

太赫兹条带SAR的PFA成像与误差补偿方法

罗绍文, 王秋艳, 李银伟*

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2024年4月22日; 录用日期: 2024年5月22日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

由于成像分辨率高、成像帧频高等优势, 太赫兹合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)正日益受到广泛的关注。而太赫兹波束窄使得其成像幅宽相对较小, 这也正好符合极坐标格式算法(Polar Format Algorithm, PFA)的应用场景。然而PFA是针对聚束SAR成像的, 不能直接应用于条带SAR; 同时随着太赫兹SAR分辨率的提升, PFA对运动误差的二维空变影响无法忽视。为解决以上问题, 本文提出了一种太赫兹条带SAR的PFA成像与误差补偿方法。首先通过确定条带SAR与聚束SAR之间的补偿函数实现二者的等效转换, 拓宽PFA的应用范围; 其次在PFA处理前采用互相关方法进行运动误差的粗补偿以减小PFA对运动误差的二维耦合影响; 最后在PFA之后采用最大对比度自聚焦算法进行运动误差精补偿来满足太赫兹SAR的成像要求。仿真实验结果验证了该方法的有效性和鲁棒性。

关键词

极坐标格式算法, 合成孔径雷达, 最大对比度算法, 条带探测

PFA Imaging and Error Compensation Methods for Terahertz Strip-Map SAR

Shaowen Luo, Qiuyan Wang, Yinwei Li*

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 22nd, 2024; accepted: May. 22nd, 2024; published: May. 31st, 2024

Abstract

Due to its high imaging resolution and frame rate, terahertz (THz) synthetic aperture radar (SAR) is increasingly attracting widespread attention. The narrow beam of terahertz waves results in a rel-

*通讯作者。

文章引用: 罗绍文, 王秋艳, 李银伟. 太赫兹条带 SAR 的 PFA 成像与误差补偿方法[J]. 建模与仿真, 2024, 13(3): 3449-3461. DOI: 10.12677/mos.2024.133314

atively small imaging swath, which aligns well with the application scenario of the Polar Format Algorithm (PFA). However, PFA is designed for spotlight SAR imaging and cannot be directly applied to stripmap SAR; moreover, with the improvement of THz SAR resolution, the two-dimensional space-variant impact of motion errors by PFA cannot be ignored. To address these issues, this paper proposes a PFA imaging and error compensation method for THz stripmap SAR. Initially, by establishing a compensation function between stripmap SAR and spotlight SAR for an equivalent conversion, the application range of PFA is expanded. Subsequently, a cross-correlation method is used for coarse compensation of motion errors before PFA processing to reduce the two-dimensional coupling impact of PFA on motion errors. Finally, a maximum contrast autofocus algorithm is applied after PFA for fine compensation of motion errors to meet the imaging requirements of terahertz SAR. Simulation experimental results verify the effectiveness and robustness of this method.

Keywords

Polar Format Algorithm, Synthetic Aperture Radar, Maximum Contrast Algorithm, Strip-Map

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

太赫兹(Terahertz, THz)条带合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种在太赫兹频段工作的雷达成像系统[1]。THz 条带 SAR 在微波 SAR 的基础上结合太赫兹技术获得了更高的分辨率和成像帧频,在近年来得到了广泛的关注[2]。THz 波束在为条带 SAR 带来高分辨率的同时,其波束窄的特点也使得成像幅宽变得相对较小。这一特点也正好符合极坐标格式算法(Polar Format Algorithm, PFA)应用场景。

PFA 能够有效处理不同飞行轨迹和不同成像条件下的数据,具有较高的适应性[3] [4]。虽然涉及到极坐标到直角坐标的转换,但总体上,其流程简洁,可以高效地实现,尤其适用于实时或近实时的 SAR 成像需求[5] [6]。然而 PFA 作为一种聚束式成像算法,没有对条带信号直接处理的能力。条带信号中的同距离单元点目标多普勒中心相同,方位时间存在分别。而 PFA 所处理的聚束信号则相反。并且条带 SAR 通常使用距离去调频来处理接收信号,聚束 SAR 则采用二维去调频来处理。因此直接使用 PFA 来处理条带数据的话,会因为信号模型的不同而导致插值不准确。要将 PFA 应用在 THz 条带 SAR 中的话,需要在成像算法中增加数据转换的步骤[7]。

另一方面,在实际应用中,运动平台的非理想运动会产生运动误差,从而产生方位相位误差(Azimuth Phase Error, APE)和距离单元徙动误差(Range Cell Migration, RCM) [8] [9]。最终导致成像结果中出现散焦、虚影等现象,降低图像质量[10]。相比微波 SAR,太赫兹 SAR 对运动误差更为敏感。即使微小的运动误差也会导致图像质量显著降低。这对误差补偿提出了更高的要求,如二维运动误差和 PFA 本身引入的额外误差[11] [12]。PFA 通过波数域的二维重采样实现 SAR 图像的二维解耦。这会导致 APE 和残余 RCM 发生二维耦合。考虑到太赫兹 SAR 的误差敏感性,这种耦合会导致二维图像的散焦。此外,由于太赫兹 SAR 的高分辨率,这种二维散焦会极大地干扰主散射体的选择,降低依赖于散射体选择的自聚焦算法的精度。因此 PFA 在太赫兹 SAR 的应用中还需要考虑其额外引入的二维误差问题。

考虑到上述两个问题,本文提出了一种太赫兹条带 SAR 的 PFA 成像与误差补偿方法。首先,针对探测模式不符的问题,通过比对条带 SAR 与聚束 SAR 的时频区别并结合相位结构分析,确定了两者的

间的补偿函数。通过该补偿函数实现两者的转换,拓宽了 PFA 在太赫兹视频 SAR 中的应用场景。其次,为解决 PFA 二维耦合误差影响自聚焦算法精度的问题,提出一种粗补偿和细补偿结合的补偿方法。在 PFA 处理前,使用基于互相关估计的粗补偿,以减少 PFA 引起的额外误差。然后进行 PFA 处理,并采用最大对比度算法进行细补偿,以满足太赫兹 SAR 的高补偿精度要求,获得高质量图像。最后通过 0.22 THz 条带 SAR 的仿真结果,验证了该方法的有效性。

2. 信号模型

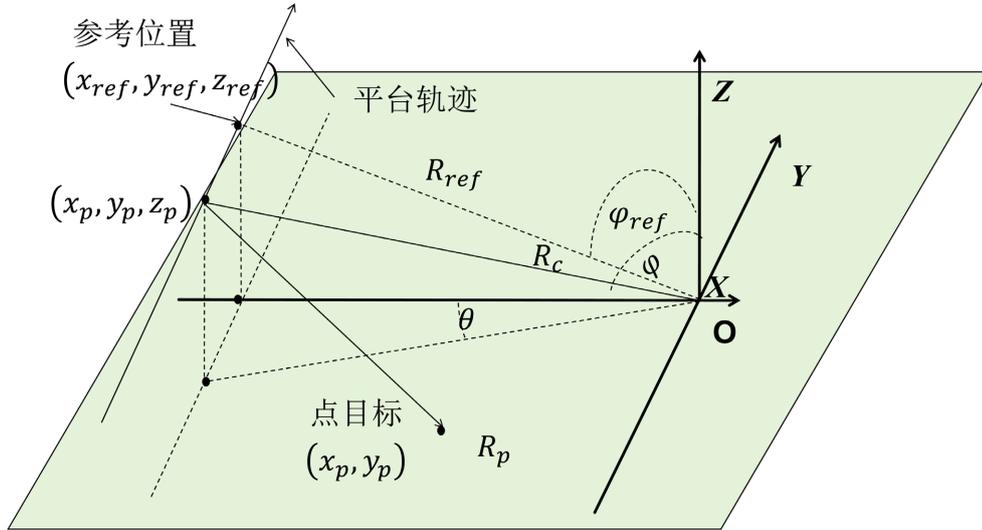


Figure 1. Radar detection geometry diagram

图 1. 雷达探测几何关系图

太赫兹 SAR 采集回波的几何模型如图 1 所示。为了模拟实际应用场景,假设雷达平台沿非理想轨迹移动。建立 XYZ 坐标系,以场景中心 O 为原点, x 轴、y 轴、z 轴分别表示距离、方位角、高度方向。雷达天线相位中心在该坐标系下的瞬时位置记为 (x_a, y_a, z_a) , 对应的瞬时俯仰角和方位角分别记为 φ 和 θ 。以合成孔径中心为方位角慢时间原点时,对应的瞬时俯仰角作为参考俯仰角记为 φ_{ref} 。对于场景中的点目标 (x_p, y_p) , 雷达天线相位中心到该点的瞬时距离记为 R_p , R_c 表示雷达平台到场景中心的瞬时倾斜距离, R_{ref} 表示雷达平台参考点到场景中心的参考倾斜距离。

当雷达向探测场景发射线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号时,该信号可表示为:

$$S_{signal}(n, \tau) = A \cdot \exp \left[j2\pi f_c \left(t - 2\frac{R_p}{C} \right) + j\pi K_r \tau \left(\tau - 2\frac{R_p}{C} \right)^2 \right] \quad (1)$$

其中 f_c 是所发射 LFM 信号的载频, K_r 是调频率, $\tau = t - nPRF$ 代表距离向的快时间, t 为方位慢时间, n 代表第 n 个脉冲, PRF 为脉冲重复频率, C 为光速, A 表示发射信号的强度幅值。

PFA 作为一种对去调频后信号进行处理的成像算法,需要对接收到的回波以平台到场景中心的瞬时距离 R_c 作为参考距离进行去调频预处理,参考函数为:

$$S_{ref}(n, \tau) = A \cdot \exp \left[j2\pi f_c \left(t - 2\frac{R_c}{C} \right) + j\pi K_r \left(\tau - 2\frac{R_c}{C} \right)^2 \right] \quad (2)$$

去调频信号如下所示:

$$S_{d1}(n, \tau) = S_{signal1}(n, \tau) * S_{ref}^*(n, \tau) \\ = A \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi K_r}{C} \left(\frac{f_c}{K_r} + \tau - 2 \frac{R_c}{C} \right) (R_p - R_c) + j \frac{4\pi K_r}{C^2} (R_p - R_c)^2 \right] \quad (3)$$

此时公式中的第二项被称为剩余视频相位(Residual Video Phase, RVP), RVP 在足够大时会导致成像结果发生畸变以及分辨率降低。因此需要使用补偿函数对其进行消除, 补偿函数如下所示:

$$S_c(f_r) = A \cdot \exp \left[-j\pi \frac{f_r^2}{K_r} \right] \quad (4)$$

式中 $f_r = K_r \tau$, 表示距离频率。补偿后即可完成 PFA 的预处理环节, 此时信号为:

$$S_{signal2}(t, f_r) = S_{d1}(t, \tau) * S_c^*(f_r) \\ = A \cdot \exp \left[j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) \Delta R(t) \right] \quad (5)$$

其中 ΔR 代表平台到指定目标点位置以及场景中心间的差分距离。有 $\Delta R(t) = R_c - R_p = R_b(t) + R_e(t)$, $R_b(t)$ 是差分距离的基本项, $R_e(t)$ 是距离误差项。

基于平面波假设, $R_b(t)$ 可被简化为:

$$R_b(t) = \sin \varphi (x_p \sin \theta + y_p \cos \theta) \quad (6)$$

则(2)可转化为:

$$S_{signal2}(t, f_r) = A \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) \times \left[\sin \varphi (x_p \sin \theta + y_p \cos \theta) + R_e(t) \right] \right\} \quad (7)$$

根据[13]中提供的极坐标格式转换定义, PFA 的二维插值可被分解为距离频率调制、RCM 线性化和楔形变换三个步骤。在(7)中的距离频率调制定义如下:

$$f_r = \delta_r f_r + f_c (\delta_r - 1) \quad (8)$$

$\delta_r = \sin \varphi_{ref} / (\sin \varphi \cos \theta)$ 是频率变标尺度, $f_c (\delta_r - 1)$ 代表 $S_{signal2}(n, \tau)$ 中的偏移量。调制后的信号为:

$$S_{R1}(t, f_r) = A \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) \times \sin \varphi_{ref} \left[(x_p \tan \theta + y_p) + \epsilon(t) \right] \right\} \quad (9)$$

式中的 $\epsilon(t) = R_e(t) / (\sin \varphi \cos \theta)$ 。

信号在方位维度的格式转换被分为 RCM 线性化和楔形变换两部分。RCM 线性化只是单纯的方位角度到方位时间的变换, 并不涉及距离频率的转换, 即 $t = \mathcal{G}_a(t)$ 。

此时信号为:

$$S_{A1}(t, f_r) = A \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) \times \sin \varphi_{ref} \left[x_p \Omega t + y_p + \eta(t) \right] \right\} \quad (10)$$

其中有 $\Omega = V_a / R_c$ 表示雷达平台运动的角速度, 且 $\eta(t) = \epsilon[\mathcal{G}_a(t)]$ 。

最后令 $t = \frac{f_c}{f_c + f_r} t$ 即可完成信号的楔形变换, 从而实现信号的二维解耦合:

$$S_{A2}(t, f_r) = A \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi}{c} \left[x_p \Omega t + (f_c + f_r) y_p \right] + \Phi \right\} \quad (11)$$

式中的 $\Phi = \frac{4\pi \sin \varphi_{ref}}{c} (f_c + f_r) \eta \left(\frac{f_c}{f_c + f_r} t \right)$ ，表示信号在空间频域中的二维误差。

以上就是完整的 PFA 处理过程。通过对(10)所表示的信号进行二维快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)即可获得压缩图像。然而，回波信号中的一维运动误差没有得到补偿，并且在极坐标变换过程中会发生二维耦合，这导致图像二维散焦和畸变。由于一维运动误差补偿方法通常采用后处理的方式，因此在 PFA 后的表现效果不佳。

结合(10)、(11)二式可知，在信号完成 RCM 线性化之后，误差项 $\eta(t)$ 还是表现为一维形式。然而当进行到(11)完成楔形变换之后， $\eta(t)$ 被转换为了 $\eta(f_c t / (f_c + f_r))$ 。其中误差项变为二维耦合的 Φ 状态。

传统自聚焦算法只考虑一维误差估计和补偿，忽略了残余 RCM 的影响。它对微波 SAR 一般是无害的。然而它不适用于载波频率高的太赫兹 SAR。由(10)可以推导出 PFA 在空间上引起的二维耦合误差如下：

$$\begin{aligned} \Delta\Phi(t, f_r) &= \frac{4\pi \sin \varphi_{ref}}{c} \left[(f_c + f_r) \eta \left(\frac{f_c}{f_c + f_r} t \right) - f_c \eta(t) \right] \\ &\approx \frac{4\pi \sin \varphi_{ref}}{c} f_c \left[\eta \left(\frac{f_c}{f_c + f_r} t \right) - \eta(t) \right] \end{aligned} \tag{12}$$

当二维相位误差 $\Delta\Phi(t, f_r)$ 大于 $\pi/4$ 时，方位相位误差无法被简单地视作一维误差，此时该误差的二维影响应该予以考虑。如果在 PFA 处理前进行粗补偿，不仅降低计算复杂度、提高鲁棒性，而且能减小后续误差对自聚焦算法的影响，从而增强自聚焦算法的优化效果。

3. 太赫兹条带 SAR 的 PFA 成像与补偿

3.1. 模式转换

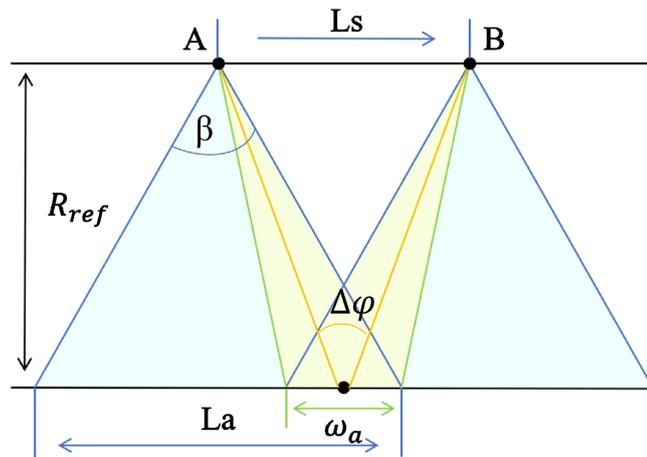


Figure 2. Strip SAR detection geometry
图 2. 条带 SAR 探测几何示意图

条带 SAR 探测的几何关系如图 2 所示，令 L_a 和 L_s 分别表示条带方位积累长度和等效聚束方位积累长度。雷达的波束宽度为 β ，等效聚束方位积累长度到场景中心的张角设为 $\Delta\varphi$ ，平台到成像场景中心的最短距离设为参考距离 R_{ref} 。当 L_a 大于 L_s 时，A 处与 B 处的探测区域间会有 ω_a 的共同区域。这代表当平台从 A 点至 B 点期间， ω_a 区域始终在照射状态。因此， ω_a 区域中的回波数据可作为类聚束探测数

据。而 ω_a 则可作为时聚束探测的方位场景大小。

结合图 2 几何关系可得：

$$\Delta\varphi \approx \frac{\lambda}{2\rho_a}$$

$$\omega = 2R_{ref} \left[\tan\left(\frac{\beta}{2}\right) - \tan\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right] \quad (13)$$

在条带式 SAR 中，采用距离 dechirp 处理方式接收的回波信号如下所示：

$$\tilde{S}_{d1}(n, \tau) = A \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi K_r}{C} \left(\frac{f_c}{K_r} + \tau - 2 \frac{R_c}{C} \right) (R_p - R_{ref}) + j \frac{4\pi K_r}{C^2} (R_p - R_{ref})^2 \right] \quad (14)$$

与 PFA 所处理的聚束数据相比，条带数据在多普勒频谱上的表现不同。如图 3 所示，条带数据中的散射点回波因为方位分布不同而在慢时间轴 t_a 上有着平移，且多普勒频谱相同。聚束数据则相反。聚束探测时各散射点处于同一探测时段，因此在 t_a 上相同。而方位位置上的不同使聚束数据出现多普勒中心偏移。

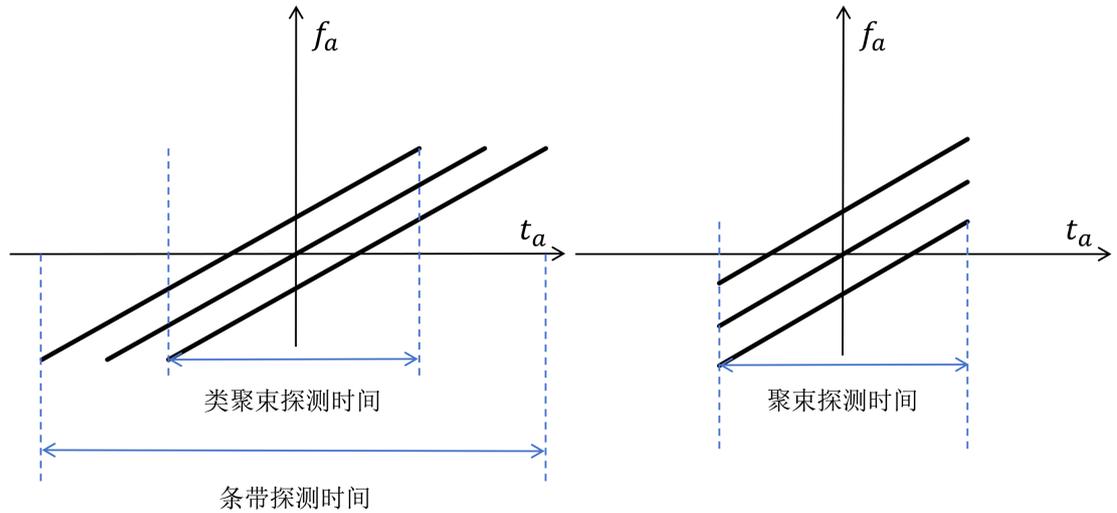


Figure 3. Doppler time-frequency diagram

图 3. 多普勒时频图

因此要用 PFA 对条带 SAR 进行成像的话，首先需要调整信号，使条带信号的多普勒频谱具有聚束信号的多普勒频谱特性。已知聚束信号与条带信号如(3)，(14)所示，聚束信号为二维去调频信号，条带信号为距离去调频信号。因此补足两者之间的相位差异，包括相位补偿和方位去调频两个步骤。

用于相位补偿的函数为：

$$S_{ref2}(t, \tau) = \exp \left[j \frac{4\pi K_r \tau}{C} (R_a(t) - R_{ref}) + j \frac{4\pi K_r}{C^2} (R_{ref}^2 - R_a(t)^2) \right] \quad (15)$$

实现方位 dechirp 的函数为：

$$S_{ref3}(t, \tau) = \exp \left[j \frac{4\pi f_c \tau}{C} (R_a(t) - R_{ref}) \right] \quad (16)$$

则聚束转换的二维 dechirp 信号如下：

$$\begin{aligned}\tilde{S}_{d2}(n, \tau) &= \tilde{S}_{d1}(n, \tau) * S_{ref2} * S_{ref3} \\ &= A * \exp \left[-j \frac{4\pi K_r}{C} \left(\frac{f_c}{K_r} + \tau - 2 \frac{R_c}{C} \right) (R_p - R_c) + j \frac{4\pi K_r}{C^2} (R_p - R_c)^2 \right]\end{aligned}\quad (17)$$

对该二维 dechirp 信号进行去除 RVP 处理后, 即可进行 PFA 的极坐标格式转换, 从而获取二维解耦合信号, 最后通过二维 FFT 得到聚焦的 SAR 图像。

3.2. 运动误差补偿

运动误差对回波信号产生两种影响: APE 和残余 RCM。前者引起方位散焦, 后者引起图像弯曲。两者间存在线性关系, 即 APE 是残余 RCM 的 $4\pi/\lambda$ 乘积。因此, 估计两者中的任何一方都能补偿整体误差。

由上节分析可知, PFA 虽然可以消除信号固有的二维耦合, 但会令具有误差信号产生额外二维误差。这一部分额外误差的大小与原始误差相关。如果提前对误差进行补偿, 可以减小 PFA 引入的误差的影响。本文提出的补偿方法核心思想是在 PFA 处理之前, 进行残余 RCM 的估计。然后根据估计的残余 RCM 与 APE 之间的关系, 计算这一阶段的总平移误差, 实现初始补偿。

通过互相关的方式来估计残差 RCM 可以保持原始信号结构, 是一种值得考虑的方式[14]。在每个方位时刻, 利用快速分带信号干涉法估计相邻距离剖面的失准量, 将其积分得到残余 RCM 估计值。基于该策略可以获得较为准确的残余 RCM 值, 从而用于计算大致误差完成粗补偿。

由式(5)进行方位 FFT 后, 信号的方位维结构如下所示:

$$S(f) = \sin c(T_r(f - K_r\tau)) \cdot \exp \left[j2\pi t_c \left(\frac{f_c\tau}{t_c} - f + K_r\tau \right) \right]\quad (18)$$

该式中的 t_c , T_r 是被处理信号的时间中心和时间宽度。通过截取信号子时间带可构建距离子信号:

$$\begin{aligned}S_{a1}(f) &= \sin c(\tilde{T}_r(f - K_r\tau)) \cdot \exp \left[j2\pi t_{ca} \left(\frac{f_c\tau}{t_{ca}} - f + K_r\tau \right) \right] \\ S_{b1}(f) &= \sin c(\tilde{T}_r(f - K_r\tau)) \cdot \exp \left[j2\pi t_{cb} \left(\frac{f_c\tau}{t_{cb}} - f + K_r\tau \right) \right]\end{aligned}\quad (19)$$

其中 \tilde{T}_r 为子信号时宽, t_{ca} 、 t_{cb} 分别为两子信号的时间中心。上式两信号的相邻方位单元信号分别为:

$$\begin{aligned}S_{a2}(f) &= \sin c(\tilde{T}_r(f - K_r\tau + \Delta f)) \cdot \exp \left[j2\pi t_{ca} \left(\frac{f_c\tau}{t_{ca}} - f + K_r\tau - \Delta f \right) \right] \\ S_{b2}(f) &= \sin c(\tilde{T}_r(f - K_r\tau + \Delta f)) \cdot \exp \left[j2\pi t_{cb} \left(\frac{f_c\tau}{t_{cb}} - f + K_r\tau - \Delta f \right) \right]\end{aligned}\quad (20)$$

式中的 $\Delta f = 2K_r d\delta/C$, 表示相邻方位单元差分运动误差 $d\delta$ 带来的频率偏移。

结合(19)、(20)两式可通过运算获取其中的差分运动误差 $d\delta$ 以进行粗补偿:

$$\begin{aligned}S_{a1}(f) \cdot S_{a2}(f)^* &= \sin c(\tilde{T}_r(f - K_r\tau)) \sin c(\tilde{T}_r(f - K_r\tau + \Delta f))^* \cdot \exp[j2\pi t_{ca} \Delta f] \\ S_{b1}(f) \cdot S_{b2}(f)^* &= \sin c(\tilde{T}_r(f - K_r\tau)) \sin c(\tilde{T}_r(f - K_r\tau + \Delta f))^* \cdot \exp[j2\pi t_{cb} \Delta f] \\ [S_{a1}(f) \cdot S_{a2}(f)^*] \cdot [S_{b1}(f) \cdot S_{b2}(f)^*] &= \exp[j2\pi(t_{ca} - t_{cb}) \Delta f]\end{aligned}\quad (21)$$

$$d\delta = \frac{C}{4\pi(t_{ca} - t_{cb})} \cdot \text{angle} \left\{ [S_{a1}(f) \cdot S_{a2}(f)^*] \cdot [S_{b1}(f) \cdot S_{b2}(f)^*] \right\}\quad (22)$$

得到精确的差分误差项 $d\delta$ 后，逐项积分得到误差 $\delta(t)$ ，如下所示：

$$\hat{\delta}(t) = \sum_{i=1}^t d\delta(i) \tag{23}$$

随后可以根据该误差项构建粗补偿项 $H(t)$ ：

$$H(t) = \exp\left[-j\frac{4\pi(f_c + f_r)}{c}\hat{\delta}(t)\right] \tag{24}$$

通过 $H(t)$ 对(5)所示预处理信号进行粗补偿来获取粗补偿信号，补偿过程如下所示：

$$\begin{aligned} S_{c1}(t, f_r) &= S_{signal2} \cdot H(t) \\ &= A \cdot \exp\left\{j\frac{4\pi(f_c + f_r)}{c}dR(t)\right\} \end{aligned} \tag{25}$$

其中 $dR(t) = \Delta R(t) - \hat{\delta}(t)$ 代表在粗补偿之后的剩余误差。

上述处理消除了大部分运动误差，同时保持了信号的模型结构，有利于后续 PFA 处理。此时(25)中的信号 $S_{c1}(t, f_r)$ 进行 PFA 处理能够在减少额外误差的基础上消除信号的二维耦合。信号的二维解耦如下：

$$S_{c2}(t, f_r) = A \cdot \exp\left\{j\frac{4\pi \sin \varphi_{ref}}{c}\left[f_c x_p \Omega t + (f_c + f_r)y_p + (f_c + f_r)dR\left(\frac{f_c}{f_c + f_r}t\right)\right]\right\} \tag{26}$$

对(26)进行二维 FFT，可得压缩后的图像。然而残余误差 $dR(t)$ 的存在会导致图像中残留部分散焦。因此，在完成 PFA 后，还需要使用自聚焦算法，如最大对比度算法(Maximum Contrast Algorithm, MCA)对误差进行细补偿。

MCA 的逻辑是基于整体图像质量优化，有时会导致信号先验结构被破坏，从而使得 PFA 的二维插值不再准确。因此，需要在 PFA 后再采用 MCA 进行细补偿以获得高质量 SAR 图像。

在综合分析误差估计和补偿处理的基础上，所提方法的总体流程图如图 4 所示。

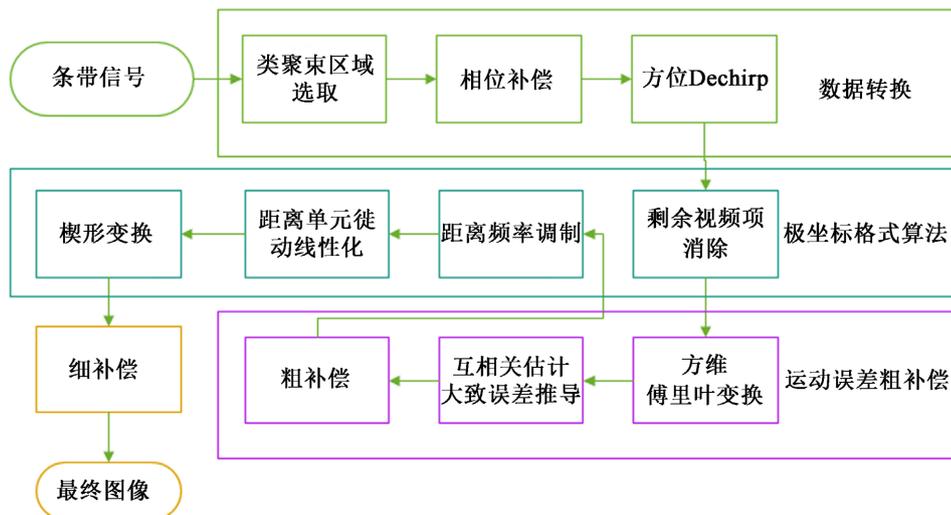


Figure 4. General flow chart

图 4. 总体流程图

4. 实验结果

4.1. 条带模式转换

在本次仿真中所使用的 THz 条带 SAR 的主要参数如表 1 所示, 在场景中的等效聚束范围内放置多个点目标生成回波。图 5 为 PFA 处理后的回波图像。其中图 5(a)代表回波直接进行 PFA 处理后的图像, 而图 5(b)代表回波进行模式转换后获得的 PFA 图像。观察可见图 5(a)中设置的点目标并没有完全压缩, 且图像中的各点目标都存在 RCM 现象。这是因为在本次仿真中生成的信号为距离去调频的条带信号, 该信号无法被 PFA 正确处理。因此 PFA 没有发挥校正固有 RCM 的功能, 相反还加剧了这种影响。

Table 1. Simulation system parameter

表 1. 仿真系统参数

参数	数值
载频	216 GHz
带宽	1.002 GHz
距离分辨率	0.1497 m
方位分辨率	0.0298 m
斜距	1000 m
波束宽度	3°
平台速度	25 m/s
俯仰角	45°

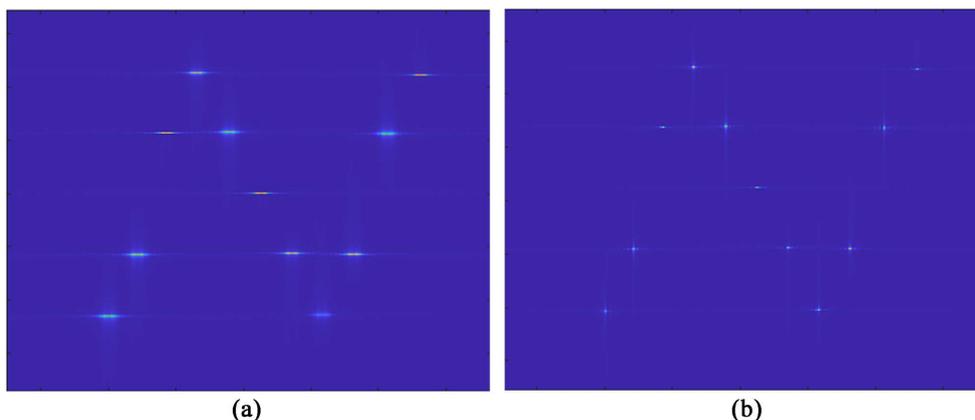


Figure 5. PFA processing images; (a) PFA images for striped data; (b) Images obtained by PFA after data conversion
图 5. PFA 处理图像; (a) 为条带数据进行 PFA 所得图像; (b) 为数据转换后进行 PFA 所得图像

与图 5(a)相比, 图 5(b)图像中的点目标都已经得到了理想的压缩, 图像中并不存在 RCM 现象。可见信号中的固有 RCM 已经被 PFA 消除, 在数据转换处理后的理论等效区域信号能够被 PFA 正确处理。

4.2. 仿真实验结果

数据转换的有效性经由上文的仿真得到了验证。首先为了模拟真实场景下的机载 SAR 成像, 验证所提误差补偿方法的有效性。在生成条带信号时加入平台平动误差, 误差所引起的相位误差如图 6(a)中蓝线所示。之后对该信号进行数据转换。最后基于该信号选择 MCA 来估计补偿信号中的误差, 并与我们

所提的方法进行比较。值得注意的是，相位误差表示在 PFA 处理之前存在一维运动误差。PFA 对信号解耦后，该相位误差将会二维耦合。

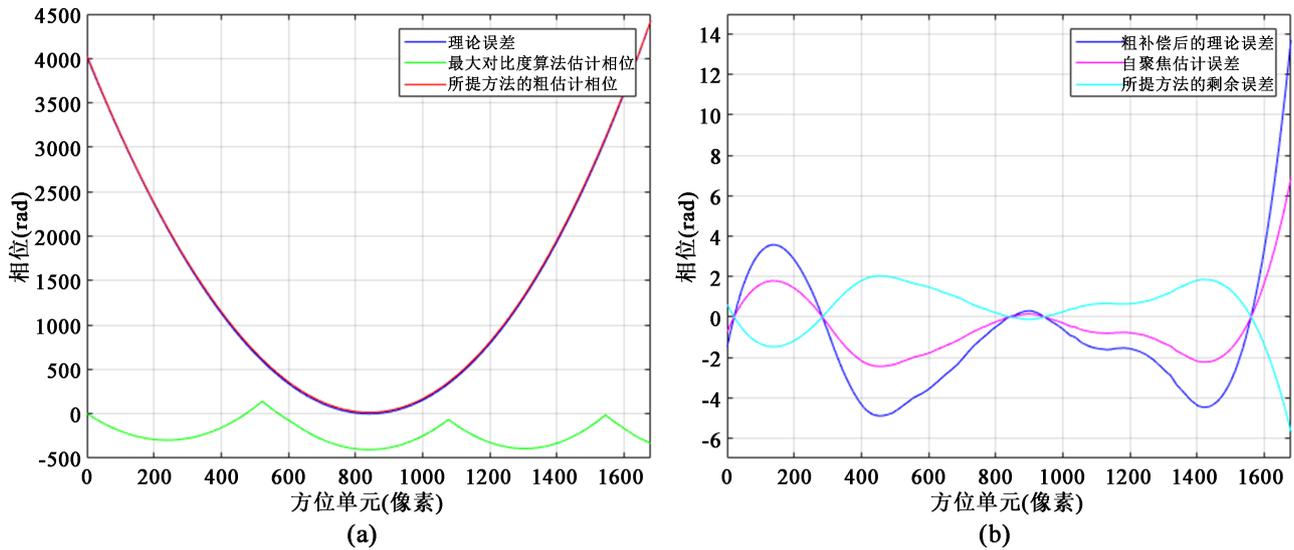


Figure 6. Error graph. (a) theoretical error and rough estimation error; (b) compensation for the proposed method
图 6. 误差图。(a) 为理论误差与粗估计误差；(b) 为所提方法细补偿

根据前一节对 PFA 二维耦合误差的分析，可以计算出 PFA 处理后的二维耦合误差。结合表中参数可由(12)计算获得在该平动误差下由 PFA 所引入的额外二维差分误差值，该数值约为 ± 45 rad。这些误差值大多超出了 $\pm\pi/4$ 的最大容忍范围。此时，二维耦合会加剧图像质量的退化，影响误差补偿处理的有效性。含有误差的类聚束信号的 PFA 图像如图 7(a)所示。从图 7(a)中可以看出，相位误差会影响图像质量，导致方位重影、图像翘曲和距离散焦。

在本次比较中首先分析的是自聚焦补偿的性能。该方法估计的方位相位误差如图 6(a)中绿线所示。随着载波频率 f_c 的增加，信号中的相位误差也将会增大，最终导致相邻两方位单元之间的相位误差超过 $\pm\pi$ 。估计结果表明了该基于相位估计的自聚焦算法结果波动过大，降低了算法的估计精度。

显然，在高载频、高分辨率的太赫兹 SAR 中，自聚焦的直接补偿效果并不理想，信号中存在较大的未补偿误差。此外，由于自聚焦只补偿一维误差，在 PFA 中引入二维差分误差没有消除。最终补偿图像如图 7(c)所示，空间中存在明显二维散焦和 RCM。毫无疑问，未补偿的 APE 和 PFA 引入的二维差分误差是导致图像二维散焦的原因之一。

我们提出的方法是在 PFA 处理前，采用互相关估计的方法来获取残差 RCM。结合残差 RCM 与 APE 之间的线性关系，导出空间上的总相位误差进行粗略补偿。得到的 APE 如图 6(a)中的红线所示。图 6(a)的估计误差与理论误差非常接近。在这个阶段，PFA 还没有引起信号误差的二维耦合，误差估计的精度高于经过 PFA 楔形变换处理后的估计。经过高精度粗补偿后，剩余相位误差明显减小，如图 6(b)蓝线所示。此时理论剩余相位误差减小很多，这说明在 PFA 前的误差估计和补偿是有效的。

图 7(c)为粗补偿后的图像。可以看出，我们的方法可以进行精确的粗补偿处理，粗补偿图像在两个维度上都具有一定的优化效果。由以上分析可知，粗补偿后的残差可以估计为一维误差，对图像质量没有明显影响。此时，使用自聚焦进行误差估计的结果如图 6(b)中的粉色线所示。这使得进一步精细补偿后的残差非常小，如图 6(b)中的青色线所示。显然，这一阶段的剩余误差大多在 $\pm\pi/4$ 的可容忍范围内。图 7(d)为最终补偿图像，距离偏移不再存在，二维散焦现象完全消除。与前两种方法相比，本方法处理

的图像具有更高的整体质量。

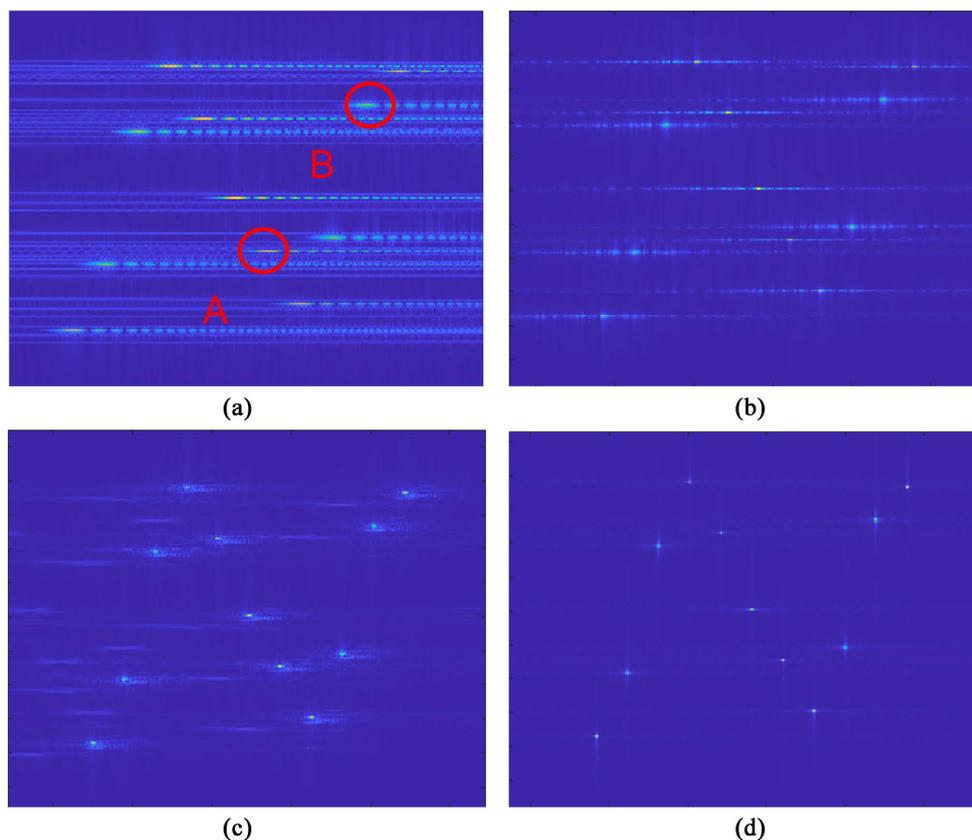


Figure 7. PFA images. (a) PFA original images; (b) Coarse compensation of images by the proposed method; (c) MCA-compensated images; (d) Images compensated by the proposed method

图 7. PFA 图像。(a) PFA 原始图像；(b) 所提方法粗补偿图像；(c) MCA 补偿的图像；(d) 所提方法补偿的图像

为了定量评价各种方法的性能，选择图 7(a)中红色标记的两个点目标进行定量分析，剖面结果如图 8 所示。通过对比两种方法的分析结果可以看出，两种方法在距离方向上的主瓣压缩都是理想的。两种方法在距离方向上的脉冲响应宽度(IRW)都非常接近理论值 0.0530 m。但这两种方法在方位维有所不同。自聚焦的方位角主瓣压缩较差。我们的方法在两个维度上都优于自聚焦。方位角的 IRW 为 0.0303 m，非常接近理想值。总的来说，相比于自聚焦补偿，本文所提方法能有效消除 PFA 对误差的耦合影响，是一种更加适合 THz SAR 的运动误差补偿方法。

5. 结论

本文提出了一种针对太赫兹条带 SAR 的 PFA 成像与运动误差补偿方法，有效地解决了太赫兹 SAR 与 PFA 结合应用时所面临的高精度误差补偿与多模式匹配度问题。为减小 PFA 的二维重采样处理对运动误差的二维空变影响，该方法采取了两步补偿的处理思路，结合残余 RCM 与 APE 之间的固有关系，通过调整粗、细两步补偿的动作节点，提出了一种基于 MD 互相关估计与最大对比度自聚焦的运动误差补偿方法。该方法相比与单一的自聚焦后处理能够更加精确地消除高分辨太赫兹 SAR 中的细微误差与二维耦合误差。考虑到实际应用中太赫兹 SAR 对于多探测模式下进行探测的要求，对条带模式与聚束模式信号的结构与频谱特性进行了对比分析，得到了用于模式转换的补偿函数。从而在 PFA 之前增加了数据转换

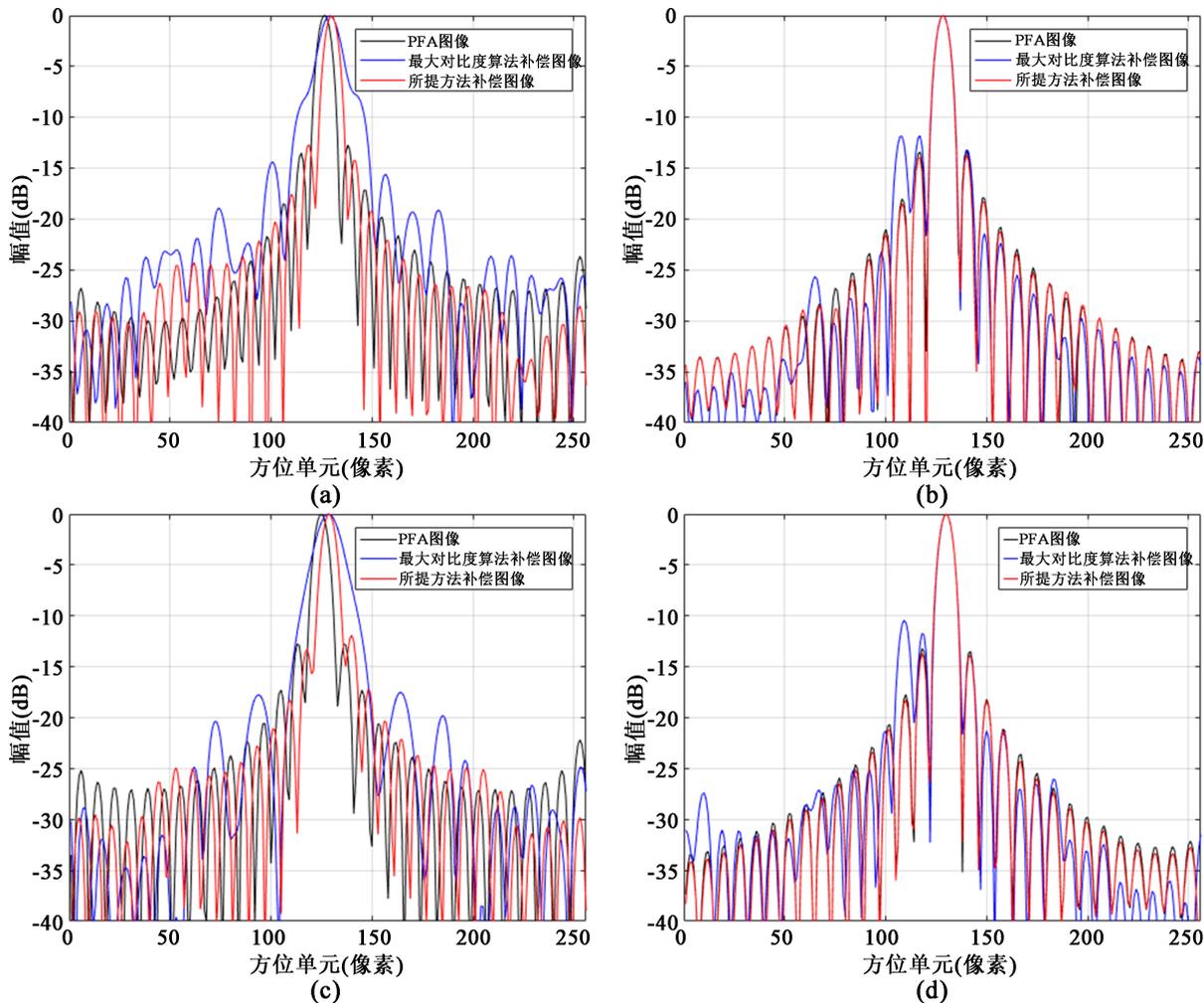


Figure 8. Profile map. (a) and (b) are two-dimensional profiles of point A respectively; (c) and (d) are two-dimensional profiles of point B respectively

图 8. 剖面图。(a)、(b)分别为 A 点的二维剖面图；(c)、(d)分别为 B 点的二维剖面图

的环节，使条带数据也能得以被本补偿方法处理。通过仿真实验处理验证了该方法的有效性。这种方法为增强基于重采样的成像算法(如 PFA)的性能提供了另一种处理思路。虽然具体到极坐标格式算法，但该方法原理和见解具有适用于其他基于重标度的成像技术的潜力。

基金项目

基金项目：上海自然科学基金(21ZR1444300)。

参考文献

- [1] Li, Y., et al. (2023) A Novel 2-D Autofocusing Algorithm for Real Airborne Stripmap Terahertz Synthetic Aperture Radar Imaging. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **20**, 1-5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2023.3323266>
- [2] Zhang, Z., Wang, H., Yang, Q. and Deng, B. (2022) Analysis of High Squint Stripmap SAR Imaging in the Terahertz Band. *2022 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Harbin, 12-15 August 2022, 1-3. <https://doi.org/10.1109/ICMMT55580.2022.10023175>
- [3] Song, Y., Hai, Y., Wu, J., Li, Z. and Yang, J. (2021) An Efficient PFA Subaperture Algorithm for Video SAR Imaging. *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, Brussels, 11-16 July 2021, 5179-5182.

-
- <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9554136>
- [4] Han, S., Zhu, D. and Mao, X. (2022) A Modified Space-Variant Phase Filtering Algorithm of PFA for Bistatic SAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **19**, 1-5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.3047617>
- [5] Liu, J., *et al.* (2023) Bistatic PFA Parallel Algorithm Based on Double Chirp-Z Transforms and The Dsp Implementation. *IGARSS 2023—2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Pasadena, 16-21 July 2023, 8118-8121. <https://doi.org/10.1109/IGARSS52108.2023.10281914>
- [6] Nie, X., Lei, W. and Zhuang, L. (2022) A Two-Step Wide-Scene Polar Format Algorithm for High-Resolution Highly-Squinted SAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **19**, 1-5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3140865>
- [7] Yeo, T.S., Tan, N.L., Lu, Y.H. and Zhang, C.B. (1998) A Stripmap to Spotlight Data Converting Algorithm. *IGARSS'98. Sensing and Managing the Environment. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing. Symposium Proceedings (Cat. No.98CH36174)*, Seattle, 6-10 July 1998, 1168-1170. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1998.699707>
- [8] Hao, Z., Sun, J. and Gu, D. (2022) A Novel Motion Compensation Method for High Resolution Terahertz SAR Imaging. *2022 15th International Congress on Image and Signal Processing*, Beijing, 5-7 November 2022, 1-6. <https://doi.org/10.1109/CISP-BMEI56279.2022.9979931>
- [9] Fornaro, G. (1999) Trajectory Deviations in Airborne SAR: Analysis and Compensation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **35**, 997-1009. <https://doi.org/10.1109/7.784069>
- [10] Xing, M., Jiang, X., Wu, R., Zhou, F. and Bao, Z. (2009) Motion Compensation for UAV SAR Based on Raw Radar Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **47**, 2870-2883. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2015657>
- [11] Fitzgerrel, A., *et al.* (2000) Two-Dimensional Phase Gradient Autofocus. SPIE Press, Washington, 162-173.
- [12] Zhu, D. (2009) SAR Signal-Based Motion Compensation through Combining PGA and 2-D Map Drift. *2009 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, Xi'an, 26-30 October 2009, 435-438. <https://doi.org/10.1109/APSAR.2009.5374289>
- [13] Mao, X. and Zhu, D. (2016) Two-Dimensional Autofocus for Spotlight SAR Polar Format Imagery. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, **2**, 524-539. <https://doi.org/10.1109/TCI.2016.2612945>
- [14] Fu, X., Wang, B., Xiang, M., Jiang, S. and Sun, X. (2019) Residual RCM Correction for LFM-CW Mini-SAR System Based on Fast-Time Split-Band Signal Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **57**, 4375-4387. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2890978>