

基于坐标变换的大斜视 SAR 波数域成像算法

徐鹤临¹, 李凌宇^{1,2}, 毕辉^{1,2}

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京 211106;

2. 南京航空航天大学雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室, 南京 211106)

摘要: 波数域成像算法 (Wavenumber Domain Algorithm, WDA) 采用了精确的信号形式和距离徙动校正方法, 在合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 斜视数据处理中具有精度高等优势。然而, 在大斜视情况下, 传统 WDA 不能充分利用倾斜的二维频谱支撑域, 导致目标聚焦效果差。本文提出了一种全新基于坐标变换的大斜视 SAR 波数域成像算法。该算法首先将 SAR 回波数据变换到二维频域, 通过参考函数相乘 (Reference Function Multiply, RFM) 完成对数据的一致压缩; 然后, 基于坐标变换原理将倾斜的频谱转化为正侧视频谱实现频谱的高利用; 最后, 构建改进的 Stolt 插值因子, 完成补余压缩。与传统波数域算法相比, 所提方法不仅有效校正了倾斜的频谱支撑域, 保证了成像质量, 且其重构的点目标脉冲响应函数 (Impulse Response Function, IRF) 的距离向和方位向剖面正交, 便于分辨率的计算与剖面的精确提取。通过对多组仿真和实测数据处理结果的验证, 证实了所提算法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 波数域算法; 坐标变换; Stolt 插值

中图分类号: TN959

文献标识码: A

Coordinate Transformation Based Wavenumber Domain Algorithm for Squint SAR Imaging

XU Helin¹, LI Lingyu^{1,2}, BI Hui^{1,2}

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Because of Wavenumber Domain Algorithm (WDA) using a more accurate signal form and range cell migration correction technology, it shows high accuracy in squint Synthetic Aperture Radar (SAR) data processing. However, the conventional WDA cannot fully utilize the complete Two-Dimensional (2-D) spectrum support region under high-squint condition, resulting in poor target focusing effect. In this paper, we propose a novel coordinate transformation-based WDA for high-squint SAR imaging. In the proposed method, the squint SAR echo is firstly transformed into the 2-D frequency domain, and the “uniform compression” of the entire data is completed by multiplying the reference function. Then, based on the principle of coordinate transformation, the tilted spectrum is converted into a rectangular form. Finally, residual focusing is achieved by a modified Stolt interpolation. Compared with traditional WDA, the proposed algorithm corrects the inclined spectral support region and ensures the imaging quality. In addition, the range and azimuth profiles of its point target impulse response function (IRF) are orthogonal, which facilitates the calculation of resolution and the extraction of profiles. Experimental results based on simulated and real data validate the proposed method.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Wavenumber Domain Algorithm (WDA); Coordinate Transformation; Stolt Interpolation

1 引言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种主动式高分辨率微波成像手段。它不受时间和天气的影响, 可实现全天时、全天候观测, 被广泛应用于灾情预测、地质勘探以及战场情报侦察等领域^[1]。传统 SAR 一般工作在正侧视模式下, 只能对雷达平台的侧方区域成像, 无法获取雷达平台斜前视区域的信息, 然而在复杂战场环境下, 斜前视场景信息获取十分重要^[2]。随着 SAR 技术的不断发展, SAR 已经有条带、扫描、聚束等多种工作模式, 且广泛应用于飞机、卫星、无人机等多种机动平台。

为满足战场侦察和目标检测的现代战争需求, 大斜视 SAR 高分辨成像算法的研究具有重要意义。大斜视 SAR 不仅扩大了雷达的探测范围, 还能通过测量目标多角度后向散射特性来获取表面结构信息, 为目标的检测和识别提供便利^[3]。然而, 大斜视 SAR 回波具有更强的空变性, 距离方位耦合更严重, 成像处理的难度更大。自 20 世纪 80 年代, 美国就针对斜视 SAR 成像算法开展了相关工作^[4]。经过国内外学者几十年的努力, 目前已有多种可用于斜视 SAR 成像的有效处理方法。常用的有后向投影 (Back Projection, BP) 算法^[5]、距离多普勒 (Range Doppler, RD) 算法^[6]、频谱分析 (Spectral analysis, SPECAN) 算法^[7]等。SPECAN 算法的核心在于通过“解斜”后的快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 完成方位压缩, 该算法效率高, 所需内存少, 可用于小孔径数据处理。RD 算法采用插值的方式来补偿二次距离压缩 (Secondary Range Compression, SRC) 和距离单元徙动 (Range Cell Migration, RCM), 该算法兼具成熟、简单和高效等优点, 至今仍为应用最广泛的算法^[8]。在大斜视、高精度 SAR 成像中, SPECAN 算法因其简化的信号模型导致方位向成像场景长度被严重限制, RD 算法因未精确校正距离方位耦合无法获取高分辨图像。与频域成像算法相比, BP 算法可以有效利用传感器轨迹信息, 适合处理大斜视非线性平台轨迹数据。但 BP 本质是一个逐点遍历成像的时域算法, 其计算效率低, 限制了其在实时成像系统中的应用^[9]。

与上述成像算法相比, 波数域算法 (Wavenumber Domain Algorithm, WDA, 亦可称作 Omega-K 算法) 采用了更精确的信号形式和距离徙动校正方法, 在处理高分辨率、大斜视 SAR 数据方面具有独特优势^[10]。经典波数域 (Classical Wavenumber Domain, CWD) 算法^[11]通过二维波数域中的 Stolt 插值实现了距离方位解耦补偿。2006 年, Reigber 等人针对机载情况提出了一种新的条带 SAR 数据处理算法, 该方法采用了改进的 Stolt 插值, 被命名为扩展波数域 (Extended Wavenumber Domain, EWD) 算法^[12]。文献[13]采用 EWD 算法对斜视聚

束 SAR 数据进行了聚焦成像，目前 EWD 算法被广泛用于星载斜视条带模式^[16]、斜视滑动聚束模式^[17]和斜视 TOPS 模式^{错误!未找到引用源。}。基于圆锥参考几何，文献[20]提出了一种用于处理斜视 SAR 数据的改进 EWD 算法，该算法在文献[12]中被称为斜视波数域（Squinted Wavenumber Domain, SWD）方法。2022 年，Fornaro 等人分析了不同 SAR 原始数据获取模型和处理几何对图像聚焦的影响，并表明获取模型和处理几何不匹配可能会在生成图像中产生显著的相位差^[21]。2023 年，Chen 等人推导了 CWD、EWD 和 SWD 三种算法的内在联系，并从计算复杂度、聚焦图像质量和几何位置三个方面定量地分析了它们的优劣^[12]。然而，上述波数域算法所采用的 Stolt 插值都忽略了倾斜的二维数据支撑域的影响，因此当斜视角变大时 SAR 图像质量会大大降低。2012 年，安道祥等人提出了一种处理斜视聚束 SAR 数据的两步聚焦算法，该算法可以校正倾斜的数据支持域，但在大斜视情况下存在难以忽视的相位误差^[22]。2016 年，梁毅等人提出了一种处理大斜视、小孔径数据的改良 Omega-K 算法，该算法通过旋转校正函数来进行频谱无斜视处理，但其最终聚焦图像在方位向上存在几何畸变^[23]。同年，董祺等人提出了一种基于坐标轴旋转的俯冲段大斜视 SAR 波数域算法，该算法通过坐标轴旋转改变频谱支撑域的选择，从而有效保证 SAR 成像质量^[23]。**针对现有方法在大斜视成像中存在的几何失真问题**，本文在 SWD 算法基础上融入频谱旋转，提出了一种全新基于坐标变换的大斜视 SAR 波数域算法，消除了几何形变，提高了重构图像质量。该算法先通过 RFM 完成一致压缩，再基于坐标变换完成二维频谱旋转，最后采用改进的 Stolt 插值核完成补余压缩。

本文后续结构如下。第 2 节主要介绍了大斜视条带 SAR 成像模型，并推导了该模型下回波信号形式。第 3 节介绍了本文所提算法原理及流程。第 4 节给出了基于星载 SAR 参数的仿真和实测数据实验。第 5 节开展了不同斜视角下的机载参数仿真实验，给出了实测数据成像结果，证明了所提算法可在机载大斜视情况下精确成像。最后一节对本文进行了总结和展望。

2 成像模型

条带模式下，**大斜视** SAR 成像几何模型如图 1 所示。SAR 平台沿方位向以速度 V_r 飞行，点目标 P 被波束中心照射时的斜距为 R_0 ，则雷达到该目标的瞬时斜距 $R(x)$ 可以表示为

$$\begin{aligned}
R(x) &= \sqrt{R_0^2 + V_r^2 (\eta - \eta_c)^2 - 2R_0 V_r (\eta - \eta_c) \sin \theta} \\
&= \sqrt{R_0^2 + (x - x_n)^2 - 2R_0 (x - x_n) \sin \theta}
\end{aligned} \tag{1}$$

其中, θ 为波束的中心斜视角, η 为方位向时间, $x = V_r \eta$ 为雷达的瞬时位置, η_c 为波束中心穿越时刻, $x_n = V_r \eta_c$, η_0 为零多普勒时刻。

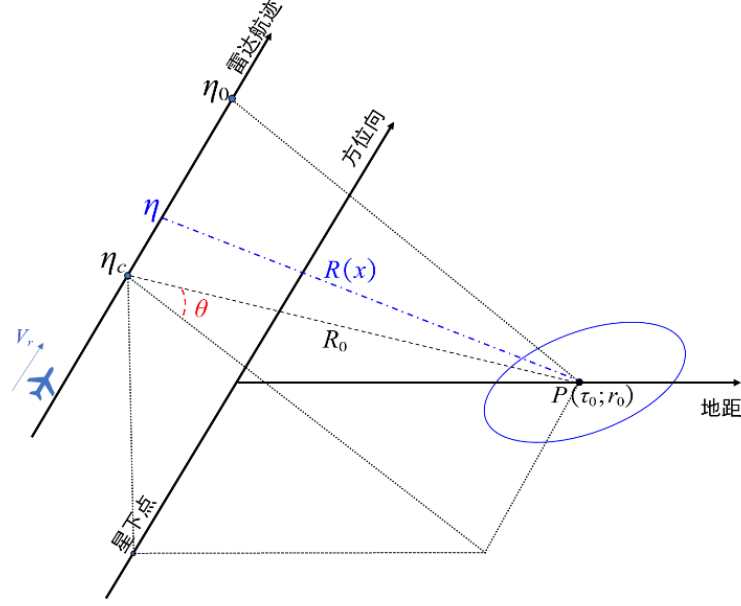


图 1 条带 SAR 斜视成像几何模型

Fig.1 Squinted imaging geometry of stripmap SAR

若雷达发射信号为具有线性调频特性的脉冲信号, 则对于单个点目标 P 的接收信号可以表示为

$$\begin{aligned}
s_r(\tau, \eta) &= A_0 \omega_r \left(\tau - \frac{2R(x)}{c} \right) \omega_a (\eta - \eta_c) \\
&\cdot \cos \left[2\pi f_0 \left(\tau - \frac{2R(x)}{c} \right) + \pi \gamma \left(\tau - \frac{2R(x)}{c} \right)^2 + \psi \right]
\end{aligned} \tag{2}$$

其中, σ_0 为点目标后向散射系数, A_0 为 σ_0 的幅度值, γ 为发射信号调频率, f_0 为载波频率, τ 为距离向时间, ψ 为地表散射过程可能引起的雷达信号相位改变, ω_r 表示距离窗函数, ω_a 表示方位窗函数。经过 SAR 系统正交解调后, 点目标 P 的回波形式为

$$s_0(\tau, \eta) = A_1 \omega_r \left(\tau - \frac{2R(x)}{c} \right) \omega_a(\eta - \eta_c) \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0 R(x)}{c} \right\} \exp \left\{ j\pi \gamma \left(\tau - \frac{2R(x)}{c} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

其中, $A_1 = A_0 \exp\{j\psi\}$, A_1 为一个复常数。

为得到回波的二维频域表达式, 先对 $s_0(\tau, \eta)$ 进行距离向傅里叶变换, 根据驻定相位原理 (Principle of Stationary Phase, POSP), 忽略常数乘积项, 求得回波在距离频域、方位时域的表达式为

$$S_1(f_\tau, \eta) = W_r(f_\tau) \omega_a(\eta - \eta_c) \cdot \exp \left\{ -j \frac{\pi f_\tau^2}{\gamma} \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi(f_0 + f_\tau)R(x)}{c} \right\} \quad (4)$$

其中, f_τ 为距离向频率, W_r 为信号的距离频谱包络。然后对 $S_1(f_\tau, \eta)$ 进行方位向 FFT, 可获得回波二维频域表达式

$$S_2(f_\tau, f_\eta) = \int S_1(f_\tau, \eta) \exp(-j2\pi f_\eta \eta) d\eta \quad (5)$$

由驻定相位原理, 可求得驻定相位中心

$$\eta^* = \eta_c + \frac{R_0}{V_r} \left(\sin \theta - \frac{h(f_\tau, f_\eta)}{\sqrt{1 - h(f_\tau, f_\eta)^2}} \cdot \cos \theta \right) \quad (6)$$

其中, f_η 为方位向频率, $h(f_\tau, f_\eta) = \frac{cf_\eta}{2V_r(f_0 + f_\tau)}$ 。利用 η^* 可以将式(5)的积分结果写成

$$S_2(f_\tau, f_\eta) = W_r(f_\tau) W_a(f_\eta - f_{\eta_c}) \exp \left(-j \frac{\pi f_\tau^2}{\gamma} \right) \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi(f_0 + f_\tau)R_0}{c} \sqrt{1 - h(f_\tau, f_\eta)^2} \cos \theta \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi f_\eta}{V_r} (x_n + R_0 \sin \theta) \right\} \quad (7)$$

其中, f_{η_c} 为多普勒中心频率, W_a 为信号的方位频谱包络。

3 基于坐标变换的斜视波数域算法

3.1 一致距离压缩

本文所提算法包含三个关键步骤：参考函数相乘（Reference Function Multiply, RFM）、基于坐标变换的频谱旋转和改进的 Stolt 插值。

波数域算法第一个主要聚焦步骤是在二维频域实现的 RFM，其滤波器相位为

$$\Phi_{\text{ref}} = \frac{4\pi(f_0 + f_\tau)R_{\text{ref}}}{c} \sqrt{1 - h(f_\tau, f_\eta)^2} \cos\theta + \frac{2\pi f_\eta R_{\text{ref}}}{V_r} \sin\theta + \frac{\pi f_\tau^2}{\gamma} \quad (8)$$

其中， R_{ref} 为参考斜距，一般以成像场景中心为参考点。经过参考函数相乘滤波后，补偿后的信号可以表示为

$$S_3(f_\tau, f_\eta) = W_r(f_\tau) W_a(f_\eta - f_{\eta_c}) \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi(f_0 + f_\tau)}{c} \sqrt{1 - h(f_\tau, f_\eta)^2} \cdot m - j \frac{2\pi f_\eta}{V_r} \cdot n\right\} \quad (9)$$

其中， $m = (R_0 - R_{\text{ref}})\cos\theta$ ， $n = (R_0 - R_{\text{ref}})\sin\theta + x_n$ 。

RFM 用参考距离处的相位对整个数据进行“一致压缩”，使得参考距离处的残余相位为零，但其他距离处的目标仍存在残余相位。为了对全部场景精确聚焦，需在执行后续操作时予以校正。

3.2 二维频谱旋转

在波数域算法中，插值时需要对频谱的支持域进行矩形选择^[25]。值得注意的是，在斜视 SAR 成像中矩形区域的选择受限于数据支撑域(Data Support Region, DSR)，矩形区域和 DSR 分别如图 2 红色和绿色区域所示。随着斜视角的增大，DSR 越倾斜，矩形区域选择受限越严重。若 Stolt 插值时选择了受限的矩形区域，将减小用于二维逆傅里叶变换（Inverse FFT, IFFT）的频谱支撑域，从而导致最终聚焦图像质量的降低^[23]。设 k_r 为距离向波数，

$$k_r = k_{rc} + \Delta k_r = \frac{4\pi(f_0 + f_\tau)}{c}, \quad k_x \text{ 为方位向波数, } k_x = \frac{2\pi f_\eta}{V_r}, \quad k_y = \sqrt{k_r^2 - k_x^2}。$$

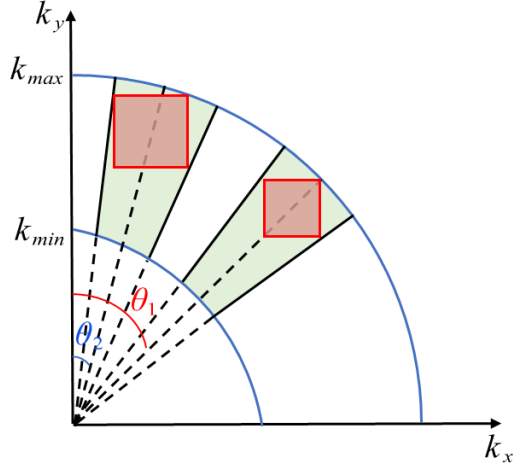


图 2 传统波数域算法的数据支撑域选择^[23]

Fig.2 DSR selection of the conventional WDA^[23]

因此，我们可以通过旋转坐标轴或 DSR 的方式来提高 DSR 的利用率，最大化矩形区域的面积。本文通过坐标旋转变换的原理来获取新的坐标轴，从而将倾斜的斜视频谱转化为正侧视频谱，增加频谱内矩形区域面积，有效地保证成像质量，如图 3 所示。其中， $k_{x_n} = \frac{2\pi f_u}{V_r}$ ， f_u 为坐标变换后新的方位向频率， $k_{y_n} = \sqrt{k_r^2 - k_{x_n}^2}$ 。

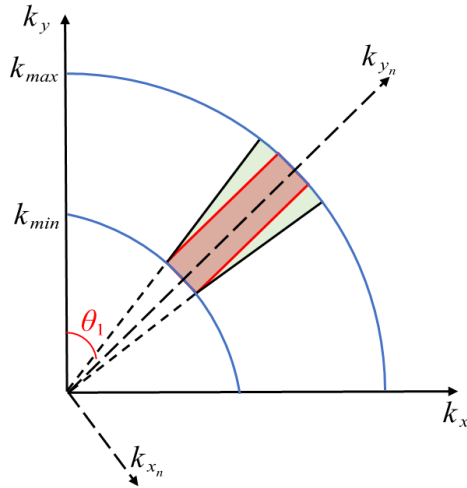


图 3 本文算法的数据支撑域选择^[23]

Fig.3 DSR selection of the proposed algorithm^[23]

综上所述，坐标旋转因子为

$$\begin{bmatrix} n \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (10)$$

旋转后信号表达式可整理为

$$\begin{aligned}
 S_4(f_\tau, f_\eta) = & W_r(f_\tau) W_a(f_\eta - f_{\eta_c}) \\
 & \cdot \exp \left\{ -j \left[\frac{4\pi(f_0 + f_\tau)}{c} \sqrt{1 - h(f_\tau, f_\eta)^2} \cos \theta + \frac{2\pi f_\eta}{V_r} \sin \theta \right] \cdot v \right\} \\
 & \cdot \exp \left\{ -j \left[\frac{2\pi f_\eta}{V_r} \cos \theta - \frac{4\pi(f_0 + f_\tau)}{c} \sqrt{1 - h(f_\tau, f_\eta)^2} \sin \theta \right] \cdot u \right\}
 \end{aligned} \quad (11)$$

式中，第一个指数项表示距离向分量，第二个指数项表示方位向分量。首先对方位向进行插值变换，插值因子为

$$\begin{aligned}
 f_u = & f_\eta \cos \theta - \frac{2V_r(f_0 + f_\tau)}{c} \sqrt{1 - h(f_\tau, f_\eta)^2} \sin \theta \\
 = & f_\eta \cos \theta - \sqrt{\left[\frac{2V_r(f_0 + f_\tau)}{c} \right]^2 - f_\eta^2} \sin \theta
 \end{aligned} \quad (12)$$

方位向插值变换后，信号的二维频谱由倾斜谱转化成矩形谱，为后续的残余相位校正等成像处理带来了极大方便。图 4(a)展示了坐标旋转变换前因斜视而严重倾斜的二维频谱，图 4(b)给出了坐标旋转变换校正后的二维频谱，该结果与上述分析一致。

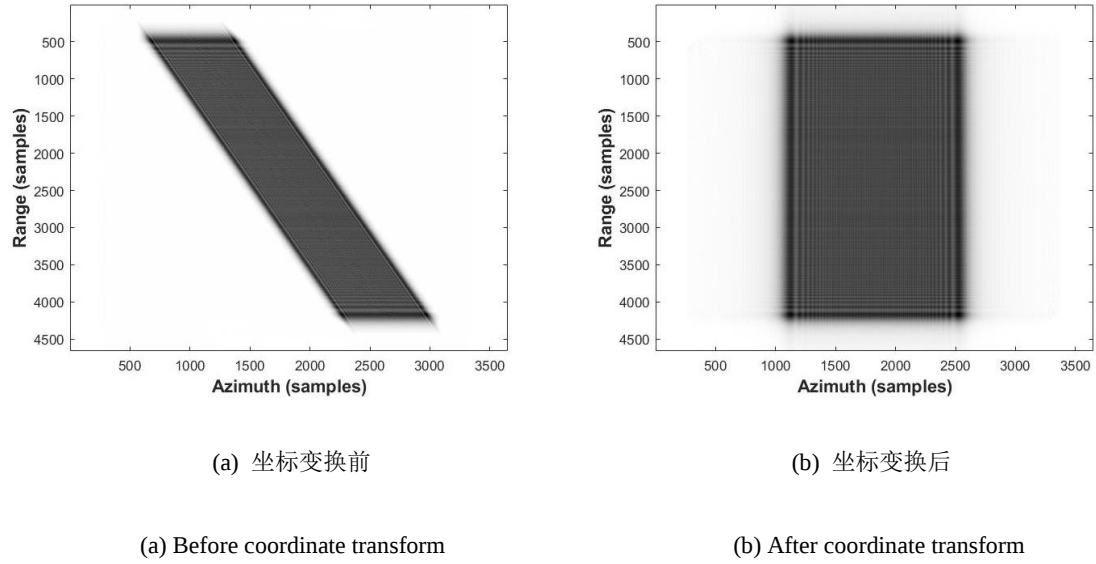


图 4 斜视 SAR 频谱仿真

Fig.4 Simulation of squint SAR spectrum

3.3 改进的 Stolt 插值

方位向插值实际上将原来的方位向频率 f_η 映射为新的方位向频率 f_u ，因此信号表达式

变为

$$S_5(f_\tau, f_u) = W_r(f_\tau) W_a(f_u - f_{\eta_c}) \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi f_u}{V_r} \cdot u\right\} \cdot \exp\left\{-j \left[\frac{4\pi(f_0 + f_\tau)}{c} \sqrt{1 - h(f_\tau, f_u)^2} \cos\theta + \frac{2\pi f_u}{V_r} \sin\theta \right] \cdot v\right\} \quad (13)$$

其中, $h(f_\tau, f_u) = \frac{c f_u}{2V_r(f_0 + f_\tau)}$, 随后构建改进的 Stolt 插值因子, 对信号距离向进行插值, 插值因子为

$$f_0 + f_v = (f_0 + f_\tau) \sqrt{1 - h(f_\tau, f_u)^2} \cos\theta + \frac{c f_u}{2V_r} \sin\theta \quad (14)$$

经过改进的 Stolt 插值后, 信号二维频域表达式为

$$S_6(f_v, f_u) = W_r(f_v) W_a(f_u - f_{\eta_c}) \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi f_u}{V_r} \cdot u\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi(f_0 + f_v)}{c} \cdot v\right\} \quad (15)$$

最后, 通过二维 IFFT 将信号变回二维时域得到聚焦的 SAR 图像。综上所述, 本文所提算法处理流程如图 5 所示。

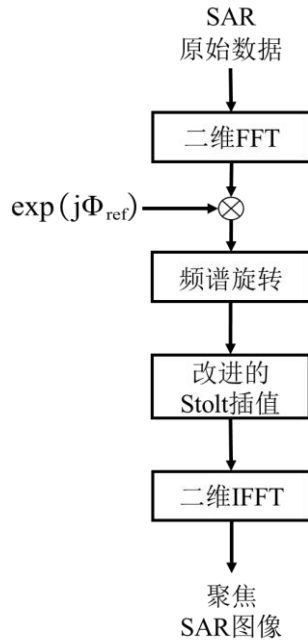


图 5 本文算法流程图

Fig.5 Flowchart of the proposed algorithm

4 点目标仿真

4.1 星载参数仿真实验

为了验证所提基于坐标变换原理的波数域成像算法的有效性，本文先进行星载条带 SAR 的点目标仿真实验，点目标成像场景设计如图 6 所示。成像场景中的 9 个点目标以 3×3 矩阵的形式均匀分散在场景中，其中点目标 T2 为场景中心。星载仿真参数如表 1 所示。

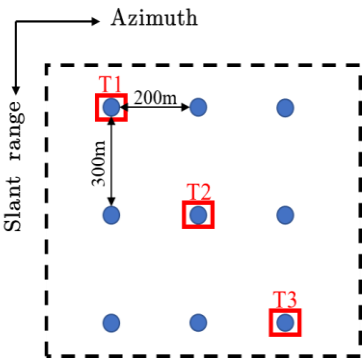


图 6 成像场景设计

Fig.6 Designed imaged scene

表 1 星载 SAR 系统参数

Tab.1 Spaceborne SAR system parameters

参数	参数值
雷达工作频率	5.3 GHz
脉冲重复频率	1256.98 Hz
信号带宽	30.11 MHz
发射脉冲时宽	41.74 μ s
等效雷达速度	7062 m/s
景中心斜距	1006.3 km
多普勒中心频率	-6900 Hz

为评估点目标的聚焦效果，图 7 分别绘制了 EWD 算法和本文算法的点目标 T1、T2 和 T3 脉冲响应函数二维等高线图（第一行为 EWD 结果，第二行为本文算法结果），直观地反映了点目标的聚焦效果。同时，为了量化地分析本文所提算法性能，表 2 进一步给出了点目标的峰值旁瓣比(Peak Sidelobe Ratio, PSLR)和积分旁瓣比(Integrated Sidelobe Ratio, ISLR)。

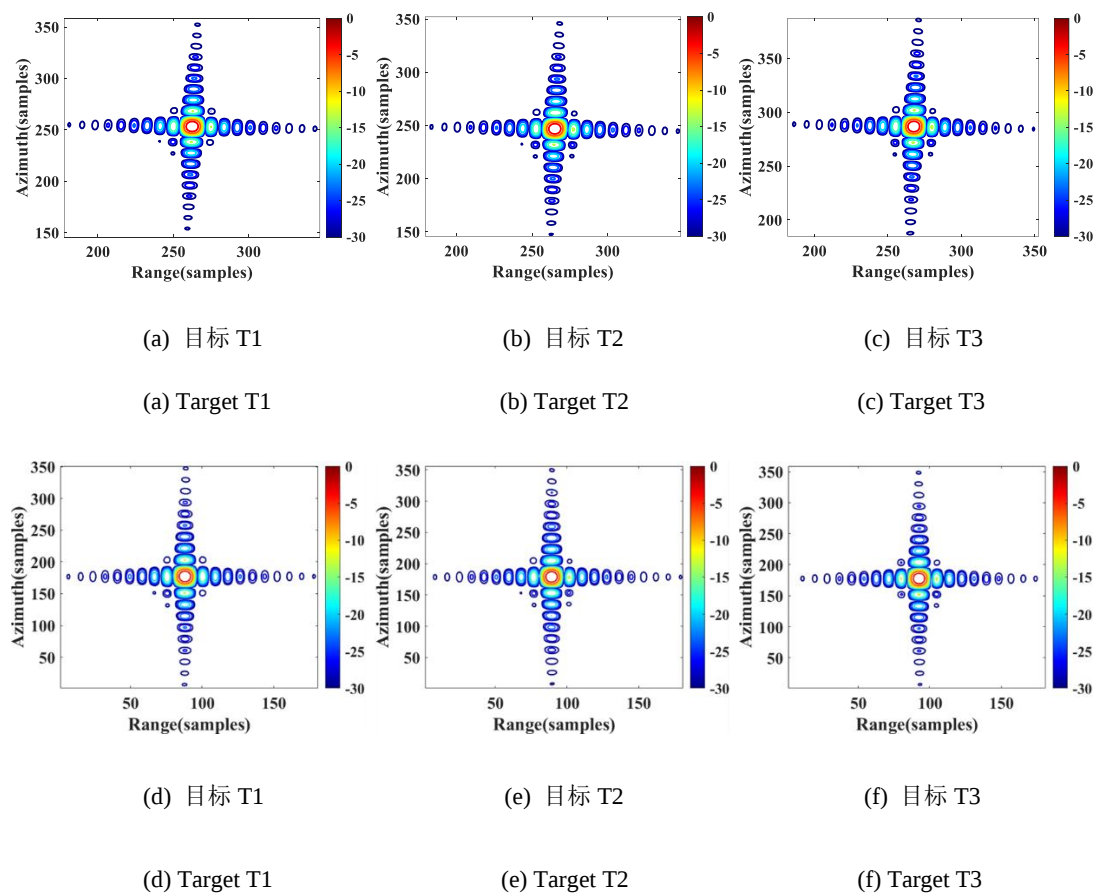


图 7 点目标 IRF 等高线图

Fig.7 Contours of point target IRF

表 2 点目标成像性能参数

Tab.2 Imaging parameters of point target

点目标		方位向		距离向	
		PSLR(dB)	ISLR(dB)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
理论值		-13.26	-9.80	-13.26	-9.80
T1	EWD 算法	-13.27	-10.03	-13.12	-9.96
	本文算法	-13.23	-9.98	-13.37	-9.85

T2	EWD 算法	-13.09	-9.90	-13.14	-10.00
	本文算法	-13.41	-9.83	-13.19	-9.74
T3	EWD 算法	-13.20	-9.49	-13.07	-9.99
	本文算法	-13.19	-10.04	-13.10	-9.69

由图 7 可知，本文算法重构点目标的距离向和方位向保持正交。从表 2 中可以看出，本文所提算法的成像性能指标与理论值基本吻合，证明本文算法可以在星载参数下实现目标的精确聚焦。与 EWD 算法相比，本文算法的 ISLR 更接近理论值，点目标聚焦效果更好。

4.2 机载斜视参数仿真实验

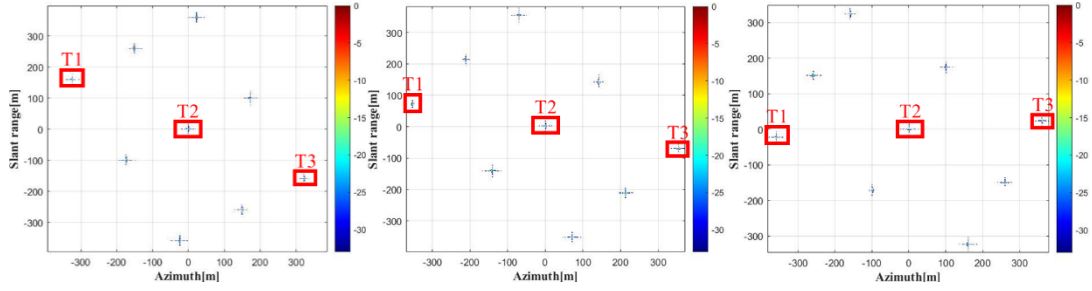
为了验证所提算法可以在机载斜视情况下实现精确成像，本文将分别在斜视角为 30°、45° 和 60° 的情况下进行机载仿真实验，从而证明所提算法在机载斜视情况下的有效性和普适性。点目标场景设计如图 6 所示，机载仿真参数如表 3 所示。

表 3 机载 SAR 系统参数

Tab.3 Airborne SAR system parameters

参数	数值
雷达工作频率	9.4GHz
脉冲重复频率	600Hz
信号带宽	100MHz
发射脉冲时宽	10μs
等效雷达速度	250m/s
景中心斜距	30km
斜视角	30°、45° 和 60°

所提算法在斜视角为 30° 、 45° 和 60° 时的多个点目标成像结果如图 8(a)、8(b) 和 8(c) 所示。可以看出，所提算法的成像结果为设计场景以景中心为中心逆时针旋转斜视角大小，与第三章式(15)所示的理论聚焦位置相符。值得注意的是，图 8 不同斜视角成像结果中的点目标相对位置并未改变，因此不存在几何形变。



(a) 斜视角 $\theta = 30^\circ$

(b) 斜视角 $\theta = 45^\circ$

(c) 斜视角 $\theta = 60^\circ$

(a) Squint angle is 30°

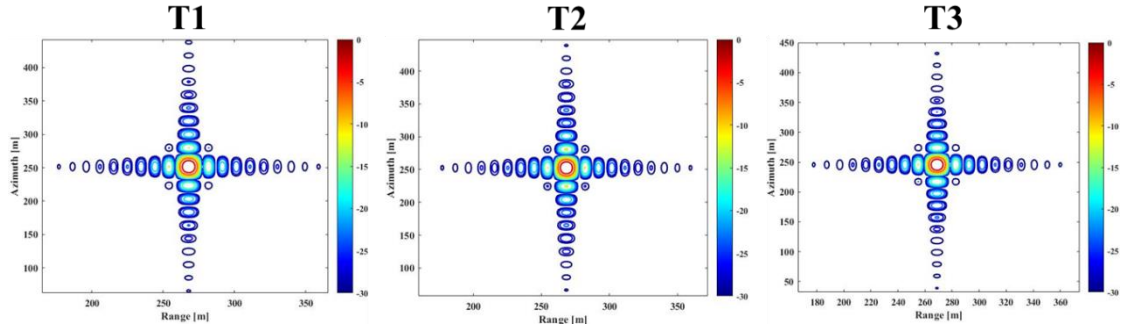
(b) Squint angle is 45°

(c) Squint angle is 60°

图 8 本文所提算法成像结果

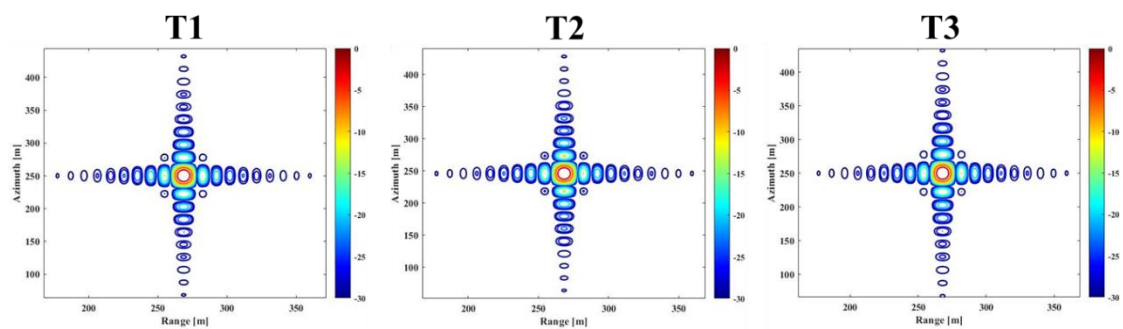
Fig.8 Imaging result of the proposed algorithm

为进一步评估本算法在机载大斜视情况下的聚焦效果，分别对 30° 、 45° 和 60° 聚焦图像中的 T1、T2 和 T3 进行升采样，并画出它们 IRF 等高线图，分别如图 9(a)、9(b) 和 9(c) 所示。



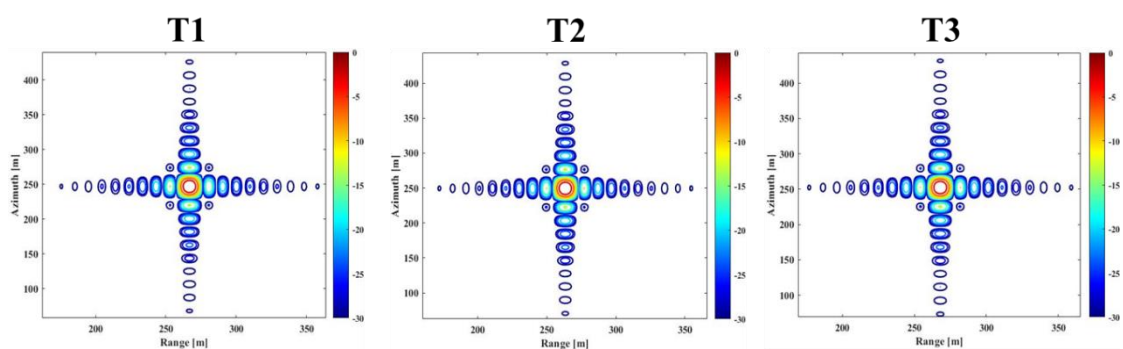
(a) 斜视角 $\theta = 30^\circ$

(a) Squint angle is 30°



(b) 斜视角 $\theta = 45^\circ$

(b) Squint angle is 45°



(c) 斜视角 $\theta = 60^\circ$

(c) Squint angle is 60°

图9 不同斜视角下 T1、T2 和 T3 的恢复图像

Fig.9 Recovered images of T1, T2, and T3 with different squint angles

由于本算法加入了频谱旋转操作,将倾斜的频谱转化为矩形谱。因此无论斜视角为多大,点目标脉冲响应函数的距离向和方位向剖面均可保持正交。以文献[12]中所提 SWD 算法作为对比,比较两种方法在不同斜视角情况下不同点目标的方位向 PSLR 和 ISLR,结果如表 4 所示。

表 4 成像性能指标对比(方位向)

Tab.4 Comparison of imaging performance indicators (azimuth)

点目标	本文算法	SWD 算法
-----	------	--------

		PSLR(dB)	ISLR(dB)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
理论值		-13.26	-9.80	-13.26	-9.80
30°	T1	-13.2937	-10.1384	-13.3021	-10.1626
	T2	-13.1138	-9.8132	-13.1733	-9.9587
	T3	-13.3332	-10.1645	-13.3070	-10.1667
45°	T1	-13.1333	-9.9720	-13.3944	-10.2056
	T2	-13.1398	-9.9340	-13.2181	-10.1184
	T3	-13.1576	-9.9735	-13.3290	-10.1888
60°	T1	-13.0956	-9.8587	-13.2818	-10.3070
	T2	-13.1123	-9.8478	-13.1939	-10.2043
	T3	-13.1022	-9.8489	-13.2542	-10.3022

结果表明，本文算法处理的不同斜视、不同位置点目标的 PSLR 和 ISLR 与理论值基本吻合，说明信号近似为理想的二维 sinc 函数，证明了所提算法在机载斜视情况下的有效性。而且，随着斜视角的增大本文算法的 PSLR 比 SWD 算法的 PSLR 更接近理论值，这是由于本文算法在大斜视下的 DSR 利用率更高，证明所提算法在机载大斜视 SAR 成像上具有更好的聚焦效果。

5 机载斜视参数面目标实验

为进一步验证所提算法在机载斜视情况下场景重建的可靠性，本文使用天津盐田实测 SAR 复图像作为输入预设场景来生成 SAR 回波。在回波仿真中，输入复图像中的每个单元都被视为包含目标信号和噪声的点散射体，因此在回波生成过程中没有添加额外的噪声。该

实测仿真参数与表 3 保持一致。图 10 至图 12 依次给出了斜视角为 30° 、 45° 和 60° 的 EWD 算法、SWD 算法和本文算法场景重建结果。

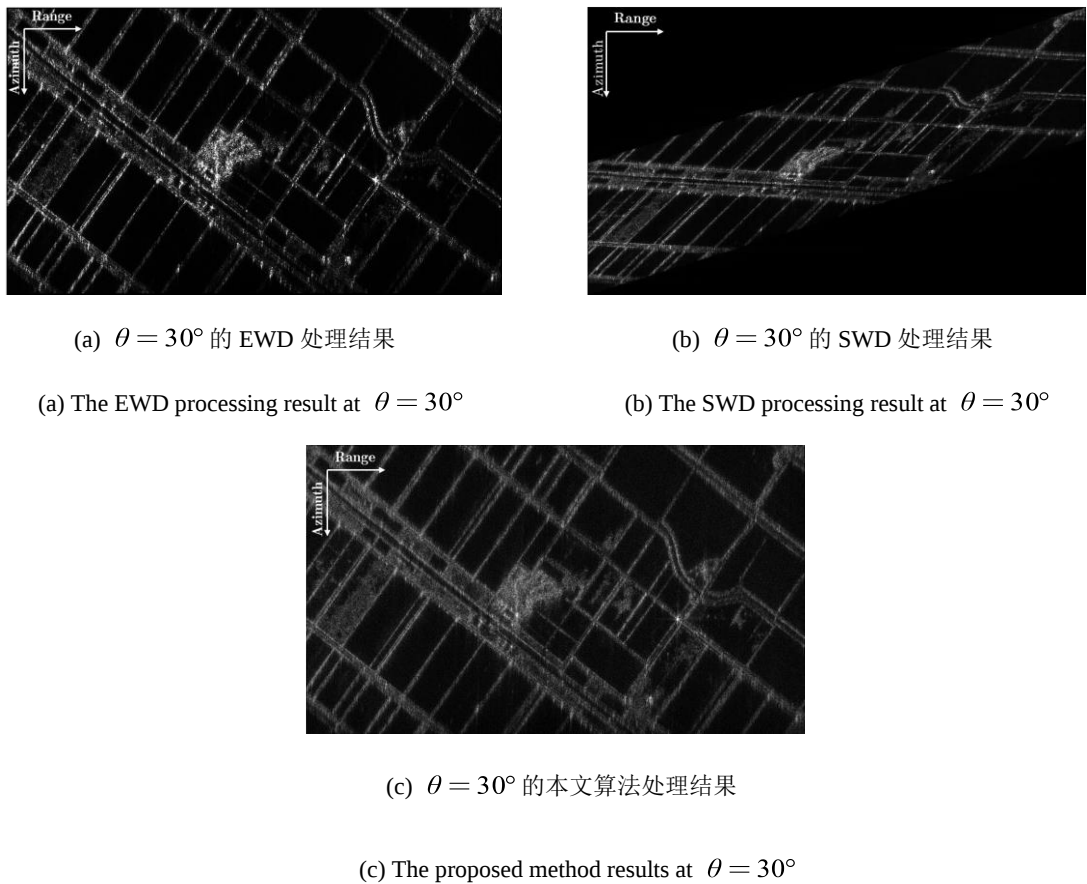
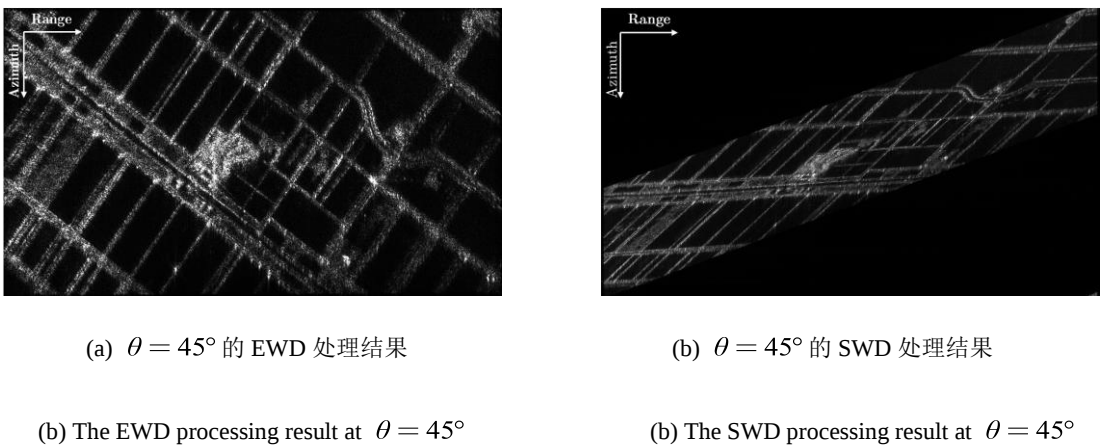
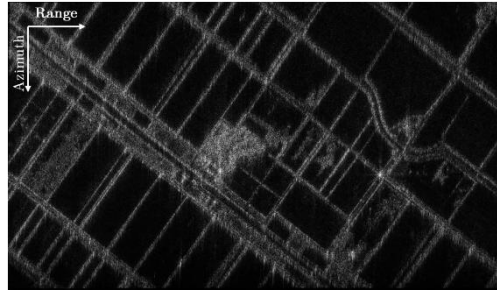


图 10 机载斜视 30° 实测数据仿真结果

Fig.10 Simulation results of airborne squint SAR data



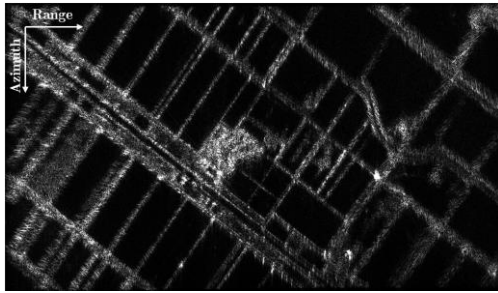


(c) $\theta = 45^\circ$ 的本文算法处理结果

(c) The proposed method results at $\theta = 45^\circ$

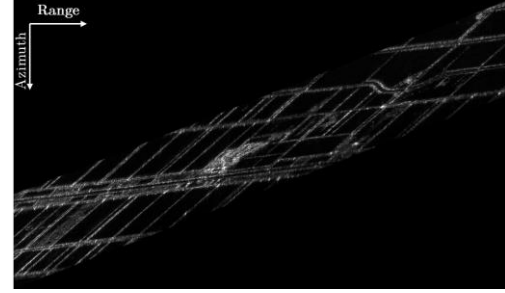
图 11 机载斜视 45° 实测数据仿真结果

Fig.11 Simulation results of airborne squint SAR data



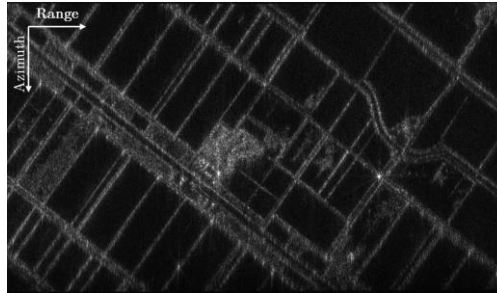
(a) $\theta = 60^\circ$ 的 EWD 处理结果

(a) The EWD processing result at $\theta = 60^\circ$



(b) $\theta = 60^\circ$ 的 SWD 处理结果

(b) The SWD processing result at $\theta = 60^\circ$



(c) $\theta = 60^\circ$ 的本文算法处理结果

(c) The proposed method results at $\theta = 60^\circ$

图 12 机载斜视实测数据仿真结果

Fig.12 Simulation results of airborne squint SAR data

从图 10-12 可以看出，斜视角越大，EWD 算法重建的盐田轮廓越模糊，而 SWD 算法和本文算法的重建图像均聚焦良好。然而，SWD 算法处理结果存在明显的几何形变，且斜

视角越大，图像沿方位向的倾斜越严重。而本文所提算法处理结果不存在几何形变，且有效地保证了大斜视下场景重建的质量。

6 结论

为了保证大斜视条件下 WDA 成像质量，本文提出了一种结合坐标变换的全新斜视波数域 SAR 成像算法。该算法首先构建了条带 SAR 斜视成像几何模型，然后利用坐标变换原理校正倾斜二维频谱支持域，最后通过改进的 Stolt 插值完成残余相位校正，得到聚焦的 SAR 图像。本文基于星载、机载 SAR 仿真数据实验，验证了所提算法在星载、机载斜视情况下的有效性。本文对斜视 SAR 成像研究仅考虑了匀速运动的理想情况，后续可对 SAR 平台非理想轨迹运动情况下的成像问题展开研究。

参考文献:

- [1] SONG Yufan, ZHANG Jingjing, JIN Shuang, et al. Frequency-scaling-based spaceborne squint SAR sparse imaging[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15: 8064-8073.
- [2] HE Feng, DONG Zhen, ZHANG Yongsheng, et al. Processing of spaceborne squinted sliding spotlight and HRWS TOPS mode data using 2-D baseband azimuth scaling[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(2): 938-955.
- [3] 毕辉, 金双, 王潇, 等. 基于高分三号SAR数据的城市建筑高分辨高维成像[J]. 雷达学报, 2022, 11(1): 40-51.

BI Hui, JIN Shuang, WANG Xiao, et al. High-resolution high-dimensional imaging of urban building based on GaoFen-3 SAR data[J]. Journal of Radars, 2022, 11(1): 40-51.(in Chinese)
- [4] 王井增. 机载大斜视SAR成像方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

WANG Jingzeng. Research on airborne highly squint SAR imaging method[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [5] Wong F W, Yeo T S. New applications of nonlinear chirp scaling in SAR data processing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(5): 946-953.
- [6] LASSWELL S W. History of SAR at Lockheed Martin (previously Goodyear Aerospace)[J]. Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, 2005.
- [7] RIBALTA A. Time-domain reconstruction algorithms for FMCW-SAR[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(3): 396-400.
- [8] GAIBEL A, BOAG A. Backprojection imaging of moving objects[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(8): 4944-4954.
- [9] FAN Wenna, ZHANG Min, LI Jinxing, et al. Modified range-doppler algorithm for high squint SAR echo processing[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(3): 422-426.
- [10] CUMMING I G, WONG F H C. Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation[M]. Boston: Artech House, 2005.
- [11] 唐江文, 邓云凯, 王宇, 等. 高分辨率滑动聚束SAR BP成像及其异构并行实现[J]. 雷达学报, 2017, 6(4): 368-375. doi:10.12000/JR16053.

TANG Jiangwen, DENG Yunkai, WANG Robert, et al. High-resolution slide spotlight SAR imaging by BP algorithm and heterogeneous parallel implementation[J]. Journal of Radars, 2017, 6(4): 368-375.(in Chinese)
- [12] CHEN Xing, HOU Zhenyu, DONG Zhen, et al. Performance analysis of wavenumber domain algorithms for highly squinted SAR[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2023, 16: 1563-1575.
- [13] CAFFORIO C, PRATI C, ROCCA F. SAR data focusing using seismic migration techniques[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1991, 27(2): 194-207.

-
- [14] MOREIRA A, PRATS-IRAOLA P, YOUNIS M, et al. A tutorial on synthetic aperture radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013, 1(1): 6-43.
- [15] REIGBER A, ALIVIZATOS E, POTSIS A, et al. Extended wavenumber-domain synthetic aperture radar focusing with integrated motion compensation[J]. IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation, 2006, 153(3): 301-310.
- [16] LIN Hao, CHEN Jianlai, XING Mengdao, et al. 2-D frequency autofocus for squint spotlight SAR imaging with extended omega-K[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-12.
- [17] LIU Wenkang, SUN Guangcai, XIA Xianggen, et al. Highly squinted MEO SAR focusing based on extended omega-K algorithm and modified joint time and Doppler resampling[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(11): 9188-9200.
- [18] MO Yajun, YAN He, ZHAO Bingji. Novel approach based on deramping technique for squinted sliding spotlight SAR imaging[J]. Journal of Electronics(China), 2013, 30(3): 243-253.
- [19] ZHANG Gang, LIANG Yi, SUO Zhiyong, et al. Modified ERMA with generalized resampling for maneuvering highly squinted TOPS SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 1-5.
- [20] FORNARO G, FRANCESCHETTI G, PERNA S. Motion compensation of squinted airborne SAR raw data: Role of processing geometry[C]//IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Anchorage, AK, USA. IEEE, 2004: 1518-1521.
- [21] FORNARO G, SANSOSTI E, LANARI R, et al. Role of processing geometry in SAR raw data focusing[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(2): 441-454.
- [22] AN Daoxiang, HUANG Xiaotao, JIN Tian, et al. Extended two-step focusing approach for squinted spotlight SAR imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(7): 2889-2900.
- [23] LIANG Yi, HUAI Yuanyuan, DING Jinshan, et al. A modified ω -k algorithm for HS-SAR small-aperture data imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(6): 3710-3721.
- [24] 董祺, 邢孟道, 李震宇, 等. 一种基于坐标轴旋转的俯冲段大斜视SAR波数域成像算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(12): 3137-3143.
- DONG Qi, XING Mengdao, LI Zhenyu, et al. Wavenumber-domain imaging algorithm for high squint diving SAR based on axes rotation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(12): 3137-3143.(in Chinese)
- [25] CARRARA W G, GOODMAN R S, MAJEWSKI R M. Spotlight synthetic aperture radar: signal processing algorithms[M]. Boston: Artech House, 1995:192-200.