引文格式:程晓璐,汪长城,万杰.一种基于多孔径自聚焦的机载层析SAR相位误差校正方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(8):1639-1647.DOI:10.13203/j.whugis20250002

Citation:CHENG Xiaolu,WANG Changcheng,WAN Jie.A Phase Error Correction Method for Airborne TomoSAR Based on Multi-aperture and Self-Focusing[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(8):1639-1647.DOI:10.13203/j.whugis20250002

一种基于多孔径自聚焦的机载层析SAR相位误差校正方法

程晓璐[1] 汪长城[1] 万 杰[1]

1 中南大学地球科学与信息物理学院,湖南 长沙,410083

摘 要:在利用机载多基线合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)数据开展层析SAR森林参数反演时,轨道不稳定等因素引起的相位误差会改变回波信号相位,导致层析谱出现虚假峰值或目标,甚至产生散焦现象。现有的基于多孔径的相位误差校正方法虽能消除大部分误差相位,但由于其直接采用估计的相位误差进行相位校正,处理后仍存在残余误差。基于信息熵最小化的自聚焦相位校正算法虽可有效校正相位误差、显著提升影像聚焦质量,却因高度依赖初始值选择,易陷入局部最优,难以实现全局最优的相位校正效果。基于此,提出一种联合多孔径与自聚焦算法的机载SAR相位误差校正方法。该方法首先利用多孔径方法获取相位误差初值;然后对初值进行自聚焦处理,进一步消除残余相位误差。为验证该方法的有效性与可行性,以机载P波段层析SAR数据为对象,开展相位误差消除实验与分析。实验结果表明,相较于单一的多孔径方法,联合多孔径和自聚焦算法的相位误差校正方法在处理后,残余误差相位显著减少,且校正后的层析谱旁瓣、偏移等问题明显改善,清晰度得到大幅提升。

关键词:机载SAR;子孔径分解;熵最小化;相位校正;层析SAR

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-01-02

DOI:10.13203/j.whugis20250002 **文章编号**:1671-8860(2025)08-1639-09

A Phase Error Correction Method for Airborne TomoSAR Based on Multi-aperture and Self-Focusing

CHENG Xiaolu[1] *WANG Changcheng*[1] *WAN Jie*[1]

1 School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: **Objectives**: When using airborne multi-baseline synthetic aperture radar (SAR) data for the inversion of stratified SAR forest parameters, the phase error caused by the orbit instability and other factors will distort the phase of the echo signal, which will lead to false peaks, target misjudgment, and defocusing of the stratified spectrum. Although the multi-aperture phase error correction method can remove most of the error phases, some errors will still remain after processing because it directly adopts the estimated phase error for correction. Although the self-focusing phase correction algorithm based on information entropy minimization can effectively correct the phase error and significantly improve the image focusing quality, it has the limitations of relying on the selection of the initial value and easily falling into the local optimal solution, which makes it difficult to realize the globally optimal phase correction effect. The aim is to develop an efficient airborne SAR phase error correction method to improve the accuracy and reliability of stratified SAR forest parameter inversion. **Methods**: A two-step phase error correction method combining the multi-aperture and self-focusing algorithms is proposed. First, the initial value of phase error is estimated by mining the redundant information of multi-baseline SAR data using the multi-aperture method. Second, the esti-

基金项目:国家重点研发计划(2023YFF1303904,2022YFB3903304);国家自然科学基金(42471422)。

第一作者:程晓璐,硕士,研究方向为层析SAR仿真及数据处理。225011018@csu.edu.cn

通信作者:汪长城,博士,教授。wangchangcheng@csu.edu.cn

mated initial value is used as the input of the self-focusing algorithm to iteratively optimize the phase error based on the principle of information entropy minimization to effectively eliminate the residual error. **Results**: Compared to the multi-aperture method, the on-board SAR phase error correction method utilizing the combined multi-aperture and self-focusing algorithms has significantly fewer error phases after correction. At the same time, the corrected chromatographic spectra have significantly fewer side flaps and offsets than the multi-aperture method, and the clarity is higher. **Conclusions**: The airborne SAR phase error correction algorithm combining multi-aperture and self-focusing overcomes the limitations of a single method, combining the robustness of multi-aperture correction with the high accuracy of self-focusing optimization. The method provides a reliable solution for airborne stratified SAR phase error correction, which is especially suitable for complex forest scenarios and lays a solid foundation for more accurate forest parameter inversion.

Key words: airborne SAR; sub-aperture decomposition; entropy minimization; phase correction; TomoSAR

层析合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)(tomographic SAR,TomoSAR)作为新兴的SAR对地观测技术[1],与SAR干涉测量(interferometric SAR,InSAR)技术相比,突破了高程维度的限制,能够精准获取目标场景的三维结构信息,展现出卓越的垂直结构探测能力[2]。这一特性使其在森林垂直结构参数反演研究领域备受各国学者的关注[3]。在频段选择方面,低频段SAR相较于高频段具备更强的穿透能力,利用长波SAR数据可充分发挥TomoSAR技术对森林垂直结构的解析优势,实现高精度的森林垂直结构参数反演[4]。目前,基于长波SAR数据的森林参数反演研究多采用机载数据。不同于星载SAR,机载SAR数据的相位误差主要源于雷达平台飞行不稳定、天线姿态变化及其他外部因素引发的运动误差。此类运动误差会导致基线测量偏差,即使是微小的基线误差,也会对干涉相位产生显著影响,最终降低森林参数反演的准确性。因此,为实现高精度的森林参数反演,必须对相位误差或基线误差给干涉相位造成的影响进行有效补偿。

目前,国内外学者已针对相位误差问题开展了深入研究,提出了诸多行之有效的解决方法。文献[5]提出一种基于永久散射体(permanent scatterers,PS)的方法。该方法依托PS点相位中心的稳定性,通过提取并计算PS点的相位误差,再运用插值获取整个场景的相位误差。但在森林场景中,筛选合适的PS点往往面临较大挑战。若提取的PS点分布稀疏或不均匀,将会影响整个场景相位校正的准确性[6]。文献[7]提出一种利用全极化信息进行散射体相位中心分解,从而分离出与地面散射体相关的相位中心的相位校准方法。尽管此方法能够对森林植被层进行三维结构重建,但由于无法有效获取林下地形信息,其在森林场景中的应用受到了极大限制。此外,文献[8]提出一种基于相位中心双重定位的相位定标算法,通过相位连接和迭代求解实现对相位中心和相位误差的联合估计。虽然相位连接算法[9-10]能够提高相位信噪比,但该方法仍无法较好地应用于相关性较低的森林密集地区。文献[11]提出一种基于熵最小化的自聚焦方法,通过最小化信息熵来获取相位误差。该方法无需依赖任何参考点,但由于信息熵最小化属于高度非线性非凸问题,需要对相位误差初始值进行合理假设,否则求解过程极易陷入局部最优,进而导致干涉条纹偏移,最终影响结果的准确性。文献[12]将相位误差视为待估计的矩阵参数,基于最小均方误差和最小熵的联合约束准则,对误差矩阵进行优化估计。文献[13]提出一种基于相位梯度自聚焦(phase gradient autofocus,PGA)的全息SAR相位误差补偿方法,该方法利用振幅色散指数与模糊度约束筛选永久散射点,借助改进的波束成形PGA方法在回波域提升相位误差估计抗噪性,运用累积强度投影配准方法在图像域实现子孔径精对准,最终达到在回波域和图像域校正相位误差、解决垂直偏移问题、提升三维成像质量的目的。文献[14]提出多孔径方法对时变基线误差进行补偿,但该方法直接利用估计的时变基线误差补偿,会引入常量误差和线性误差。常量误差来自积分过程中产生的未知常数,呈距离向非线性残余条纹,线性误差因图像全局配准问题,导致干涉条纹方位向线性偏移。针对这个问题,文献[15]提出先利用多孔径补偿误差相位,再引入外部数字高程模型(digital elevation

model,DEM)对残余误差建模求解。综上,传统相位校正算法普遍存在局限性,它们在不同程度上依赖外部控制点及其他辅助信息。因此,这些算法缺乏一定的普适性,在实际应用场景中受到诸多制约。

本文提出一种联合多孔径与自聚焦算法的机载SAR相位误差校正方法,该方法有效弥补了多孔径方法需额外后处理、自聚焦算法依赖初始值选择的不足。此方法主要包含两个步骤:第一步,在零多普勒几何条件下,通过子孔径分解,图像信息保持在原始位置,而残余误差与几何畸变发生偏移,基于此利用多孔径方法获取相位误差。然而,由于多孔径方法得到的相位误差是经积分运算所得,积分过程可能引入其他误差,导致相位校正后仍存在残余误差。针对第一步的局限性,第二步对多孔径方法获取的相位误差进行进一步估计。考虑到层析SAR处理中层析谱质量直接影响森林参数反演结果,通过优化基于层析垂直结构剖面构建的信息熵,最终获得优化后的相位误差。为验证该方法的有效性与可行性,以机载P波段层析SAR数据为实验对象,开展相位误差校正实验。

1　研究方法

1.1　算法流程

为解决机载SAR相位误差校正难题,本文提出一种联合多孔径和自聚焦的相位误差校正方法。首先,利用多孔径算法获取相位误差初始估计值;然后,基于层析垂直结构剖面构建信息熵,运用自聚焦算法对初值进行迭代优化,实现相位误差的精细化再估计,具体流程如图1所示。

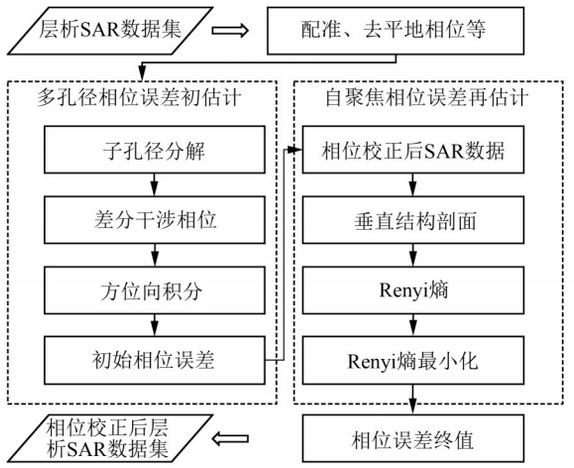


图1　联合多孔径和自聚焦算法的相位误差校正流程图

Fig. 1　Phase Error Correction Flowchart for Joint Multi-aperture and Self-Focusing Algorithms

1.2　多孔径相位误差初估计

在SAR成像中,斜视信号、合成孔径长度与成像几何的平均斜视角之间存在紧密联系,三者共同决定全分辨率SAR图像的构成[16]。其中,SAR图像的方位带宽 W 是指雷达在方位向上(即沿航线方向)所能提供的频率范围,其大小直接决定了图像的方位向分辨率。通过对该方位带宽进行划分,可获取多个子带宽,并生成对应不同平均斜视角的子孔径图像。理论上,在零多普勒几何条件下开展成像处理时,各子孔径图像中的实际图像信息应保持在相同位置。但受雷达平台运动误差、载荷系统特性以及地形起伏等因素影响,子孔径图像不可避免地会产生相位误差。这些相位误差将导致图像在方位向出现几何畸变,具体表现为目标位置偏移,其偏移量可表示为:

$$\Delta x = r\tan\beta \tag{1}$$

式中,r 表示子孔径SAR影像的斜距;β 为子孔径SAR影像的平均斜视角。

因此,在各子孔径内,相位误差的不同部分会被映射至子孔径SAR图像的相同位置,故而可借助不同子孔径图像间的差分相位来估计相位误差。两个子孔径图像的差分相位对应剩余运动误差(即误差的局部导数)[17-18],对其进行方位向积分即可得到相位误差。不过,由于分布式目标在不同观测角度下的后向散射系数存在差异,易导致子孔径图像间出现去相关现象。但无论是点目标还是分布式目标,均可利用两幅或多幅子孔径影像的干涉相位差信息重建目标的三维形状或位移信息。因此,借助干涉技术建立两幅子孔径影像间的关系,能够有效解决图像去相干问题,进而提升SAR成像质量与分辨率。

首先,将SAR主辅影像在方位频谱上以 Δf_{sub} 为间隔进行子孔径分解,可获得 K 个子孔径影像对。随后,在主辅影像的各子孔径干涉对间实施差分干涉操作,从而获取对应的差分干涉相位:

$$\Phi_i = \arg\left\{\left(S_i^1 S_i^{2*}\right)\left(S_{i+1}^1 S_{i+1}^{2*}\right)^*\right\} \tag{2}$$

式中,Φ_i 是第 i 个子孔径干涉对的差分干涉相位;S_i^1 和 S_i^2 是子孔径 i 对应的主辅影像;S_{i+1}^1 和 S_{i+1}^2 是子孔径 $i+1$ 所对应的主辅影像。

由于SAR主辅影像间存在固有配准误差,在子孔径分解过程中,该误差会被进一步放大,导致差分干涉相位的噪声水平显著增加。为有效提升相位误差估计精度,本文采用均值滤波方法

对差分相位中的干涉噪声进行抑制处理：

$$\frac{\partial}{\partial x}E=\frac{v_0}{2\pi r\Delta f_{\mathrm{sub}}}\arg\left\{\sum_{i=1}^{K-1}\varsigma_i\left(\left|\gamma_i\right|\exp\left(\mathrm{i}\Phi_i\right)\right)\right\} \tag{3}$$

式中，$\frac{\partial}{\partial x}E$是相位误差沿方位向的导数；$v_0$为载机运行速度；$r$为主影像斜距；$\Delta f_{\mathrm{sub}}$为不同子孔径影像的频谱间隔；$\left|\gamma_i\right|$是$\Phi_i$的复相干干涉系数的绝对值；$\varsigma_i(\cdot)$表示差分干涉相位沿方位向的平移操作，平移量为$\Delta x_i=r\tan\beta_{i,i+1}$，$\beta_{i,i+1}=\left(\beta_i+\beta_{i+1}\right)/2$。

根据式(3)能够得到相位误差沿方位向的导数，然而相位误差E不仅与方位向有关，还与距离向相关。因此，若要精确获得相位误差，就必须考虑距离向因素。然而，距离向部分位置相关性较低，这可能会对相位误差结果的估计产生不利影响。针对这种情况，采用一种基于几何模型的积分方法来解决。具体做法是：将相位误差沿方位向的导数按几何模型在雷达视线(line of sight，LOS)方向进行分解，进而得到误差在水平和垂直方向上沿方位向导数：

$$\frac{\partial}{\partial x}E_n=\frac{\partial}{\partial x}E_z\cos\theta_n\pm\frac{\partial}{\partial x}E_y\sin\theta_n \tag{4}$$

式中，E_n为给定方位向的第n个距离位置的相位误差；$\frac{\partial}{\partial x}E_z$和$\frac{\partial}{\partial x}E_y$分别为相位误差在垂直和水平方向沿方位向导数；$\theta_n$为第$n$个距离位置的下视角。

在确定距离向位置后，该位置沿雷达LOS向的相位误差主要由$\frac{\partial}{\partial x}E_z$和$\frac{\partial}{\partial x}E_y$两个参数决定。若能获取这两个参数，通过沿方位向积分，即可得到该距离向位置的相位误差；对不同距离向位置重复此操作，便能获取整个场景的相位误差。理论上，利用距离向剖面中两个高相干系数点即可估计这两个未知参数。然而在实际应用中，同一距离向剖面常存在多个高相干系数点，导致求解方程变为超定方程。同时，考虑到需区分高相干与低相干像素，最终采用加权最小二乘算法进行未知参数的求解，以提高参数估计的准确性和稳定性。计算公式如下：

$$\boldsymbol{e}_{yz}=\left(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}\boldsymbol{A}\right)^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_{\mathrm{LOS}} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}\pm\sin\theta_1 & \pm\cos\theta_1\\ \pm\sin\theta_2 & \pm\cos\theta_2\\ \vdots & \vdots\\ \pm\sin\theta_N & \pm\cos\theta_N\end{bmatrix},\boldsymbol{e}_{yz}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial E_y}{\partial x}\\ \dfrac{\partial E_z}{\partial x}\end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{e}_{\mathrm{LOS}}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial}{\partial x}E_1 & \dfrac{\partial}{\partial x}E_2 & \cdots & \dfrac{\partial}{\partial x}E_n\end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{W}=\mathrm{diag}\left\{\frac{1}{\sigma_1^2}\quad\frac{1}{\sigma_2^2}\quad\cdots\quad\frac{1}{\sigma_N^2}\right\} \tag{8}$$

式中，$\boldsymbol{e}_{yz}$为需要求解的距离向剖面位置的相位误差沿方位向导数矩阵；$\boldsymbol{e}_{\mathrm{LOS}}$为给定距离向剖面处雷达LOS向的相位误差沿方位向导数；σ_n为第n个距离向位置信号的标准差，可由相干系数求解得到。

尽管通过加权最小二乘算法可求解相位误差相关参数，但基于多孔径的方法直接利用估计的相位误差进行补偿时，仍存在局限性。在积分过程中易引入额外误差，导致校正后仍残留较多相位误差。具体而言，积分引入的误差主要包含两类：一是由未知积分常数导致的恒定误差；二是因图像配准误差引发的线性误差。图像配准误差会干扰差分干涉相位的准确求解，致使相位误差沿方位向的导数出现偏差。这种偏差经过积分运算后，会转化为类似的线性误差，最终造成补偿后的干涉条纹沿方位向发生线性偏移[19]。这表明仅依赖多孔径方法进行相位误差校正，难以实现高精度的误差消除，需要进一步优化校正策略。

1.3 自聚焦相位误差再估计

在完成第一步处理后，虽然大部分相位误差得以消除，但仍存在残留误差。因此，需要对多孔径算法估计的相位误差进行后续优化。联合多孔径和自聚焦的相位校正算法具体流程如下：首先进行基于多孔径的相位误差校正，为减少积分过程中引入的误差，在对$\frac{\partial}{\partial x}E_z$和$\frac{\partial}{\partial x}E_y$进行积分运算前，先减去平均值，再开展积分操作。通过此步骤，将待求解的未知相位误差聚焦于常量误差与线性误差部分，从而简化误差模型。然后对完成初始校正的SAR数据，采用基于信息熵最小化的自聚焦算法来精确估计相位误差。

将自聚焦相位误差校正算法与层析SAR成像处理相结合[11]。首先，利用层析算法处理数据，获取目标垂直结构剖面P；随后，构建垂直结构剖面P的信息熵表达式，以此作为评估误差校正后剖面质量的量化指标；最后，通过迭代优化相位误差，实现信息熵的最小化，进而得到相位误差的最优估计值。该流程通过两阶段协同处理，有效提升了相位误差校正的精度与可靠性。

与Capon、Beamforming算法相比，多重信号分类(multiple signal classification，MUSIC)算法具备超分辨能力[20-21]。非参数迭代自适应(iterative adaptive approach，IAA)算法基于迭代优化和自适应处理，通过不断更新对信号协方差矩阵的估计来实现高分辨率的层析成像[22]。与IAA

算法相比,MUSIC算法无需进行复杂迭代运算,极大缩短了数据处理时长。因此本文选用MUSIC层析成像算法处理获取目标垂直结构剖面,用于后续处理,即

$$\hat{P}_{\mathrm{MUSIC}}=\frac{1}{\boldsymbol{a}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{G}\boldsymbol{G}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{a}_d} \tag{9}$$

式中,$\boldsymbol{a}_d$为层析成像模型的映射向量;$\boldsymbol{G}$为噪声子空间矩阵,由协方差矩阵的$N-K$个最小特征值对应的$N-K$个特征向量确定,N为协方差矩阵特征值个数,K为分辨单元中散射体的数量,在森林场景中,通常只考虑地面和植被两个主要散射源,故K取2。

假设没有相位误差存在,目标垂直结构剖面则具有超分辨率、无旁瓣效应和高清晰度等特点[23]。如果相位误差没有得到有效校正,目标垂直结构剖面就会出现较多旁瓣,散射体高度也可能错位,具有较低的清晰度。因此将垂直结构层析剖面用Renyi熵进行表达,通过对Renyi熵进行最小化,获得清晰度更好的层析垂直结构剖面,实现相位误差的估测[24-25]。表达式如下:

$$\begin{cases} S\left[P\left(z,\vec{\boldsymbol{\Phi}}_{\mathrm{err}}^{\mathrm{EM}}\right)\right]=2\ln\int P\left(z,\vec{\boldsymbol{\Phi}}_{\mathrm{err}}^{\mathrm{EM}}\right)- \\ \qquad\qquad \ln\int P^2\left(z,\vec{\boldsymbol{\Phi}}_{\mathrm{err}}^{\mathrm{EM}}\right) \\ \underset{\vec{\boldsymbol{\Phi}}_{\mathrm{err}}^{\mathrm{EM}}}{\operatorname{argmin}}\, S\left[P\left(z,\vec{\boldsymbol{\Phi}}_{\mathrm{err}}^{\mathrm{EM}}\right)\right] \end{cases} \tag{10}$$

由于Renyi熵的最小化是高度的非线性非凸问题,无法利用传统算法进行求解,而遗传算法是一种启发式搜索算法[26],可用于复杂优化问题的求解,它模拟了自然选择和遗传学中的进化过程,可用于解决传统算法难以处理的问题,因此本文使用遗传算法来求解信息熵的最小化问题。将相位误差作为个体,垂直结构剖面的信息熵函数为适应度函数,实施遗传算法的计算。将前一步计算得到的相位误差作为种群中的旧个体开始遗传算法的运算,即

$$\vec{\boldsymbol{\Phi}}_{\mathrm{err}}^{\mathrm{EM}}=\left[\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{err},1}^{\mathrm{EM}}\quad\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{err},2}^{\mathrm{EM}}\quad\cdots\quad\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{err},n}^{\mathrm{EM}}\right] \tag{11}$$

这个过程涉及到种群中新旧个体在问题特征限制下的相互作用。该算法通过一系列的选择、交叉、变异和替换等操作,对自然进化进程进行模拟,从而得以高效地在优化问题的解空间中展开搜索,进而获取全局最优解。

2　研究区与实验数据

2.1　TropiSAR数据集

TropiSAR数据集来源于法属圭亚那热带雨林的巴拉库研究基地,其中心地理位置为5°16′N,52°57′W。该研究区大部分区域地形颇为平坦,海拔介于5～50 m,不过部分区域较为崎岖。该区域内的森林类型丰富,包括原始森林和经过伐木、干扰和其他自然因素破坏后恢复的自然次生森林。森林物种丰富多样,以热带雨林树木为主,包括豆科、金莲科、大戟科、桑科和橄榄科等各类植物。森林的垂直结构复杂,树高从20～45 m不等。

TropiSAR数据集来自欧洲空间局2009年热带雨林机载SAR遥感试验,已由法国国家航空航天研究中心进行了前期预处理,包括SAR图像成像、配准、平地效应去除等[27]。该数据集的6个轨道沿垂直向均匀分布,两个相邻轨道之间的距离大约是15.24 m,如表1所示。此外,由于所有的图像都是在2 h内完成的,可以忽略时间去相关的影响。斜距采样间隔为1.000 m,方位向采样间隔为1.245 m,高度向分辨率大约在15.0 m,入射角从近距20°慢慢变化到远距60°,如表2所示。

表1　TropiSAR机载多基线SAR数据基线信息

Table 1　Baseline Information of TropiSAR Airborne Multi-baseline SAR Data

编号	获取日期	基线/m
Tropi0402	2009-08-24	0
Tropi0403		−14.487 9
Tropi0404		−30.116 3
Tropi0405		−43.834 3
Tropi0406		−60.063 2
Tropi0407		−74.968 3

表2　TropiSAR机载P波段SAR系统参数

Table 2　System Parameters of Airborne P-band SAR

波长/m	极化方式	中心斜距/m	中心入射角/(°)	斜距向采样间隔/m	方位向采样间隔/m
0.754 2	HH	4 905	35.061 4	1.0	1.245

为了对SAR层析结果进行验证,法国农业研究中心和Guyafor项目提供了激光雷达数字地形模型(digital terrain model,DTM)和林冠高度模型(canopy height model,CHM),如图2所示。

2.2　塞罕坝数据集

塞罕坝数据集覆盖中国河北省承德市北部的塞罕坝机械林场,其中心地理位置是42°22′42.31″N,116°53′117.31″E。研究区域海拔处于1 450～1 550 m之间。该地区植被类型丰富多样,涵盖落叶针叶林、针阔混交林、阔叶林、灌丛等。

该数据集共包含7个轨道,各轨道呈垂直向分

布,基线信息见表3。由于所有图像都是在3 h内采集完成,可忽略时间去相关的影响。斜距采样间隔为0.577 m,方位向采样间隔为0.958 m,入射角从近距10°慢慢变化到远距45°,如表4所示。

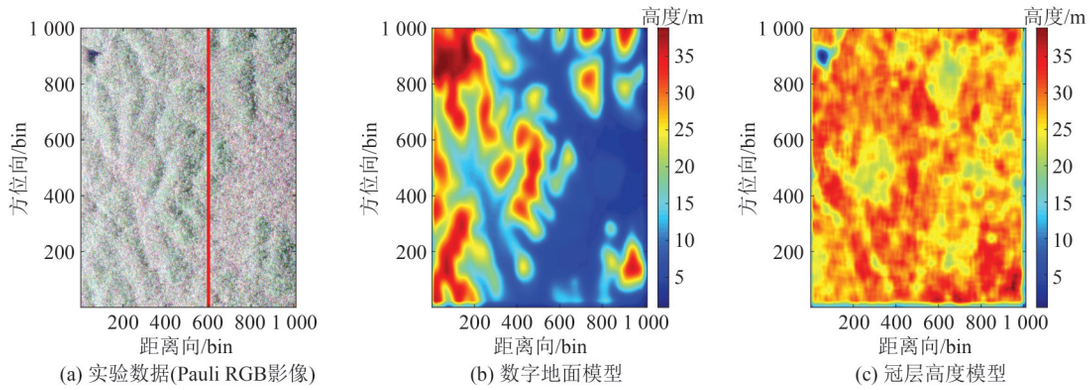


图2 TropiSAR 2009数据集

Fig. 2 TropiSAR 2009 Dataset

表3 塞罕坝实验区多基线SAR数据基线信息

Table 3 Baseline Information of Multi-baseline SAR Data in Saihanba

编号	获取日期	基线/m
PSAR_H4570_20231005_ID45		163.261 2
PSAR_H4530_20231005_ID46		127.162 4
PSAR_H4440_20231005_ID49		32.458 6
PSAR_H4410_20231005_ID50	2023-10-05	0
PSAR_H4380_20231005_ID51		31.762 6
PSAR_H4350_20231005_ID52		63.308 2
PSAR_H4260_20231005_ID55		162.481 1

表4 塞罕坝实验区机载P波段多基线SAR系统参数

Table 4 System Parameters of Airborne P-band Multi-baseline SAR in Saihanba

波长/m	极化方式	中心斜距/m	中心入射角/(°)	斜距向采样间隔/m	方位向采样间隔/m
0.768 7	HH	4 867.90	25.597 3	0.577	0.958

为对实验结果进行检验,获取了由航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission,SRTM)生成的DEM,如图3所示。

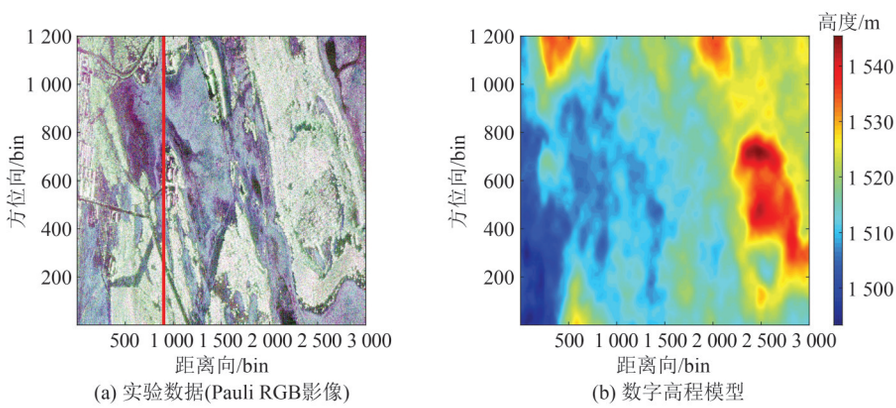


图3 塞罕坝数据集

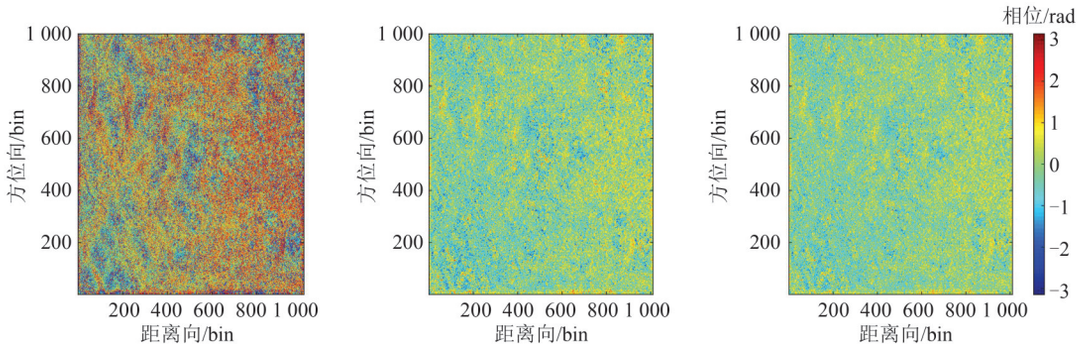
Fig. 3 Saihanba Dataset

3 结果与分析

本文提出一种联合多孔径和自聚焦的机载SAR相位误差校正方法,采用TropiSAR数据集和塞罕坝数据集实验验证所提算法的有效性和可行性。通过两种方法展开验证,首先,比较分析两个数据集分别经过多孔径相位校正以及所提方法校正后的相位误差残余情况;然后,为了研究误差校正对层析成像谱的影响,比较分析两种方法相位误差校正前后层析谱的质量。

3.1 相位误差残余情况

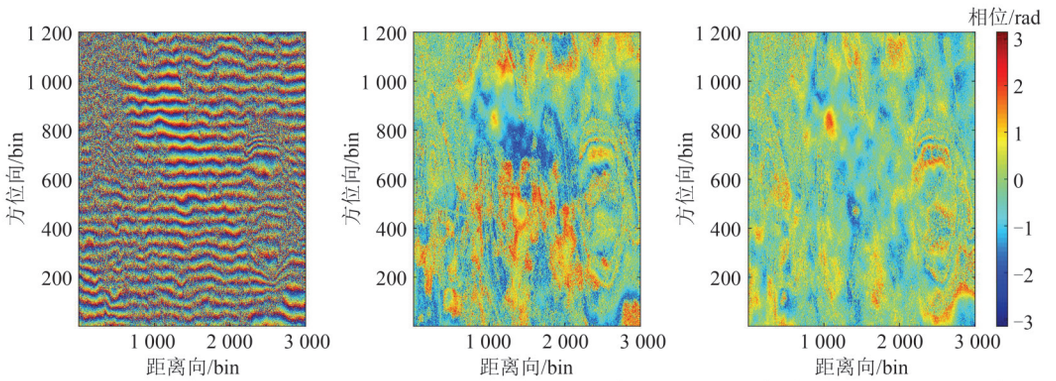
为了验证本文算法的相位误差校正情况,比较多孔径方法和所提算法相位误差校正后的去除地形相位的差分干涉相位。图4和图5分别显示了TropiSAR数据集和塞罕坝数据集的差分干涉相位以及两种方法相位校正后的残余相位。



(a) 去除地形相位后的差分干涉相位　(b) 多孔径相位校正后的残余相位　(c) 所提算法相位误差校正后的残余相位

图4　TropiSAR数据集差分干涉相位

Fig. 4　Differential Interferometric Phase of TropiSAR Dataset



(a) 去除地形相位后的差分干涉相位　(b) 多孔径相位校正后的残余相位　(c) 所提算法相位误差校正后的残余相位

图5　塞罕坝数据集差分干涉相位

Fig. 5　Differential Interferometric Phase of Saihanba Dataset

由图4(a)所示的TropiSAR数据集的差分干涉相位无明显条纹，误差相位大致处于π rad左右，通过图4(b)可看出，经过多孔径相位校正后误差基本已得到去除，残余相位基本在0 rad附近，而经过联合多孔径和自聚焦的相位校正算法校正后的残余相位在多孔径校正后的基础上有所减小(图4(c))。图5(a)中塞罕坝数据集的差分干涉相位呈现出明显条纹，图5(b)和图5(c)中仍存在残余误差，主要原因为差分干涉处理中所采用的外部地形(SRTM DEM)误差导致。对比图5(b)和图5(c)，本文算法校正后的残余误差相位明显小于多孔径相位校正后的结果。因此，联合多孔径与自聚焦的相位校正算法通过对初始相位误差开展自聚焦处理，有效弥补多孔径方法所存在的问题。

3.2　层析谱质量分析

为了进一步对本文算法的相位误差校正性能进行分析，分别采用多孔径相位校正方法以及联合多孔径与自聚焦的相位校正方法，先对两个数据集中HH极化SAR数据进行处理，再开展层析成像，并针对层析谱质量展开分析。在层析成像算法中，谱估计算法具有较高的垂直分辨率和噪声抑制能力，其中MUSIC、Beamforming和Capon较为常用。Beamforming和Capon算法求解时仅用样本协方差来实现层析成像，MUSIC算法求解除了用样本协方差外，还需依赖一定的先验信息。而IAA算法通过循环迭代进行协方差矩阵的求解，并且不需要先验信息，同时已有实验证实IAA算法比Beamforming和Capon等具有更高的分辨率[21]，故选取图2(a)与图3(a)中红色实线处的HH极化SAR数据，运用IAA算法开展层析成像处理以获取层析谱。图6和图7分别显示了TropiSAR数据集和塞罕坝数据集相位校正前后数据处理获取得到的层析谱。另外，为对层析谱质量展开分析，将获取得到的林下地形(黑色实线)以及森林高度(黑色虚线)叠加在层析谱中。

在图6中，根据未进行相位误差校正的层析谱可知，TropiSAR数据集的相位误差较小，层析谱较为清晰、连续，但存在较多的旁瓣，影响森林垂直结构判读，降低了林下地形和森林树高等参数的反演精度。与未进行相位校正的层析谱相比，多孔径相位误差校正后的层析谱具备一定的旁瓣抑制能力，但在方位向上存在较多层析谱不连续、偏移等问题。

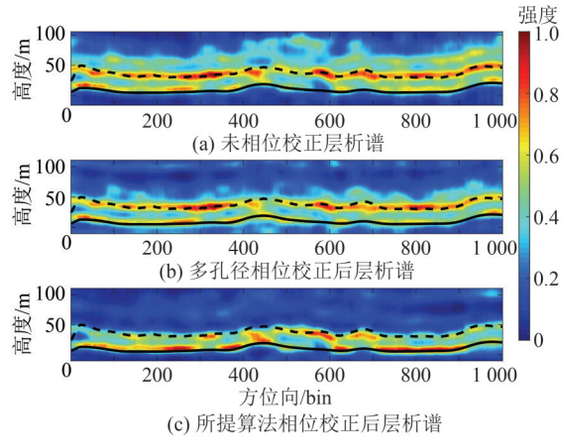


图6 TropiSAR数据集相位校正前后层析谱

Fig. 6 Tomography Spectra of TropiSAR Dataset Before and After Phase Correction

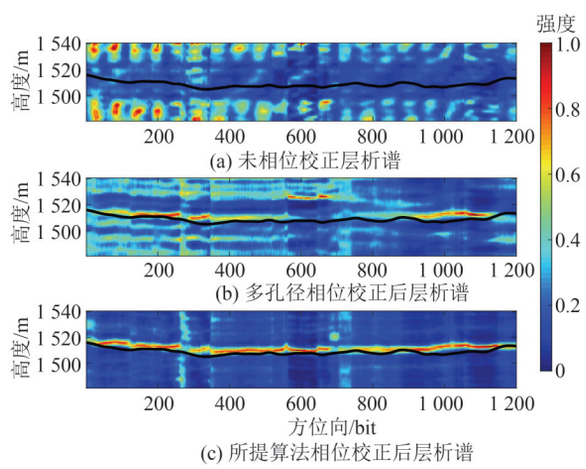


图7 塞罕坝数据集相位校正前后层析谱

Fig. 7 Tomography Spectra of the Saihanba Dataset Before and After Phase Correction

与多孔径相位误差校正后的层析谱相比,本文算法校正后的层析谱更为清晰、连续,几乎不受旁瓣影响,可见联合多孔径与自聚焦的相位校正算法具有较强的旁瓣抑制能力。另外,本文算法的第二步是对由MUSIC算法获取的层析谱所构成的信息熵进行优化,以获取最优误差相位,而MUSIC算法对地面散射体的识别能力显著强于冠层散射体,其根本原因在于地面目标的点源特性与算法假设高度匹配,而冠层的复杂散射特性导致模型失配与性能下降。因此,运用本文算法进行相位校正后的层析谱会出现地表层增强、冠层弱化的现象。此外,未进行相位校正、多孔径相位误差校正和所提算法相位误差校正后的剖面层析谱峰值位置与激光雷达(LiDAR)获取的地面高度和冠层高度位置基本保持一致。

根据图7可知,经过多孔径相位校正的层析谱与未进行相位校正的层析谱相比,具有更高的清晰度和聚焦能力,但由于多孔径相位校正时引入常量和线性误差,使得层析谱在部分位置存在不连续或偏移现象。而联合多孔径与自聚焦的相位校正算法在多孔径算法的基础上进行自聚焦处理,使得层析谱的清晰度和聚焦能力明显提高,并且所提算法校正后的层析谱具有更少的旁瓣,可见,本文算法提高了多孔径算法校正后层析谱的质量。并且未进行相位校正、多孔径相位误差校正和本文算法相位误差校正后的剖面层析谱峰值位置与SRTM获取的DEM位置大致相当。因此,综合两个数据集获得层析谱的旁瓣抑制能力、清晰度、剖面峰值位置等可知,联合多孔径和自聚焦的机载SAR相位误差校正方法可以有效实现相位误差校正,提升多孔径相位误差校正的层析SAR成像结果质量。

4 结 语

本文提出一种联合多孔径与自聚焦的机载SAR相位误差校正方法,该方法分为两个阶段,在第一阶段,利用多孔径算法对相位误差进行初步估计,但该步骤后仍存在残余相位误差,需进一步优化以获取精确结果。第二阶段则结合层析SAR成像原理,通过评估层析谱清晰度等关键指标对相位误差进行二次估计,并将最终确定的相位误差用于多基线SAR数据集的校正。

为验证所提算法的可行性与有效性,采用机载多基线P波段SAR数据集开展实验,从两个方面评估相位误差的校正性能:在残余误差分析方面,对比发现,联合多孔径与自聚焦方法校正后的残余相位误差显著低于传统多孔径校正方法;在层析成像质量评估中,对校正后的SAR数据进行层析成像,结果显示,多孔径方法虽能抑制旁瓣,但存在层析谱不连续、位置偏移等缺陷,而联合方法生成的层析谱连续完整,旁瓣干扰较小,聚焦效果显著提升。实验结果充分表明,联合多孔径和自聚焦的机载SAR相位误差校正方法不仅能够有效消除相位误差,还能大幅提升多基线SAR数据经多孔径校正后的层析成像性能。

参 考 文 献

[1] REIGBER A, MOREIRA A, PAPATHANASSIOU K P. First Demonstration of Airborne SAR Tomography Using Multi-baseline L-Band Data[C]//IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, Germany, 1999.

[2] 赵曜，许俊聪，全相印，等. 基于稀疏和低秩结构的层析SAR成像方法[J]. 雷达学报，2022，11(1)：52-61.
ZHAO Yao，XU Juncong，QUAN Xiangyin，et al. Tomographic SAR Imaging Method Based on Sparse and Low-Rank Structures[J]. *Journal of Radars*，2022，11(1)：52-61.

[3] PENG X，LI X W，WANG C C，et al. A Maximum Likelihood Based Non-parametric Iterative Adaptive Method of Synthetic Aperture Radar Tomography and Its Application for Estimating Underlying Topography and Forest Height[J]. *Sensors*，2018，18(8)：2459.

[4] TEBALDINI S，D'ALESSANDRO M M，DINH H T M，et al. P Band Penetration in Tropical and Boreal Forests：Tomographical Results[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium，Vancouver，BC，Canada，2011.

[5] TEBALDINI S，GUARNIERI A M. On the Role of Phase Stability in SAR Multi-baseline Applications[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*，2010，48(7)：2953-2966.

[6] AGHABABAEE H，FORNARO G，SCHIRINZI G. Phase Calibration Based on Phase Derivative Constrained Optimization in Multi-baseline SAR Tomography[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*，2018，56(11)：6779-6791.

[7] TEBALDINI S，ROCCA F. On the Impact of Propagation Disturbances on SAR Tomography：Analysis and Compensation[C]// IEEE Radar Conference，Pasadena，CA，USA，2009.

[8] TEBALDINI S，ROCCA F，D'ALESSANDRO M M，et al. Phase Calibration of Airborne Tomographic SAR Data via Phase Center Double Localization[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*，2015，54(3)：1775-1792.

[9] 沈鹏，汪长城，廖明生，等. 时序 InSAR 相位连接方法研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2025，DOI：10.13203/j.whugis20250004.
SHEN Peng，WANG Changcheng，LIAO Mingsheng，et al. Research Progress of Phase Linking Method in Time-Series InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2025，DOI：10.13203/j.whugis20250004.

[10] WU C J，SHEN P，TEBALDINI S，et al. InSAR-Based Estimation of Forest Above-Ground Biomass Using Phase Histogram Technique[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*，2025，136：104350.

[11] PARDINI M，PAPATHANASSIOU K，BIANCO V，et al. Phase Calibration of Multi-baseline SAR Data Based on a Minimum Entropy Criterion[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium，Munich，Germany，2012.

[12] WANG M H，GAO S L，QIU X L，et al. A Novel Phase Error Estimation Method for TomoSAR Imaging Based on Adaptive Momentum Optimizer and Joint Criterion[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*，2024，18：2042-2051.

[13] HUANG F Z，FENG D，HUA Y S，et al. Phase Calibration in Holographic Synthetic Aperture Radar：An Innovative Method for Vertical Shift Correction[J]. *Remote Sensing*，2024，16(15)：2728.

[14] REIGBER A，PAPATHANASSIOU K P. Correction of Residual Motion Errors in Airborne Repeat-Pass Interferometry[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium，Sydney，NSW，Australia，2002.

[15] REIGBER A，PRATS P，MALLORQUI J J. Refined Estimation of Time-Varying Baseline Errors in Airborne SAR Interferometry[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*，2006，3(1)：145-149.

[16] SCHEIBER R，MOREIRA A. Coregistration of Interferometric SAR Images Using Spectral Diversity[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*，2000，38(5)：2179-2191.

[17] PRATS P，MALLORQUI J J. Estimation of Azimuth Phase Undulations with Multisquint Processing in Airborne Interferometric SAR Images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*，2003，41(6)：1530-1533.

[18] 唐晓青，向茂生，吴一戎. 基于回波数据的机载双天线 InSAR 运动补偿[J]. 系统工程与电子技术，2009，31(10)：2311-2316.
TANG Xiaoqing，XIANG Maosheng，WU Yirong. Raw Data-Based Motion Compensation of Airborne Dual-Antenna InSAR[J]. *Systems Engineering and Electronics*，2009，31(10)：2311-2316.

[19] 王志. 机载SAR/InSAR运动补偿与基线校正技术及工程化应用[D]. 西安：西安电子科技大学，2021.
WANG Zhi. Airborne SAR/InSAR Motion Compensation and Baseline Correction Technology and Engineering Applications[D]. Xi'an：Xidian University，2021.

[20] ZHU X. Very High Resolution Tomographic SAR

（下转第1668页）