.
- 吴一戎: 男, 1963年生, 研究员, 中国科学院院士, 研究方向为高分辨机载合成孔径雷达及运动补偿技术、SAR信号处理算法、遥感卫星地面处理与应用系统的体系结构、数据处理算法等.

责任编辑: 马秀强