

LT-1A卫星全极化SAR辐射与极化系统误差稳定性分析： 以热带雨林场景为例

史磊^① 孙维东^{*①} 杨乐^② 杨杰^① 赵伶俐^③ 李平湘^① 刘亚波^④

^①(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室 武汉 430072)

^②(郑州大学地球科学与技术学院 郑州 450001)

^③(武汉大学遥感信息工程学院 武汉 430072)

^④(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

摘要：作为中国新一代天基长波SAR的代表，陆地探测1号01卫星(LT-1A)于2022年1月发射进入太阳同步轨道。LT-1A搭载的长波合成孔径雷达(SAR)工作在L波段，具备单极化、线性双极化、紧缩双极化、全极化等对地观测能力。现有研究主要侧重于LT-1A重轨干涉数据获取能力以及数字高程模型、沉降产品的生产精度评价，对LT-1A的辐射精度、地物极化信息保持能力的研究较为缺乏。该文以热带雨林植被为观测对象，通过不依赖人工定标器的自主定标方法对LT-1A全极化数据辐射误差、极化误差的稳定性进行评价与分析。实验表明：LT-1A传感器的辐射稳定性较好、极化精度优于国际对地观测组织(CEOS)推荐指标。持续对地观测1000 km内归一化雷达截面(NRCS)误差波动小于1 dB (3倍标准差)、5天内重返观测时辐射误差波动小于0.5 dB (3倍标准差)；全极化观测模式下系统串扰低于-35 dB甚至达到-40 dB，交叉极化通道不平衡优于0.2 dB与2°，同通道不平衡优于0.5 dB与10°；系统噪声介于-42~-22 dB，平均系统等效热噪声优于-25 dB，热噪声水平随持续对地观测时长的增加有升高。此外，该研究验证了电离层对LT-1A极化数据质量的影响：5°法拉第旋转角造成的图像退化与-20 dB系统串扰带来的影响相当，而3°~20°法拉第旋转角在中、低纬度较为常见，这将带来-21.16~-8.78 dB的极化通道间扰动，即电离层对全极化数据质量的退化相较传感器-40 dB的串扰更为严重。

关键词：陆地探测1号卫星；辐射误差；极化误差；热带雨林；合成孔径雷达

中图分类号：TN957.51

文献标识码：A

文章编号：2095-283X(2024)x-0001-19

DOI: 10.12000/JR24102

引用格式：史磊, 孙维东, 杨乐, 等. LT-1A卫星全极化SAR辐射与极化系统误差稳定性分析：以热带雨林场景为例[J]. 雷达学报(中英文), 待出版. doi: 10.12000/JR24102.

Reference format: SHI Lei, SUN Weidong, YANG Le, *et al.* Evaluation of radiometric and polarimetric errors in the LT-1A satellite data based on tropical forests in the amazon[J]. *Journal of Radars*, in press. doi: 10.12000/JR24102.

收稿日期：2024-05-28；改回日期：2024-08-11；网络出版：2024-xx-xx

*通信作者：孙维东 widensun2012@whu.edu.cn *Corresponding Author: SUN Weidong, widensun2012@whu.edu.cn

基金项目：国家自然科学基金(U22A2010, 42071295, 61971318, 42171442, U2033216)，深圳科技创新重点项目(JCYJ20200109150833977)，自然资源部国土卫星遥感应用重点实验室经费资助(KLSMNR-202110)，国家重点研发计划(2022YFB3903605)，中央高校基本科研业务费专项资金资助，资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (U22A2010, 42071295, 61971318, 42171442, U2033216), The Shenzhen Fundamental Research Program (JCYJ20200109150833977), The Key Laboratory of Land Satellite Remote Sensing Application of the Ministry of Natural Resources of the People Republic of China (KLSMNR-202110), The National Key Research and Development Program of China (2022YFB3903605), The Fundamental Research Funds for the Central Universities, and a Grant from the State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System

责任主编：陈思伟 Corresponding Editor: CHEN Siwei

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Evaluation of Radiometric and Polarimetric Errors in the LT-1A Satellite Data Based on Tropical Forests in the Amazon

SHI Lei^① SUN Weidong^{*①} YANG Le^② YANG Jie^① ZHAO Lingli^③
LI Pingxiang^① LIU Yabo^④

^①(State Key Laboratory of Surveying, Mapping and Remote Sensing Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

^②(The school of Geo-Science and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

^③(School of Remote Sensing Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

^④(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: As a representative of China's new generation of space-borne long-wavelength Synthetic Aperture Radar (SAR), the LuTan-1A (LT-1A) satellite was launched into a solar synchronous orbit in January 2022. The SAR onboard the LT-1A satellite operates in the L band and exhibits various earth observation capabilities, including single-polarization, linear dual-polarization, compressed dual-polarization, and quad-polarization observation capabilities. Existing research has mainly focused on LT-1A interferometric data acquisition capabilities and the accuracy evaluation of digital elevation models and displacement measurements. Research on the radiometric and polarimetric accuracy of the LT-1A satellite is limited. This article uses tropical rainforest vegetation as a reference to evaluate and analyze the radiometric error and polarimetric stability of the LT-1A satellite in the full polarization observation mode through a self-calibration method that does not rely on artificial calibrators. The experiment demonstrates that the LT-1A satellite has good radiometric stability and polarimetric accuracy, exceeding the recommended specifications of the International Organization for Earth Observations (Committee on Earth Observation Satellites, CEOS). Fluctuations in the Normalized Radar Cross-Section (NRCS) error within 1,000 km of continuous observation are less than 1 dB (3σ), and there are no significant changes in system radiometric errors of less than 0.5 dB (3σ) when observation is resumed within five days. In the full polarization observation mode, the system crosstalk is less than -35 dB, reaching as low as -45 dB. Further, the cross-polarization channel imbalance is better than 0.2 dB and 2° , while the co-polarization channel imbalance is better than 0.5 dB and 10° . The equivalent thermal noise ranges from $-42 \sim -22$ dB, and the average equivalent thermal noise of the system is better than -25 dB. The level of thermal noise may increase to some extent with increasing continuous observation duration. Additionally, this study found that the ionosphere significantly affects the quality of the LT-1A satellite polarization data, with a Faraday rotation angle of approximately 5° , causing a crosstalk of nearly -20 dB. In middle- and low-latitude regions, the Faraday rotation angle commonly ranges from 3° to 20° . The Faraday rotation angle can cause polarimetric distortion errors between channels ranging from $-21.16 \sim -8.78$ dB. The interference from the atmospheric observation environment is considerably greater than the influence of about -40 dB system crosstalk errors. This research carefully assesses the radiometric and polarimetric quality of the LT-1A satellite data considering dense vegetation in the Amazon rainforest and provides valuable information to industrial users. Thus, this research holds significant scientific importance and reference value.

Key words: LuTan-1A satellite (LT-1A); Radiometric error; Polarimetric error; Tropical rainforest; Synthetic Aperture Radar (SAR)

1 引言

相比于星载短波合成孔径雷达系统(Synthetic Aperture Radar, SAR),星载长波SAR具有更强的穿透性,逐渐成为遥感对地观测的热点,如日本ALOS-2^[1]、阿根廷SAOCOM-CS^[2]、德国TanDEM-L^[3]等。星载长波雷达系统可以配置全极化SAR传感器(Polarimetric SAR, PolSAR),通过交

替发射水平(Horizontal, H)与垂直(Vertical, V)极化波获取地物全极化散射矩阵,能够提供最多、最完备的地表物理与结构信息,因此全极化数据被广泛应用于地物分类、目标探测、专题制图以及定量反演等领域。

然而SAR硬件潜在的装配误差、发射时带来的剧烈颤动、太空工作环境的剧烈变化等,使得获取

的全极化数据不可避免地受到多种误差干扰, 主要包括辐射误差、极化误差、系统加性热噪声等(即系统畸变)。辐射误差包括天线方向图误差(含天线指向误差)、绝对辐射误差, 前者影响数据在距离向的亮度不均衡, 后者决定SAR图像灰度值转换为归一化雷达截面(Normalized Radar Cross Section, NRCS)的精度^[4,5]。极化误差中的串扰用于量化发射、接收H与V极化电磁波的能量泄露情况, 极化通道不平衡参数表征发射、接收H与V极化电磁波的不一致性问题^[6-8]。系统加性热噪声常用噪声等效后向散射系数(Noise Equivalent Sigma Zero, NESZ)来衡量图像中目标受噪声的影响, 特别是水体、道路、裸土等回波较弱的地物更容易受到NESZ的干扰^[9-12]。

从2009年起, 国际对地观测组织(Committee on Earth Observation Satellites, CEOS)下属的雷达定标验证工作组(SAR Subgroup)对全极化SAR产品的质量提出了一些指导性的建议, 经过十余年的发展达成了一些共识, 如定标后串扰小于 -35 dB, 通道不平衡幅度与相位不超过 ± 0.5 dB, $\pm 10^\circ$ (https://calvalportal.ceos.org/web/guest/sar_subgroup)。此外, 保障极化产品不同波位、不同模式下极化误差的一致性也是极化定标需要解决的重要问题。特别需要强调, 上述指标主要量化了极化误差的绝对精度, 而极化误差在一定时间内的相对稳定性也同样重要, 如传感器某波位的极化通道相位误差为 -9° , 运行一定时间后该误差变为 9° , 虽然绝对误差仍满足 10° 设计指标但误差的变化幅度为 18° , 可能对变化检测、多时相地物分类等应用造成不利^[6], 而现有研究对极化误差的时间稳定性研究较为缺乏。此外, 部分国际研究学者对当前在轨SAR绝对辐射精度与稳定性进行了一些验证, 如: 加拿大RADARSAT-2卫星的绝对辐射精度达到 0.81 dB、辐射稳定性优于 0.47 dB (1σ)^[13]; 德国TerraSAR-X卫星的绝对辐射精度、稳定性优于 0.34 dB, 0.15 dB (1σ)^[14]; 欧洲Sentinel-1A卫星的绝对辐射精度、稳定性优于 0.43 dB, 0.48 dB (1σ)^[15,16]。

SAR传感器是一种主动成像设备, 随着设备运行时间的延长、数据的误差会逐渐增加, 即系统误差具有时变特性(也称为误差漂移)。本文将SAR时变误差划分为短期、中期、长期误差。一般地, 星载极化SAR系统获取一张长度 $30\sim 50$ km的影像只需要对地观测 $3\sim 6$ s, 短期时变误差指设备持续对地观测 3000 km内的误差波动(约数百秒)。在传统对地观测任务中, 遥感、测绘等领域的用户往往只

关注数十至数百公里内的地学问题, SAR开机观测几十秒即可满足应用需求, 系统工作时间很短、设备误差的变化基本可以忽略。然而, 未来的应用将从局部区域逐渐转变为面向全球范围的大尺度地学研究, SAR数据覆盖范围的需求将由数十公里变为上千公里、设备持续工作的时间也将不断增加, 短期时变误差将变得不可忽视。中期误差指SAR设备在数天至数月中的误差波动, 主要源于设备重复开机、关机期间的数据质量改变, 虽然该误差常通过设备内定标硬件进行消除, 但依然需要进行足够多次在轨测试以验证标定精度。长期误差指SAR设备经过数年的运作后, 硬件系统老化、失效引起的数据质量退化, 需要根据地面布设的主动、被动定标器对SAR设备与定标参数进行调整, 尽可能保障产品数据的质量。星载PolSAR发射后采用系统内定标、外场定标两个部分, 尽可能地将数据误差限制在一定水平。其中, 内定标通过SAR搭载的定标硬件设备保证系统误差的时间稳定性, 确保数据包含的误差在一定时间内基本不变; 进一步地通过外场定标布设的角反射器或热带雨林等参考目标, 将内定标无法消除的残留误差进行标定。前者可以保证系统误差的相对稳定性, 后者在数据特性稳定的基础上进行绝对校准。显然, 前者包含的相对定标精度是后续绝对定标的关键性保障: 当SAR内定标精度较高时, 残留的系统误差在数月甚至数年内变化较小, 进行一次绝对定标即可保证高质量数据的长期生产; 当SAR内定标精度较低时, 系统误差具有明显的时间变化特性, 需要高频次的绝对定标才能满足数据生产的需求, 增加了外场定标的工作量、挤占了数据生产时间。

星载数据质量的全方位评价需要在定标场、海洋、热带雨林等多个场景开展, 考虑到星载长波SAR观测容易受到电离层法拉第旋转角的影响, 相应评估方法与短波SAR有所不同。现有的PolSAR影像系统误差评估方法可分为两类: 通过定标器等参考目标评价影像极化通道的比值、RCS等指标; 或根据极化系统误差模型, 采用一些定标方法将参考目标的观测值分解为串扰、通道不平衡、绝对辐射误差等各个误差源。后者不仅是对前者指标的细化, 还直接提供了PolSAR影像的定标参数, 具有质量评价与数据定标的双重作用, 如: 国外利用定标场对ALOS卫星极化误差进行估计时, 布设三面角、 45° 与 22.5° 旋转二面角等不同类型的角反射器作为参考, 将定标器理论值、观测值代入极化畸变模型, 实现系统误差、法拉第旋转角的评价与定标^[17-20]; 而Touzi, Tan, Shimada等人^[21-23]将赤道附近的热

带雨林作为参考,根据高随机散射植被的散射对称性、互易性、旋转对称性作为约束,通过弱化电离层的影响对ALOS卫星串扰、发射与接收通道不平衡进行评价与误差消除。

陆地探测1号卫星(LT-1)作为中国新一代天基长波SAR的代表,因具有丰富的多极化观测模式而备受关注。LT-1是我国第1颗双星民用长波星载SAR,其搭载了两个L波段极化传感器,具备单极化、线性双极化、紧缩双极化、全极化对地观测能力。LT-1A星与B星分别于2022年1月、2月发射进入太阳同步轨道,设计寿命为8年,主要任务包括:高精度数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)生产、大尺度地表沉降信息估计、多极化地表测图与定量反演等。国内已有工作主要聚焦于LT-1双星时序干涉数据DEM生产、沉降信息估计等方面^[24-26],对其极化与辐射观测精度、系统误差稳定性的评估研究较为缺乏。

为了满足LT-1A全极化数据质量评估与标定的需求,本文以亚马逊热带雨林为观测对象,收集了201张未定标的全极化数据,根据系统误差模型将PolSAR影像观测测量分解为各个误差源,从误差稳定性的角度定量评价LT-1A星的辐射精度、极化精度以及系统噪声水平随时间变化的规律。

2 长波全极化SAR系统误差模型

长波极化SAR系统发射的电磁波会受到通道不平衡的幅度、相位影响,经过天线辐射时进一步受到天线串扰的干扰,然后穿过大气电离层对地物进行照射,散射的信号经过大气被SAR天线接收,通过传输通道被接收机记录,该过程可以由式(1)进行总体表征^[7,27]。由于系统发射与接收模块的串扰 $\delta_{i=1,2,3,4}$ 、通道不平衡 $f_{i=1,2}$ 的存在,极化观测的散射矩阵 \mathbf{M} 并不等于地物真实散射矩阵 \mathbf{S} ,电离层法拉第旋转角引起的矩阵 \mathbf{F} 进一步扰动了观测,系统加性热噪声 \mathbf{N} 中的元素满足零均值复高斯分布:

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= A(\phi) \exp(j\varphi) \mathbf{RFSFT} + \mathbf{N} \\ &\rightarrow \begin{bmatrix} M_{HH} & M_{HV} \\ M_{VH} & M_{VV} \end{bmatrix} \\ &= A(\phi) \exp(j\varphi) \begin{bmatrix} 1 & \delta_3 \\ \delta_4 & f_2 \end{bmatrix} \\ &\quad \cdot \begin{bmatrix} a & b \\ -b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ -b & a \end{bmatrix} \\ &\quad \cdot \begin{bmatrix} 1 & \delta_1 \\ \delta_2 & f_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{HH} & N_{HV} \\ N_{VH} & N_{VV} \end{bmatrix} \quad (1) \end{aligned}$$

其中,实数 $A(\phi)$ 为绝对辐射定标因子、相位 φ 表征传感器到目标绝对距离引起的相位, j 为虚数符

号。当极化影像未进行天线方向图校准时,绝对定标因子 $A(\phi)$ 是SAR视线天底偏角 ϕ (off nadir angle)的函数,表现为图像沿距离向亮暗不均匀^[5,19]。式(1)将极化天线与通道的误差糅合进发射端 \mathbf{T} 与接收端 \mathbf{R} ,从数据的角度量化了影像产品受到的系统误差干扰,除了 \mathbf{F} 、 $A(\phi)$ 与相位 φ 外其他所有元素均为复数。 $a = \cos\omega$ 与 $b = \sin\omega$ 分别为法拉第旋转角 ω 的余弦、正弦函数,法拉第旋转角(2)主要受传感器载频 f_0 、电磁波传播方向与地磁线夹角 ψ 、电离层自由电子含量(Total Electron Content, TEC)以及SAR视角 ϕ 影响, B 为当地磁通密度,其余成分为物理常数^[28-30]。由于大多数星载SAR卫星为太阳同步轨道,其通过赤道时正侧观测向与地磁线夹角接近 90° 、 $\cos\psi$ 接近0,对应法拉第旋转角接近 0° 。

$$\omega = \frac{e^3}{8\pi^2 \epsilon_0 m^2 c} \frac{B \cos\psi}{f_0^2} \text{TEC} \sec\phi \quad (2)$$

式(1)可以进行矢量化表达为式(3),其中系统串扰矩阵为 \mathbf{X} 、交叉极化通道不平衡矩阵为 \mathbf{Q} 、同极化通道不平衡矩阵为 \mathbf{K} 、电离层法拉第旋转角表示为 $\mathbf{\Omega}$:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M_{HH} \\ M_{VH} \\ M_{HV} \\ M_{VV} \end{bmatrix} &= Y \begin{bmatrix} 1 & w & v & vw \\ u & 1 & uv & v \\ z & wz & 1 & w \\ uz & z & u & 1 \end{bmatrix} \\ &\quad \cdot \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &\quad \cdot \begin{bmatrix} a^2 & ab & -ab & -b^2 \\ -ab & a^2 & b^2 & -ab \\ ab & b^2 & a^2 & ab \\ -b^2 & ab & -ab & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{HH} \\ S_{VH} \\ S_{HV} \\ S_{VV} \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} N_{HH} \\ N_{VH} \\ N_{HV} \\ N_{VV} \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{M} = \mathbf{YXQK\Omega S} + \mathbf{N} \quad (3) \end{aligned}$$

式(1)与式(3)是量化极化误差的一般形式,也是极化定标采用的最常用形式,两公式的元素具有严格数学转换关系,可以由参考文献^[7]提供的公式进行推导:

$$\begin{aligned} u &= \delta_4, v = \frac{\delta_2}{f_1}, w = \frac{\delta_3}{f_2}, z = \delta_1, k = f_2^{-1}, \\ \alpha &= \frac{f_2}{f_1}, Y = f_1 f_2 A(\phi) \exp(j\varphi) \quad (4) \end{aligned}$$

本文对收集的LT-1A数据进行研究时发现HH与VV极化的数据已经经过天线方向图校准,然而HV与VH极化还未校准。因此本文将误差式(3)改为

$$M = YGXQK\Omega S + N \quad (5)$$

其中, 对角阵 $G = \text{diag}\{1, g(\phi), g(\phi), 1\}$, $g(\phi)$ 为 HV 与 VH 未校正的天线方向图函数。特别需要强调, 后续发布的 LT-1A 全极化数据可能已经进行了 HV, VH 天线方向图校正。用户可以观察影像距离向是否存在亮暗不均匀, 来判断是否存在未校准的天线方向图。

3 基于热带雨林观测的误差稳定性评估方法

本文在极化误差模型的基础上, 首先利用热带雨林植被的均质特性对 LT-1A 天线方向图进行校正, 再对 LT-1A 的辐射稳定性开展评估, 然后根据地磁场模型、电离层模型估计法拉第旋转角作为先验, 通过散射对称性、散射互易性、散射旋转性假设对串扰、通道不平衡进行评估, 最后在散射互易性的基础上对系统加性噪声进行评估, 具体流程如图 1 所示。

3.1 HV 与 VH 天线方向图估计

热带雨林植被均质性较好, 为畸变参数的求解提供了便利, 无论星载短波还是长波 SAR 都采用雨林观测对天线方向图形状进行估计。SAR 系统对原始雷达回波数据进行二维相干成像, 灰度方程相比普通非相干雷达灰度方程有所不同^[4,5]。当忽略法拉第旋转角、串扰、通道不平衡时, HV 或 VH 原始回波信号的功率 P_r 为

$$P_r = \frac{P_t g(\phi)^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma + P_n \quad (6)$$

P_t 为雷达系统发射功率、 λ 为 LT-1A 发射信号波长、 R 为传感器到目标斜距、 σ 为目标 RCS、 P_n 为雷达系统热噪声功率, $g(\phi)$ 为待估计的 HV 或 VH 通道天线方向图。考虑二维成像过程中相干滤波器带来的功率累积, 未定标 SAR 图像的功率 P_s 为^[4,5]

$$\begin{aligned} P_s &= E(|M_{VH}|^2) \approx \left(\sqrt{P_r} N_R N_A\right)^2 \\ &= \frac{P_t g(\phi)^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \left(\tau_s f_s \cdot \frac{\lambda R f_a}{2\xi_a V_a}\right)^2 G\sigma + \sigma_n \\ &= \frac{P_t \lambda^2}{(4\pi)^3} \left(\tau_s f_s \cdot \frac{\lambda f_a}{2\xi_a V_a}\right)^2 G \frac{g(\phi)^2}{R^2} \frac{\sigma_0 \rho_r \rho_a}{\sin\theta} + \sigma_n \\ &= C \cdot \frac{g(\phi)^2}{R^2} \frac{\sigma_0}{\sin\theta} + \sigma_n \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)假设地物散射过程与系统噪声不相干。其中, $E(\cdot)$ 为数学期望, 常以空间平均的方式消除分布式地物相干斑噪声; $N_R = \tau_s f_s$ 表示距离向成像参与积分的像素个数, τ_s 为发射脉冲时长、 f_s 为信号采样频率; $N_A = \lambda R / 2\xi_a$ 表示方位向成像参与积分的像素个数, ξ_a 为方位向分辨率约等于天线长度一半, f_a 为脉冲重复频率, V_a 为传感器运动速度; σ_n 为 P_n 成像后在 SAR 图像产生的加性噪声; ρ_r, ρ_a 为距离向与方位向像素尺寸; G 为数据处理时各种增益、衰减等入射角、斜距无量纲; 星载观测中入射角 θ 与视线天底偏角 ϕ 不相等, 需要根据几何关系进行转换^[5]。为了估计式(7)中天线方向图 $g(\phi)$, 需要利用热带雨林的散射均质特性。在遥感理论中热带雨林假设满足余弦散射: $\sigma_0 = \alpha \cdot \cos\theta$, α 为目标特性决定的入射角无关常数^[31]。热带雨林地区 HH 或 VV 的 α 经验散射值在 -6.5 dB 左右, 因此建议在散射系数 $\gamma_0 = \sigma_0 / \cos\theta = \alpha$ 下进行 $g(\phi)$ 的估计^[32]:

$$\begin{aligned} E(|M_{VH}|^2) &= C \frac{g(\phi)^2}{R^2} \frac{\gamma_0}{\tan\theta} + \sigma_n \rightarrow g(\phi)^2 \\ &\propto E(|M_{VH}|^2) R^2 \tan\theta \end{aligned} \quad (8)$$

考虑到 LT-1A 系统加性热噪声显著低于 -20 dB (见实验部分), 本研究在式(8)中忽略 σ_n 的影响。天线方向图用于校准 SAR 图像距离向亮度不均, 因此可以忽略常数项 C 只对 $g(\phi)$ 形状进行估计, 再采用经验天线模型对结果拟合以进一步提高精度。用户在使用 SAR 产品时常希望图像强度进行空间平均消除相干斑后可获取 σ_0 , 因此联合式(1)与式(8)可得绝对辐射定标因子 $A(\phi) = C/R^2 \sin\theta$, 入射角 θ 是天底偏角 ϕ 的函数。可以采用雨林附近布设的定标器准确估计 C , 或假设雨林的 HH 极化 γ_0 为 -6.5 dB 对 C 进行粗略估计。

此外, 热带雨林地区存在很多河流、砍伐区、经济作物开垦区, 需要先提取散射特性稳定的均质森林像素再输入到估计器(8)。Shimada 等人^[5]假设图像上雨林植被面积占优, 而非雨林目标像素少、对图像整体直方图的影响小, 基于此将 SAR 影像分为若干不重叠的图像块, 然后统计每块图像强度的直方图, 以每个距离向上所有图像块直方图的均值为参考, 若某块的直方图形状与参考直方图相似则认为该块的像素可用于 $g(\phi)$ 估计。但该方法在非雨

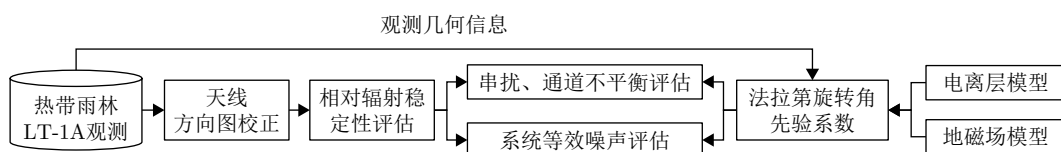


图 1 基于热带雨林观测的 LT-1A 数据评估流程

Fig. 1 The quality evaluation of LT-1A based on tropical rainforest vegetation

林地物占比面积较大时表现不佳,较多的河流、砍伐区等目标干扰了参考直方图的估计,会导致雨林像素提取失败。

人工目标均质性比自然地物差,对应的变差系数(Coefficient of Variation, CV)较大,而变差系数平方的倒数为ENL (Equivalent Number of Looks),因此自然目标比人工目标具有更高的ENL,可以采用ENL进行自然地物的提取。此外,经典极化散射理论中植被去相干过程会降低HH与VV的相干系数 R_{HHVV} ,而Bragg散射占优的水体、裸土HH与VV的相干性较高,因此可以将 R_{HHVV} 较低的像素视为植被。然而,平静的水体、表面光滑裸土散射回波弱,其 R_{HHVV} 容易受到系统噪声去相干的影响表现出低值。考虑到系统热噪声呈现通道失相干、互易条件下的自然地物HV与VH回波呈现高相干,本文进一步采用HV与VH相干系数 R_{HHVV} 剔除 R_{HHVV} 无法去除的平静水体、表面光滑裸土。本文采用自主极化定标中常用的等效视数ENL, HH与VV相干系数幅度 R_{HHVV} , HV与VH相干系数幅度 R_{VHHV} 作为3个特征^[6],采用人工给定的阈值进行植被像素的提取。参考作者前期研究结果^[6,7],本文保留等效视数ENL高于0.3的像素作为自然地物,再保留HV与VH相干系数幅度高于0.9的像素作为非光滑水体;考虑到LT-1A影像过采样率相对较高,本文将HH与VV相干系数幅度低于0.5的像素作为植被。

3.2 极化串扰、通道不平衡估计

法拉第旋转角 ω 源于电磁波穿越大气电离层时发生的极化改变,在不同时间、不同地理位置、不同太阳辐射状态下 ω 均不相同。由于 ω 不属于硬件系统带来的误差,因此 Ω 的校正不属于极化定标的范畴,然而电离层引起的法拉第旋转角会干扰系统串扰、通道不平衡的求解^[33]。相比其他地区的森林,亚马逊热带雨林位于赤道附近,当地的地磁场矢量与太阳同步轨道卫星的正侧观测方向接近垂直,法拉第旋转角 ω 近似为零,即 Ω 为单位矩阵。在极化理论中沿着雷达入射平面对称的目标满足散射对称性假设,即 $E(S_{xx}S_{xy}^*) = 0$ 且 $x, y \in \{H, V\}$;而单站式雷达对地观测时绝大多数自然目标产生的交叉回波满足互易性假设,即 $E(|S_{HV}|^2) = E(|S_{VH}|^2) = \text{Re}\{E(S_{VH}S_{HV}^*)\}$ 且 $\text{Im}\{E(S_{VH}S_{HV}^*)\} = 0$,其中上标*为共轭、 $\text{Re}\{\cdot\}$ 与 $\text{Im}\{\cdot\}$ 为复数的实部与虚部。现有的极化定标方法可以对影像中存在的误差进行估计,如Quegan^[34]相比van Zyl^[35]方法可以对交叉通道不平衡进行估计,但在串扰估计时忽略了二阶串

扰量与交叉通道不平衡的影响;Ainsworth等人^[36]方法虽然通过迭代方式提高串扰二阶量的估计精度,但较少的约束导致串扰低估。本文假设热带雨林较好满足散射对称性,将Ainsworth中A与B参数设置为0(记为Ainsworth0方法),让算法收敛于散射对称性约束,从而提高串扰的估计精度。

本文对式(5)中HV与VH天线方向图矩阵 G 进行校准,为简化起见仍然将天线方向图校正后数据记为 M 且有 $M = G'^{-1}YGXQKS + G'^{-1}N$,其中 G' 为 G 估计值。随后将每张图像获取的植被像素进行平均,输入到改进的Ainsworth0定标算法^[6,37]对式(5)中串扰矩阵 X 、交叉通道不平衡矩阵 Q 的元素 u, v, w, z, α 进行估计,产生初步标定结果:

$$M' = (X'Q')^{-1}M = Y(X'Q')^{-1}G'^{-1}GXQKS + (X'Q')^{-1}G'^{-1}N \quad (9)$$

其中, X', Q' 为相应畸变的估计量。然后根据热带雨林的旋转对称性散射假设 $E(|S_{HH}|^2) = E(|S_{VV}|^2)$ 与 $\text{Im}\{E(S_{HH}S_{VV}^*)\} = 0$ 进行同极化通道不平衡 k 的估计^[6,38,39]:

$$k = \left\{ \frac{E(|M'_{HH}|^2)}{E(|M'_{VV}|^2)} \right\}^{1/4} \cdot \exp(j\angle E(S_{HH}S_{VV}^*)/2) \quad (10)$$

其中,符号 \angle 表示复数取相位操作。特别需要强调,LT-1A传感器发射的L波段信号穿透性较强,雨林地区部分植被下的地表仍然有可能产生地表散射、二面角散射回波,因此估计器(10)在一些地区可能会高估 k 的幅度与相位。因此布设在热带雨林地区的定标器有助于 k 的准确估计,本研究收集的数据中没有包含定标器,仅将基于自然地物的自主定标结果作为LT-1A数据的初步评估。将估计的 k 与绝对辐射系数 Y 进行标定后可以获取最终的全极化数据 S' :

$$S' = \left\{ (Y'G'X'Q'K')^{-1}YGXQK \right\} \cdot S + (Y'G'X'Q'K')^{-1}N \quad (11)$$

由于估计误差的存在 S' 一般近似等于地物真实散射矩阵 S ,估计的校准参数与 N 一起构成4个极化通道NESZ:

$$\sigma_n^{xy} = (Y'G'X'Q'K')^{-1}E(|N_{xy}|^2) \quad (12)$$

其中, $x, y \in \{H, V\}$ 。

3.3 等效系统热噪声估计

SAR等效系统热噪声表征了硬件系统可量测的

最低信号下限(Noise floor), 图像中低于NESZ的像素应被视为不可靠的观测结果, 是SAR数据处理中重要的先验参数。特别是利用LT-1A数据进行海洋风速反演、地表土壤含水量估计、冰雪含水量估计、洪灾检测等应用时, 需要考虑NESZ对影像中弱散射地物回波的干扰。现代SAR系统可以通过关闭发射模块, 将接收机获取的纯噪声数据当作原始回波, 经过成像匹配滤波、天线方向图校准、定标系数校准等步骤获取NESZ^[40,41]; 也可以对平静海面、冰原、沙漠等大面积、均质的弱回波目标进行观测来估计NESZ, 进一步验证硬件回路获取的系统噪声精度。

基于自然目标的NESZ估计方法可以分为两大类: 基于最小散射强度的估计方法、基于极化互易性的估计方法。前者对平静海面或光滑冰盖进行连续观测, 将每个距离向上SAR影像强度的最小值作为NESZ^[42,43]。但受到海风与引力的影响, 海洋表面并不光滑, 容易发生Bragg后向散射造成NESZ的高估; 而LT-1A卫星发射的L波段信号穿透性强, 对冰原、沙漠观测时容易穿透介质表层产生体散射回波, 也会造成NESZ的高估。基于极化互易性的估计方法假设目标满足散射互易性, 且 \mathbf{N} 中4个极化通道的噪声不相干、功率相同, 即^[10,44,45]

$$\begin{aligned} E(|N_{HH}|^2) &= E(|N_{HV}|^2) = E(|N_{VH}|^2) \\ &= E(|N_{VV}|^2) = \sigma_n \end{aligned} \quad (13)$$

天线方向图校正后, 忽略系统串扰与法拉第旋转角估计 σ_n ^[6]:

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_n &= \frac{1}{2} \{E(|M_{HV}|^2) + E(|M_{VH}|^2)\} \\ &\quad - \frac{1}{2} \sqrt{\{E(|M_{VH}|^2) - E(|M_{HV}|^2)\}^2 + 4|E(M_{VH}M_{HV}^*)|^2} \end{aligned} \quad (14)$$

估计器(14)不受到交叉通道不平衡 \mathbf{Q} 、同极化通道不平衡 \mathbf{K} 的影响, 也不需要没有后向散射回波的地物作为参考, 可以较为鲁棒地估计系统热噪声。本文采用式(14)进行逐像素噪声估计, 然后在每个距离向保留最小 σ_n 作为该入射角下的最终结果, 结合估计的标定系数 $(\mathbf{Y}'\mathbf{X}'\mathbf{Q}'\mathbf{K}')^{-1}$ 即可获取等效NESZ^[10]:

$$\sigma_n^{xy} = (\mathbf{Y}'\mathbf{X}'\mathbf{Q}'\mathbf{K}')^{-1} \tilde{\sigma}_n \quad (15)$$

式(14)输入的观测值 $[M]$ 已在3.1节进行了天线方向图校正, 因此式(15)相比式(12)不需要加入 \mathbf{G}' 获取NESZ。虽然热带雨林可以较好地估计天线方向图、极化畸变等, 但相比回波较弱的水体等参考目

标, 植被会引起系统加性噪声的高估。本研究收集到的数据有限, 基于热带雨林的系统加性噪声估计方法只提供了噪声上限的估计值。

4 实验结果与分析

本文的研究重点在于LT-1A传感器误差的时变特性而非其绝对定标精度, 因此作者在热带雨林地区收集了201张未定标的全极化数据对辐射、极化误差稳定性开展评估, 数据分布范围如图2所示。LT-1A数据产品中Strip4观测方式生产全极化条带模式产品, 每景SAR影像覆盖地面宽度为30~33 km, 地面距离向分辨率为4.3~5.9 m、方位向分辨率为7.0~9.8 m。SAR系统波位对应观测时的视线天底偏角, 该参数决定产品的入射角范围。一般而言, 星载SAR进入测区后会根据编程指令自动开机, 然后对地球表面进行持续成像, 观测任务结束后自动关机。本文收集了43, 46, 53 3个波位的全极化产品, 分别包含69张、66张、66张影像; 每个波位对雨林进行两次观测, 每次观测条带总长度约1000 km。

本文主要从以下3个方面对LT-1A的辐射误差、极化误差、系统噪声的稳定性进行评估:

(1) 每次观测均采用不间断的成像方式获取数据, 评估系统持续开机运作时是否存在误差的短期时变现象, 即对一轨数据进行评估。

(2) 每个波位在一周时间内对雨林区进行两次观测, 评估系统在不同时间重返观测时是否存在误差的中期时变现象。

(3) 评价电离层法拉第旋转角对系统误差估计的影响。

星载SAR定标研究中热带雨林常被视为理想的同质目标评估天线方向图、绝对定标系数、极化质量等参数。如图3(a), 图3(b)所示, 本文展示了散射较为均匀的雨林Pauli假彩色影像, 左右两侧色调偏红、中间色调偏绿色, 表明某些极化通道天线方向图未校准, 从而引起假彩色影像在距离向的颜色变化不均, 因此可以在式(8)的基础上利用雨林区对 $g(\phi)^2$ 进行估计; 而图3(c), 图3(d)中水体与森林散射差异大于天线方向图在距离向的变化, 在灰度拉伸时掩盖了未校准天线方向图带来的辐射畸变, 因此假彩色图像的目视显示效果相对图3(a), 图3(b)较好。图3(b)展示了雨林区常见的两种均质植被: 右上角的纹理丰富植被区、左下角纹理不丰富植被区, 前者的纹理变化会带来一定的散射异质性, 且NRCS比后者高约1 dB。如图3(c)所示, 本文还在少部分LT-1A数据的近距端观察到了模糊现象, 初步猜测可能由方位向、距离向模糊或射频频干

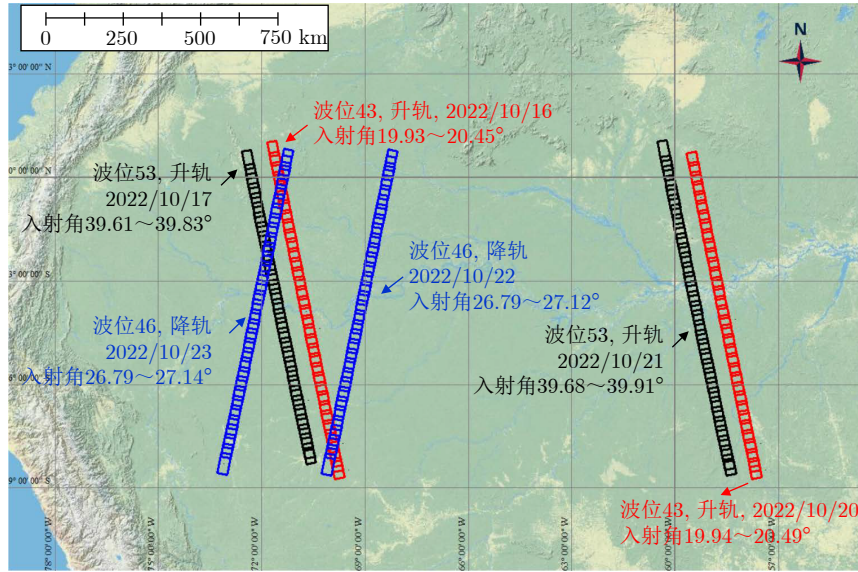


图2 本文LT-1A热带雨林观测范围(共包含201景升轨、降轨全极化数据)

Fig. 2 The LT-1A observation areas in the Amazon rainforest (including 201 images with full polarization of ascending and descending orbits)

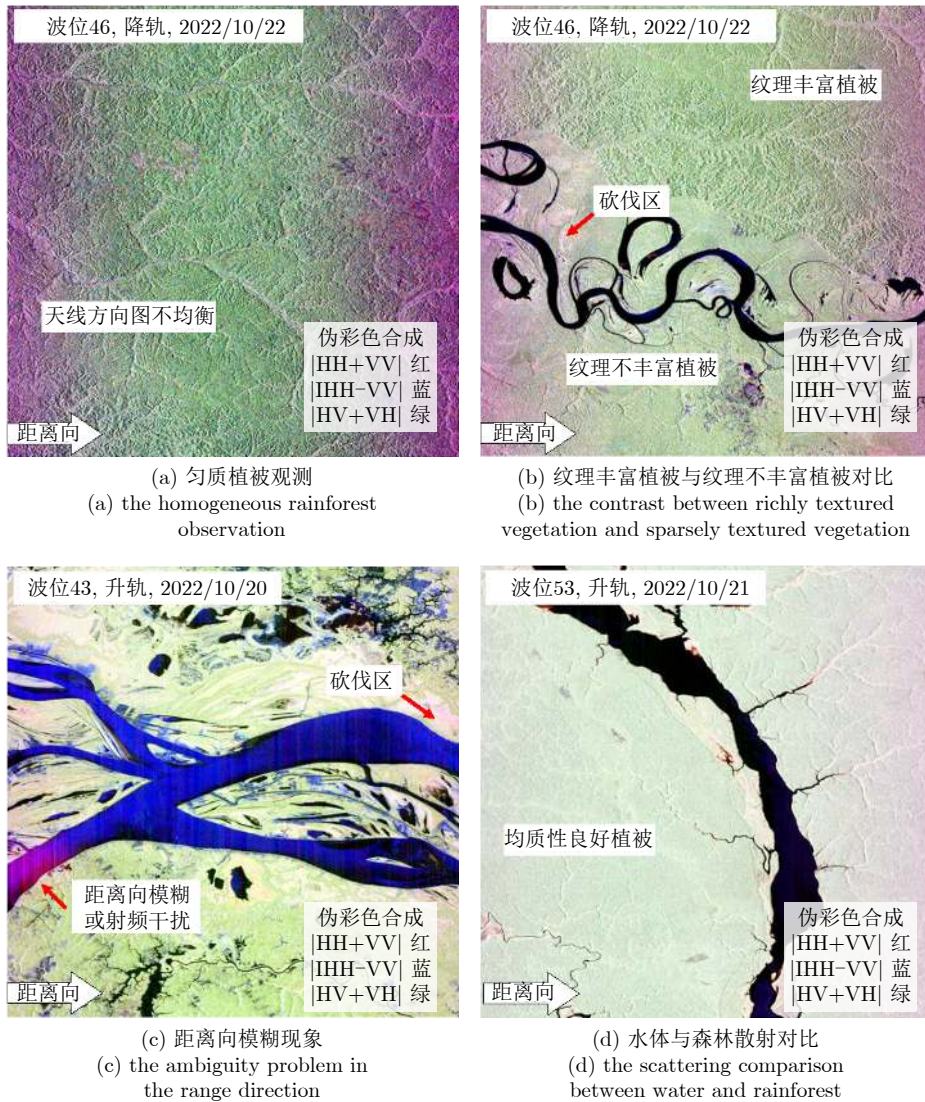


图3 LT-1A热带雨林观测数据示例(a)–(d)为Pauli假彩色合成影像

Fig. 3 The LT-1A observations in the Amazon rainforest (a)–(d) present the PauliRGB images

扰引起。此外, 砍伐、火灾以及其他人为活动也增加了雨林地区森林的异质性, 因此在进行星载SAR数据定标、质量评估时需要考虑雨林目标潜在的植被散射多样性影响。

4.1 辐射误差稳定性评估

天线方向图估计时需要先对同质性高的植被进行提取, 由于本研究收集的数据包含大量非植被地物, 本文首先对含有模糊的距离向数据进行裁剪, 然后保留等效视数ENL高于0.3的像素作为自然地物, 再保留HV与VH相干系数幅度高于0.9的像素作为非水体目标, 最后将HH与VV相干系数幅度低于0.5的像素作为植被输入式(8)对 $g(\phi)^2$ 进行估计。本文先利用头文件存储的量化系数“quantifyValue”

将16位TIFF影像转换位32位浮点数据, 根据“pixelValueID”记录的“SIGMMA”项假设灰度值已经为 σ_0 形式, 再调整式(8)进行天线方向图估计: $g(\phi)^2 \propto E(|M_{VH}|^2)/\cos\theta$ 。

图4展示了3个波位的天线方向图估计结果, 红色HH与VV散点没有展现出明显的距离向变化趋势, 因此同极化通道天线方向图经过了较好的校准; 而灰色HV与VH散点具有倒U形, 表明交叉极化通道影像近距、远距端图像亮度低, 造成了图3(a)与图3(b)左右两端绿色成分偏少。为了对HV与VH极化通道天线方向图进行校准, 本文采用多项式天线模型(16)对交叉极化通道天线方向图进行拟合, 其中 ϕ_0, a, b, c 为多项式待拟合参数, $g(\phi)_{dB}^2$ 为以dB表示的天线方向图 $g(\phi)^2$ 。

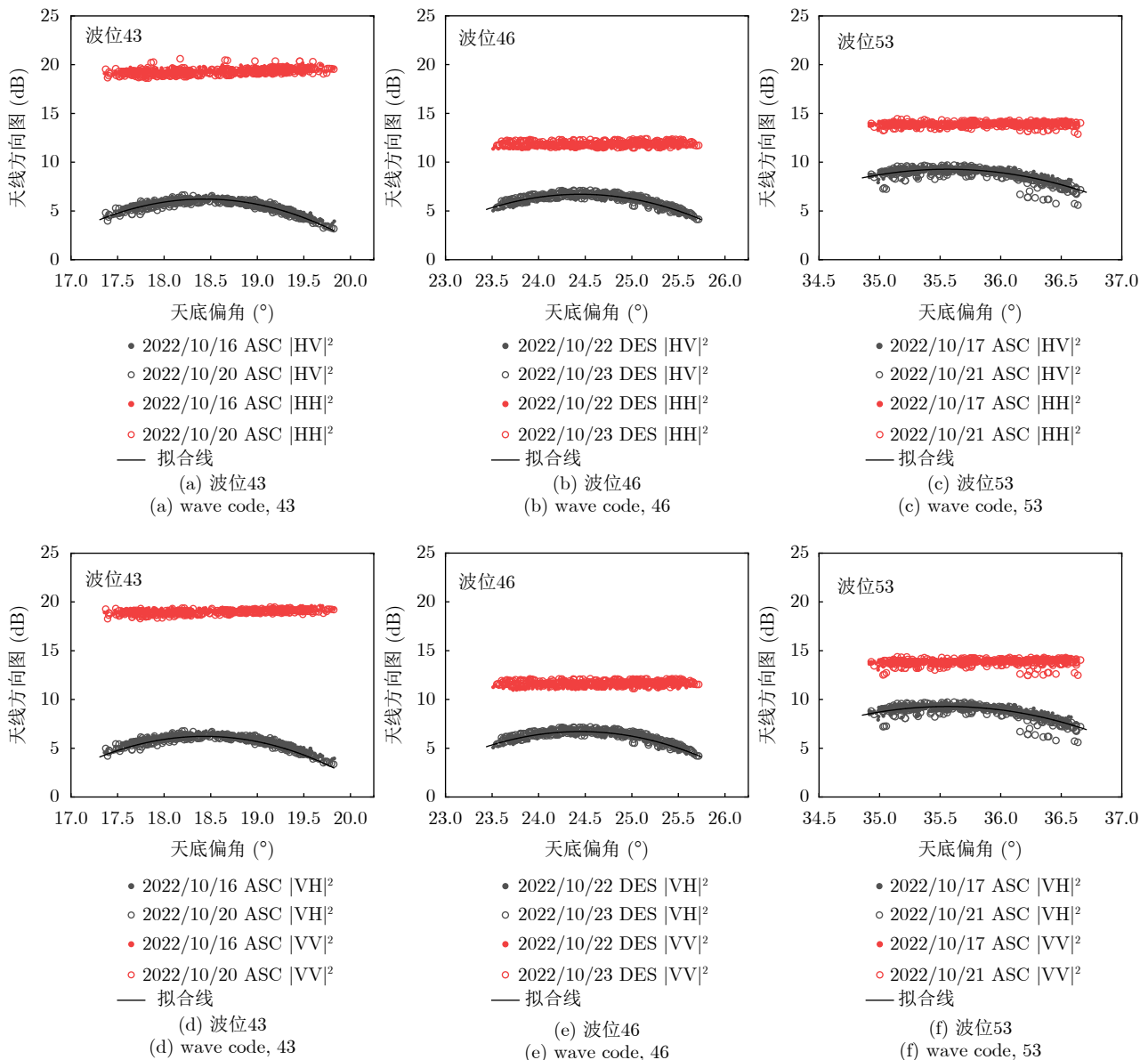


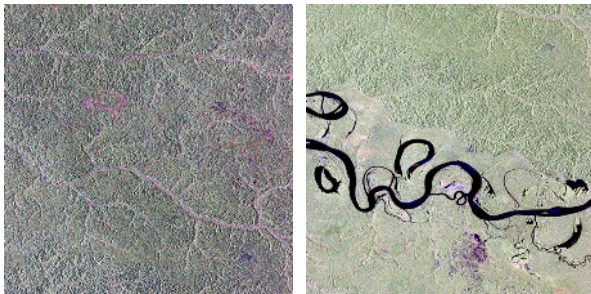
图 4 基于热带雨林的LT-1A天线方向图估计结果

Fig. 4 The antenna pattern estimation results based on the Amazon rainforest observations

$$g(\phi)_{\text{dB}}^2 = a(\phi - \phi_0)^2 + b + c(\phi - \phi_0)^4 \quad (16)$$

根据拟合的天线方向图进行校准后可以消除图像距离向的亮度不均衡, 图5展示了图3(a)与图3(b)校准后Pauli假彩色影像。图3(c)与图3(d)中植被与水体亮度反差大, 天线方向图校准后假彩色影像目视效果变化不大, 故未作展示。

表1展示了经天线方向图校准后同一天所有极化影像上雨林像素的均值与三倍标准差。如图2所示, 相同日期的数据由LT-1A进行不间断的连续成像获取, 雨林像素的标准差表征了传感器在1000 km范围内的辐射误差波动。除53波位HV, VH极化在2022/10/21的三倍标准差超过1 dB外, 其余波位的三倍标准差小于1 dB, 意味着LT-1A在1000 km内辐射波动小于1 dB的可能性高于99.7%。考虑到图4(c)与图4(f)近距端与远距端的少量散点波动较大, 本文认为2022/10/21标准差的增大源于雨林参考样本选取误差, 而非传感器的短期误差升高。此外, 表1中同一波位不同时间影像的辐射均值变化不大, 证明了4天时间内LT-1A对地重复观测的辐射稳定性好, 辐射的中期误差波动均小于0.5 dB, 如: 波位43在2022/10/16与2022/10/20两天内各个极化通道均值的差异小于0.22 dB、波位46小于0.25 dB、波位53小于0.2 dB。然而, 本文发现43波位的同极化HH, VV辐射强度比HV, VH高12~13 dB, 相



(a) 图3(a)校准后
(a) the calibrated PauliRGB image of Fig. 3(a)

(b) 图3(b)校准后
(b) the calibrated PauliRGB image of Fig. 3(b)

图5 天线方向图校准后LT-1A数据示例

Fig. 5 The LT-1A samples after calibrating the antenna pattern

比46, 53波位的4~6 dB明显偏高。根据Freeman-Durden极化分解模型, 具有高度随机散射的植被体散射成分中HH, VV极化强度比HV, VH高约3倍即4.77 dB, 波位46, 波位53的同极化与交叉极化辐射差异符合经典极化理论; 而波位43的极化通道辐射差异过大可能源于量化系数错误、人工增益参数(Manual Gain Control, MGC)的错误等, 需要在后续定标中予以关注。本文将43波位HH与VV极化散射强度减少7.5 dB作为MGC误差的补偿, 并在此基础上进行极化误差与系统等效噪声的估计。

4.2 极化误差稳定性评估

本文对LT-1A数据的HV, VH极化通道进行天线方向图校准后, 即可对极化误差进行估计。考虑到热带雨林植被具有较高的散射随机性, 本文在散射对称性、散射互易性的基础上采用Ainsworth0算法对串扰、交叉通道不平衡进行估计, 利用估计值对数据进行初标定后利用旋转对称性假设根据式(10)进行同极化通道不平衡的估计。然而, 由于大气干扰的存在, 3.2节的估计结果为包含系统极化误差与法拉第旋转角的“总体极化畸变”(亦称为“总体误差”), 需要在地面布设多个不同类型定标器才能实现系统误差与大气影响的分解。在ALOS-1, ALOS-2等长波SAR传感器的定标中假设雨林地区法拉第旋转角小于5°, 不会对极化畸变参数的估计造成影响。为了验证上述假设的正确性, 本文以大气模型估算的法拉第旋转角为参考来对“总体误差”进行评价, 观察“总体误差”中LT-1A系统极化误差的水平。本文根据式(2)计算了每张LT-1A影像的法拉第旋转角作为参考, 其中电离层自由电子数TEC从电离层模型IRI获取(International Reference Ionosphere, <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/>), 热带雨林的磁通密度矢量来自全球地磁模型WMM(World Magnetic Model, <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml>)。

图6展示了雨林地区每张LT-1A影像估计的“总体极化畸变”与式(2)计算的法拉第旋转角。

表1 天线方向图校准后不同极化影像雨林像素均值(Mean)与三倍标准差(Std)

Tab. 1 The Mean and 3 times Std level of the Amazon rainforest observations after calibrating the antenna pattern

极化通道	波位43 (dB) Mean±3*Std		波位46 (dB) Mean±3*Std		波位53 (dB) Mean±3*Std	
	2022/10/16	2022/10/20	2022/10/22	2022/10/23	2022/10/17	2022/10/21
HH	19.43±0.80	19.26±0.95	11.70±0.61	11.91±0.63	13.96±0.56	13.87±0.69
HV	6.34±0.72	6.13±0.63	6.63±0.67	6.80±0.62	9.36±0.77	9.18±1.20
VH	6.51±0.72	6.30±0.63	6.69±0.68	6.86±0.63	9.38±0.76	9.20±1.23
VV	19.15±0.61	18.95±0.62	11.47±0.70	11.71±0.61	13.92±0.60	13.81±0.98

图6(a)—图6(c)展示了“总体极化畸变”串扰畸变 u, v, w, z 中的最大值, 用于量化系统发射与接收H, V极化的最低纯净程度。散点形状表示了不同日期的估计结果, 颜色条表示同一天但不同时刻数据的估计结果, 即将第1张影像成像时间记为0, 其他影像相对第1张影像的时间作为颜色索引, 表明了LT-1A持续观测时系统误差随时间的变化过程。图6(a)—图6(c)中Ainsworth0算法估计的最大串扰值与电离层模型提供的法拉第旋转角有显著的相关性: 当法拉第旋转角接近0时最大串扰值较低, 当法拉第旋转角逐渐增大时最大串扰逐渐增高。对式(3)中法拉第旋转角矩阵 Ω 进行变换得式(17), 其形式与串扰矩阵 X 相似, 可以将 ω 表征为电离层带来的等效串扰: $u_F = -\tan\omega$, $v_F = -\tan\omega$, $w_F = \tan\omega$, $z_F = \tan\omega$ 。

$$\Omega = (\cos\omega)^2 \begin{bmatrix} 1 & \tan\omega & -\tan\omega & -(\tan\omega)^2 \\ -\tan\omega & 1 & (\tan\omega)^2 & -\tan\omega \\ \tan\omega & (\tan\omega)^2 & 1 & \tan\omega \\ -(\tan\omega)^2 & \tan\omega & -\tan\omega & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

由于法拉第旋转角对数据的影响与系统串扰相似, Ainsworth0算法通过散射对称性假设估计的串扰是 $\tan\omega$ 与系统畸变 u, v, w, z 以及 k 与 α 的总和。根据式(2)可知: 当雷达视线向与当地磁场矢量夹角为 90° 时法拉第旋转角为0, 此时Ainsworth0算法的解算结果才是系统串扰的估计量。图6(a)与图6(c)中 ω 为0时数据的串扰低于 -35 dB甚至达到 -40 dB, 表明LT-1A全极化系统具有较好的极化通道隔离度。

然而, 法拉第旋转角受到太阳辐射、地球磁场影响具有明显的时变、空变特性, SAR系统误差也具有潜在的时间变化可能, 两者的相互耦合增加了星载长波SAR产品质量评估的难度。虽然图6(a)与图6(c)中2022/10/20, 2022/10/21串扰估计结果以 0° 法拉第旋转角为中心先下降、再上升, 但2022/10/16, 2022/10/17日的串扰持续升高过程依然有可能由系统持续成像时的不稳定引起, 不能对“LT-1A极化串扰误差是否存在时变性”这一问题做出判断。进一步地考虑到图6(b)中串扰随着观测时间增加而下降、随法拉第旋转角增加而增大, 本文认为图6(a)—图6(c)中串扰的升高主要由法拉第旋转角引起的, 而非系统误差的时变特性造成的。相比于串扰的短、中期时变误差, 数据质量更容易受到法拉第旋转角的影响, 如: $1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ$ 法拉第旋转角造成极化质量的退化程度与 -35.16 dB, -29.14 dB, -25.61 dB, -23.10 dB, -21.16 dB的系统串扰相当。非赤道地区星载L波段传感器对地观

测时的法拉第旋转角常为 $3^\circ \sim 20^\circ$, 电离层对极化质量造成的退化已经远高于系统极化畸变的影响, 需要在应用前根据电离层先验或者影像自校准技术对 ω 予以消除^[17,46]。

本文在图6绘制了法拉第旋转角引起的等效串扰(灰色实线), 虽然图6(a)—图6(c)中Ainsworth0估计的最大串扰与 $\tan\omega$ 趋势基本一致, 但图6(b)相对图6(a)与图6(c)较差, 可能的潜在原因包括:

(1) IRI电离层模型获取的TEC数据时间分辨率较高, 每15分钟一张自由电子浓度图, 但在空间上只能每 1° 提供一个格网点(约110 km); 而LT-1A全极化影像覆盖幅宽约30 km, 较低的TEC空间分辨率不能提供准确的电离层参考信息。

(2) WMM地磁模型仅提供地球大范围磁场的总体趋势以及缓变过程, 对小尺度局部区域的地磁矢量、地磁强度估计精度不足, 也造成了图6(b)中法拉第旋转角的估计误差。

(3) SAR系统极化串扰的相位具有一定随机性, 与法拉第旋转角以及交叉通道、同极化通道进行非线性组合后会影响到Ainsworth0算法的估计精度; 此外图6(b)中串扰量级已经低于 -30 dB, 系统加性热噪声也可能对估计产生影响。

式(3)中交叉极化通道不平衡 α 主要影响HV与VH幅度、相位不均衡, 其与同极化通道不平衡 k 共同影响HH与VV幅度、相位不均衡。为了评价LT-1A极化影像误差, 本研究根据系统误差模型(3)将畸变 u, v, w, z, k 与 α 重构为“定标器伪观测”。

$$\begin{aligned} M^{\text{TR}} &= X'Q'K'[1, 0, 0, 1]^T, \\ M^{45\text{DR}} &= X'Q'K'[0, 1, 1, 0]^T \end{aligned} \quad (18)$$

其中, $[1, 0, 0, 1]^T$, $[0, 1, 1, 0]^T$ 为三面角定标器(TR)、 45° 旋转二面角定标器(45DR)的理论极化散射矢量, 上标T为转置符号。式(18)对应极化通道比 $M_{\text{HV}}^{45\text{DR}}/M_{\text{VH}}^{45\text{DR}}$, $M_{\text{HH}}^{\text{TR}}/M_{\text{VV}}^{\text{TR}}$ 表征了所有极化误差对影像的共同影响, 当 $|M_{\text{HV}}^{45\text{DR}}/M_{\text{VH}}^{45\text{DR}}|$, $|M_{\text{HH}}^{\text{TR}}/M_{\text{VV}}^{\text{TR}}|$ 接近1时通道不平衡幅度误差小, $\angle M_{\text{HV}}^{45\text{DR}}/M_{\text{VH}}^{45\text{DR}}$, $\angle M_{\text{HH}}^{\text{TR}}/M_{\text{VV}}^{\text{TR}}$ 接近0时通道不平衡相位误差小。

图6(d)—图6(i)为“总体极化畸变”通道比估计结果, 未展现出与法拉第旋转角相关的变化趋势, 本文认为图6(d)—图6(i)反映了系统极化通道不平衡的真实水平。实际上, 当参考地物满足散射对称性、散射互易性、旋转对称性时, 法拉第旋转角对通道不平衡估计的影响会降低。考虑文献[47]中公式(4c), (4d), (4o), (4p), 代入散射对称性与互易性假设, 含有法拉第旋转角的地物散射元素 $E(|S_{\text{HV}}|^2)^F$, $E(|S_{\text{VH}}|^2)^F$, $E(S_{\text{VH}}S_{\text{HV}}^*)^F$ 为

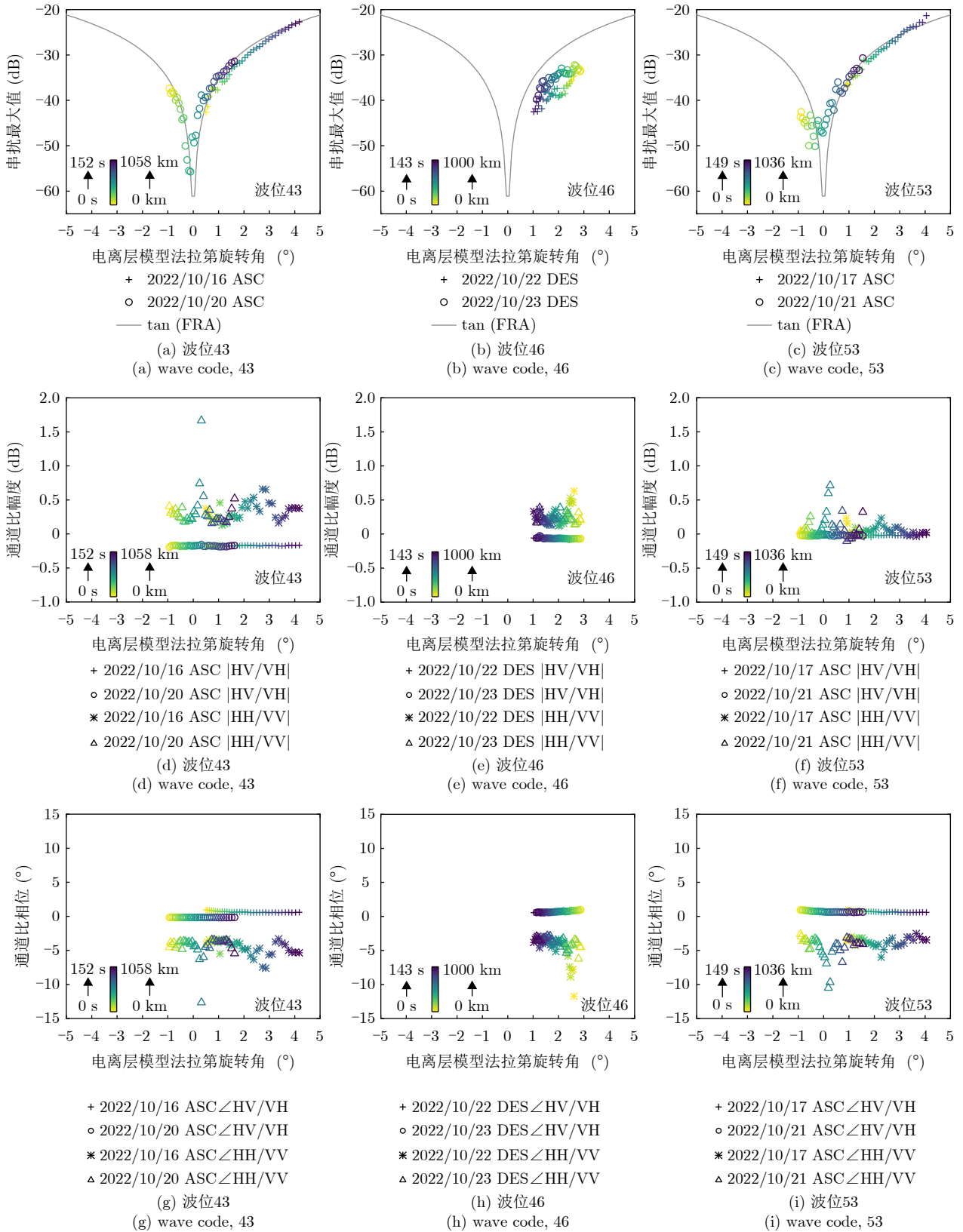


图6 雨林地区LT-1A影像“总体极化畸变”与电离层模型获取的法拉第旋转角先验(横轴)。ASC表示升轨、DES表示降轨

Fig. 6 The contrast between the theoretical faraday rotation angle determined by the Ion. Model and the polarimetric distortions of the LT-1A data in the Amazon rainforest. The scatters in (a)—(c) present max polarimetric crosstalk levels estimated by the Ainsworth0 method and the gray lines represent the tangent values ($\tan\omega$) of the theoretical faraday rotation angle. The scatters in (d)—(f) present the amplitude levels of channel ratio estimated by the Ainsworth0 in Eq. (10) and the scatters in (g)—(i) present the phase levels of channel ratio. ASC and DES represent the ascending and descending orbits, respectively

$$E(|S_{HV}|^2)^F \approx E(|S_{HV}|^2) + E(|S_{HH} + S_{VV}|^2) \cdot (\sin\omega\cos\omega)^2 \quad (19)$$

$$E(|S_{VH}|^2)^F \approx E(|S_{HV}|^2) + E(|S_{HH} + S_{VV}|^2) \cdot (\sin\omega\cos\omega)^2 \quad (20)$$

$$\operatorname{Re}\{E(S_{VH}S_{HV}^*)^F\} \approx E(|S_{HV}|^2) - E(|S_{HH} + S_{VV}|^2) \cdot (\sin\omega\cos\omega)^2 \quad (21)$$

$$\operatorname{Im}\{E(S_{VH}S_{HV}^*)^F\} \approx 0 \quad (22)$$

忽略串扰后观测值 $E(|M_{VH}|^2) \approx |k\alpha|^2 E(|S_{VH}|^2)^F + \sigma_n$, $E(|M_{HV}|^2) \approx |k|^2 E(|S_{HV}|^2)^F + \sigma_n$, $E(M_{VH}M_{HV}^*) \approx \alpha|k|^2 \operatorname{Re}\{E(S_{VH}S_{HV}^*)^F\}$ 。本文采用的Ainsworth0交叉通道不平衡估计方法主要基于互易性假设中 $E(|S_{HV}|^2) = E(|S_{VH}|^2)$, $\operatorname{Im}\{E(S_{VH}S_{HV}^*)\} = 0$ 两个约束实现 α 的估计。当忽略串扰与加性噪声时, 仍然可以不受法拉第旋转角的影响估计 α 幅度、相位:

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{E(|M_{VH}|^2)}{E(|M_{HV}|^2)}} &\approx \sqrt{\frac{|k\alpha|^2 E(|S_{VH}|^2)^F}{|k|^2 E(|S_{HV}|^2)^F}} = |\alpha| \\ \angle E(M_{VH}M_{HV}^*) &\approx \angle\left\{\alpha|k|^2 \operatorname{Re}\{E(S_{VH}S_{HV}^*)^F\}\right\} \\ &= \angle\alpha \pm \pi \end{aligned} \quad (23)$$

当 $\operatorname{Re}\{E(S_{VH}S_{HV}^*)^F\}$ 为负实数时需要考虑 $\pm\pi$ 。

类似地, 考虑参考文献[47]中公式(4a), (4b), (4g), (4h), 代入散射旋转对称性假设, 含有法拉第旋转角的地物散射元素 $E(|S_{HH}|^2)^F$, $E(|S_{VV}|^2)^F$, $E(S_{HH}S_{VV}^*)^F$ 为

$$\begin{aligned} E(|S_{HH}|^2)^F &= E(|S_{HH}|^2) \{\cos^4\omega + \sin^4\omega\} \\ &\quad - 2\operatorname{Re}\{E(S_{HH}S_{VV}^*)^F\} \sin^2\omega\cos^2\omega \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} E(|S_{VV}|^2)^F &= E(|S_{HH}|^2) \{\cos^4\omega + \sin^4\omega\} \\ &\quad - 2\operatorname{Re}\{E(S_{HH}S_{VV}^*)^F\} \sin^2\omega\cos^2\omega \end{aligned} \quad (25)$$

$$\operatorname{Im}\{E(S_{HH}S_{VV}^*)^F\} \approx 0 \quad (26)$$

忽略串扰后观测值 $E(|M_{HH}|^2) \approx |k|^4 |\alpha|^2 E(|S_{HH}|^2)^F + \sigma_n$, $E(|M_{VV}|^2) \approx E(|S_{VV}|^2)^F + \sigma_n$, $E(M_{HH}M_{VV}^*) \approx \alpha k^2 \operatorname{Re}\{E(S_{HH}S_{VV}^*)^F\}$ 。忽略系统噪声后结合Ainsworth0方法获取的 α , 可以不受法拉第旋转角的影响解算同极化通道不平衡幅度与相位:

$$\begin{aligned} \frac{E(|M_{HH}|^2)}{E(|M_{VV}|^2)} &\approx \frac{|k|^4 |\alpha|^2 E(|S_{HH}|^2)^F}{E(|S_{VV}|^2)^F} \\ &= |k|^4 |\alpha|^2 \\ \angle E(M_{HH}M_{VV}^*) &\approx \angle\alpha k^2 \operatorname{Re}\{E(S_{HH}S_{VV}^*)^F\} \\ &= \angle\alpha k^2 \pm \pi \end{aligned} \quad (27)$$

当 $\operatorname{Re}\{E(S_{HH}S_{VV}^*)^F\}$ 为负实数时需要考虑 $\pm\pi$ 。因此, 对于满足散射对称性、散射互易性、散射旋转对称性假设的热带雨林植被, 本文采用的Ainsworth0与估计器(10)可以降低法拉第旋转角的影响, 实现通道不平衡幅度、相位的估计。

图6(d)—图6(f)中HV/VH的幅度为0.02~0.20 dB、相位小于1°, 并且在同一天以及不同日期的估计结果中未观测到明显的幅度、相位变化。而图6(g)—图6(i) HH/VV的估计波动相对HV/VH较高, 通道幅度比均值为0.06~0.33 dB、相位均值为-3.85°~-4.63°, 有部分影像展现了较大的通道比。由于LT-1A发射的L波段信号比C波段短波信号穿透力更强, 雨林植被的回波不仅来自冠层产生的体散射, 还包含植被下的地表、粗大树干形成的表面散射、二面角散射, 当散射旋转对称性不满足时会引起估计器(10)结果的波动。此外, 本文采用ENL, R_{VHHV} , R_{HHVV} 共3个特征进行植被参考像素的提取, 不可避免地包含一些非植被目标、散射随机度较低的植被等, 增加了估计器(10)结果的不稳定。从总体上看, 图6(d)—图6(f)中并未观察到HH/VV通道比存在规律性、趋势性的变化, 说明LT-1A系统的全极化误差稳定, 在1000 km持续观测、5天重返观测上没有明显的误差时变特性, 短期误差与中期误差稳定。此外, 相比极化串扰估计结果图6(a)—图6(c), 估计器(10)获取的通道不平衡图6(d)—图6(f)对0°~5°内法拉第旋转角的变化不敏感, 当法拉第旋转角较大时对极化畸变估计精度的影响还需要在未来开展进一步研究。

特别需要强调, 极化误差模型(1)与模型(3)都只采用两个复数 $f_{i=1,2}$ 或 k 与 α 量化极化通道间的不均衡, 而数学原理上4个复极化通道不均衡的完整评价则需要3个复数。现有极化定标研究思路是: 先标定HV与VH不均衡、再标定HH与VV不均衡, 还缺乏一个复数对交叉极化(HV, VH)与同极化通道(HH, VV)的不均衡进行量化。如4.1节所述, 43波位的HH, VV强度比HV, VH高12~13 dB, 相比46波位, 53波位的4~6 dB明显偏高, 虽然该过程并不会对图6中Ainsworth0与估计器(10)的结果造成影响, 但会在数据中残留HV, VH与HH, VV潜在的不平衡。因此, 作者建议在LT-1A进行极化定标时考虑有源电子定标器、旋转22.5°的二面角、热带雨林等参考目标对交叉极化与同极化的比值进行评估, 消除MGC等因素带来的不同极化通道绝对增益偏差。

4.3 等效系统热噪声稳定性评估

基于互易假设的等效热噪声估计器可以用于低

串扰系统的NESZ估计,但影像中存在天线旁瓣带来的距离向模糊会造成式(14)的高估。因此最小包络噪声估计方法(Minimum Noise Envelope Estimator, MNEE)从3个方面改进基于互易假设的噪声估计器(14)^[10]:

(1) 利用远离人工目标的均质自然地物作为参考(如海洋、雨林等),使得天线旁瓣引入的距离向模糊仍然来自自然地物,避免旁瓣照射区域中人工目标对互易性假设的破坏。

(2) 利用远离人工目标的大面积弱散射地物作为参考(如海洋等),散射较弱的目标被天线旁瓣照射后产生的距离向模糊能量也较弱,增加了等效噪声能量与背景模糊能量的差异,避免NESZ出现高估。

(3) 对极化SAR影像上每个像素进行等效热噪声估计,仅保留每个距离向上噪声的最小值作为等效热噪声的有效估计结果,避免图像上出现的少量人工目标、方位向模糊、射频干扰等造成的高估。

本文收集的测试数据位于热带雨林地区,虽然

大面积分布的植被不满足上面第2个假设,但仍然可以为LT-1A数据提供等效噪声的参考值,对后续研究具有一定的指导意义。图4中需要将图像灰度值转化为 γ_0 消除入射角影响,因此后续的等效噪声也在 γ_0 形式下讨论。本文利用MNEE对估计器(14)获取的噪声进行处理,将每个距离向噪声的最小值作为等效热噪声的有效估计值,然后假设雨林的HH极化 γ_0 为-6.5 dB,将噪声灰度值转换为NEGZ (Noise Equivalent Gamma Zero)。

图7展示了基于热带雨林数据的系统热噪声估计结果,利用互易性估计器(14)与MNEE获取的NEGZ为-43~-22 dB,颜色表示当LT-1A持续开机观测时系统噪声的变化过程。图7(a)表明43波位在2022/10/16噪声NEGZ范围-40~-32 dB,并且估计的噪声水平有明显上升的趋势。然而,图7(b)~图7(f)中NEGZ随时间变化规律不明显,可能由于法拉第旋转角的干扰、雨林地区多种地物混杂增加了NEGZ的估计方差。

本文采用的系统噪声估计器为式(14),结合式(19)~式(22),系统噪声估计会受到法拉第旋转角影响:

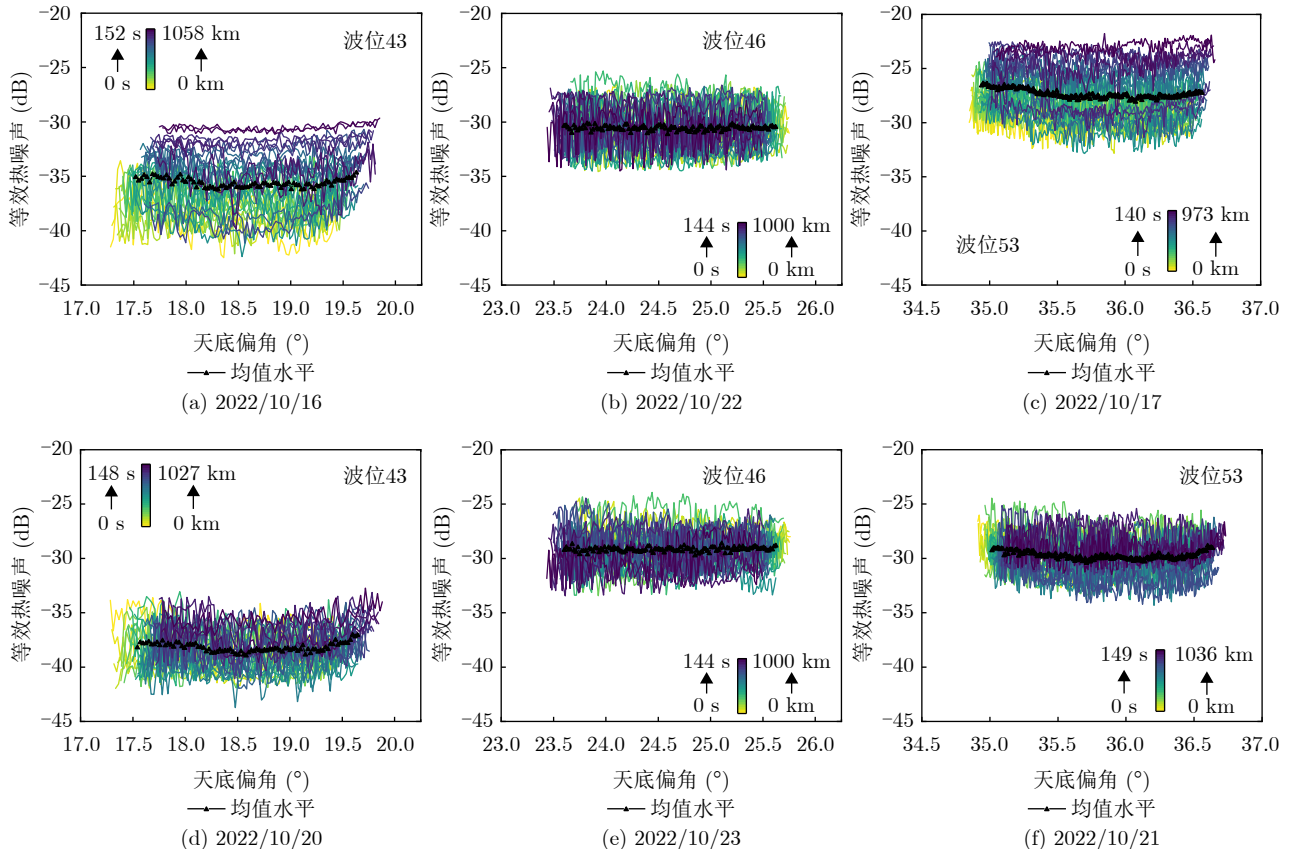


图7 基于雨林地区的系统等效热噪声估计

Fig. 7 The equivalent thermal noise estimation based on the rainforest observations

$$\begin{aligned}
\tilde{\sigma}_n &= \frac{1}{2} \left\{ E(|M_{HV}|^2) + E(|M_{VH}|^2) \right\} - \frac{1}{2} \sqrt{\left\{ E(|M_{VH}|^2) - E(|M_{HV}|^2) \right\}^2 + 4|E(M_{VH}M_{HV}^*)|^2} \\
&= \sigma_n + \frac{1}{2} \left(|k\alpha|^2 + |k|^2 \right) \left\{ E(|S_{HV}|^2) + E(|S_{HH} + S_{VV}|^2) (\sin\omega\cos\omega)^2 \right\} \\
&\quad - \frac{1}{2} \sqrt{\left(|k\alpha|^2 - |k|^2 \right)^2 \left\{ E(|S_{HV}|^2) + E(|S_{HH} + S_{VV}|^2) (\sin\omega\cos\omega)^2 \right\}^2 + 4|\alpha|^2|k|^4 \left| E(|S_{HV}|^2) - E(|S_{HH} + S_{VV}|^2) (\sin\omega\cos\omega)^2 \right|^2}
\end{aligned} \quad (28)$$

由于4.1节验证了LT-1A通道不平衡接近0 dB与 0° , 本文进一步设 $k \approx \alpha \approx 1$:

$$\tilde{\sigma}_n = \sigma_n + E(|S_{HV}|^2) + E(|S_{HH} + S_{VV}|^2) (\sin\omega\cos\omega)^2 - \left| E(|S_{HV}|^2) - E(|S_{HH} + S_{VV}|^2) (\sin\omega\cos\omega)^2 \right| \quad (29)$$

自然地物 $E(|S_{HH}|^2)$, $E(|S_{VV}|^2)$ 通常比 $E(|S_{HV}|^2)$ 高6~10 dB, 热带雨林地区 $1^\circ \sim 5^\circ$ 法拉第旋转角对应 $\sin^2\omega\cos^2\omega$ 为-35~-21 dB. 因此通常有 $E(|S_{HV}|^2) \geq E(|S_{HH} + S_{VV}|^2) (\sin\omega\cos\omega)^2$, 则有

$$\tilde{\sigma}_n = \sigma_n + 2E(|S_{HH} + S_{VV}|^2) \sin^2\omega\cos^2\omega \quad (30)$$

所以法拉第旋转角引起系统热噪声的高估, 偏差程度与地物单次散射成分 $E(|S_{HH} + S_{VV}|^2)$ 、法拉第旋转角正相关。

图8进一步展示了每张影像NEGZ均值、一倍标准差与法拉第旋转角、开机成像时长的关系。图8(d)、图8(f)中当电离层模型估计的法拉第旋转角接近 0° 时, NEGZ均值有先下降、再上升过程。考虑到法拉第旋转角会对极化数据带来类似串扰的影响, 大气电离层显然会对NEGZ的估计结果产生干扰, 因此并不能准确判断图8中估计的NEGZ的升高是由于法拉第旋转角或系统噪声时变特性造成的。有趣的是在图8(b)与图8(e)中NEGZ均值约-30 dB, 没有观察到明显的持续升高或降低趋势, 似乎NEGZ不随法拉第旋转角增加而增大、也不随着观测时间的持续而变大。此外, 当地物不满足散射对称性时, 法拉第旋转角会破坏数据的互易性假设。该假设也是系统热噪声估计的重要前提, 因此法拉第旋转角时变特性与系统噪声时变特性会相互耦合。

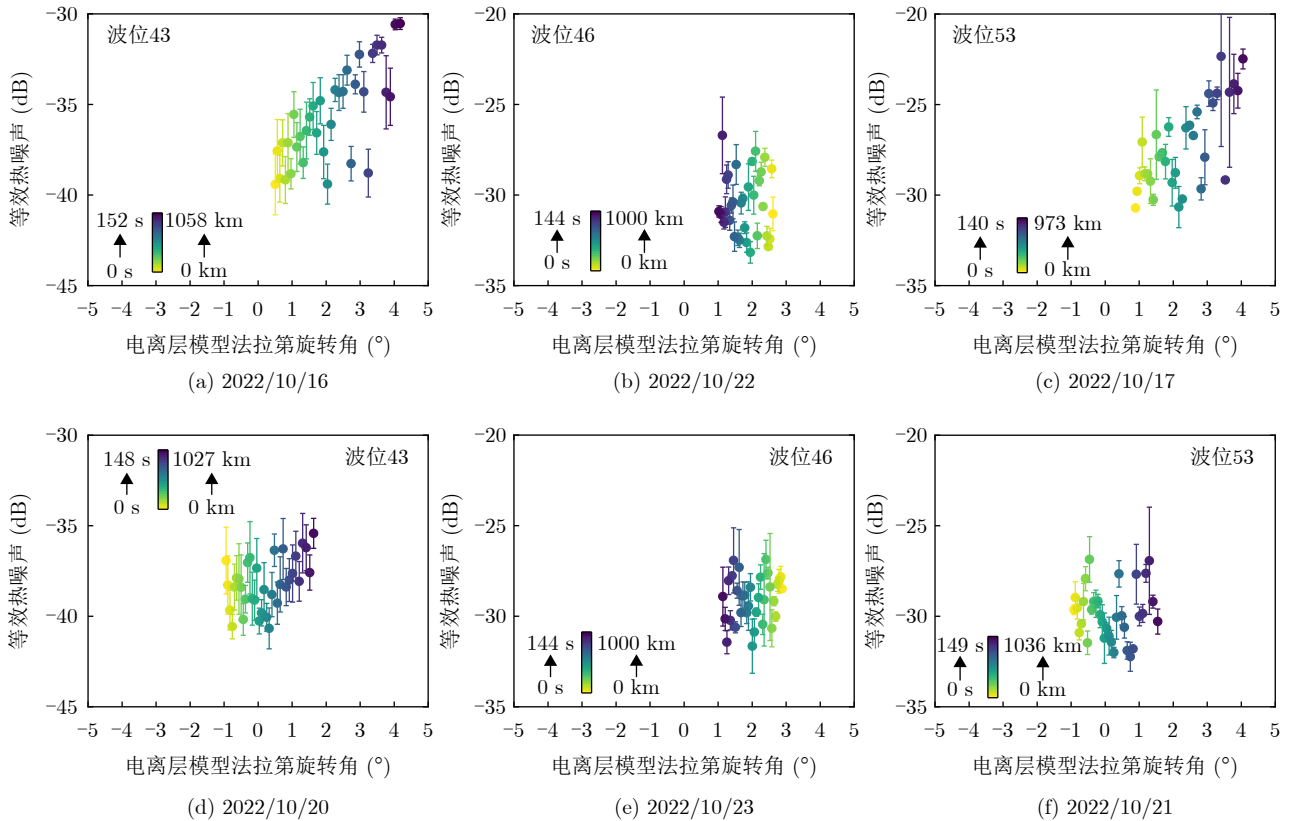


图 8 基于雨林地区的LT-1A影像系统等效热噪声均值与1倍标准差

Fig. 8 The statistical levels of LT-1A equivalent thermal noise estimated by the rainforest observations

本文认为LT-1A系统热噪声特性与波位有依赖关系,图8(b)与图8(e)的现象由法拉第旋转角时变特性与系统噪声时变特性共同引起。基于互易性约束的等效噪声估计精度与参考地物类型有关。覆盖面积大的水体、裸土等弱回波目标具有较高的估计精度,散射目标的回波增强则可能引起噪声高估。目前LT-1A公布的数据有限,雨林数据中河流面积少,因此本文估计结果反映了LT-1A系统热噪声的上限,真实系统噪声应优于本文结果。

总体而言,LT-1A的NEGZ介于 $-42\text{ dB} \sim -22\text{ dB}$,而Gamma软件公司发布的初步测评报告认为:LT-1A的噪声水平低于 -20 dB ,该结论与本文结果相符(https://www.gamma-rs.ch/uploads/media/2023-1_TR_China_LT1_Support_in_GAMMA.pdf);但本文不排除存在LT-1A持续对地观测时,系统温度升高带来NEGZ的短时期增高,在后续研究中还需要开发更适合星载长波观测的等效噪声估计方法进行NEGZ的评估、标定。

5 结论与展望

SAR传感器受到多种因素的影响不可避免地存在误差,只有当系统误差相对稳定时绝对定标才有意义,否则会增加绝对定标的频次、难以满足全球观测对数据质量的要求。本文的研究重点在于评价LT-1A系统误差的时变特性,利用未定标的雨林数据对辐射误差、极化误差、系统加性热噪声进行评估。

总体而言,LT-1A系统误差具有较好的时间稳定性,在 1000 km 连续观测下短时期辐射不稳定性小于 1 dB (3倍标准差)、4天重复观测内中时期辐射不稳定性小于 0.5 dB (3倍标准差)。而极化串扰、同极化通道与交叉极化通道的幅度与相位不平衡精度较高,未观察到随观察时间增加带来的系统误差明显升高;此外,上述极化指标满足CEOS提出的:定标后串扰不高于 -35 dB ,通道不平衡幅度与相位不超过 $\pm 0.5\text{ dB}$ 、 $\pm 10^\circ$ 要求。考虑到L波段的强穿透性,基于热带雨林的极化通道不平衡估计方法会受到植被下土壤、树干散射的干扰,LT-1A的通道不平衡幅度与相位精度很可能优于CEOS指标1~2倍。同时,LT-1A的系统噪声介于 $-42\text{ dB} \sim -22\text{ dB}$,平均系统噪声小于 -25 dB ,具有良好的系统信噪比。

本研究验证了电离层引起的法拉第旋转角会对长波数据的极化质量造成退化,特别是对极化通道间引入类似串扰的干扰。非赤道区域星载L波段传感器受到的法拉第旋转角干扰为 $3^\circ \sim 20^\circ$,会带来 $-21.16 \sim -8.78\text{ dB}$ 的极化通道间扰动。虽然法拉第旋转角对地物分类、目标检测、定量反演等应用会

造成干扰,但能对大气电离层物理参数估计等研究提供重要的观测信息。建议LT-1A数据生产部门根据大气模型对法拉第旋转角进行估计,在头文件中为相关用户提供先验信息,用户再根据自身需求采用自校准技术消除或保留法拉第旋转角。此外,本文发现部分LT-1A数据存在一些模糊,见图3(c),推测可能源自射频干扰或距离向模糊等,具体原因还需要在未来开展进一步研究。

星载长波SAR系统的质量评价、定标相对短波系统较难,具有时变、空变特性的电离层会引起具有时变、空变特性的法拉第旋转角,其与SAR系统潜在的时变误差相互耦合增加了定标、质量评价的难度。本研究利用热带雨林中均质的高随机散射植被作为参考对象,对LT-1A数据质量进行了评估,为相关用户提供了一些产品质量信息,具有一定科学意义与参考价值。受限于高随机、均质植被的有限覆盖范围,本文只对 1000 km 内数据辐射、极化误差稳定性进行了评价,在未来的工作中还需要进一步发展具有抗法拉第旋转角能力的系统误差估计方法,实现全球或更大尺度区域范围的数据评价与定标。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

参考文献

- [1] PAPATHANASSIOU K and KIM J S. Pol-InSAR calibration of ALOS-2: Analysis and results from the calval phase[C]. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2016: 3853-3854. doi: [10.1109/IGARSS.2016.7729999](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7729999).
- [2] BORDONI F, YOUNIS M, RODRIGUEZ-CASSOLA M, et al. SAOCOM-CS SAR imaging performance evaluation in large baseline bistatic configuration[C]. 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Milan, Italy, 2015: 2107-2110. doi: [10.1109/IGARSS.2015.7326218](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326218).
- [3] HUBER S, DE ALMEIDA F Q, VILLANO M, et al. Tandem-L: A technical perspective on future spaceborne sar sensors for earth observation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(8): 4792-4807. doi: [10.1109/TGRS.2018.2837673](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2837673).
- [4] FRULLA L A, MILOVICH J A, KARSZENBAUM H, et al. Radiometric corrections and calibration of SAR images[C]. Sensing and Managing the Environment. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing, Seattle, USA, 1998: 1147-1149. doi: [10.1109/IGARSS.1998.699700](https://doi.org/10.1109/IGARSS.1998.699700).

- [5] SHIMADA M and FREEMAN A. A technique for measurement of spaceborne SAR antenna patterns using distributed targets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(1): 100–114. doi: [10.1109/36.368217](https://doi.org/10.1109/36.368217).
- [6] SHI Lei, YANG Le, SUN Weidong, *et al.* Amplitude-optimized UZH for polarimetric channel imbalance calibration in PolSAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5217523. doi: [10.1109/TGRS.2023.3321046](https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3321046).
- [7] SHI Lei, LI Pingxiang, YANG Jie, *et al.* Polarimetric SAR calibration and residual error estimation when corner reflectors are unavailable[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(6): 4454–4471. doi: [10.1109/TGRS.2020.2964732](https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2964732).
- [8] FREEMAN A. SAR calibration: An overview[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(6): 1107–1121. doi: [10.1109/36.193786](https://doi.org/10.1109/36.193786).
- [9] YANG Le, SHI Lei, YANG Jie, *et al.* PolSAR additive noise estimation based on shadow regions[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2021, 42(1): 259–273. doi: [10.1080/01431161.2020.1805135](https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1805135).
- [10] SHI Lei, YANG Le, ZHAO Lingli, *et al.* NESZ estimation and calibration for gaofen-3 polarimetric products by the minimum noise envelope estimator[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(9): 7517–7534. doi: [10.1109/TGRS.2020.3033534](https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3033534).
- [11] YANG Junxin, HAN Bing, ZHONG Lihua, *et al.* First assessment of GF3-02 SAR ocean wind retrieval[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(8): 1880. doi: [10.3390/rs14081880](https://doi.org/10.3390/rs14081880).
- [12] ESPESETH M M, BREKKE C, JONES C E, *et al.* The impact of system noise in polarimetric SAR imagery on oil spill observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(6): 4194–4214. doi: [10.1109/TGRS.2019.2961684](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2961684).
- [13] ZHOU Xiao, ZENG Qiming, JIAO Jian, *et al.* Field calibration and validation of radarsat-2[C]. 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Melbourne, Australia, 2013: 4451–4454. doi: [10.1109/IGARSS.2013.6723823](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2013.6723823).
- [14] SCHWERDT M, SCHMIDT K, KLENK P, *et al.* Radiometric performance of the TerraSAR-X mission over more than ten years of operation[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 754. doi: [10.3390/rs10050754](https://doi.org/10.3390/rs10050754).
- [15] SCHWERDT M, SCHMIDT K, RAMON N T, *et al.* Independent verification of the sentinel-1A system calibration[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(3): 994–1007. doi: [10.1109/JSTARS.2015.2449239](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2449239).
- [16] EL HAJJ M, BAGHDADI N, ZRIBI M, *et al.* Analysis of sentinel-1 radiometric stability and quality for land surface applications[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(5): 406. doi: [10.3390/rs8050406](https://doi.org/10.3390/rs8050406).
- [17] FREEMAN A. Calibration of linearly polarized polarimetric SAR data subject to Faraday rotation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(8): 1617–1624. doi: [10.1109/TGRS.2004.830161](https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.830161).
- [18] TOUZI R and SHIMADA M. Polarimetric PALSAR calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(12): 3951–3959. doi: [10.1109/TGRS.2009.2032176](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2032176).
- [19] SHIMADA M, ISOGUCHI O, TADONO T, *et al.* PALSAR radiometric and geometric calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(12): 3915–3932. doi: [10.1109/TGRS.2009.2023909](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2023909).
- [20] SATAKE M, MATSUOKA T, UMEHARA T, *et al.* Polarimetric calibration experiment of ALOS PALSAR with polarization-selective dihedrals[C]. 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain, 2007: 1596–1598. doi: [10.1109/IGARSS.2007.4423117](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2007.4423117).
- [21] TOUZI R, SHIMADA M, MOTOHKA T, *et al.* Assessment of PALSAR-2 compact non-circularity using amazonian rainforests[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(10): 7472–7482. doi: [10.1109/TGRS.2020.2983008](https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2983008).
- [22] TAN Hong and HONG Jun. Calibration of compact polarimetric SAR images using distributed targets and one corner reflector[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(8): 4433–4444. doi: [10.1109/TGRS.2016.2541666](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2541666).
- [23] SHIMADA M. Model-based polarimetric SAR calibration method using forest and surface-scattering targets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(5): 1712–1733. doi: [10.1109/TGRS.2010.2090046](https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2090046).
- [24] LI T, TANG X, GAO X, *et al.* Lu TAN-1 SAR satellite characteristics and productions in the phase of in-orbit test[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2023, XLVIII-1/W2-2023: 1251–1256. doi: [10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W2-2023-1251-2023](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W2-2023-1251-2023).
- [25] LIU Kaiyu, WANG R, ZHANG Heng, *et al.* LuTan-1: An innovative l-band spaceborne SAR mission[C]. 14th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Leipzig, Germany, 2022: 1–5.
- [26] LI Tao, TANG Xinming, ZHOU Xiaoqing, *et al.* LuTan-1 SAR main applications and products[C]. 14th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Leipzig, Germany, 2022: 1–4.
- [27] JIANG Sha, QIU Xiaolan, HAN Bing, *et al.* Error source analysis and correction of GF-3 polarimetric data[J].

- Remote Sensing*, 2018, 10(11): 1685. doi: [10.3390/rs10111685](https://doi.org/10.3390/rs10111685).
- [28] WRIGHT P A, QUEGAN S, WHEADON N S, *et al.* Faraday rotation effects on L-band spaceborne SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(12): 2735–2744. doi: [10.1109/TGRS.2003.815399](https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.815399).
- [29] MEYER F J and NICOLL J B. Prediction, detection, and correction of faraday rotation in full-polarimetric L-band SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3076–3086. doi: [10.1109/TGRS.2008.2003002](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2003002).
- [30] ROGERS N C and QUEGAN S. The accuracy of faraday rotation estimation in satellite synthetic aperture radar images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(8): 4799–4807. doi: [10.1109/TGRS.2013.2284635](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2284635).
- [31] WOODHOUSE I H. Introduction to Microwave Remote Sensing[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [32] LUKOWSKI T I, HAWKINS R K, CLOUTIER C, *et al.* RADARSAT elevation antenna pattern determination[C]. 1997 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development, Singapore, 1997: 1382–1384. doi: [10.1109/IGARSS.1997.606453](https://doi.org/10.1109/IGARSS.1997.606453).
- [33] 史磊, 杨杰, 李平湘, 等. 不依赖人工定标器的全极化SAR定标研究进展[J]. *遥感学报*, 2021, 25(11): 2211–2219. doi: [10.11834/jrs.20219310](https://doi.org/10.11834/jrs.20219310).
- SHI Lei, YANG Jie, LI Pingxiang, *et al.* Research process of full-polarimetric SAR calibration without using corner reflectors[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(11): 2211–2219. doi: [10.11834/jrs.20219310](https://doi.org/10.11834/jrs.20219310).
- [34] QUEGAN S. A unified algorithm for phase and cross-talk calibration of polarimetric data-theory and observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(1): 89–99. doi: [10.1109/36.285192](https://doi.org/10.1109/36.285192).
- [35] VAN ZYL J J. Calibration of polarimetric radar images using only image parameters and trihedral corner reflector responses[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(3): 337–348. doi: [10.1109/36.54360](https://doi.org/10.1109/36.54360).
- [36] AINSWORTH T L, FERRO-FAMIL L, and LEE J S. Orientation angle preserving a posteriori polarimetric SAR calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(4): 994–1003. doi: [10.1109/TGRS.2005.862508](https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.862508).
- [37] SHI Lei, LI Pingxiang, YANG Jie, *et al.* Polarimetric calibration for the distributed Gaofen-3 product by an improved unitary zero helix framework[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 160: 229–243. doi: [10.1016/j.isprsjprs.2019.12.003](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.12.003).
- [38] SUN Guangde, LI Zhen, HUANG Lei, *et al.* Quality analysis and improvement of polarimetric synthetic aperture radar (SAR) images from the GaoFen-3 satellite using the Amazon rainforest as an example[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2021, 42(6): 2131–2154. doi: [10.1080/01431161.2020.1851798](https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1851798).
- [39] JIANG Sha, QIU Xiaolan, HAN Bing, *et al.* A quality assessment method based on common distributed targets for GF-3 polarimetric SAR data[J]. *Sensors*, 2018, 18(3): 807. doi: [10.3390/s18030807](https://doi.org/10.3390/s18030807).
- [40] BUESO-BELLO J L, MARTONE M, PRATS-IRAOLA P, *et al.* First characterization and performance evaluation of bistatic TanDEM-X experimental products[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(3): 1058–1071. doi: [10.1109/JSTARS.2015.2430454](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2430454).
- [41] BUESO-BELLO J L, MARTONE M, PRATS-IRAOLA P, *et al.* Performance analysis of TanDEM-X quad-polarization products in pursuit monostatic mode[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(5): 1853–1869. doi: [10.1109/JSTARS.2017.2663323](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2663323).
- [42] MOUCHE A and CHAPRON B. Global C-band envisat, RADARSAT-2 and sentinel-1 SAR measurements in copolarization and cross-polarization[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(11): 7195–7207. doi: [10.1002/2015JC011149](https://doi.org/10.1002/2015JC011149).
- [43] REN Lin, YANG Jingsong, MOUCHE A, *et al.* Preliminary analysis of Chinese GF-3 SAR Quad-polarization measurements to extract winds in each polarization[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 1215. doi: [10.3390/rs9121215](https://doi.org/10.3390/rs9121215).
- [44] VILLANO M. SNR and noise variance estimation in polarimetric SAR data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(1): 278–282. doi: [10.1109/LGRS.2013.2255860](https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2255860).
- [45] HAJNSEK I, POTTIER E, and CLOUDE S R. Inversion of surface parameters from polarimetric SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(4): 727–744. doi: [10.1109/TGRS.2003.810702](https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.810702).
- [46] FREEMAN A and SAATCHI S S. On the detection of Faraday rotation in linearly polarized L-band SAR backscatter signatures[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(8): 1607–1616. doi: [10.1109/TGRS.2004.830163](https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.830163).
- [47] QI Renyuan and JIN Yaqiu. Analysis of the effects of faraday rotation on spaceborne polarimetric SAR observations at P-band[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(5): 1115–1122. doi: [10.1109/TGRS.2007.892583](https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.892583).

作者简介

史 磊，博士，副教授，主要研究方向为合成孔径雷达定标及信息智能提取。

孙维东，博士，副研究员，主要研究方向为极化雷达影像分类、灾害监测和评估。

杨 乐，博士，讲师，主要研究方向为极化雷达影像定标。

杨 杰，博士，教授，主要研究方向为极化SAR图像解译。

赵伶俐，博士，副教授，主要研究方向为极化雷达影像滤波、农业监测。

李平湘，博士，教授，主要研究方向为摄影测量与遥感、遥感图像处理等。

刘亚波，博士，副研究员，主要研究方向为微波成像理论、雷达目标识别。

(责任编辑：于青)