

太赫兹SAR平台振动精细化建模与自适应运动补偿算法研究

陈思雨, 王勇*

(哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 太赫兹合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)凭借其高分辨率成像和精细目标细节提取能力, 展现出广阔的应用前景. 由于信号波长较短, 太赫兹SAR极易受到平台振动的影响, 导致其成像过程中存在虚假成像点、沿方位向模糊、SAR图像散焦等诸多问题. 为解决这一挑战, 本文对复杂太赫兹SAR平台振动进行精细化建模, 并对应地提出了太赫兹SAR自适应运动补偿算法, 基于数理模型分析平台振动对成像过程影响机理, 灵活精确地补偿实际场景中复杂的太赫兹SAR平台振动. 首先, 本文提出了基于时变幅度调制振动模型(Temporal Amplitude Modulation Vibration Model, TAMVM)的太赫兹SAR平台振动的精细化建模方法. 通过集成余弦时变幅度和随机时变幅度调制模型, TAMVM模型克服了传统简谐振动模型的局限性, 提升了对复杂多变的太赫兹SAR平台振动的适配性. 其次, 针对传统依赖简谐模型的运动补偿算法在处理复杂平台振动时的性能损失, 提出了最小Tsallis熵准则下基于列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt, LM)算法的太赫兹SAR自适应运动补偿方法. 本文提出的图像质量驱动的运动补偿算法无需依赖特显点, 能够在非线性最小二乘框架下精确估计复杂多变的回波振动相位, 且无需额外的补偿步骤. 同时, 本文在最小Tsallis熵准则下精确推导了LM算法的迭代运算过程. 该算法通过自适应调整搜索位移实现反馈更新和迭代优化, 能够精确估计回波振动相位并抑制图像模糊, 从而获得高质量的聚焦太赫兹SAR图像. 仿真与实测数据的对比结果验证了本文所提的TAMVM振动模型的合理性和可行性, 以及所提自适应运动补偿方法在精准聚焦太赫兹SAR图像与抑制虚假成像点方面的优越性.

关键词: 太赫兹SAR; 平台振动精细化建模; TAMVM模型; 最小Tsallis熵准则; LM算法

基金项目: 国家杰出青年科学基金(No.62325104)

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)05-1500-20

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

DOI: 10.12263/DZXB.20241174

Platform Vibration Fine Modeling and Adaptive Motion Compensation Algorithm for Terahertz SAR Imaging

CHEN Si-yu, WANG Yong*

(School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Terahertz synthetic aperture radar (SAR) exhibits broad application prospects due to its capability for high-resolution imaging and detailed target extraction. However, its short wavelength makes terahertz SAR extremely susceptible to the platform vibration, leading to many issues during the imaging process such as false imaging points, azimuthal blurring, and defocused SAR images. Therefore, this paper establishes a fine platform vibration model of terahertz SAR, and proposes an adaptive terahertz SAR motion compensation algorithm. Based on the impact mechanism analysis of the platform vibration on imaging using the mathematical model, the complex platform vibration in terahertz SAR imaging scenes can be compensated flexibly and accurately. Firstly, a fine terahertz SAR vibration model is established based on the temporal amplitude modulation vibration model (TAMVM). By integrating the cosine time-varying amplitude and the random time-varying amplitude modulation vibration model, the TAMVM model reduces the limitation of the traditional harmonic model, and improves the adaptability to the complex and variable terahertz SAR platform vibration. Secondly, to address the performance loss of traditional harmonic model-based motion compensation algorithms when handling the complex plat-

form vibration, this paper proposes an adaptive motion compensation method based on the Levenberg-Marquardt (LM) algorithm under the minimum Tsallis entropy criterion. The image quality-driven motion compensation algorithm proposed in this paper does not rely on the dominant target points, and it can precisely estimate the complex and varying vibration phase under the nonlinear least squares framework without the additional compensation steps. Moreover, the iterative process of the LM algorithm is derived under the minimum Tsallis entropy criterion in this paper. This algorithm adaptively adjusts the search displacement to achieve the feedback update and the iterative optimization, enabling precise estimation of the vibration phase and suppression of image blur, thereby obtaining high-quality focused terahertz SAR images. Furthermore, the comparison results of the simulated and real-measured data verify the rationality and feasibility of the proposed TAMVM model, and demonstrate the superiority of the proposed adaptive motion compensation method in achieving the precise terahertz SAR image focusing and suppressing false imaging points.

Key words: terahertz synthetic aperture radar (SAR); platform vibration fine modeling; temporal amplitude modulation vibration model (TAMVM); minimum Tsallis entropy criterion; Levenberg-Marquardt (LM) algorithm

Foundation Item(s): National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No.62325104)

1 引言

太赫兹波是频率介于 100 GHz~10 THz 的电磁波, 位于微波与红外线之间. 由于太赫兹波频率高、波长短, 具有独特的穿透能力和出色的成像效果, 在众多许多科技领域得到广泛应用^[1,2].

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)通过发射电磁波并接收目标反射的回波信号, 再经过处理生成高分辨图像, 能穿透云层和部分植被, 对目标细节进行精确观测^[3-5]. 通过将太赫兹波与 SAR 技术结合, 太赫兹 SAR 展现出多项显著优势和应用前景. 首先, 太赫兹波可以穿透纸张、布料、陶瓷等非金属材料, 同时其能量较低, 在检测隐藏或内部结构时效果显著, 不会对检测对象造成损害, 适用于安全检查等对对象无损害的场景. 此外, 太赫兹波段的高空间分辨率能够生成更为精细的图像, 这是太赫兹 SAR 相较于其他波段 SAR 的一大优势. 随着科学技术的不断进步, 太赫兹 SAR 未来将在更多领域实现创新应用^[6-8].

由上述介绍可见, 太赫兹 SAR 技术在高分辨率成像中具有重要的应用潜力, 但其对平台振动异常敏感^[9-11]. 这种敏感性意味着即便是微小的振动也可能对成像质量产生显著影响, 导致成像结果沿方位向严重散焦, 降低图像清晰度. 因此, 为保证成像结果的质量与精确性, 必须特别关注平台振动对太赫兹 SAR 成像过程的影响, 并采取有效的补偿措施和校正措施, 以确保成像结果的精确性和可靠性. 现有的太赫兹 SAR 平台振动研究主要分为两个方向: (1) 太赫兹 SAR 平台振动建模; (2) 太赫兹 SAR 平台振动补偿. 下面分别对这两个研究方向进行介绍.

在太赫兹 SAR 平台振动建模方面, 通常使用多正弦信号叠加的简谐振动形式对太赫兹 SAR 平台振动进行近似建模^[12-21]. 研究表明, 上述模型在描述某些规律的振动情况时可以获得较好的结果, 但在实际太赫兹 SAR 成像处理过程中, 平台振动的复杂性和不规则性

可能会导致该模型失配. 由于实际中的振动环境可能涉及多种因素的交互影响, 使得简单规律的模型难以准确反映真实的平台振动状态, 从而限制了其在高精度成像中的应用. 为克服传统基于简谐振动模型的局限性, 考虑实际场景中平台振动的非线性、多分量性、时变性、不规则性等, 亟待建立能够更全面和更准确地描述复杂振动情况的太赫兹 SAR 平台振动模型, 为后续的太赫兹 SAR 平台振动补偿算法研究奠定基础.

在太赫兹 SAR 平台振动补偿方面, 一些学者基于简谐振动模型来补偿平台的振动^[12-21], 另外一些学者从图像质量出发对太赫兹 SAR 图像进行聚焦^[22-24].

一方面, 在基于特定简谐模型的运动补偿算法上, 现有研究建立对应的正弦或正弦调频信号模型拟合平台振动, 这种算法可以较好地处理较为规律的振动. 然而, 实际的平台振动往往复杂且具有随机性, 规律性的、确定的数学模型难以准确拟合. 此外, 这类算法往往需要成像场景中存在特显点, 缺少这些特显点可能会导致图像聚焦精度下降^[12-21]. 综上, 这些特定模型驱动的太赫兹 SAR 平台振动补偿算法在实际复杂场景中可能无法实现理想的成像效果, 甚至需要额外的补偿步骤^[21].

另一方面, 在基于图像质量的太赫兹 SAR 图像聚焦算法上, 一些学者使用最小香农熵准则补偿更加复杂的平台振动^[22-24]. 这种算法不依赖某种特定的振动模型, 可以很好地补偿复杂或不规律的平台振动, 一定程度上克服了特定模型驱动的平台振动补偿算法的局限性. 但是香农熵在描述复杂系统时往往存在一定的局限性. 此外, 香农熵参数的单一性使得其无法通过调整参数来适应不同的系统特性.

综上所述, 太赫兹 SAR 平台振动会造成 SAR 图像沿方位向散焦、产生虚假成像点等诸多问题, 从太赫兹 SAR 平台振动建模和平台振动补偿两个方面出发, 现有研究还存在如上所述的挑战和困难. 为此, 本文首先

提出了基于时变幅度调制振动模型(Temporal Amplitude Modulation Vibration Model, TAMVM)的太赫兹 SAR 平台振动精细化建模,提升了振动模型在实际场景中的适配性;进一步,本文提出了 Tsallis 熵驱动下的基于列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt, LM)算法的自适应太赫兹 SAR 运动补偿算法,在减少补偿算法对振动模型依赖的同时提升了实际复杂成像场景下运动补偿算法的自适应能力. 本文主要贡献如下.

首先,在太赫兹 SAR 平台振动建模方面,为提升振动模型在实际场景中的适配性,本文提出了基于 TAMVM 模型的太赫兹 SAR 平台振动精细化建模方法. 所提的 TAMVM 模型中同时包含了适用于特定规律性成像场景的余弦时变幅度调制振动模型,以及适用于复杂不规则成像场景的随机时变幅度调制振动模型. 通过综合考虑实际场景中太赫兹 SAR 平台振动的非线性、多分量性、时变性、不规则性,所提基于 TAMVM 模型的太赫兹精细化建模方式克服了传统基于简谐振动模型的局限性,并为后续运动补偿算法研究奠定基础.

其次,在太赫兹 SAR 平台振动补偿方面,本文提出了一种最小 Tsallis 熵准则下基于 LM 算法的自适应太赫兹 SAR 运动补偿算法,可以更好地应对实际场景中复杂多样的太赫兹 SAR 平台振动. 作为一种图像质量驱动的运动补偿算法,所提方法克服了基于特定简谐模型运动补偿算法的局限性,并在不依赖成像场景中的特显点的前提下,能够准确估计出太赫兹 SAR 回波信号中的振动相位且无需额外的补偿步骤. 同时,最小 Tsallis 熵准则的引入克服了现有研究中香农熵的参数单一性和描述复杂系统时的局限性. 通过调整 Tsallis 熵的非加性参数,所提方法可以在处理复杂多样的太赫兹 SAR 系统时呈现出更灵活的适应能力和更好的鲁棒性.

此外,为缓解相位估计过程中的高阶导数计算复杂与动态全局搜索能力不足的问题,所提算法将最小 Tsallis 熵准则下的相位估计问题转换为非线性最小二乘问题,并引入 LM 算法实现相位精确估计和补偿. 作为 LM 算法迭代运算的基础,本文精确推导了最小 Tsallis 熵准则下的待优化函数及其相关偏导数的具体表示形式. 同时,LM 算法能够有效避免高阶导数的相关计算,并且可以通过动态调整搜索位移实现自适应反馈更新和迭代优化,使得所提方法可以更好收敛到全局最优解并精确估计由平台振动引入的相位.

最后,为证明所提算法可行性与优越性,本文同时进行了仿真与实测数据的实验验证,结果表明:(1)本文所提算法克服了基于特定简谐模型运动补偿算法的局限性,且无需依赖成像场景中的特显点;(2)与现有算法相比,所提算法可以更好地处理实际场景中复杂

多样的太赫兹 SAR 平台振动,并在不同的信噪比条件下均可取得更好的成像结果.

2 基于 TAMVM 模型的太赫兹 SAR 信号模型构建

2.1 TAMVM 模型构建

建立平台振动模型是研究补偿太赫兹 SAR 平台振动补偿算法的基础. 平台振动的幅度通常处于毫米量级,与太赫兹波段的波长接近,因此微小振动对太赫兹 SAR 成像的影响不容忽视^[25,26]. 如图 1 所示,太赫兹 SAR 平台振动可能导致产生虚假成像点、SAR 图像沿方位向模糊、图像散焦等问题. 在现有的太赫兹 SAR 平台振动研究中,平台振动通常被建模为简谐振动模型^[12~21]. 但是,在实际情况中,平台振动的幅度可能是随着慢时间而变化的,简谐模型无法充分反映平台振动的变化特性,并且在使用简谐模型对平台振动进行补偿时,图像可能仍然会出现散焦现象,需要做进一步的聚焦处理^[21]. 为了克服这一问题,本文基于文献^[12~21]中的简谐振动模型,进一步提出了 TAMVM 模型,如式(1)所示:

$$r_v(m) = \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} a_{\gamma}(m) \sin(2\pi f_{\gamma} m + \varphi_{\gamma}) \quad (1)$$

其中, $\gamma=1, 2, \dots, \Gamma$, Γ 为振动分量数,当 $\Gamma=1$ 时,振动 r_v 为单分量振动; m 为慢时间, $m=0, 1, \dots, M-1$, M 为方位向采样点数; $a_{\gamma}(m)$ 为时变振幅; f_{γ} 为振动频率; φ_{γ} 为振动相位.

该模型旨在更真实地描述实际太赫兹 SAR 平台振动特性,尤其是现有简谐振动模型所不能适应的复杂振动情况. 通过建立这一振动模型,不仅能够更准确地模拟太赫兹 SAR 平台的振动,还能为复杂平台振动补偿算法的研究提供更加可靠的理论基础. 为了更清晰地展示太赫兹 SAR 成像中 TAMVM 模型建立的过程与方法,图 1 给出了 TAMVM 模型的建立流程与示意图.

式(1)中提出的 TAMVM 模型中振动幅度 $a_{\gamma}(m)$ 是由慢时间调制的,这一时变振幅的存在使得该模型可以更灵活地适用于多变且复杂的不规律太赫兹 SAR 振动情况. 对于时变振动幅度 $a_{\gamma}(m)$ 的具体形式,本文将分为两种情况,如式(2)所示. 具体来说,平台振动的一个常见来源是由机械部件的周期性运动,对于这类振动,本文引入具有周期性特性的余弦时变幅度进行描述,如式(2)中的情况 1 所示. 这种余弦时变幅度调制振动模型可以更加准确地描述周期性的平台振动. 除此之外,平台振动还可能来源于环境扰动的影响,这类振动的幅度通常会呈现出随机波动的特征. 在这种情况下,振动的变化无法通过简单的周期性函数来建

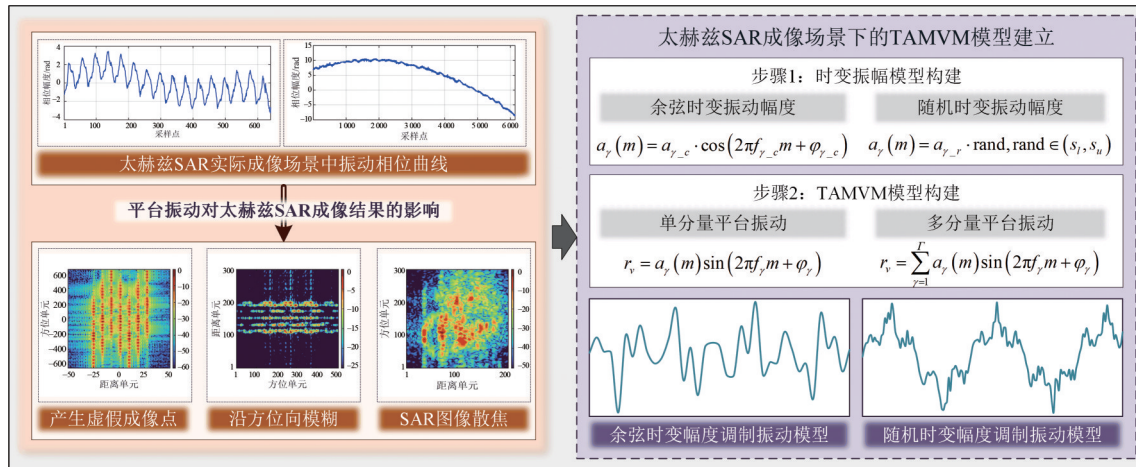


图1 TAMVM 模型建立流程与示意

模,因此进一步引入随机时变幅度来更准确地刻画这种不规则的变化,如式(2)中的情况2所示.这种随机时变幅度调制振动模型具有更强的通用性,能够更好地应对实际中的太赫兹 SAR 平台振动情况.因此,该 TAMVM 模型的建立不仅增强了对不同振动类型的适应能力,也提高了在实际太赫兹 SAR 成像中对复杂平台振动的精准建模能力,为后续的太赫兹 SAR 成像及运动补偿算法研究奠定了基础.

$$a_{\gamma}(m) = \begin{cases} a_{\gamma_c} \cdot \cos(2\pi f_{\gamma_c} m + \varphi_{\gamma_c}), & \text{情况1} \\ a_{\gamma_r} \cdot \text{rand}, \text{ rand} \in (s_l, s_u), & \text{情况2} \end{cases} \quad (2)$$

其中, a_{γ_c} 为余弦时变振幅模型中的幅度, f_{γ_c} 为余弦时变振幅模型中的频率, φ_{γ_c} 为余弦时变振幅模型中的相位, a_{γ_r} 为随机时变振幅模型中的幅度, rand 为随机数, s_l 为随机数范围的下界, s_u 为随机数范围的上界.

2.2 太赫兹 SAR 信号模型构建

基于上述 TAMVM 模型的太赫兹 SAR 平台振动精细化建模,本文进一步构建了太赫兹 SAR 信号模型.太赫兹 SAR 成像几何模型如图2所示,雷达平台沿 X 轴方向运动,对场景中的目标点 Q 进行成像.其中,橙色虚线表示平台的理想运动轨迹,而蓝色实线表示平台的实际运动轨迹.可见,太赫兹 SAR 平台振动使得平台实际运动轨迹发生了偏移,而这也正是引起太赫兹图像散焦的关键因素.

假设雷达发射线性调频信号,则接收信号可以表示为

$$x(n, m) = \tilde{\eta} \exp \left\{ j\pi \left[k_r \left(n - \frac{2r_a(m)}{c} \right)^2 - \frac{4r_a(m)}{\lambda} \right] \right\} \quad (3)$$

其中, $\tilde{\eta}$ 表示接收信号的幅度; k_r 为调频率; n 为快时间, $n=0, 1, \dots, N-1, N$ 为距离向采样点数; c 为光速; λ 是信号波长; $r_a(m)$ 表示天线相位中心到目标的实际距离,具体可表示为

$$r_a(m) = r_i(m) + r_v(m) \quad (4)$$

其中, $r_i(m)$ 表示天线相位中心到目标的理想距离, $r_v(m)$ 是式(1)中描述的平台振动.

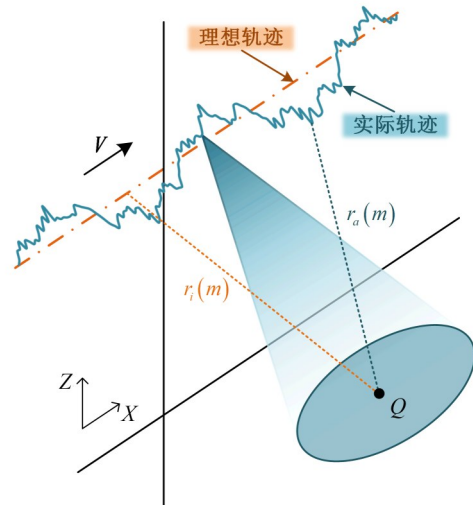


图2 太赫兹 SAR 成像几何模型

对式(3)中的回波信号进行距离压缩后,可得:

$$x(n, m) = \eta \text{sinc} \left[\pi B \left(n - \frac{2r_a(m)}{c} \right) \right] \exp \left[-j \frac{4\pi r_a(m)}{\lambda} \right] \quad (5)$$

其中, η 为距离压缩后的信号幅度, B 为信号带宽.

在对回波信号进行距离压缩后,进一步进行距离徙动校正操作,可得:

$$x(n, m) = \eta \text{sinc} \left[\pi B \left(n - \frac{2r_{a0}}{c} \right) \right] \exp \left[-j \frac{4\pi r_a(m)}{\lambda} \right] \quad (6)$$

其中, r_{a0} 是太赫兹 SAR 平台到目标的最短斜距.

将式(1)与式(4)代入式(6)中,可以得到基于 TAMVM 模型的太赫兹 SAR 回波信号模型,如式(7)所示.同时,式(8)进一步给出了太赫兹 SAR 回波信号中

由平台振动引起的相位 φ_v , 该相位是导致太赫兹 SAR 图像质量下降的关键因素, 对其进行有效补偿是后续运动补偿算法研究的核心问题。

$$x(n, m) = \eta \text{sinc} \left[\pi B \left(n - \frac{2r_{a0}}{c} \right) \right] \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[r_i(m) + \sum_{\gamma=1}^F a_\gamma(m) \sin(2\pi f_\gamma m + \varphi_\gamma) \right] \right\} \quad (7)$$

$$\varphi_v = \frac{4\pi}{\lambda} \sum_{\gamma=1}^F a_\gamma(m) \sin(2\pi f_\gamma m + \varphi_\gamma) \quad (8)$$

为得到太赫兹 SAR 成像结果, 对距离徙动校正后的信号(7)进行方位向补偿与傅里叶变换, 即可得到 SAR 成像结果, 如式(9)所示:

$$\begin{aligned} \tilde{I}(n, k) &= \text{FT}_m \left[x(n, m) \cdot \exp(-j\pi k_a m^2) \right] \\ &= \text{FT}_m \left[\tilde{x}(n, m) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

其中, k 为多普勒频率指数; $\text{FT}_m[\cdot]$ 表示沿方位向的傅里叶变换操作; k_a 表示多普勒调频率; $\exp(-j\pi k_a m^2)$ 为方位向补偿函数, $\tilde{x}(n, m) = x(n, m) \cdot \exp(-j\pi k_a m^2)$ 。

由于相位 φ_v 的存在, 式(9)中得到的太赫兹 SAR 图像在方位向上是严重散焦的。为了获得清晰且高质量的成像结果, 需要进一步实施运动补偿算法以抑制图像散焦问题。针对本节讨论的 TAMVM 模型下的太赫兹 SAR 信号模型, 下一节将深入探讨其相应的运动补偿算法, 以有效解决因振动引起的图像散焦。

3 最小 Tsallis 熵准则下基于 LM 算法的自适应太赫兹 SAR 运动补偿算法

第 2 节建立的 TAMVM 模型是复杂甚至不规律的, 难以基于特定的简谐振动模型对其进行补偿, 因此研究相关的运动补偿算法是获得高质量太赫兹 SAR 图像的基础。基于上述分析, 本文提出了最小 Tsallis 准则下基于 LM 算法的自适应太赫兹 SAR 运动补偿算法。通过引入最小 Tsallis 熵准则评判太赫兹 SAR 图像质量, 该算法从图像质量出发估计出由平台振动引入回波信号的相位 φ_v 。由于 Tsallis 熵具有独特的优势, 它在图像处理领域得到了广泛的应用^[27]。与传统的香农熵不同, Tsallis 熵通过引入非加性参数 q , 提供了一种更为通用的熵度量框架, 能够灵活适应不同的场景需求, 尤其是在处理复杂的非延展性系统时表现出更强的适应性。此外, Tsallis 熵可以看作是香农熵的扩展形式, 而香农熵本质上是 Tsallis 熵在特定条件下(当 $q \rightarrow 1$ 时)的一种特例, 缺乏灵活性和适应性。因此, 基于最小 Tsallis 熵准则的算法不仅涵盖了香农熵的特性, 而且进一步通过其非加性参数 q 提供了更为灵活和有效的自适应能力。

基于最小 Tsallis 熵准则, 本文所提算法首先将运动

补偿问题转化为非线性最小二乘问题, 再进一步引入 LM 算法求解出相位 φ_v 。LM 算法通过自适应调整搜索位移能够实现反馈更新和迭代优化, 在避免了 Tsallis 熵高阶导数相关计算的基础上保证了算法的数学严谨性与稳定性, 进而获得精确的振动相位估计值。值得注意的是, 本文提出的自适应运动补偿算法从图像质量出发, 通过引入最小 Tsallis 熵准则评估图像的质量, 在获得最佳质量图像的同时, 估计出平台振动相位 φ_v 。因此, 该算法不需要依赖特定的振动模型, 能够灵活地适应多种复杂的振动场景, 尤其是那些简谐模型无法处理的复杂振动。这一特点使得本文的算法在实际应用中具有更强的适应性, 能够对复杂的太赫兹 SAR 平台振动进行有效的运动补偿, 克服了基于简谐模型的运动补偿算法在处理复杂平台振动时的局限性, 并最终实现高清晰度的成像。该算法的具体实施步骤将在后续部分进行详细阐述。

3.1 Tsallis 熵与香农熵的关系

在现有文献[22~24]中, 一些学者基于最小香农熵准则研究了太赫兹 SAR 运动补偿算法。这种算法不依赖特定的振动模型, 能有效补偿复杂或不规律的平台振动, 一定程度上克服了简谐模型驱动方法的局限性。然而, 式(10)中定义的香农熵因其参数的单一性, 无法通过调整参数适应不同系统特性, 且在描述复杂系统时存在一定的局限性。因此, 本文进一步基于最小 Tsallis 熵准则提出了一种太赫兹 SAR 运动补偿算法, Tsallis 熵的定义式如式(11)所示。通过引入非加性参数 q , Tsallis 熵扩展了香农熵的定义, 从而使 Tsallis 熵更适用于处理复杂的非延展性系统。此外, Tsallis 熵可以通过不同的 q 值选择在图像聚焦性能与计算时间之间实现不同程度的权衡, 从而使 Tsallis 熵能够更灵活地适应不同的场景和成像需求, 展现出更强的适应性和灵活性^[28]。值得注意的是, Tsallis 熵是香农熵的扩展形式, 而香农熵是 Tsallis 熵在特定条件下($q \rightarrow 1$ 时)的一种特例。

$$E_S = - \sum_i P_i \cdot \ln P_i \quad (10)$$

其中, $\sum_i P_i = 1$ 。

$$E_T = \frac{1 - \sum_i P_i^q}{q-1} \quad (11)$$

其中, q 为 Tsallis 熵的非加性参数。

当 $q \rightarrow 1$ 时, 指数函数 P_i^{q-1} 的泰勒展开式可以表示为

$$P_i^{q-1} = 1 + (q-1) \ln P_i \quad (12)$$

将式(12)代入 Tsallis 熵定义式(11)中, 可以得到 $q \rightarrow 1$ 时的 Tsallis 熵表达式:

$$\begin{aligned}
E_T &= \frac{1 - \sum_i (1 + (q-1) \ln P_i) P_i}{q-1} \\
&= \frac{1 - \sum_i P_i - \sum_i (q-1) P_i \ln P_i}{q-1} \\
&= - \sum_i P_i \ln P_i
\end{aligned} \quad (13)$$

可见,当 $q \rightarrow 1$ 时, Tsallis 熵的极限为

$$\lim_{q \rightarrow 1} E_T = - \sum_i P_i \ln P_i = E_S \quad (14)$$

而这恰恰正是式(10)中香农熵的定义.

综上所述,当 $q \rightarrow 1$ 时, Tsallis 熵与香农熵等价,故香农熵是 Tsallis 熵在 $q \rightarrow 1$ 时的一种特例形式.

3.2 最小 Tsallis 熵准则下的非线性最小二乘问题转换

为了抑制平台振动引起的方位向散焦,首先应估计平台振动引入的相位 φ_v ,进而构造相应的补偿函数来获取聚焦的太赫兹 SAR 图像. 这里的补偿函数表达式为

$$h_r = \exp[j\varphi(m)] \quad (15)$$

其中, $\varphi(m)$ 是 m 时刻对相位 φ_v 的估计值. 通过利用式(15)中的补偿函数 h_r 对信号 $\tilde{x}(n, m)$ 进行补偿并执行方位向傅里叶变换,可以得到补偿后的太赫兹 SAR 图像,其表达式为

$$\begin{aligned}
I(n, k) &= \text{FT}_m[\tilde{x}(n, m) \cdot h_r] \\
&= \text{FT}_m[\tilde{x}(n, m) \cdot \exp[j\varphi(m)]]
\end{aligned} \quad (16)$$

针对式(16)中补偿后的太赫兹 SAR 图像,本文引入 Tsallis 熵来评估太赫兹 SAR 图像的聚焦质量. 太赫兹 SAR 图像 $I(n, k)$ 的 Tsallis 熵表达式为

$$E_T = \frac{1 - \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} \left[\frac{|I(n, k)|^2}{S_I} \right]^q}{q-1} \quad (17)$$

其中,

$$S_I = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} |I(n, k)|^2 \quad (18)$$

当补偿后太赫兹 SAR 图像的 Tsallis 熵最小时,意味着图像的聚焦效果最佳,且此时估计出的相位值为最终的相位估计值. 因此,基于最小 Tsallis 熵准则,可以估计出由复杂不规则平台振动引入的相位 φ_v , 如式(19)所示:

$$\hat{\varphi}(m) = \arg \min_{\varphi(m)} E_T \quad (19)$$

其中, $\hat{\varphi}(m)$ 为 m 时刻等于相位 φ_v 的最终估计值.

为了实现 Tsallis 熵的最小化,需要使 Tsallis 熵关于相位的偏导数为 0. 将 Tsallis 熵关于相位 $\varphi(m)$ 的偏导数记作函数 $F(m)$, 则 Tsallis 熵最小化问题可以转化为

如式(15)所示的非线性方程求解问题:

$$F(m) = 0 \quad (20)$$

其中, $F(m)$ 为 Tsallis 熵关于相位的一阶偏导数,即为

$$F(m) = \frac{\partial E_T}{\partial \varphi(m)} \quad (21)$$

当函数 $F(m)$ 取值为 0 时,其平方亦达到最小值,故式(20)可以进一步转化为如式(22)所示的极小化问题. 而式(22)中的极小化问题可以被视为非线性最小二乘问题,具体如下:

$$\forall m = 0, 1, \dots, M-1, \min f(m) = \frac{1}{2} F^2(m) \quad (22)$$

其中, $f(m)$ 表示非线性最小二乘问题的目标函数.

上文讨论了太赫兹 SAR 运动补偿问题的具体求解方式,并基于最小 Tsallis 熵准则将其转换为非线性最小二乘问题. 下节将继续讨论针对非线性最小二乘问题的求解算法,以得到相位 φ_v 的最终估计值.

3.3 基于 LM 算法的自适应太赫兹 SAR 运动补偿算法

为了解上述非线性最小二乘问题式(22),本文引入 LM 算法进行求解. 首先,式(23)与式(24)分别给出了非线性最小二乘问题式(22)中目标函数 $f(m)$ 的一阶偏导数 $g(m)$ 与二阶偏导数 $h(m)$:

$$\begin{aligned}
g(m) &= \frac{\partial f(m)}{\partial \varphi(m)} = \frac{\partial}{\partial \varphi(m)} \left[\frac{1}{2} F^2(m) \right] \\
&= \frac{\partial F(m)}{\partial \varphi(m)} \cdot F(m) = J(m) \cdot F(m)
\end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned}
h(m) &= \frac{\partial^2 f(m)}{\partial [\varphi(m)]^2} = \frac{\partial g(m)}{\partial \varphi(m)} \\
&= J(m) \cdot \frac{\partial F(m)}{\partial \varphi(m)} + \frac{\partial J(m)}{\partial \varphi(m)} \cdot F(m) \\
&= J(m) \cdot J(m) + \frac{\partial J(m)}{\partial \varphi(m)} \cdot F(m) \\
&= J(m) \cdot J(m) + S(m)
\end{aligned} \quad (24)$$

其中, $J(m)$ 为 Tsallis 熵关于相位的二阶偏导数,即为

$$J(m) = \frac{\partial F(m)}{\partial \varphi(m)} = \frac{\partial}{\partial \varphi(m)} \left[\frac{\partial E_T}{\partial \varphi(m)} \right] = \frac{\partial^2 E_T}{\partial [\varphi(m)]^2} \quad (25)$$

并且

$$\begin{aligned}
S(m) &= \frac{\partial J(m)}{\partial \varphi(m)} \cdot F(m) \\
&= \frac{\partial}{\partial \varphi(m)} \left[\frac{\partial^2 E_T}{\partial [\varphi(m)]^2} \right] \cdot \frac{\partial E_T}{\partial \varphi(m)} \\
&= \frac{\partial^3 E_T}{\partial [\varphi(m)]^3} \cdot \frac{\partial E_T}{\partial \varphi(m)}
\end{aligned} \quad (26)$$

对于非线性最小二乘问题式(22),根据无约束优

化问题取极值的必要条件,则有

$$g(m) = J(m) \cdot F(m) = 0 \quad (27)$$

为求解式(27),首先使用最基础的牛顿迭代法,可以得到迭代求解式(28):

$$\begin{aligned} \varphi_k(m) &= \varphi_{k-1}(m) - h_{k-1}^{-1}(m) g_{k-1}(m) \\ &= \varphi_{k-1}(m) - [J_{k-1}(m) \cdot J_{k-1}(m) \\ &\quad + S_{k-1}(m)]^{-1} J_{k-1}(m) \cdot F_{k-1}(m) \end{aligned} \quad (28)$$

其中, $\varphi_k(m)$ 与 $\varphi_{k-1}(m)$ 分别是第 k 次与第 $k-1$ 次迭代得到的相位误差估计值; $h_{k-1}(m)$ 为第 $k-1$ 次迭代得到的目标函数 $f(m)$ 的二阶偏导数 $h(m)$; $g_{k-1}(m)$ 为第 $k-1$ 次迭代计算出的目标函数 $f(m)$ 的一阶偏导数 $g(m)$; $J_{k-1}(m)$ 为第 $k-1$ 次迭代得到的 Tsallis 熵二阶偏导数 $J(m)$; $S_{k-1}(m)$ 为第 $k-1$ 次迭代求得的函数 $S(m)$; $F_{k-1}(m)$ 为第 $k-1$ 次迭代得到的 Tsallis 熵一阶偏导数 $F(m)$ 。

然而,式(28)中迭代算法的缺点是 $S_{k-1}(m)$ 项的计算量较大,如式(26)所示, $S_{k-1}(m)$ 项中包含 Tsallis 熵的三阶偏导数的相关计算,这导致 $S_{k-1}(m)$ 的计算较为复杂。因此,忽略式(28)中的 $S_{k-1}(m)$ 项,即可得到迭代求解表达式(29):

$$\varphi_k(m) = \varphi_{k-1}(m) - [J_{k-1}(m) \cdot J_{k-1}(m)]^{-1} J_{k-1}(m) \cdot F_{k-1}(m) \quad (29)$$

虽然在式(29)的迭代求解中避免了计算较为复杂的 $S_{k-1}(m)$ 项,但是当 $J_{k-1}(m)$ 秩亏时, $[J_{k-1}(m) \cdot J_{k-1}(m)]$ 奇异,式(29)中的迭代中断。为解决这一问题,进一步引入参数 μ_{k-1} 对式(29)中的迭代公式进行修正,即可得到 LM 算法的迭代表达式(30)。 μ_{k-1} 的引入使得 LM 算法在避免了计算较为复杂的 $S_{k-1}(m)$ 项的同时,保证了 $[J_{k-1}(m) \cdot J_{k-1}(m) + \mu_{k-1} I]$ 的非奇异性,进而保证了 LM 算法的数学严谨性。

$$\begin{aligned} \varphi_k(m) &= \varphi_{k-1}(m) + s_{k-1}(m) \\ &= \varphi_{k-1}(m) - [J_{k-1}(m) \cdot J_{k-1}(m) \\ &\quad + \mu_{k-1} I]^{-1} J_{k-1}(m) \cdot F_{k-1}(m) \end{aligned} \quad (30)$$

其中, $\mu_{k-1} > 0$, I 为单位矩阵。 $s_{k-1}(m)$ 为第 $k-1$ 次迭代得到的 LM 算法的搜索位移,可记为

$$s_{k-1}(m) = -[J_{k-1}(m) \cdot J_{k-1}(m) + \mu_{k-1} I]^{-1} J_{k-1}(m) \cdot F_{k-1}(m) \quad (31)$$

μ_{k-1} 的引入不仅可以用来保证 LM 算法的数学严谨性,还可以用来调整其搜索位移 $s_{k-1}(m)$ 。基于此,本文选取 Tsallis 熵作为 LM 算法的目标函数 R ,通过调整参数 μ_{k-1} 进一步自适应调整搜索位移 $s_{k-1}(m)$,目标函数 R 表达式如式(32)所示:

$$R = E_T = \frac{1 - \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} \left[\frac{|I(n,k)|^2}{S_I} \right]^q}{q-1} \quad (32)$$

通过目标函数 R 的变化灵活调整参数 μ_{k-1} , LM 算法可以有效地实现全局收敛到最终解。因此,本文根据每次迭代中目标函数 R 的变化,基于最小 Tsallis 熵准则引入式(33)中的判断准则,通过动态调整参数 μ_{k-1} 灵活控制搜索位移 $s_{k-1}(m)$,确保 LM 算法能够准确地收敛至最终解。当第 k 次迭代时的目标函数值 R_k 增大时,表示图像质量变差,此时需要缩小搜索位移 $s_{k-1}(m)$ 的值,即增大参数 μ_{k-1} 的取值;反之,若目标函数 R_k 的值减小,表明当前的迭代方向能够产生正向补偿效果,此时应减小参数 μ_{k-1} 的取值,以扩大搜索位移 $s_{k-1}(m)$ 。通过引入图像的 Tsallis 熵作为目标函数 R ,可以在迭代过程中动态灵活地调整参数 μ_{k-1} 的值,进而自适应调整 LM 算法的搜索位移 $s_{k-1}(m)$,从而保证 LM 算法的稳定性,并有效避免陷入局部最优解。

$$\mu_k = \begin{cases} \vartheta \times \mu_{k-1}, & R_k > R_{k-1} \\ \mu_{k-1} / \theta, & R_k \leq R_{k-1} \end{cases} \quad (33)$$

其中, $\vartheta > 1$ 与 $\theta > 1$ 均为常数; R_k 与 R_{k-1} 分别为第 k 次和第 $k-1$ 次迭代中得到的目标函数 R 。

此外,当目标函数 R_k 的值增大时,说明第 k 次迭代的搜索方向无法产生正向的补偿效果。此时,应该舍弃第 k 次迭代得到的相位估计值 $\varphi_k(m)$ 与目标函数 R_k ,即需要执行式(34):

$$\begin{cases} \varphi_k(m) = \varphi_{k-1}(m) \\ R_k = R_{k-1} \end{cases} \quad (34)$$

对于式(30)中的 LM 算法迭代公式,设定终止条件式(35),即当相邻两次迭代得到的目标函数差值的绝对值 \leq 预设阈值 TH 时,认为 LM 算法收敛到最终的相位误差估计值 $\hat{\varphi}(m)$ 。

$$|R_k - R_{k-1}| \leq \text{TH} \quad (35)$$

其中, TH 为终止条件的阈值。

综上所述, LM 算法不仅可以有效避免 Tsallis 熵高阶导数的相关计算,还通过引入参数 μ_{k-1} 克服由 $[J_{k-1}(m) \cdot J_{k-1}(m)]$ 奇异所带来的困难,并保证了 LM 算法的数学严谨性与稳定性。此外,通过引入目标函数 R 并结合最小 Tsallis 熵准则, LM 算法可以在迭代中自适应调整搜索位移 $s_{k-1}(m)$,从而实现反馈更新与迭代优化,灵活准确地估计出由平台振动引起的相位误差 φ_v 。最后,将得到的 $\hat{\varphi}(m)$ 代入补偿函数式(15)中并完成运动补偿,即可得到最终聚焦的太赫兹 SAR 成像结果。

至此,基于最小二乘问题转换与 LM 算法自适应迭代求解,式(19)中的 Tsallis 最小化过程得以完成,并且

可以求解出最终的相位误差估计值 $\hat{\phi}(m)$. 此外,图3给出了最小 Tsallis 熵准则下基于 LM 算法的自适应太赫兹 SAR 运动补偿算法的详细处理流程. 如 LM 算法的迭代表达式(30)所示,LM 算法迭代求解的关键在于函数 $F(m)$ 与 $J(m)$,因此下文将详细推导 LM 迭代算法中 Tsallis 熵关于相位的一阶偏导数 $F(m)$ 与 Tsallis 熵关于相位的二阶偏导数 $J(m)$ 的详细表达式.

3.3.1 Tsallis熵关于相位的一阶偏导数 $F(m)$ 表达式推导

在 LM 算法的迭代式(30)中,函数 $F(m)$ 与 $J(m)$ 的求解十分关键. 因此,首先对 $F(m)$ 的具体表达形式进行推导. 如式(20)所示, $F(m)$ 为 Tsallis 熵关于相位 $\phi(m)$ 的导数,故 $F(m)$ 可表示为

$$F(m) = \frac{\partial E_T}{\partial \phi(m)} = -\frac{1}{q-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} \frac{\partial \left\{ \left[\frac{|I(n,k)|^2}{S_I} \right]^q \right\}}{\partial \phi(m)} \quad (36)$$

由于 S_I 是对补偿后的太赫兹 SAR 图像 $I(n,k)$ 的模值平方求和,故 S_I 是一个常数,且它的取值并不依赖于相位 $\phi(m)$. 因此,函数 $F(m)$ 的求解关键在于对 $\partial \left\{ |I(n,k)|^2 \right\} / \partial \phi(m)$ 的求解,如式(37)所示:

$$\frac{\partial \left\{ |I(n,k)|^2 \right\}^q}{\partial \phi(m)} = \frac{\partial \left\{ |I(n,k)|^2 \right\}^q}{\partial |I(n,k)|^2} \cdot \frac{\partial |I(n,k)|^2}{\partial \phi(m)} \quad (37)$$

$$= q |I(n,k)|^{2q-2} \cdot \frac{\partial |I(n,k)|^2}{\partial \phi(m)}$$

其中,

$$\frac{\partial |I(n,k)|^2}{\partial \phi(m)} = 2 \operatorname{Re} \left\{ I^*(n,k) \cdot \frac{\partial I(n,k)}{\partial \phi(m)} \right\} \quad (38)$$

并且

$$\frac{\partial I(n,k)}{\partial \phi(m)} = j \tilde{x}(n,m) \exp[j\phi(m)] \exp \left[-j \frac{2\pi}{M} mk \right] \quad (39)$$

将式(37)~式(39)代入式(36)中,可得函数 $F(m)$ 的最终表达式,如式(40)所示:

$$F(m) = \frac{\partial E_T}{\partial \phi(m)} = \frac{2q}{(q-1)S_I^q} \operatorname{Im} \left\{ \exp[j\phi(m)] \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{x}(n,m) \cdot \sum_{k=0}^{M-1} |I(n,k)|^{2q-2} \cdot I^*(n,k) \cdot \exp \left(-j \frac{2\pi}{M} mk \right) \right\} \quad (40)$$

其中, $\operatorname{Im}[\cdot]$ 表示取虚部操作.

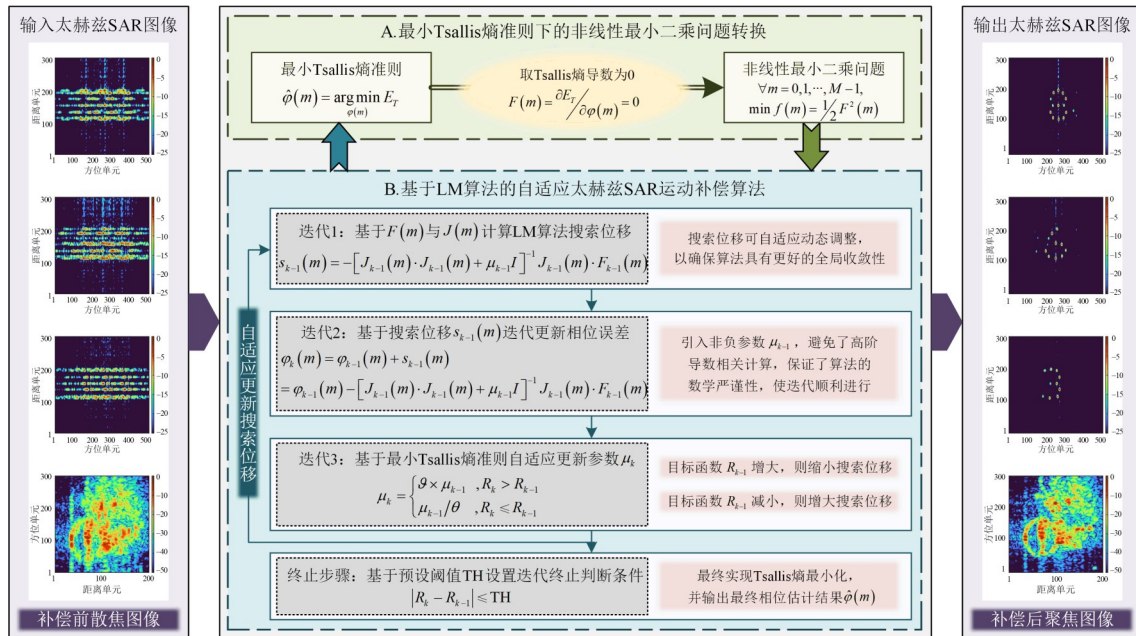


图3 最小 Tsallis 熵准则下基于 LM 算法的自适应太赫兹 SAR 运动补偿算法处理流程

3.3.2 Tsallis熵关于相位的二阶偏导数 $J(m)$ 表达式推导

在式(40)中函数 $F(m)$ 的表达式的基础上,下文将

进一步推导函数 $J(m)$ 的表达式. 首先重写式(40), 可得:

$$\begin{aligned}
F(m) &= \frac{\partial E_T}{\partial \varphi(m)} \\
&= \frac{-2q}{(q-1)S_f^q} \operatorname{Im} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} |I(n,k)|^{2q-2} \right. \\
&\quad \left. \cdot I(n,k) \cdot \tilde{x}^*(n,m) \cdot \exp[-j\varphi(m)] \cdot \exp\left(j\frac{2\pi}{M}mk\right) \right\} \quad (41)
\end{aligned}$$

基于式(41),可以进一步得到Tsallis熵关于相位的二阶偏导数 $J(m)$,如式(42)所示:

$$J(m) = \frac{\partial F(m)}{\partial \varphi(m)} = \frac{-2q}{(q-1)S_f^q} \operatorname{Im} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} \frac{\partial J_{\text{sub}}(m)}{\partial \varphi(m)} \right\} \quad (42)$$

其中,

$$\begin{aligned}
J_{\text{sub}}(m) &= |I(n,k)|^{2q-2} \cdot I(n,k) \cdot \tilde{x}^*(n,m) \\
&\quad \cdot \exp[-j\varphi(m)] \cdot \exp\left(j\frac{2\pi}{M}mk\right) \quad (43)
\end{aligned}$$

进一步地, $J_{\text{sub}}(m)$ 关于 $\varphi(m)$ 的导数可以被分解为式(44)的求解形式:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial J_{\text{sub}}(m)}{\partial \varphi(m)} &= \tilde{x}^*(n,m) \cdot \exp\left(j\frac{2\pi}{M}mk\right) \\
&\quad \times \left\{ -j \exp[-j\varphi(m)] \cdot |I(n,k)|^{2q-2} \cdot I(n,k) \right. \\
&\quad \left. + \exp[-j\varphi(m)] \cdot \frac{\partial \left[|I(n,k)|^{2q-2} \cdot I(n,k) \right]}{\partial \varphi(m)} \right\} \quad (44)
\end{aligned}$$

其中,导数 $\frac{\partial \left[|I(n,k)|^{2q-2} \cdot I(n,k) \right]}{\partial \varphi(m)}$ 可以被进一步表示为式(45):

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \left[|I(n,k)|^{2q-2} \cdot I(n,k) \right]}{\partial \varphi(m)} \\
&= \frac{\partial \left[|I(n,k)|^{2q-2} \cdot I(n,k) \right]}{\partial I(n,k)} \cdot \frac{\partial I(n,k)}{\partial \varphi(m)} \quad (45)
\end{aligned}$$

基于式(38)与式(39),式(45)可以被进一步推导为式(46):

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \left[|I(n,k)|^{2q-2} \cdot I(n,k) \right]}{\partial \varphi(m)} \\
&= j |I(n,k)|^{2q-4} \tilde{x}(n,m) \\
&\quad \cdot \exp[j\varphi(m)] \exp\left[-j\frac{2\pi}{M}mk\right] \\
&\quad \cdot \left\{ |I(n,k)|^2 + 2(q-1)I(n,k) \cdot \operatorname{Re}[I^*(n,k)] \right\} \quad (46)
\end{aligned}$$

基于式(42)~式(46),可以得到函数 $J(m)$ 表达式,如式(47)所示:

$$\begin{aligned}
J(m) &= \frac{-2q}{(q-1)S_f^q} \cdot \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} |I(n,k)|^{2q-2} |\tilde{x}(n,m)|^2 \right. \\
&\quad + 2(q-1) |I(n,k)|^{2q-4} I(n,k) \operatorname{Re}[I^*(n,k)] |\tilde{x}(n,m)|^2 \\
&\quad \left. - |I(n,k)|^{2q-2} I(n,k) \tilde{x}^*(n,m) \right. \\
&\quad \left. \cdot \exp[-j\varphi(m)] \exp\left[j\frac{2\pi}{M}mk\right] \right\} \quad (47)
\end{aligned}$$

其中, $\operatorname{Re}[\cdot]$ 表示取实部操作.

最终,基于推导出的 $F(m)$ 与 $J(m)$ 表达式,可以基于最小Tsallis准则完成LM算法的迭代,进而估计出由平台振动引入回波信号的相位误差,最终完成运动补偿,并获得聚焦的太赫兹SAR图像.最小Tsallis熵准则下基于LM算法的自适应太赫兹SAR运动补偿算法的具体步骤如算法1所示.

算法1 最小Tsallis熵准则下基于LM算法的自适应太赫兹SAR运动补偿算法

输入: 太赫兹SAR回波信号

输出: 最终相位误差估计值 $\hat{\varphi}(m)$ 与聚焦的太赫兹SAR图像

1. 初始化相位误差估计值 $\varphi_0(m)$, Tsallis熵的非加性参数 q , LM迭代算法的参数 μ_0 , 终止条件阈值 TH , 目标函数 R_0 , 最大迭代次数 k_{\max} , $k=1$
 2. While $k \leq k_{\max}$ Do
 3. 根据相位误差估计值 $\varphi_{k-1}(m)$, 式(40)以及式(47), 计算函数 $F_{k-1}(m)$ 与 $J_{k-1}(m)$
 4. 根据式(31)计算LM算法的搜索位移 $s_{k-1}(m)$
 5. 根据式(30)中的LM算法迭代公式更新相位误差估计值, 得到 $\varphi_k(m)$
 6. 根据式(15)与式(16)得到补偿后的太赫兹SAR图像
 7. 根据式(32)更新目标函数 R_k
 8. 根据式(35)判断是否终止循环, 即
 - (1) If $\{|R_k - R_{k-1}| \leq TH\}$
 - (2) 跳转至步骤11, 终止While循环
 - (3) End if
 9. 根据式(33)更新参数 μ_{k-1} 并判断执行式(34), 具体地,
 - (1) If $(R_k > R_{k-1})$
 - (2) $\mu_k = \vartheta \times \mu_{k-1}$, $\varphi_k(m) = \varphi_{k-1}(m)$, $R_k = R_{k-1}$
 - (3) Elseif $(R_k \leq R_{k-1})$
 - (4) $\mu_k = \mu_{k-1} / \theta$
 - (5) End if
 10. $k = k + 1$
 11. End While
 12. 将While循环结束后所得的最终相位误差估计值 $\hat{\varphi}(m)$ 代入式(15)中得到最终的运动补偿函数
 13. 根据式(16)得到最终聚焦的太赫兹SAR图像
-

4 实验结果分析

为了验证上文中提出的描述太赫兹 SAR 平台振动的 TAMVM 模型的合理性与可行性,以及最小 Tsallis 熵准则下基于 LM 算法的自适应太赫兹 SAR 运动补偿算法的有效性,本节通过仿真数据和实测数据进行实验验证. 在仿真实验中,分别基于式(1)中 TAMVM 模型下的余弦时变幅度振动模型(式(2)中情况 1)与随机时变幅度振动模型(式(2)中情况 2),在不同的信噪比场景下(-10、0 和 10 dB)构建太赫兹 SAR 信号模型,给出所提算法的太赫兹 SAR 运动补偿结果并与其他算法进行对比. 在仿真试验的基础上,基于两组实际太赫兹 SAR 系统的实测数据,通过在不同的信噪比场景下与其他方法对比,进一步验证了所提 TAMVM 模型的合理性和可行性以及所提运动补偿算法的优越性.

4.1 仿真实验验证

在仿真实验中,本文设置了如图 4 所示的散射点模型. 仿真实验设置的散射点模型中并未设置特显点. 此外,太赫兹 SAR 仿真实验系统参数如表 1 所示. 基于式(2)中的不同振动情况,本文在仿真实验中分别构建余弦时变幅度振动模型与随机时变幅度振动模型,并给出对应的运动补偿实验结果.

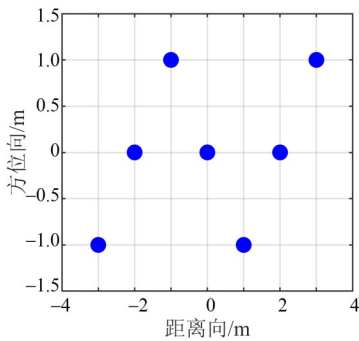


图 4 仿真实验散射点模型

表 1 太赫兹 SAR 仿真实验系统参数

仿真参数	数值	仿真参数	数值
载频/GHz	220	带宽/GHz	3.2
波长/mm	1.36	脉冲重复频率/Hz	2 344
距离分辨率/m	0.047	方位分辨率/m	0.080

4.1.1 场景一:余弦时变幅度振动

首先进行式(2)中情况 1 下的余弦时变幅度振动仿

真实验. 图 5 为本文建立的余弦时变幅度振动模型,其中,红色实线表示振幅余弦时变时的平台振动,而蓝色虚线表示未加时变振幅前的平台振动,即常数幅度的简谐振动. 此外,本文在距离压缩后的信号中添加了不同信噪比的噪声,以进一步验证不同噪声下所提算法的有效性.

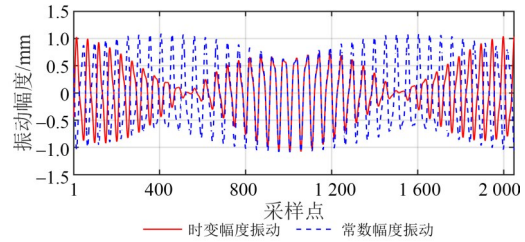


图 5 余弦时变幅度振动与常数幅度振动对比示意

图 6~图 8 分别给出了在不同信噪比条件下,由不同算法处理得到的太赫兹 SAR 成像结果. 由图 6~图 8 中的图(a)可知,由于时变幅度平台振动的存在,太赫兹 SAR 图像沿方位向严重散焦,在真实成像点两侧会产生多个虚假成像点,从而严重影响成像质量. 为了更好地证明本文提出的算法在时变幅度振动下运动补偿的优越性,本文引入文献[21]中基于 VA(Viterbi Algorithm)的补偿方法进行对比,该算法是一种基于特定简谐模型的运动补偿算法. 如图 6~图 8 中的图(b)所示,VA 算法不能将振幅时变的平台振动完全补偿,因此 VA 算法补偿后的图像仍然是散焦的. 如图 6~图 8 中的图(c)所示,利用本文提出的基于 LM 的运动补偿算法可以很好地处理余弦时变幅度平台振动,并得到聚焦的太赫兹 SAR 成像结果与清晰可见的目标点.

最后,表 2 给出了图 6~图 8 中太赫兹 SAR 图像的 Tsallis 熵与沿方位向的积分旁瓣比(Integrated Side Lobe Ratio, ISLR)结果. Tsallis 熵与 ISLR 的减小进一步证明了与基于特定简谐模型的运动补偿算法相比,本文提出的太赫兹 SAR 运动补偿算法可以更好地处理复杂平台振动,并得到高质量的成像结果.

4.1.2 场景二:随机时变幅度振动

进一步地,如式(2)中的情况 2 所示,本文构造了振幅随机变化的平台振动,并利用不同的算法对其进行运动补偿. 图 9 给出了幅度随机变化的平台振动及其放大图. 同样,红色实线表示随机时变幅度振动,而蓝

表 2 图 6~图 8 中太赫兹 SAR 图像的 Tsallis 熵与沿方位向的 ISLR 结果

SAR 图像	SNR=10 dB			SNR=0 dB			SNR=-10 dB		
	图 6(a) (未补偿)	图 6(b) (VA 算法)	图 6(c) (LM 算法)	图 7(a) (未补偿)	图 7(b) (VA 算法)	图 7(c) (LM 算法)	图 8(a) (未补偿)	图 8(b) (VA 算法)	图 8(c) (LM 算法)
Tsallis 熵	3.122 5	3.065 3	2.908 0	3.135 5	3.083 9	2.934 9	3.208 6	3.186 9	3.089 9
ISLR	5.557 9	2.635 1	-9.049 2	5.452 3	2.814 0	-9.406 0	5.485 6	4.334 4	-10.501 8

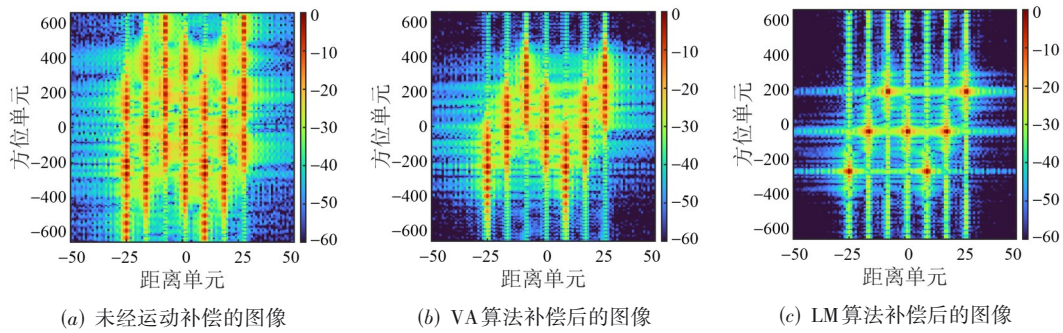


图6 信噪比10 dB情况下由不同算法得到的太赫兹 SAR 图像

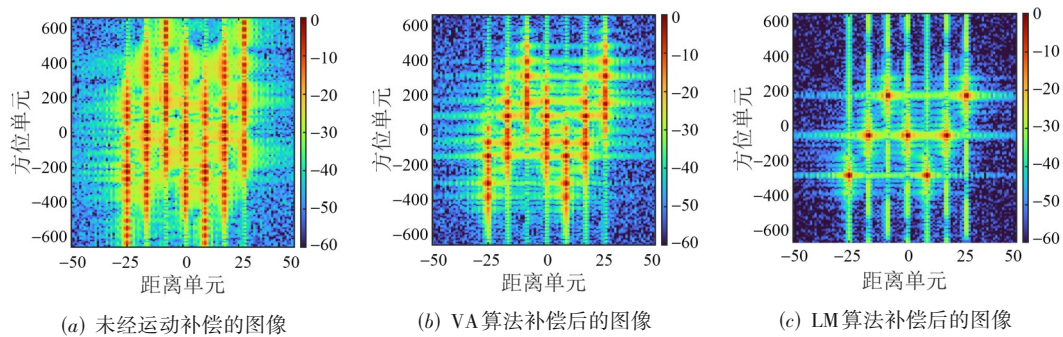


图7 信噪比0 dB情况下由不同算法得到的太赫兹 SAR 图像

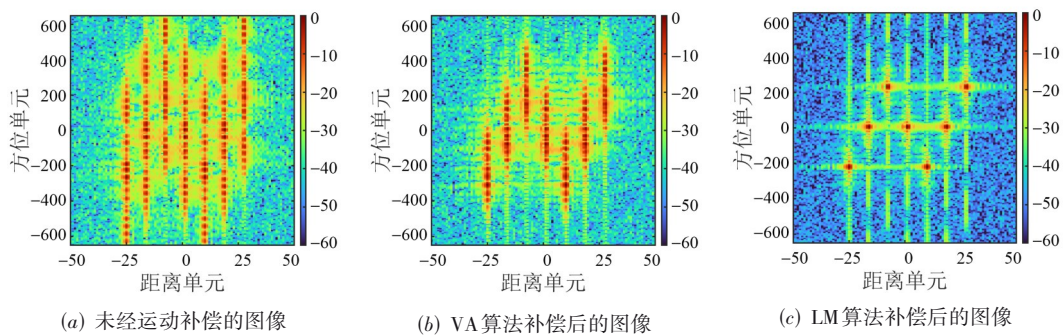


图8 信噪比-10 dB情况下由不同算法得到的太赫兹 SAR 图像

色虚线表示常数幅度振动,即简谐振动.由图9中右侧的放大图可以看出,幅度是随着慢时间随机变化的,这种不规则的随机偏移会导致太赫兹 SAR 图像的模糊,但很难用一个具体的模型描述并进行补偿.此外,本文在距离压缩后的信号中添加了不同信噪比的噪声,以进一步验证所提算法的有效性.接下来,本文将给出针对随机时变幅度振动的运动补偿结果.

图10~图12分别给出了不同信噪比下的太赫兹 SAR 运动补偿实验结果.如图10~图12中的图(a)所示,未经运动补偿前的太赫兹 SAR 图像散焦严重,目标点难以分辨.同样,本文使用文献[21]中基于VA的运动补偿算法进行对比.如图10~图12中的图(b)所示,

VA算法可以补偿一部分平台振动,但是其处理后的成像结果依然散焦.虽然图9中幅度随机时变的振动的整体变化趋势与常数幅度的简谐振动大致相同,但是随机时变振幅引起的幅度随机抖动无法由VA算法基于特定模型估计出,这是导致太赫兹 SAR 图像仍然散焦的关键因素.如文献[21]中所示,基于VA的运动补偿算法可以很好地处理如图9中蓝色虚线所示的简谐振动,但是在处理随机时变幅度振动时仍有局限.因此,使用本文提出的基于LM的运动补偿算法处理散焦的太赫兹 SAR 图像,其结果图如图10~图12中的图(c)所示,可见本文提出的算法可以很好地处理幅度随机变化的平台振动,并得到清晰的目标点.

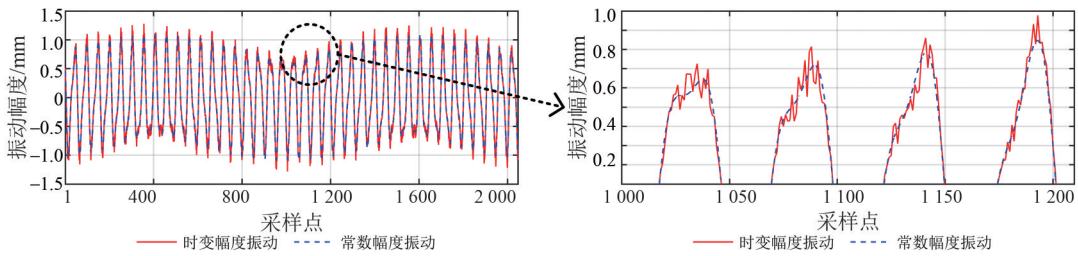


图9 随机时变幅度振动与常数幅度振动对比示意

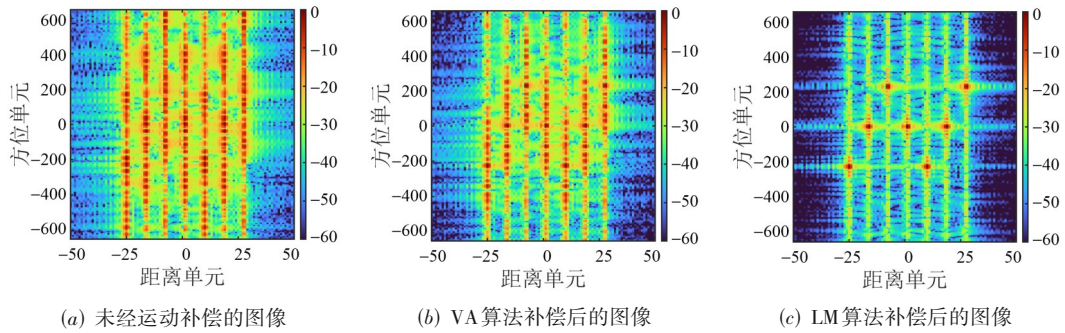


图10 信噪比10 dB情况下由不同算法得到的太赫兹 SAR 图像

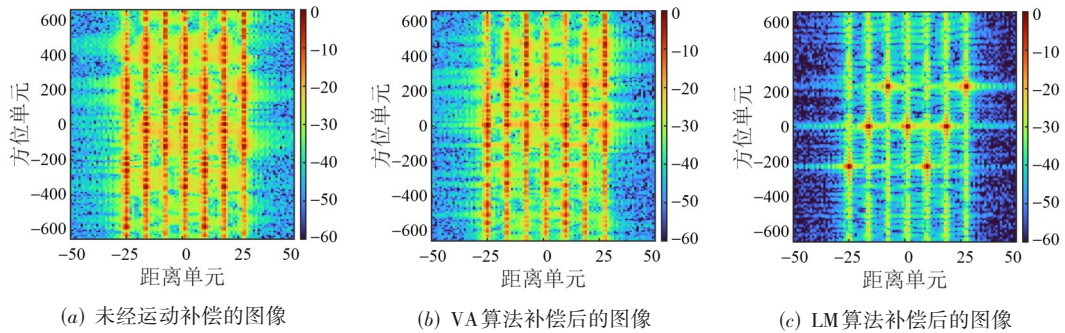


图11 信噪比0 dB情况下由不同算法得到的太赫兹 SAR 图像

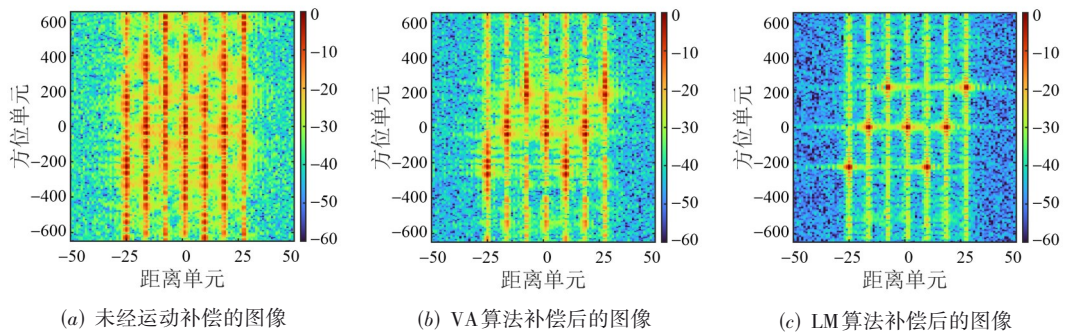


图12 信噪比-10 dB情况下由不同算法得到的太赫兹 SAR 图像

表3进一步给出了图10~图12中太赫兹 SAR 图像的 Tsallis 熵与沿方位向的 ISLR 结果. Tsallis 熵与 ISLR 的减小进一步证明了本文所提算法在不同信噪比条件下进行运动补偿的有效性. 此外,通过对

比可发现,本文提出的算法可以解决基于特定简谐模型运动补偿算法的局限性问题,在时变幅度振动的场景下能够实现更好的效果,并得到良好的成像结果.

表3 图10~图12中太赫兹SAR图像的Tsallis熵与沿方位向的ISLR结果

SAR 图像	SNR=10 dB			SNR=0 dB			SNR=-10 dB		
	图 10 (a) (未补偿)	图 10 (b) (VA 算法)	图 10 (c) (LM 算法)	图 11 (a) (未补偿)	图 11 (b) (VA 算法)	图 11 (c) (LM 算法)	图 12 (a) (未补偿)	图 12 (b) (VA 算法)	图 12 (c) (LM 算法)
Tsallis 熵	3.150 8	3.122 6	2.975 3	3.166 2	3.157 2	2.986 3	3.225 3	3.196 5	3.134 5
ISLR	4.945 3	3.443 0	-8.381 5	5.281 3	3.884 2	-7.418 3	4.549 8	4.001 0	-7.984 6

4.2 实测数据实验验证

本节采用太赫兹SAR系统分别对角反目标以及实际自行车目标进行成像,并完成实测数据实验验证.在本实验中,雷达系统被放置在手推车上,并且工作在正侧视条带扫描模式下.太赫兹SAR系统参数如表4所示.

表4 太赫兹SAR系统参数

系统参数	数值	系统参数	数值
载频/GHz	216	带宽/GHz	4.8
波长/mm	1.39	合成孔径时间/s	0.26
中心斜距/m	4.18	擦地角/ $^{\circ}$	20
距离分辨率/m	0.031	方位分辨率/m	0.032

4.2.1 场景一:角反目标实测数据验证

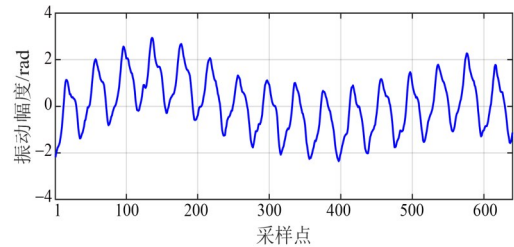
在场景一中,太赫兹SAR对由多个角反射器按特定排列组成的地面目标进行了成像,目标呈现为数字863的形态,如图13所示.为评估该算法在不同信噪比条件下的表现,本文在一维距离像上分别添加了信噪比为10、0与-10 dB的噪声,并分别给出对应的成像结果.



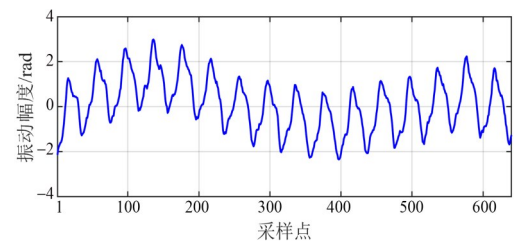
图13 角反目标实际成像场景

图14展示了角反目标实测数据验证实验中,在不同信噪比条件下,采用本文提出的运动补偿算法得到的振动相位估计结果.其中,图14中的纵坐标表示估计出的振动相位的幅度.可以看出,在角反目标实测数据中,平台振动是随慢时间而变化的,并且其幅度呈现时变的包络曲线.该组数据中的振动幅度具有时变特性,基于简谐模型的运动补偿算法无法完全消除平台振动,因此需要采用本文提出的基于图像质量的运动补偿算法进行处理.接下来,将分别给出该实测数据中,基于简谐模型的VA算法与本文提出的运动补偿算法得到的太赫兹SAR成像结果.

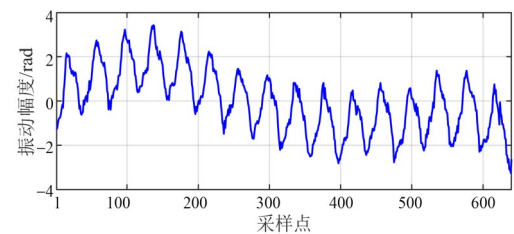
图15~图17给出了不同信噪比下对数字8的成像



(a) 10 dB 信噪比条件下振动相位估计结果



(b) 0 dB 信噪比条件下振动相位估计结果



(c) -10 dB 信噪比条件下振动相位估计结果

图14 不同信噪比条件下由本文提出的运动补偿算法得到的振动相位估计结果

结果,图18~图20给出了不同信噪比下对数字6的成像结果,图21~图23给出了不同信噪比下对数字3的成像结果.图15~图23中的图(a)给出了运动补偿前的太赫兹SAR图像,这些图像是模糊的,并且在方位向上产生了严重的散焦.为验证本文提出的算法在实际复杂太赫兹SAR成像场景中的优越性,本文还对比了文献[21]中的基于VA的运动补偿算法.在该组实测数据中,VA算法能够部分补偿平台振动,但由于引起太赫兹SAR图像散焦的因素复杂多变,且无法通过特定的简谐模型进行准确描述,使用VA算法后的图像仍然散焦,并且需要进一步补偿^[21].如图15~图23中的图(b)所示,虽然VA算法在一定程度上改善了图像质量,但效果仍有限.图15~图23中的图(c)为经过本文提出的基于LM

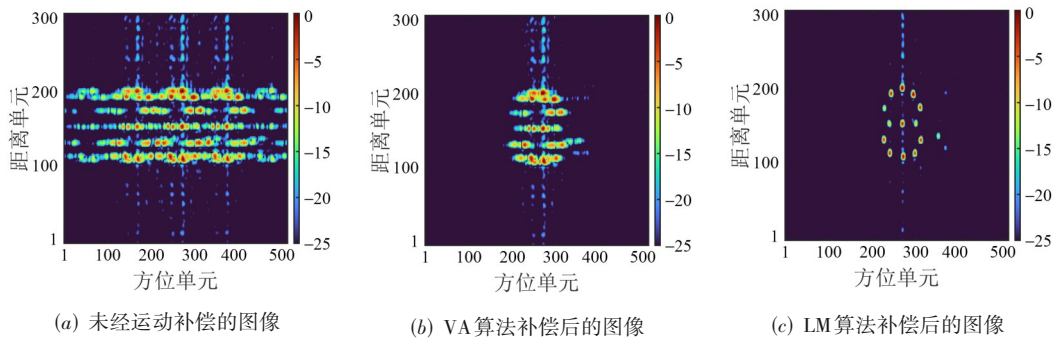


图 15 信噪比 10 dB 条件下由不同算法得到的数字 8 实测数据成像结果

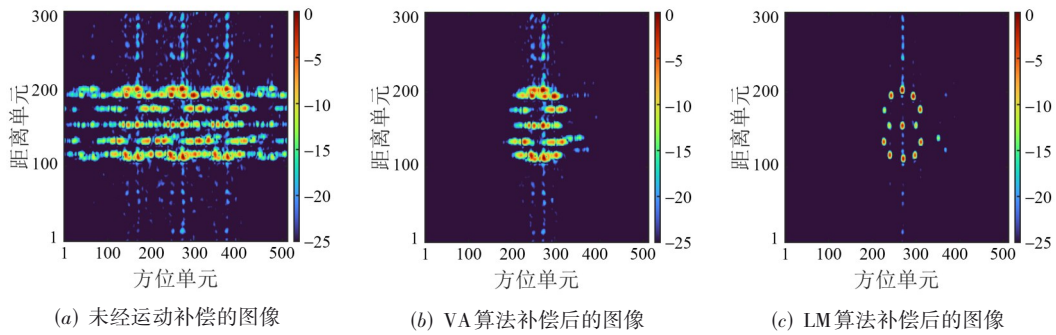


图 16 信噪比 0 dB 条件下由不同算法得到的数字 8 实测数据成像结果

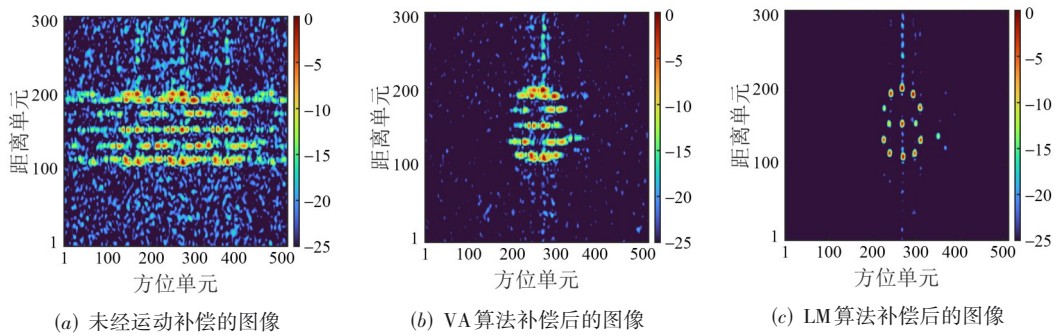


图 17 信噪比 -10 dB 条件下由不同算法得到的数字 8 实测数据成像结果

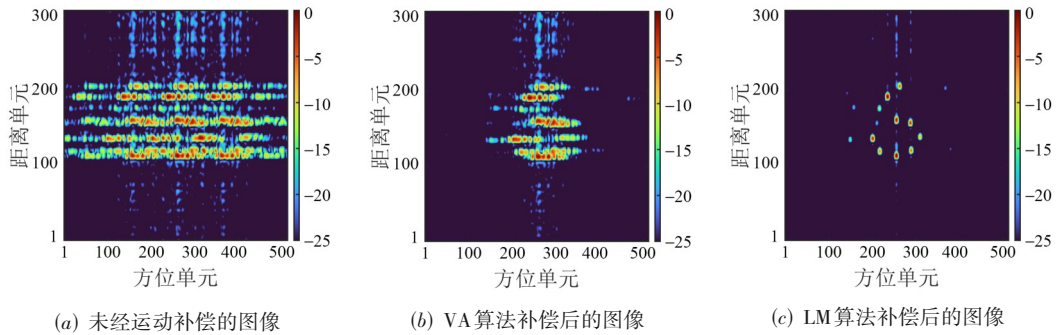


图 18 信噪比 10 dB 条件下由不同算法得到的数字 6 实测数据成像结果

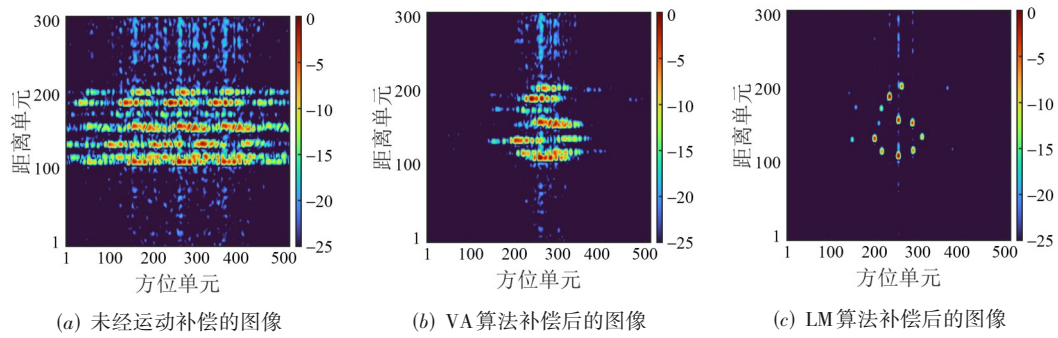


图 19 信噪比 0 dB 条件下由不同算法得到的数字 6 实测数据成像结果

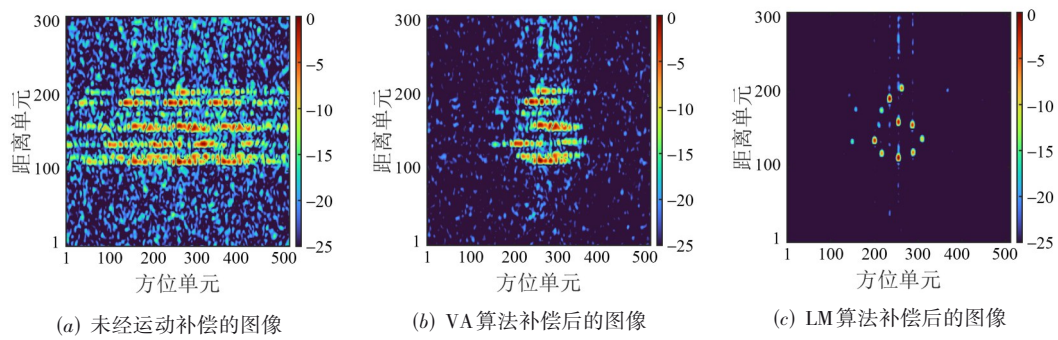


图 20 信噪比 -10 dB 条件下由不同算法得到的数字 6 实测数据成像结果

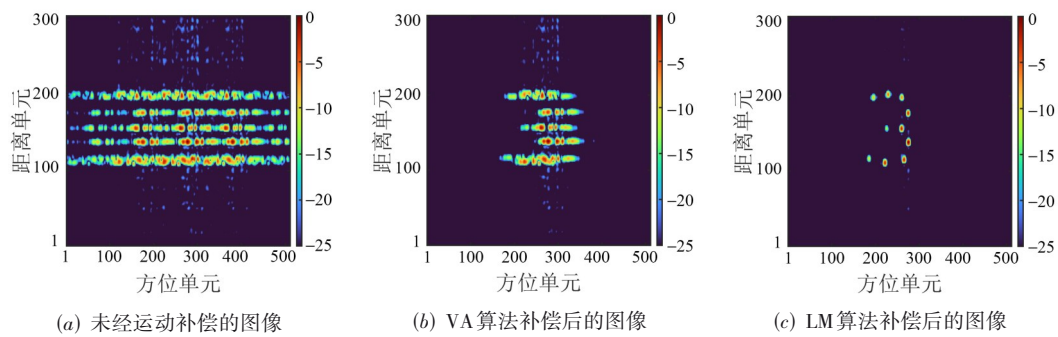


图 21 信噪比 10 dB 条件下由不同算法得到的数字 3 实测数据成像结果

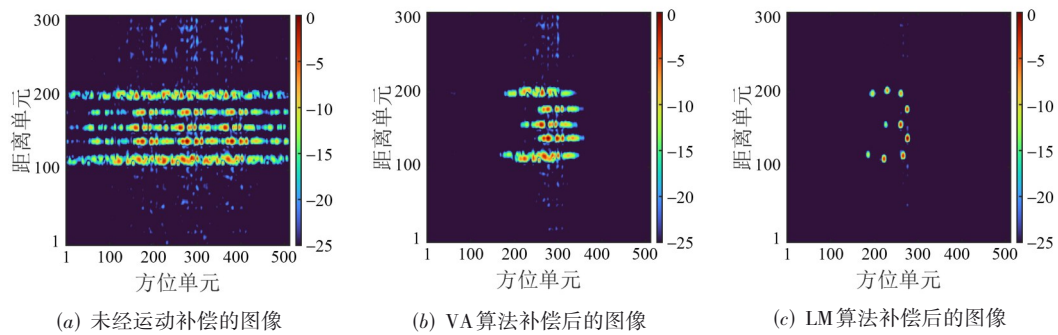


图 22 信噪比 0 dB 条件下由不同算法得到的数字 3 实测数据成像结果

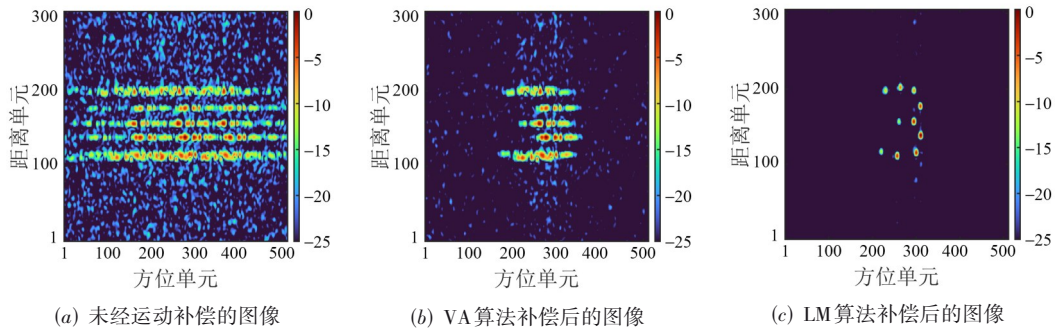


图 23 信噪比-10 dB 条件下由不同算法得到的数字 3 实测数据成像结果

算法的运动补偿算法处理后的成像结果,可以看到每个由角反射器组成的数字都变得清晰可见,且图像得到了有效的聚焦.由此可见,本文提出的太赫兹 SAR 运动补偿算法能够有效应对实际中复杂多变的太赫兹 SAR 成像场景,无需额外处理即可获得良好的图像聚焦效果.

此外,在表 5~表 7 中进一步给出了上述太赫兹 SAR 图像的 Tsallis 熵与沿方位向的 ISLR 结果.在不同信噪比下, Tsallis 熵与 ISLR 的减小进一步证明了本文提出的算法在实际太赫兹 SAR 成像处理过程中的有效性与优越性.

表 5 图 15~图 17 中太赫兹 SAR 图像的 Tsallis 熵与沿方位向的 ISLR 结果

SAR 图像	SNR=10 dB			SNR=0 dB			SNR=-10 dB		
	图 15 (a) (未补偿)	图 15 (b) (VA 算法)	图 15 (c) (LM 算法)	图 16 (a) (未补偿)	图 16 (b) (VA 算法)	图 16 (c) (LM 算法)	图 17 (a) (未补偿)	图 17 (b) (VA 算法)	图 17 (c) (LM 算法)
Tsallis 熵	3.139 5	3.056 9	2.910 3	3.143 2	3.063 4	2.921 0	3.170 6	3.112 5	3.005 2
ISLR	2.658 7	-1.687 5	-20.381 8	2.586 6	-1.625 6	-20.392 9	2.518 0	-1.432 4	-16.417 4

表 6 图 18~图 20 中太赫兹 SAR 图像的 Tsallis 熵与沿方位向的 ISLR 结果

SAR 图像	SNR=10 dB			SNR=0 dB			SNR=-10 dB		
	图 18 (a) (未补偿)	图 18 (b) (VA 算法)	图 18 (c) (LM 算法)	图 19 (a) (未补偿)	图 19 (b) (VA 算法)	图 19 (c) (LM 算法)	图 20 (a) (未补偿)	图 20 (b) (VA 算法)	图 20 (c) (LM 算法)
Tsallis 熵	3.148 9	3.074 3	2.885 7	3.152 8	3.081 0	2.897 1	3.177 3	3.123 9	2.984 9
ISLR	4.486 8	3.095 8	-19.415 9	4.762 1	3.250 8	-19.187 7	4.040 8	3.051 3	-17.090 6

表 7 图 21~图 23 中太赫兹 SAR 图像的 Tsallis 熵与沿方位向的 ISLR 结果

SAR 图像	SNR=10 dB			SNR=0 dB			SNR=-10 dB		
	图 21 (a) (未补偿)	图 21 (b) (VA 算法)	图 21 (c) (LM 算法)	图 22 (a) (未补偿)	图 22 (b) (VA 算法)	图 22 (c) (LM 算法)	图 23 (a) (未补偿)	图 23 (b) (VA 算法)	图 23 (c) (LM 算法)
Tsallis 熵	3.138 5	3.057 4	2.861 4	3.143 0	3.065 3	2.872 3	3.171 7	3.114 9	2.971 0
ISLR	6.554 2	3.010 9	-19.329 0	6.391 3	2.955 8	-20.664 9	4.031 9	2.952 7	-19.502 7

4.2.2 场景二:自行车目标实测数据验证

在场景二中,采用与场景一相同的太赫兹 SAR 系统配置,对一辆实际自行车目标进行成像.自行车目标被放置于地面上,并且其摆放方向与雷达平台的运动方向垂直.同样,在一维距离像上分别添加信噪比为 10、0 与 -10 dB 的噪声,以进一步验证所提算法在不同信噪比下的有效性.

图 24 给出了在自行车目标实测数据验证实验中,不同信噪比条件下由本文提出的运动补偿算法得到的振动相位的估计结果及其放大图.由图 24 可以看出,在该组实测数据中,平台振动在随慢时间缓慢变

化的基础上,其幅度还存在不规律的抖动,且随着信噪比的降低,抖动变得更加剧烈且不规则.由于这些抖动幅度相对较小,且难以通过具体的模型进行估计,故无法被准确捕捉.此外,复杂的自行车目标使得相位提取更加困难,因此需要基于图像质量进行运动补偿.为此,采用本文提出的最小 Tsallis 熵准则下基于 LM 算法的太赫兹 SAR 自适应运动补偿算法对该数据进行处理.

图 25~图 27 给出了不同信噪比条件下 VA 算法与本文所提算法对自行车目标处理前后的成像结果.由于该组实测数据的复杂性,VA 算法对成像效果的改

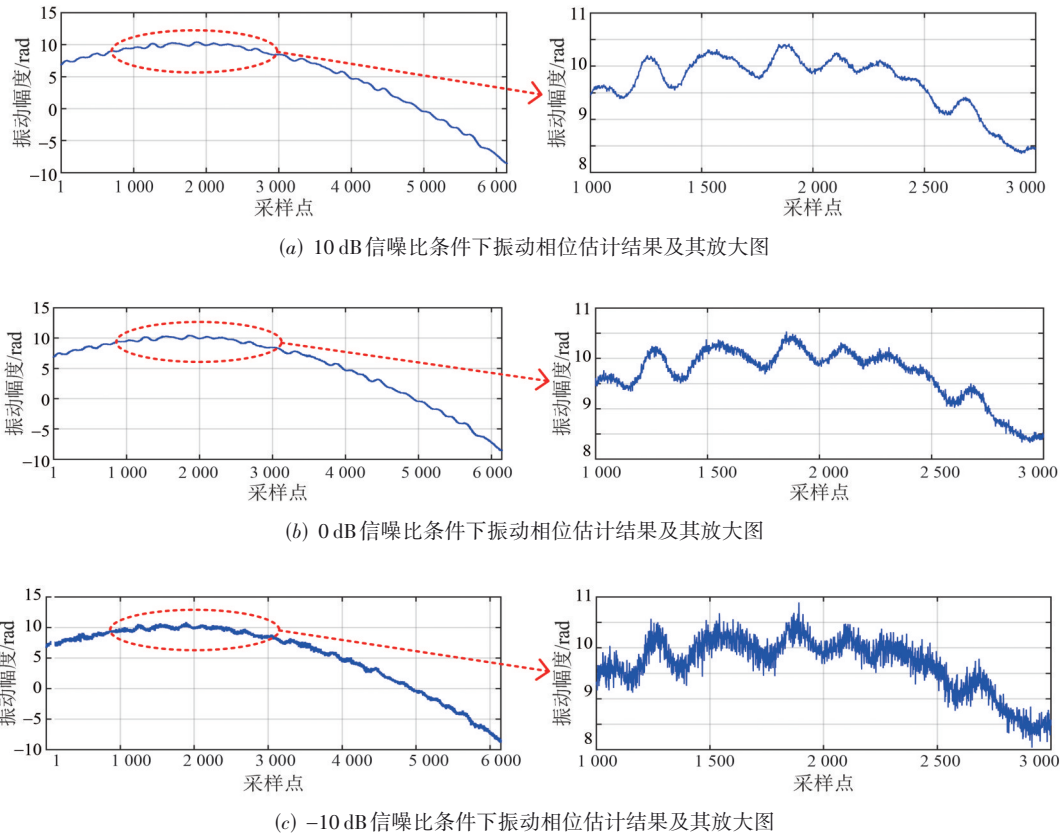


图 24 不同信噪比条件下由本文提出的运动补偿算法得到的振动相位估计结果及其放大图

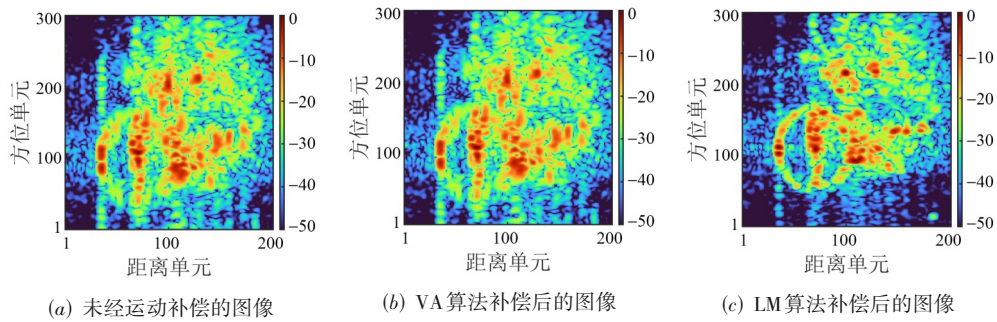


图 25 信噪比 10 dB 条件下由不同算法得到的自行车实测数据成像结果

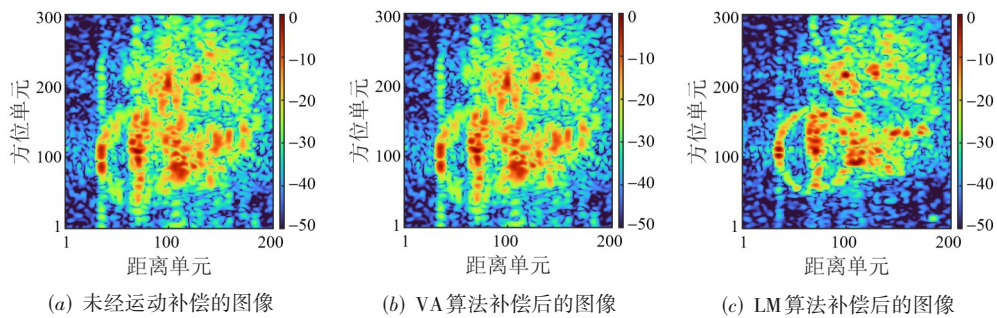


图 26 信噪比 0 dB 条件下由不同算法得到的自行车实测数据成像结果

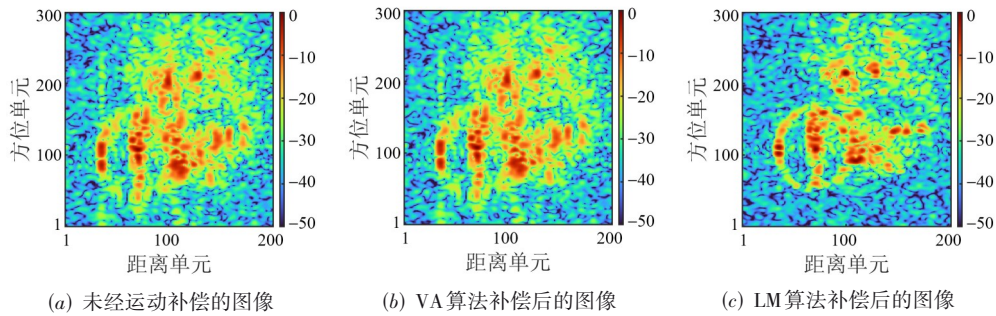


图 27 信噪比-10 dB 条件下由不同算法得到的自行车实测数据成像结果

善并不明显.但是经过本文提出的算法进行运动补偿后,自行车目标可以得到有效聚焦,轮廓清晰,形态更易分辨.这些成像结果进一步验证了图 24 中由本文所提算法得到的振动相位估计结果的准确性,以及对实际平台振动中不规则抖动幅度估计的必要性.此外,在表 8~表 10 中分别给出了图 25~图 27 中太赫兹 SAR 图像的 Tsallis 熵与沿方位向的 ISLR 结果. Tsallis 熵与

ISLR 的减小进一步证明了本文所提算法的可行性与有效性.综上所述,上述实验结果证明了第 2 节中 TAMVM 模型建立的必要性与可行性,以及本文所提的最小 Tsallis 熵准则下基于 LM 算法的自适应太赫兹 SAR 运动补偿算法在不依赖特显点的情况下,对实际场景中复杂不规则的太赫兹 SAR 平台振动进行补偿的有效性与优越性.

表 8 图 25 中太赫兹 SAR 图像的 Tsallis 熵与沿方位向的 ISLR 结果

SAR 图像	图 25 (a) (未补偿)	图 25 (b) (VA 算法)	图 25 (c) (LM 算法)
Tsallis 熵	3.081 0	3.081 0	3.040 2
ISLR	-3.089 9	-3.090 0	-6.631 5

表 9 图 26 中太赫兹 SAR 图像的 Tsallis 熵与沿方位向的 ISLR 结果

SAR 图像	图 26 (a) (未补偿)	图 26 (b) (VA 算法)	图 26 (c) (LM 算法)
Tsallis 熵	3.081 4	3.081 4	3.040 6
ISLR	-2.982 1	-2.982 3	-6.577 2

表 10 图 27 中太赫兹 SAR 图像的 Tsallis 熵与沿方位向的 ISLR 结果

SAR 图像	图 27 (a) (未补偿)	图 27 (b) (VA 算法)	图 27 (c) (LM 算法)
Tsallis 熵	3.085 0	3.084 9	3.043 4
ISLR	-3.038 3	-3.046 9	-6.690 9

5 结论

针对太赫兹 SAR 成像中平台振动易导致图像散焦的问题,本文从理论建模与算法实施两方面展开深入研究.首先,为更精细地描述实际成像场景中的复杂平台振动,本文构建了 TAMVM 模型,其中包括规律性的余弦时变幅度调制振动模型以及更具一般性的随机时变幅度调制振动模型.其次,为解决复杂平台振动带来的补偿难题与基于特定简谐模型运动补偿算法的局限性,本文提出了最小 Tsallis 熵准则下基于 LM 算法的自适应太赫兹 SAR 运动补偿算法.通过将 Tsallis 熵最小化问题转化为非线性最小二乘问题,并结合 LM 算法求解相位信息,该方法可以通过自适应调整搜索位移实

现反馈更新和迭代优化,在保证算法的全局收敛特性的同时求解出精准的相位误差.此外,本文详细推导了 LM 算法迭代过程中的具体公式表示形式.仿真与实测数据进一步证明了本文建立的 TAMVM 模型的合理性与可行性,以及本文所提算法在不依赖特显点的情况下,能够有效补偿实际场景中复杂多样的太赫兹 SAR 平台振动,并显著提高太赫兹 SAR 的图像质量.

参考文献

[1] 吴世有,高航,李超,等.太赫兹 MIMO 弧形阵列方位向成像算法研究[J].电子与信息学报,2018,40(4): 860-866.
WU S Y, GAO H, LI C, et al. Research on MIMO THz azi-

- imuth imaging algorithm based on arc antenna array[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(4): 860-866. (in Chinese)
- [2] 孔令雄, 李跃华, 陈秀琴. 太赫兹雷达杂波背景中小目标检测研究[J]. *微波学报*, 2023, 39(S1): 248-252.
KONG L X, LI Y H, CHEN X Q. Research on small target detection in THz radar clutter background[J]. *Journal of Microwaves*, 2023, 39(S1): 248-252. (in Chinese)
- [3] 化青龙, 张云, 任航, 等. 基于最小熵准则与生成对抗网络的 SAR 三维转动舰船目标重聚焦方法[J]. *电子学报*, 2024, 52(8): 2900-2912.
HUA Q L, ZHANG Y, REN H, et al. Refocusing for three-dimensional rotating ship targets in SAR images based on minimum entropy criteria and generative adversarial network[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(8): 2900-2912. (in Chinese)
- [4] 章琪琪, 张寅, 范君杰, 等. 基于改进 SBR 的舰船 SAR 成像快速仿真计算方法[J]. *电子学报*, 2024, 52(2): 602-613.
ZHANG Q Q, ZHANG Y, FAN J J, et al. A fast SAR imaging simulation method of ship targets based on improved SBR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(2): 602-613. (in Chinese)
- [5] 桂术亮, 田增山, 党思航. 基于 OMP-CADMM 的非合作运动人体 ViSAR 成像方法[J]. *电子学报*, 2023, 51(6): 1677-1686.
GUI S L, TIAN Z S, DANG S H. A ViSAR imaging method for non-cooperative moving human based on OMP-CADMM[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023, 51(6): 1677-1686. (in Chinese)
- [6] 龙娜, 李晋, 邝彩杰, 等. 太赫兹 CSAR 运动目标距离速度估计与重定位方法[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2024, 22(6): 638-646.
LONG N, LI J, KUANG C J, et al. A range velocity estimation and relocation method for ground moving targets of terahertz CSAR[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2024, 22(6): 638-646. (in Chinese)
- [7] 张野. 空间目标太赫兹雷达三维成像技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
ZHANG Y. Research on 3D Imaging Technology of Space Target Terahertz Radar[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020. (in Chinese)
- [8] 邝彩杰, 李晋, 龙娜, 等. 太赫兹 CSAR 运动目标参数估计与重聚焦方法[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2024, 22(6): 627-637.
KUANG C J, LI J, LONG N, et al. Terahertz CSAR ground moving target parameter estimation and refocusing algorithm[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2024, 22(6): 627-637. (in Chinese)
- [9] HAO Z X, LIU T Q, SUN J P. Dual-channel high frequency vibration compensation processing for terahertz SAR imaging[C]//2020 13th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI). Piscataway: IEEE, 2020: 501-505.
- [10] SUN J P, HAO Z X, LI Q, et al. Vibration compensation of airborne terahertz SAR based on along track interferometry[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 19: 4019105.
- [11] LIU Q X, HE F F. Adaptive image formation algorithm for THz-SAR based on automatic motion compensation[C]//2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). Piscataway: IEEE, 2018: 179-180.
- [12] SHI S Y, LI C, HU J M, et al. A high frequency vibration compensation approach for terahertz SAR based on sinusoidal frequency modulation Fourier transform[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(9): 10796-10803.
- [13] FAN L, WANG H Q, YANG Q, et al. High-quality airborne terahertz video SAR imaging based on echo-driven robust motion compensation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 2001817.
- [14] CHEN S Y, WANG Y, ZHAO B. Suppression of defocus along azimuth dimension for THz SAR imaging based on ADMM framework[J]. *IET Conference Proceedings*, 2024, 2023(47): 2730-2735.
- [15] HAO Z X, SUN J P, LI Q, et al. Estimation of high-frequency vibration parameters for airborne terahertz SAR using chirplet decomposition and LS sequential estimators[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(14): 3416.
- [16] CHEN S Y, WANG Y, ZHANG Y. Compensation for high-frequency vibration of SAR imaging in the terahertz band based on linear chirplet transform and empirical mode decomposition[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 1427-1446.
- [17] LI Y W, DING L, ZHENG Q B, et al. A novel high-frequency vibration error estimation and compensation algorithm for THz-SAR imaging based on local FrFT[J]. *Sensors*, 2020, 20(9): 2669.
- [18] LI Y W, WU Q, WU J W, et al. Estimation of high-frequency vibration parameters for terahertz SAR imaging

based on FrFT with combination of QML and RANSAC[J]. IEEE Access, 2020, 9: 5485-5496.

- [19] CHEN S Y, WANG Y, CAO R. A high frequency vibration compensation approach for ultra-high resolution SAR imaging based on sinusoidal frequency modulation Fourier-Bessel transform[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2023, 34(4): 894-905.
- [20] LI Y W, WU Q, JIANG J W, et al. A high-frequency vibration error compensation method for terahertz SAR imaging based on short-time Fourier transform[J]. Applied Sciences, 2021, 11(22): 10862.
- [21] CHEN S Y, WANG Y. A novel parameter estimation method of motion error in terahertz SAR imaging based on viterbi and RANSAC algorithms[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024, 17: 14265-14283.
- [22] SHI S Y, LI C, HU J M, et al. Motion compensation for terahertz synthetic aperture radar based on subaperture decomposition and minimum entropy theorem[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(24): 14940-14949.
- [23] SHI S Y, LI C, FANG G Y, et al. A THz SAR autofocus algorithm based on minimum-entropy criterion[C]//2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Piscataway: IEEE, 2019: 1-2.
- [24] LI J, YE Q R, GUO J C, et al. Motion compensation algorithm based on entropy-minimization for terahertz SAR[C]//

2021 14th UK-Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). Piscataway: IEEE, 2021: 1-3.

- [25] 张群英, 江兆凤, 李超, 等. 太赫兹合成孔径雷达成像运动补偿算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(1): 129-137. ZHANG Q Y, JIANG Z F, LI C, et al. Motion compensation imaging algorithm of terahertz synthetic aperture radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(1): 129-137. (in Chinese)
- [26] 张晓灿, 张玉玺, 孙进平. 直升机平台振动对太赫兹 SAR 成像的影响分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(2): 205-211. ZHANG X C, ZHANG Y X, SUN J P. Effects analysis of helicopter platform vibration on terahertz SAR imaging[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(2): 205-211. (in Chinese)
- [27] 邹耀斌, 邓世成, 孟祥丹, 等. 多向加权 Tsallis 熵最大化导向的自动阈值分割方法[J]. 电子学报, 2024, 52(1): 129-143. ZOU Y B, DENG S C, MENG X D, et al. Automatic thresholding segmentation method guided by maximizing multi-directional weighted tsallis entropy[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(1): 129-143. (in Chinese)
- [28] KANG M S, BAE J H, LEE S H, et al. Efficient ISAR autofocus via minimization of tsallis entropy[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(6): 2950-2960.

作者简介



陈思雨 女, 1999 年出生于黑龙江省佳木斯市. 现为哈尔滨工业大学电子工程学院博士研究生. 主要研究方向为 SAR 成像与信号处理.
E-mail: 21b905043@stu.hit.edu.cn



王勇 男, 1979 年出生于吉林省扶余市. 现为哈尔滨工业大学电子工程学院教授、博士生导师. 主要研究方向为雷达成像技术.
E-mail: wangyong6012@hit.edu.cn