

基于改进混合坐标系的大斜视俯冲机动平台 SAR 快速时域成像算法

闫 莉¹, 许高添², 张廷豪^{3*}

(1. 西安电子科技大学前沿交叉研究院, 陕西西安 710071; 2. 西安电子科技大学雷达信号处理全国重点实验室, 陕西西安 710071;
3. 西安电子科技大学物理学院, 陕西西安 710071)

摘 要: 多级子图像融合是加速合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)时域成像的关键手段。然而, 机动平台 SAR 的大斜视采集增强了频谱支持区域的不规则特性, 降低图像融合的效率 and 精度。针对这些问题, 本文设计了一种改进的混合坐标系, 在此基础上开发了大斜视俯冲机动平台 SAR 快速时域成像算法。得益于改进混合坐标系中建立的等效斜距模型, 频谱对斜视角的敏感度降低, 消除了频谱空变现象。因此, 设计频谱预处理函数可以有效压缩和拼接频谱, 提升图像融合的效率 and 精度。通过仿真和原始数据处理, 验证了提出算法性能的优越性。

关键词: 快速时域算法; 大斜视俯冲机动平台; 混合坐标系; 等效斜距模型; 频谱预处理

基金项目: 国家自然科学基金(No.62171337); 中央高校基本科研业务费专项资金(No.ZYTS24116)

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)10-3472-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20240059

A Fast Time-Domain Imaging Algorithm for High-Squint Diving Maneuvering Platform SAR Based on Modified Hybrid Coordinate System

YAN Li¹, XU Gao-tian², ZHANG Ting-hao^{3*}

(1. Academy of Advanced Interdisciplinary Research, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China; 2. National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China; 3. School of Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The multi-stage sub-image merging is a key method to accelerate to synthetic aperture radar (SAR) imaging in the time domain. However, the high-squint acquisition in the maneuvering platform enhances the irregularity of the support region of the spectrum, which degrades the performance of image merging in efficiency and accuracy. Because of these issues, in this paper, a modified hybrid coordinate system is designed, based on which a fast time domain imaging algorithm is developed for high-squint diving maneuvering platform SAR. Benefiting from the equivalent slant range model in the modified hybrid coordinate system, the sensitivity of the spectrum to the squinted angle is reduced, and the space variation phenomenon of the spectrum is eliminated. Hence, the spectral preprocessing function can be easily designed to effectively compress and merge the spectrum, which improves the performance of the image merging in efficiency and accuracy. Both simulated and raw data are processed to validate the performance superiority of the proposed algorithm.

Key words: fast time domain algorithm; high-squint diving maneuvering platform; hybrid coordinate system; equivalent slant range model; spectral preprocessing

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62171337); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.ZYTS24116)

1 引言

合成孔径雷达具有在各种环境条件下全天候工作的能力, 是微波遥感的重要工具^[1-3]。初期 SAR 成像系统受硬件体积和处理效率的限制, 大多用于机载平台

和星载平台^[4-6]。随着存储硬件体积缩小、数字信号处理效率提高, SAR 传感器能够安装在机动平台实时获得高分辨率的微波图像, 且在目标探测、目标识别以及目标跟踪等方面显示出巨大潜力^[7-10]。近年来, 机动平

台 SAR 成像引起了越来越多关注。

当前 SAR 成像算法可以分为频域算法和时域算法两大类。针对一般的 SAR 应用,频域算法具有较高聚焦性能。然而,机动平台 SAR 以大斜视模式进行俯冲或上升运动,会导致回波信号的方位不变假设失效^[11,12]。随着成像分辨率的提高,频域算法涉及的斜距模型不够准确^[13,14],难以用于具有弯曲轨迹的 SAR 成像^[15-18]。时域算法不依赖方位不变假设,避免复杂的方位-距离解耦问题,对大斜视俯冲机动平台 SAR 成像具有显著优势^[19,20]。后向投影(Back Projection, BP)^[21]算法是一种典型的时域算法,但大量计算妨碍了实时应用。文献[22~25]提出了快速因式分解后向投影(Fast Factorized Back Projection, FFBP)算法,通过多级子图像融合显著加速 BP 成像,但相邻子图像融合需要大量插值操作,降低了成像效率和成像质量。文献[26~29]提出了快速笛卡尔后向反投影(Cartesian Fast Back Projection, CFBP)算法,它与 FFBP 算法具有相同运算架构。不同于 FFBP 算法中的插值图像融合,CFBP 算法通过压缩和拼接图像频谱实现图像融合,显著提升了子图像融合的效率。然而,该算法是基于笛卡尔坐标系建立的,笛卡尔坐标系下得到的图像频谱对机动平台 SAR 的斜视角较敏感,使频谱难以有效压缩,降低了 CFBP 算法中图像融合的精度。文献[30]提出基于混合坐标系的快速时域算法。与笛卡尔坐标系不同,该算法涉及的混合坐标系是根据极坐标系和笛卡尔坐标系的特性构造的,忽略小斜视角对图像频谱的影响。针对机动平台 SAR 的大斜视采集模式,混合坐标系下获得的图像频谱也随大斜视角变化展现出严重的倾斜角,加剧频谱支持区域的不规则性,难以实现图像的精确融合。

针对上述问题,本文提出用于大斜视俯冲机动平台 SAR 成像的混合坐标系快速反投影(Hybrid Coordinate System Fast Back Projection, HCS-FBP)算法。该算法基于改进混合坐标系设计,降低频谱对大斜视角的敏感,消除频谱空变现象。此外,得益于改进的混合坐标系,频谱预处理函数可以很容易被设计来有效压缩和拼接频谱,极大提升了子图像融合的效率 and 精度。因此,本文提出的方法针对大斜视俯冲机动平台 SAR 成像具有显著优势。

2 大斜视俯冲机动平台成像模型

2.1 原始混合坐标系的图像谱分析

原始混合坐标系的 BP 成像如图 1 所示。在 t 时刻处,雷达的位置表示为 $P_t(x_t, y_t)$,接收的回波信号表示为 $S(t, k_r)$ 。利用 BP 算法将回波信号投影到由 $P_n(y_n, \theta_n)$ 表示的原始混合网格,重建的图像信号可表示为^[30]

$$i(y_n, \theta_n) = \iint s(t, k_r) \exp(jR_n k_r) dk_r dt \quad (1)$$

式中: k_r 表示发射信号的径向波数; R_n 表示原始混合坐标系中的斜距历程。根据图 1 中的成像模型, R_n 表示为

$$R_n = \sqrt{(x_t - y_n \tan \theta_n)^2 + (y_t - y_n)^2} \quad (2)$$

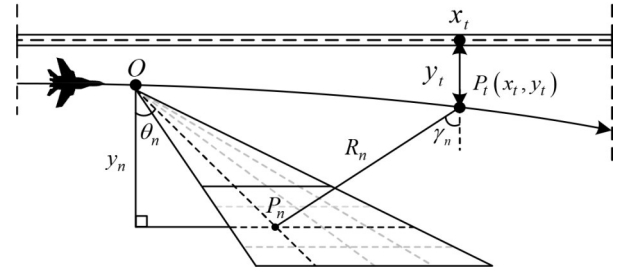


图 1 原始混合坐标系的 BP 成像

为进一步研究原始混合坐标系中的图像谱的解析式,在式(1)中引入 1 个波数对 $k_{\tan \theta}$ 和 k_y , 它们分别对应变量 $\tan \theta_n$ 和 y_n , 然后进行傅里叶变换得到 $i(y_n, \theta_n)$ 的图像频谱为

$$I(k_{\tan \theta}, k_y) = \iint i(y_n, \theta_n) \exp(-j \tan \theta_n k_{\tan \theta} - j y_n k_y) dy_n d \tan \theta \quad (3)$$

根据驻定相位原理^[31], 原始混合坐标系中的图像频谱解析表达式为

$$\begin{cases} k_{\tan \theta} = k_r \frac{(y_n \tan \theta_n - x_t) y_n}{R_n} \\ k_y = k_r \frac{(y_n \tan \theta_n - x_t) \tan \theta_n + (y_n - y_t)}{R_n} \end{cases} \quad (4)$$

根据图 1 的成像模型, 1 个角度变量 γ_n 被引入用来揭示原始混合坐标系中图像频谱对大斜视角度的敏感程度。将 $(y_n \tan \theta_n - x_t)/R_n = \sin \gamma_n$ 和 $(y_n - y_t)/R_n = \cos \gamma_n$ 代入式(4)得到

$$\begin{cases} k_{\tan \theta} = k_r y_n \sin \gamma_n \\ k_y = k_r (\sin \gamma_n \tan \theta_n + \cos \gamma_n) \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)中 k_r 的边界条件简记为 $k_{ra} \leq k_r \leq k_{rb}$, 具体表述如下:

$$\frac{4\pi(f - B/2)}{C} \leq k_r \leq \frac{4\pi(f + B/2)}{C} \quad (6)$$

式(6)中, f 表示载频; C 表示光速; B 表示发射带宽。此外, 式(5)中 γ_n 和 θ_n 的边界条件分别简记为 $\gamma_a \leq \gamma_n \leq \gamma_b$ 和 $\theta_a \leq \theta_n \leq \theta_b$, 具体表达如下:

$$\begin{cases} -\frac{\theta_{syn}}{2} + \theta_0 \leq \gamma_n \leq \frac{\theta_{syn}}{2} + \theta_0 \\ -\frac{\theta_w}{2} + \theta_0 \leq \theta_n \leq \frac{\theta_w}{2} + \theta_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: θ_0 表示方位中心时刻的斜视角; θ_{syn} 表示整个孔径时间内的合成波束宽度; θ_w 表示实际波束宽度. 根据式(5)~(7), 图像频谱的支撑区域表示为

$$k_r y_n \sin \gamma_a \leq k_{\tan \theta} \leq k_r y_n \sin \gamma_b \quad (8)$$

和

$$\begin{cases} k_y \geq k_{ra}(\sin \gamma_n \tan \theta_n + \cos \gamma_n) \\ k_y \leq k_{rb}(\sin \gamma_n \tan \theta_n + \cos \gamma_n) \end{cases} \quad (9)$$

然后, 频谱支持区域和频谱宽度之间的关系如下:

$$\begin{cases} \Delta k_{\tan \theta} = k_r y_n (\sin \gamma_b - \sin \gamma_a) \\ \Delta k_y = (k_{rb} - k_{ra})(\sin \gamma_n \tan \theta_n + \cos \gamma_n) \end{cases} \quad (10)$$

为了方便分析式(10), 引入假设条件 $\theta_w \approx \theta_{\text{syn}}$, 则式(6)和式(7)代入式(10)得到

$$\begin{cases} \Delta k_{\tan \theta} \approx 2k_r y_c \cos \theta_0 \sin \frac{\theta_{\text{syn}}}{2} \\ \Delta k_y = \frac{4\pi B}{C} \frac{1}{\cos \gamma_n} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中, y_c 表示 y_n 的中心. 从式(11)看出, $\Delta k_{\tan \theta}$ 和 Δk_y 随 θ_0 变化, 这是由原始混合坐标系的斜距历程对 θ_0 高度敏感导致, 如图2所示. 从图2看出, 大斜视模式下原始混合坐标系的斜距历程组成的几何平面的倾斜角不一致, 反映了图像频谱的空变程度, 给图像频谱的压缩和拼接带来困难. 因此, 图像频谱对大斜视角的敏感性不容忽视.

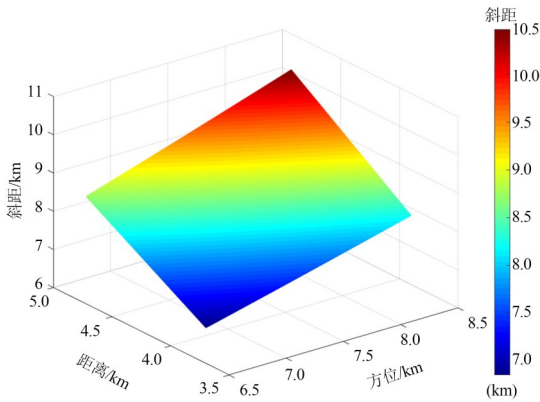


图2 大斜视模型下原始混合坐标系的斜距历程

2.2 改进混合坐标系的图像谱分析

本文提出一种改进的混合坐标系, 通过消除斜距历程对 θ_0 的敏感特性, 显著降低了由大斜视角引起的频谱倾斜, 促进图像频谱的压缩和拼接.

改进混合坐标系的BP成像, 如图3所示. 在大斜视模式下, 改进的混合网格表示为 $P_n(u_n, v_n)$, 通过传递和旋转正侧视的混合网格 (y'_n, θ'_n) 得到. 改进混合网格的位置计算如下:

$$\begin{bmatrix} u_n \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \\ -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y'_n \tan \theta'_n \\ y'_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(12)中, y'_n 的中心为场景中心斜距 R_c , 且满足 $y'_n - R_c = y_n - y_c$; θ'_n 的中心为零且满足 $\theta'_n = \theta_n - \theta_0$. 利用BP算法将回波信号投影到由 $P_n(u_n, v_n)$ 表示的改进混合网格, 则重建的图像信号可以表示为

$$i(y'_n, \theta'_n) = \iint s(t, k_r) \exp(jR'_n k_r) dk_r dt \quad (13)$$

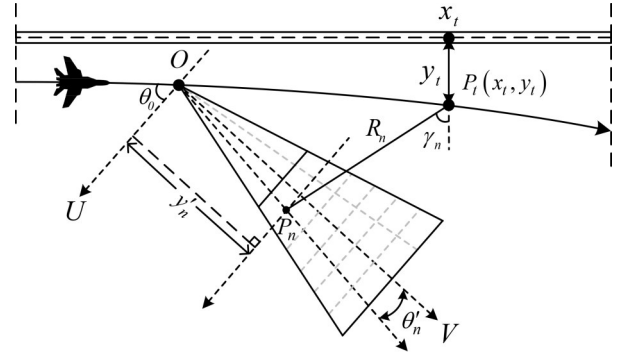


图3 改进混合坐标系的BP成像

根据图3中的成像模型, R'_n 表示为

$$R'_n = \sqrt{(x_t - u_n)^2 + (y_t - v_n)^2} \quad (14)$$

为进一步研究改进混合坐标系中的图像谱解析式, 在式(13)中引入新的波数对 $k_{\tan \theta'}$ 和 $k_{y'}$, 分别对应变量 $\tan \theta'_n$ 和 y'_n . 然后进行傅里叶变换得到 $i(y'_n, \theta'_n)$ 的图像频谱为

$$I(k_{\tan \theta'}, k_{y'}) = \iint i(y'_n, \theta'_n) \exp(-j \tan \theta'_n k_{\tan \theta'}) \cdot \exp(-j y'_n k_{y'}) dy'_n d \tan \theta' \quad (15)$$

根据驻定相位原理^[31], 改进混合坐标系中的图像频谱解析表达式为

$$k_{\tan \theta'} = k_r \frac{(u_n - x_t) y'_n \cos \theta_0 - (v_n - y_t) y'_n \sin \theta_0}{\sqrt{(x_t - u_n)^2 + (y_t - v_n)^2}} \quad (16)$$

和

$$k_{y'} = k_r \frac{(u_n - x_t)(\sin \theta_0 + \tan \theta'_n \cos \theta_0)}{\sqrt{(x_t - u_n)^2 + (y_t - v_n)^2}} + k_r \frac{(v_n - y_t)(\cos \theta_0 - \tan \theta'_n \sin \theta_0)}{\sqrt{(x_t - u_n)^2 + (y_t - v_n)^2}} \quad (17)$$

根据图3的成像模型, 将 $(u_n - x_t)/R'_n = \sin \gamma_n$ 和 $(v_n - y_t)/R'_n = \cos \gamma_n$ 代入式(16)和式(17)揭示改进混合坐标系中图像频谱对大斜视角度的敏感程度. 参考式(5)~(7), 改进混合坐标系下获得的频谱支撑区域表示为

$$\begin{cases} k_r y'_n \sin(\gamma_a - \theta_0) \leq k_{\tan \theta'} \leq k_r y'_n \sin(\gamma_b - \theta_0) \\ k_{ra} \frac{1}{\cos(\gamma_n - \theta_0)} \leq k_{y'} \leq k_{rb} \frac{1}{\cos(\gamma_n - \theta_0)} \end{cases} \quad (18)$$

则改进混合坐标系下的频谱宽度表示为

$$\begin{cases} \Delta k_{\tan \theta'} \approx 2k_r R_c \sin \frac{\theta_{\text{syn}}}{2} \\ \Delta k_{y'} = \frac{4\pi B}{C} \frac{1}{\cos(\gamma_n - \theta_0)} \end{cases} \quad (19)$$

式(19)的推导过程参考式(6)~(11). 与式(11)相比可以看出,式(19)中的 $\Delta k_{\tan \theta'}$ 和 $\Delta k_{y'}$ 不随 θ_0 变化,这得益于改进混合坐标系的斜距历程对 θ_0 不敏感,如图4所示. 大斜视模式下改进混合坐标系的斜距历程组成的几何平面具有一致的倾斜角,降低了图像频谱的空变程度. 图5描述了对应中心子孔径的若干个点目标频谱在不同斜距历程的变化过程. 从图5中可以看出,改进混合坐标系的图像频谱不依赖于 θ_0 ,仅对齐和拼接方位谱就能实现子图像融合. 因此,频谱预处理函数可以很容易地被设计来实现高效率和高精度的图像融合.

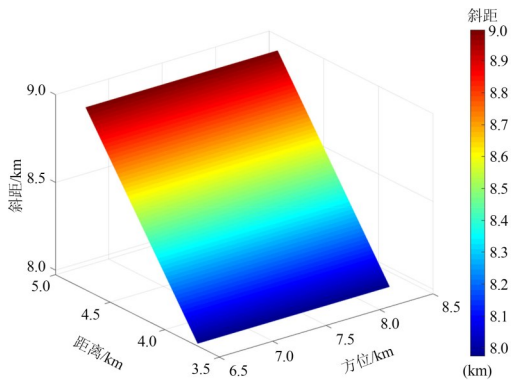
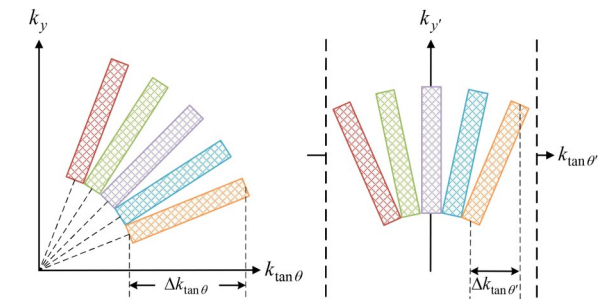


图4 大斜视模型下改进混合坐标系的斜距历程



(a) 原始混合坐标系的图像频谱 (b) 改进混合坐标系的图像频谱

图5 来自不同斜距历程的图像频谱

3 HCS-FBP 成像算法设计

得益于改进混合坐标系,斜视角引起的频谱倾斜被有效校正,只进行方位谱的处理就能实现频谱压缩

和拼接. 基于改进混合坐标系重新设计频谱预处理函数,实现子图像的高性能融合,开发用于大斜视俯冲机动平台 SAR 成像的快速时域算法.

方位谱的支持区域主要依赖于 θ_{syn} ,而 θ_{syn} 依赖于目标位置,导致图像频谱随目标位置变化. 因此,消除 $k_{\tan \theta'}$ 中关于目标位置的分量使其与孔径长度成正比是压缩图像频谱的关键. 基于式(16)和式(17),改进混合坐标系中图像频谱的方位中心表示为

$$k_{\tan \theta'_c} = k_{rc} \frac{(u_n - x_{ic}) y'_n \cos \theta_0}{\sqrt{(x_{ic} - u_n)^2 + (y_{ic} - v_n)^2}} - k_{rc} \frac{(v_n - y_{ic}) y'_n \sin \theta_0}{\sqrt{(x_{ic} - u_n)^2 + (y_{ic} - v_n)^2}} \quad (20)$$

式(20)中, k_{rc} 表示径向波数 k_r 的中心; (x_{ic}, y_{ic}) 表示子孔径中心时刻雷达平台的位置. 从式(20)可以看出不同目标的频谱随着 (u_n, v_n) 的变化展现出不一致的方位中心,如图5(b)所示. 令 H_1 表示方位中心对齐函数,其推导过程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_1}{\partial \tan \theta'} &= k_{rc} \int \frac{(u_n - x_{ic}) y'_n \cos \theta_0}{\sqrt{(x_{ic} - u_n)^2 + (y_{ic} - v_n)^2}} d \tan \theta' \\ &\quad - k_{rc} \int \frac{(v_n - y_{ic}) y'_n \sin \theta_0}{\sqrt{(x_{ic} - u_n)^2 + (y_{ic} - v_n)^2}} d \tan \theta' \end{aligned} \quad (21)$$

根据式(21),方位中心对齐函数表示为

$$H_1 = k_{rc} \sqrt{(x_{ic} - u_n)^2 + (y_{ic} - v_n)^2} \quad (22)$$

基于式(22),方位中心对齐的过程表示为

$$i'(y'_n, \theta'_n) = i(y'_n, \theta'_n) \times \exp(-jH_1) \quad (23)$$

图6描述了频谱对齐的过程. 图6(a)展示了初始频谱随不同目标位置的变化. 图6(b)展示了方位中心对齐后的图像频谱. 可以看出经过第1次频谱对齐,不同目标的频谱展现出一致的方位谱中心位置. 然而,方位谱宽对目标位置的敏感特性仍未消除,需要设计方位谱宽对齐函数.

将 $k_{\tan \theta'} = k_{\tan \theta'_c} + \Delta k_{\tan \theta'}$ 和 $k_r = k_{rc} + \Delta k_r$ 代入式(23),则第1次对齐后的方位谱宽度表示为

$$\begin{aligned} \Delta k'_{\tan \theta'} &= \Delta k_r \frac{(u_n - x_{ic}) y'_n \cos \theta_0}{R'_n} \\ &\quad - \Delta k_r \frac{(v_n - y_{ic}) y'_n \sin \theta_0}{R'_n} \end{aligned} \quad (24)$$

从式(24)可以看出,方位谱宽对目标位置也非常敏感,并且不同目标的频谱展现出不一致的倾斜角度,如图6(b)所示. 根据式(24)设计了方位谱宽对齐函数以消除 (u_n, v_n) 的影响,它的表达式如下:

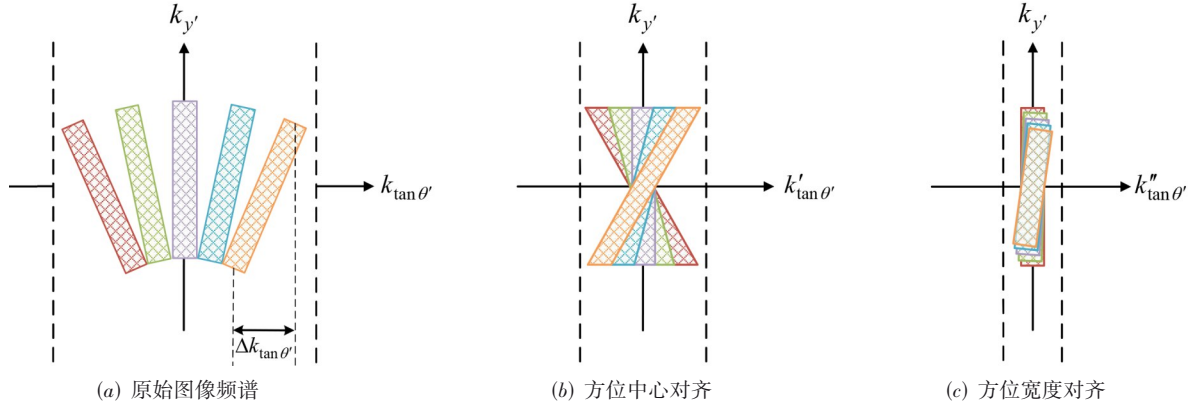


图6 图像频谱压缩

$$\frac{\partial H_2}{\partial \tan \theta'} = \Delta k_r \int \Delta k'_{\tan \theta'} d \tan \theta' \quad (25)$$

通常方位谱宽对齐需要在 $i'(y'_n, \theta'_n)$ 的距离频域和方位时域进行即 $I'(k_y, \theta'_n)$, 因此, H_2 进一步等效为关于距离谱宽的函数. 根据式(17)和式(24), $i'(y'_n, \theta'_n)$ 对应的距离谱宽为

$$\Delta k_{y'} = \Delta k_r \frac{(u_n - x_{ic})(\sin \theta_0 + \tan \theta'_n \cos \theta_0)}{\sqrt{(x_{ic} - u_n)^2 + (y_{ic} - v_n)^2}} + \Delta k_r \frac{(v_n - y_{ic})(\cos \theta_0 - \tan \theta'_n \sin \theta_0)}{\sqrt{(x_{ic} - u_n)^2 + (y_{ic} - v_n)^2}} \quad (26)$$

利用式(26)中 Δk_r 和 $\Delta k_{y'}$ 之间的关系, 方位谱宽对齐函数 H_2 可改写为

$$\frac{\partial H_2}{\partial \tan \theta'} = \int \Delta k_{y'} \frac{y'_n (y'_n \tan \theta'_n)}{y'_n - x_{ic} \sin \theta_0 - y_{ic} \cos \theta_0} d \tan \theta' + \int \Delta k_{y'} \frac{y'_n (-x_{ic} \cos \theta_0 + y_{ic} \sin \theta_0)}{y'_n - x_{ic} \sin \theta_0 - y_{ic} \cos \theta_0} d \tan \theta' \quad (27)$$

则 H_2 的具体表达式如下

$$H_2 = \Delta k_{y'} \frac{(-x_{ic} \cos \theta_0 + y_{ic} \sin \theta_0) y'_n \tan \theta'_n}{y'_n - x_{ic} \sin \theta_0 - y_{ic} \cos \theta_0} + \Delta k_{y'} \frac{(y'_n \tan \theta'_n)^2}{2(y'_n - x_{ic} \sin \theta_0 - y_{ic} \cos \theta_0)} \quad (28)$$

基于式(28), 方位谱宽对齐的过程可以表示为

$$I''(k_y, \theta'_n) = I'(k_y, \theta'_n) \times \exp(-jH_2) \quad (29)$$

经过第2次频谱对齐后, 方位谱宽表示为 $\Delta k''_{\tan \theta'} \approx k_r L$, 其中 L 表示孔径长度. 因此, $\Delta k''_{\tan \theta'}$ 主要受孔径长度影响, 保证不同目标的频谱具有一致方位谱宽, 如图6(c)所示. 至此, 不同目标的频谱被有效对齐并压缩到1个狭窄的范围. 因此, 较低的图像采样率可以被用来实现无插值的子图像融合加速时域算法处理.

4 仿真数据和原始数据处理

本章将进行仿真数据处理和原始数据处理以评估和比较不同成像算法的聚焦效率和质量.

4.1 大斜视俯冲机动平台SAR成像仿真

图1给出了大斜视俯冲机动平台的运动模型. 在2 s的合成孔径持续时间内, 雷达持续照射的场景大小为 $400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$, 对应 2048×2048 大小的回波数据. 其余仿真参数如表1所示. 假设初始阶段BP成像可以获得 2048×32 的子图像, 则传统方法的频谱对齐过程如图7所示. 图7(a)展示了传统方法得到的原始图像频谱, 频谱的未有效对齐导致频谱混叠严重, 难以实现精确的图像融合. 图7(b)展示了传统方法的第1次频谱对齐. 图7(c)展示了传统方法的第2次频谱对齐. 从图7(b)和图7(c)看出, 传统方法中图像频谱对斜视角敏感性阻碍了频谱对齐.

表1 仿真参数

系统参数	值
载频/GHz	16.0
带宽/MHz	200.0
脉冲重复频率/Hz	1 000.0
中心斜距/km	8.5
斜视角/(°)	60.0
水平速度/(m·s ⁻¹)	70.0
下降速度/(m·s ⁻¹)	-20.0
加速度/(m·s ⁻²)	(2, -2)
分辨率/m	0.8

本文方法可有效解决大斜视条件下频谱难对齐的问题. 图8展示了相同图像采样率提出方法的频谱对齐过程. 图8(a)是改进混合坐标下获得的原始图像频谱, 与图7(a)相比, 图8(a)中的频谱混叠现象主要沿着方位向发生. 因此, 提出方法得到的原始图像频谱比传统方法得到的原始图像频谱受到斜视角的影响更小. 图8(b)是提出方法的第1次频谱对齐. 图8(c)是提出

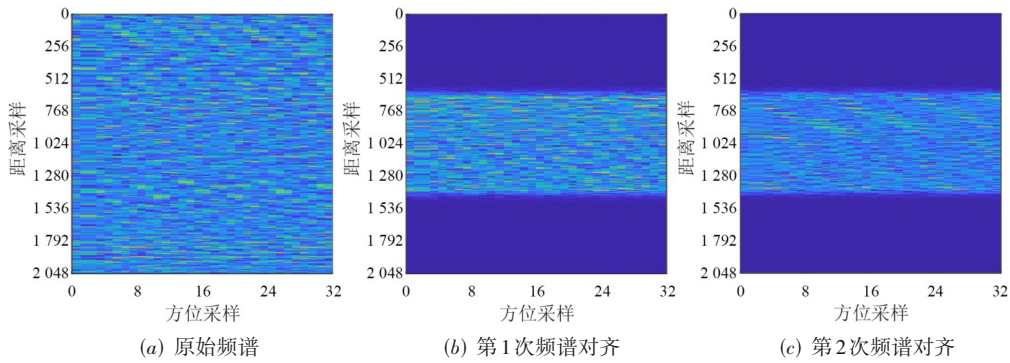


图7 CFBP算法的频谱压缩过程

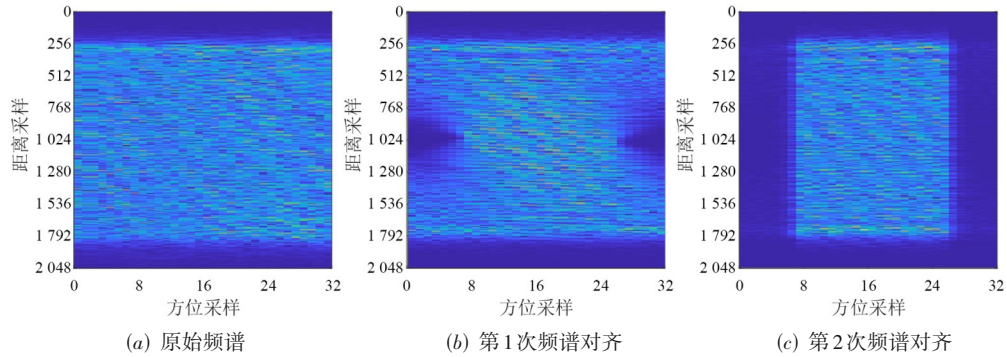


图8 本文方法的频谱压缩过程

方法的第2次频谱对齐. 从图8(b)和图8(c)可以看出, 得益于改进混合坐标下获得的图像频谱对斜视角不敏感,使频谱能有效对齐,实现高精度的图像融合.

为了验证频谱有效对齐应用于大斜视俯冲机动平台 SAR 成像的优势,传统方法和本文方法的成像结果对比和评估如图9和图10所示. 图9展示了CFBP成像评估,图9(a)为CFBP成像结果,图9(b)为直接CFBP成像后 T_1 的方位剖面结果,图9(c)为CFBP成像后 T_2 的方位剖面结果. 从图9可以看出,CFBP算法中的图像融合涉及到误差累积,且当边缘点离中心点越远,误差积累越严重. 尽管提升方位采样率可以避免频谱混叠降低误差累积,但会大大牺牲成像效率. 在仿真实验中,为了避免CFBP处理中的频谱混叠,初始阶段所需

的最小方位采样率(采样间隔)为1.4 m,则实际所需要的成像时间为243.2 s. 图10展示了传统混合坐标系FFBP成像评估,图10(a)为传统混合坐标系的FFBP成像结果,图10(b)为传统混合坐标系的FFBP成像后 T_1 的方位剖面结果,图10(c)为传统混合坐标系的FFBP成像后 T_2 的方位剖面结果. 从图10可以看出,由于频谱未有效对齐和压缩导致传统混合坐标系的FFBP在图像融合过程中出现了累加错误. 通常为避免传统混合坐标系FFBP处理中的累加错误,初始阶段的最小方位采样率为0.3 m,则实际成像时间为22.4 min. 得益于频谱的有效对齐,HCS-FFBP初始阶段的最小方位采样率为30.5 m,远小于传统方法初始阶段所需的最小方位采样率. 因此,本文的成像时间为14.7 s,显著提高了图

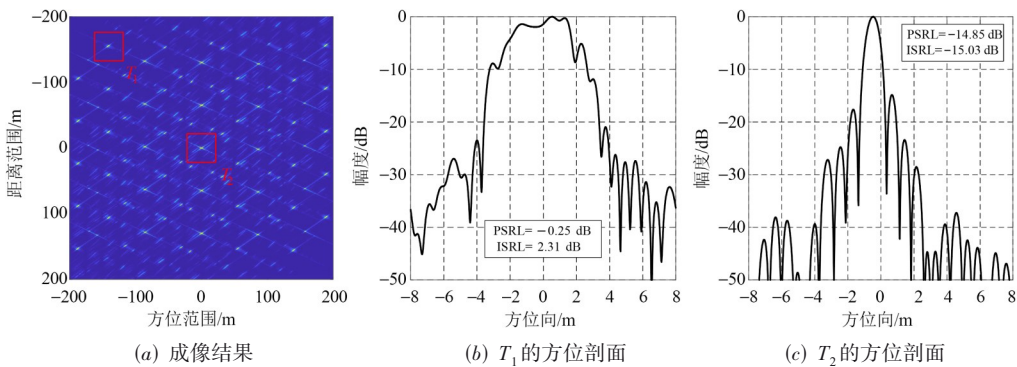


图9 CFBP成像评估

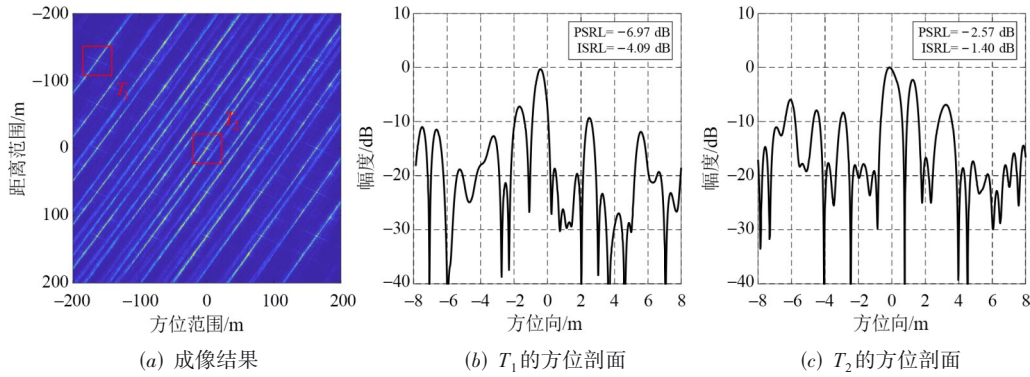


图 10 传统方法^[30]成像评估

像融合的效率. 此外,图 11 展示了 HCS-FBP 成像评估. 与传统方法的成像结果对比,本文方法对边缘点和中

心点同样具有较好的聚焦效果,实现更精确的图像融合.

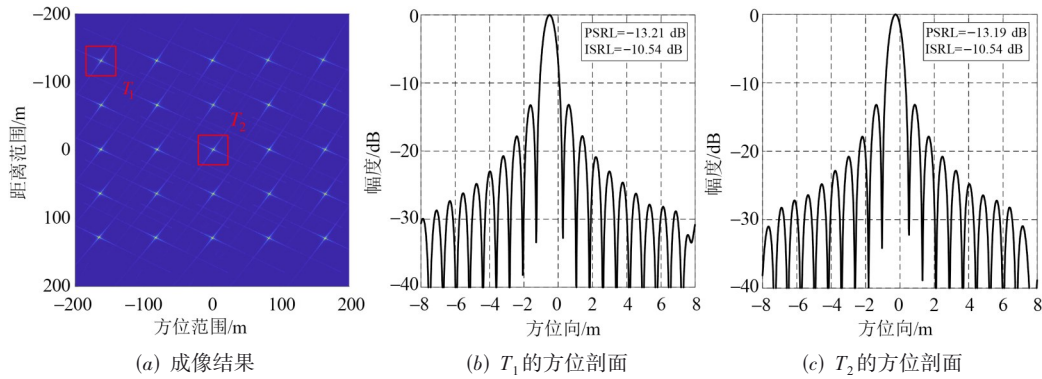


图 11 本文方法成像评估

4.2 原始数据处理

本节将进行原始数据处理以进一步评估所提出算法的性能. 在该实验中,雷达平台工作在 Ku 波段以 $(72, -3, 1)$ m/s 做匀速运动,以 $(0.05, 0.08, -0.4)$ m/s² 做加速运动. 在 1 s 的合成孔径时间内,雷达平台以 60° 左右的斜视角照射 $1.5 \text{ km} \times 2.4 \text{ km}$ (方位向 \times 距离方向) 大小的场景,对应 2048×2048 大小的回波数据. 以初始孔径长度 32 为例,经过 7 次递归融合后,不同算法的成像结果如图 12 所示. 图 12(a) 展示了 CFBP 算法的处理结果. 图 12(b) 展示了传统方法^[30]的处理结果. 图 12(c) 展示了本文方法的处理结果. 对比不同算法的成像结果可以看出,有效对齐的频谱有利于避免融合误差累加,提升图像融合的精度. 此外,图 12 还给出不同算法获得结果的图像熵. 从图 12 看出,本文方法获得的熵值最小. 因此,利用本文方法实现的图像融合最精确. 为了细致对比不同方法的成像效果,本文从局部成像结果中选择了散射点 A 进行方位响应评估,如图 12 所示. 不同方法获得的方位响应评估结果如图 13 所示. 通常峰值旁瓣比 (Peak Sidelobe Ratio, PSR) 的标准值约为 -13 dB , 积分旁瓣比 (Integral Sidelobe Ratio,

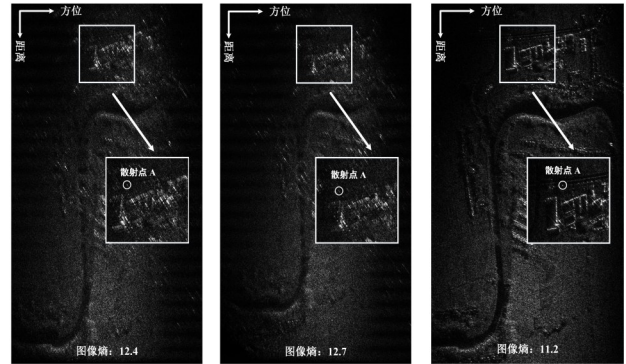


图 12 原始数据处理结果

ISR) 的标准值约为 -10 dB . 因此,从图 13 的结果可以看出,本文算法具有更好的聚焦效果. 表 2 给出了不同算法的成像效率评估结果,受大斜视角影响,传统方法难以有效对齐和压缩图像频谱,导致初始子孔径成像所需的最小方位采样率仍然较高,增加了成像时间. 因此,与传统方法相比,本文方法所需的最小方位采样率更小,显著提高了图像融合效率,加速了快速时域算法成像.

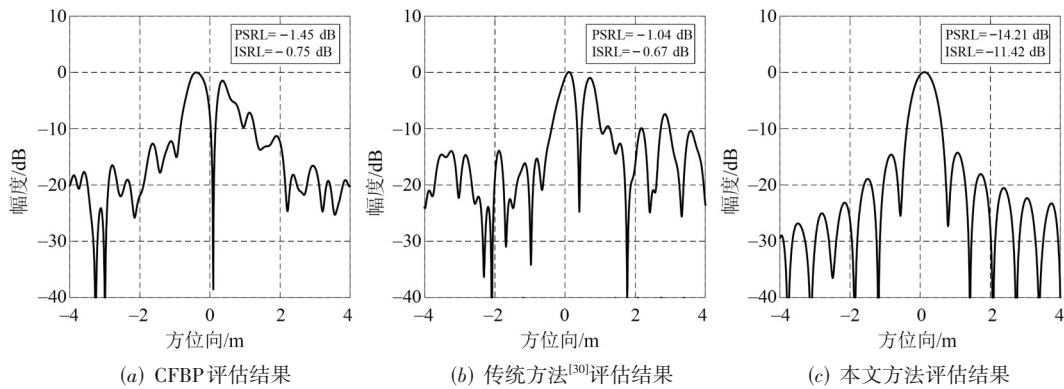


图 13 散射点 A 的方位响应评估

表 2 不同算法的成像效率评估

参数 子孔径	最小方位采样/m			成像时间/s		
	CFBP	传统方法 ^[30]	本文方法	CFBP	传统方法 ^[30]	本文方法
16	1.5	0.4	66.2	384.2	1 639	10.1
32	1.5	0.3	66.2	268.5	1 344	14.1
64	1.5	0.4	16.8	198.6	967	22.3

注:加粗数据为最佳效果.

5 总结

本文揭示了传统斜距模型下大斜视角度对图像频谱支持区域的变化规律,建立了新的混合坐标系.得益于改进混合坐标系中设计的等效斜距模型,频谱对斜视角的敏感特性显著降低.因此,频谱预处理函数可以很容易被设计来实现频谱的有效对齐和拼接,提高子图像的融合精度.本文基于混合坐标系提出了快速时域算法用于大斜视俯冲机动平台成像,频谱对齐效果更显著,使频谱展现出规则的支持区域.因此,较低的方位采样率要求即可实现子图像融合,进一步加速了快速时域算法的成像效率.

参考文献

[1] 严春满,王铖.基于选择性坐标注意力的SAR图像舰船目标检测[J].电子学报,2023,51(9):2481-2491.
YAN C M, WANG C. Ship target detection in SAR image based on selective coordinate attention[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(9): 2481-2491. (in Chinese)

[2] WEN X J, QIU X L. Research on turning motion targets and velocity estimation in high resolution spaceborne SAR[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2201.

[3] 王俊杰,冯德军,隋冉,等.基于非周期PSS的SAR目标特征操控方法研究[J].电子学报,2023,51(3):564-572.
WANG J J, FENG D J, SUI R, et al. Research on manipulation method of SAR target feature based on phase-switched screen[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(3): 564-572. (in Chinese)

[4] 邢孟道,林浩,陈溅来,等.多平台合成孔径雷达成像算法综述[J].雷达学报,2019,8(6):732-757.
XING M D, LIN H, CHEN J L, et al. A review of imaging algorithms in multi-platform-borne synthetic aperture radar[J]. Journal of Radars, 2019, 8(6): 732-757. (in Chinese)

[5] 丁亦飏,刘佳音,雷斌,等.高分三号SAR卫星系统级几何定位精度初探[J].雷达学报,2017,6(1):11-16.
DING C B, LIU J Y, LEI B, et al. Preliminary exploration of systematic geolocation accuracy of GF-3 SAR satellite system[J]. Journal of Radars, 2017, 6(1): 11-16. (in Chinese)

[6] 保铮,邢孟道,王彤.雷达成像技术[M].北京:电子工业出版社,2005.
BAO Z, XING M D, WANG T. Radar Imaging Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)

[7] 李亚超,王家东,张廷豪,等.弹载雷达成像技术发展现状与趋势[J].雷达学报,2022,11(6):943-973.
LI Y C, WANG J D, ZHANG T H, et al. Present situation and prospect of missile-borne radar imaging technology[J]. Journal of Radars, 2022, 11(6): 943-973.

[8] BIE B W, SUN G C, XIA X G, et al. High-speed maneuvering platforms squint beam-steering SAR imaging without subaperture[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(9): 6974-6985.

[9] LI X R, ZHOU S, YANG L. A new fast factorized back-projection algorithm with reduced topography sensibility

- for missile-borne SAR focusing with diving movement[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(16): 2616.
- [10] 刘旗, 刘永祥, 张新禹. 基于特征注意力融合元残差网络的小样本 SAR 目标识别[J]. *电子学报*, 2023, 51(9): 2366-2378.
LIU Q, LIU Y X, ZHANG X Y. Few-shot SAR target recognition method based on feature fusion attention and meta-ResNet[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023, 51(9): 2366-2378. (in Chinese)
- [11] CHEN Z Y, TANG S Y, REN Y, et al. Curvilinear flight synthetic aperture radar (CF-SAR): Principles, methods, applications, challenges and trends[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(13): 2983.
- [12] 陈澍来, 熊毅, 徐刚, 等. 基于子图像变标的非线性轨迹 SAR 成像及其自聚焦方法[J]. *雷达学报*, 2022, 11(6): 1098-1109.
CHEN J L, XIONG Y, XU G, et al. Nonlinear trajectory synthetic aperture radar imaging and autofocus algorithm based on sub-image nonlinear chirp scaling[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(6): 1098-1109. (in Chinese)
- [13] WANG F F, ZHANG L, CAO Y H, et al. A novel algorithm for hypersonic SAR imaging with large squint angle and dive trajectory[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 4016105.
- [14] SONG X, LI Y C, ZHANG T H, et al. Focusing high-maneuverability bistatic forward-looking SAR using extended azimuth nonlinear chirp scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5240814.
- [15] ZHANG T H, LI Y C, WANG J, et al. A modified range model and extended omega-K algorithm for high-speed-high-squint SAR with curved trajectory[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5204515.
- [16] LI Y C, SONG X, GUO L, et al. Inverse-mapping filtering polar formation algorithm for high-maneuverability SAR with time-variant acceleration[J]. *Signal Processing*, 2020, 171:107506.
- [17] LI Z Y, CHEN J L, DU W T, et al. Focusing of maneuvering high-squint-mode SAR data based on equivalent range model and wavenumber-domain imaging algorithm[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 2419-2433.
- [18] DING Z G, ZHENG P N, LI H, et al. Spaceborne high-squint high-resolution SAR imaging based on two-dimensional spatial-variant range cell migration correction[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5240114.
- [19] 王岩, 康利鸿, 刘杰, 等. 星载 SAR 非沿迹成像新模式: 机遇与挑战[J]. *雷达学报*, 2022, 11(6): 1131-1145.
WANG Y, KANG L H, LIU J, et al. Spaceborne SAR non-along-track imaging mode: Opportunities and challenges[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(6): 1131-1145. (in Chinese)
- [20] 邢孟道, 马鹏辉, 楼屹杉, 等. 合成孔径雷达快速后向投影算法综述[J]. *雷达学报*, 2024, 13(1): 1-22.
XING M D, MA P H, LOU Y S, et al. Review of fast back projection algorithms in synthetic aperture radar[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(1): 1-22. (in Chinese)
- [21] ZHANG X B, YANG P X. Back projection algorithm for multi-receiver synthetic aperture sonar based on two interpolators[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(6): 718.
- [22] BAO M, ZHOU S, YANG L, et al. Data-driven motion compensation for airborne bistatic SAR imagery under fast factorized back projection framework[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 1728-1740.
- [23] XU G T, ZHOU S, YANG L, et al. Efficient fast time-domain processing framework for airborne bistatic SAR continuous imaging integrated with data-driven motion compensation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 60: 5208915.
- [24] YANG L, ZHOU S, ZHAO L F, et al. Coherent auto-calibration of APE and NsRCM under fast back-projection image formation for airborne SAR imaging in highly-squint angle[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 321.
- [25] ZHOU S, YANG L, ZHAO L F, et al. Quasi-polar-based FFBP algorithm for miniature UAV SAR imaging without navigational data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(12): 7053-7065.
- [26] CHEN X X, SUN G C, XING M D, et al. Ground Cartesian back-projection algorithm for high squint diving TOPS SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(7): 5812-5827.
- [27] CHEN Q, LIU W K, SUN G C, et al. A fast Cartesian back-projection algorithm based on ground surface grid for GEO SAR focusing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 60: 5217114.
- [28] LI Y C, XU G T, ZHOU S, et al. A novel CFFBP algo-

rithm with noninterpolation image merging for bistatic forward-looking SAR focusing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 5225916.

- [29] LOU Y S, LIU W K, XING M D, et al. A novel motion compensation method applicable to ground Cartesian back-projection algorithm for airborne circular SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 5208917.
- [30] LIANG Y, LI G F, WEN J, et al. A fast time-domain SAR imaging and corresponding autofocus method based on hybrid coordinate system[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(11): 8627-8640.
- [31] CUMMING I G, WONG F H. Digital processing of synthetic aperture radar data[J]. Artech House, 2005, 1(3): 108-110.

作者简介



闫 莉 女, 1979 年 9 月出生, 陕西西安人. 西安电子科技大学博士研究生. 主要研究方向为航空计算机、雷达信息与信号处理.

E-mail: sxy179716@163.com



许高添 男, 1996 年 5 月出生, 江苏南通人. 西安电子科技大学雷达信号处理全国重点实验室博士研究生. 主要研究方向为单双基合成孔径雷达成像.

E-mail: xgt1996@qq.com



张廷豪 男, 1996 年 5 月出生, 陕西咸阳人. 西安电子科技大学物理学院博士后, 助理研究员. 主要研究方向为单双基合成孔径雷达成像.

E-mail: tslnzhangtao@163.com