0254-6124/2026/46(5)-1238-13 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LI Changjun, XING Zanyang, WANG Cheng, YU Zhitong, ZHANG Qinghe, WANG Yong, MA Yuzhang, ZHAO Lingxin, LU Sheng, WANG Xiangyu, ZHAO Bianlong, AN Jiachen. Polar Ionospheric TEC Inversion Based on Spaceborne Fully Polarimetric SAR and Its Response to Aurora (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1238–1250. CSTR:32142.14.cjss.2025–0244. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025–0244

基于星载全极化 SAR 的极区电离层 TEC 反演及极光活动的影响*

李长浚[1] 邢赞扬[1] 王 成[2] 于志同[2]
张清和[1,3] 王 勇[1] 马羽璋[1] 赵凌新[1,4]
陆 盛[1] 王翔宇[1] 赵变龙[1] 安家琛[1]

1(山东大学空间科学与技术学院 威海 264209)

2(中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室 北京 100094)

3(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

4(山东大学集成电路学院 济南 250100)

摘 要 极光活动可引起极区电离层总电子含量 (TEC) 增强, 并对星载全极化合成孔径雷达 (SAR) L 波段电磁波传播产生显著影响, 进而导致附加相位误差和极化失真. 基于 32 景全极化 SAR 影像数据, 采用四种典型法拉第旋转角 (FRA) 反演算法获取极区电离层 TEC, 并与同期当地地基 GNSS-TEC 观测结果进行对比评估; 同时选取 2 景重访影像, 定量分析极光活动对 SAR 信号质量的影响. 结果表明, 四种算法中, B&B 算法反演的 TEC 结果与观测值一致性最好; 极光弧引起的 TEC 增强可导致 FRA 显著增大, 并使交叉圆极化积减小, 表明 SAR 信号信噪比降低. 研究结果表明, 基于 B&B 算法的全极化 SAR 可较有效反演极区 TEC, 可为极区电离层扰动监测及其与极光活动关系研究提供新的技术手段.

关键词 合成孔径雷达, 法拉第旋转角, 电子含量, 极光, 极区电离层

中图分类号 P352

Polar Ionospheric TEC Inversion Based on Spaceborne Fully Polarimetric SAR and Its Response to Aurora

LI Changjun[1] XING Zanyang[1] WANG Cheng[2] YU Zhitong[2]
ZHANG Qinghe[1,3] WANG Yong[1] MA Yuzhang[1]

* 国家重点研发计划项目 (2024YFB3908002, 2025YFF0510702) 和国家自然科学基金项目 (42474219, 42120104003) 共同资助

2025-12-22 收到原稿, 2026-06-16 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ZHAO Lingxin[1,4] LU Sheng[1]
WANG Xiangyu[1] ZHAO Bianlong[1] AN Jiachen[1]

1(*School of Space Science and Technology, Shandong University, Weihai* 264209)

2(*Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, China Academy of Space Technology, Beijing* 100094)

3(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

4(*School of Integrated Circuits, Shandong University, Jinan* 250100)

Abstract Auroral activity can enhance ionospheric Total Electron Content (TEC) at high latitudes and thereby affect the propagation of L-band electromagnetic waves transmitted by spaceborne fully polarimetric Synthetic Aperture Radar (SAR) systems. These ionospheric disturbances introduce additional phase delay and polarization distortion, which may reduce SAR data quality and influence the reliability of quantitative interpretation. Because the Faraday Rotation Angle (FRA) derived from fully polarimetric SAR observations is sensitive to the ionospheric electron content along the propagation path, it can be used to retrieve TEC with relatively high spatial resolution. In this study, 32 fully polarimetric SAR scenes were used to examine the performance of four FRA-based inversion algorithms for polar TEC retrieval under auroral conditions. The retrieved TEC was compared with colocated ground-based GNSS-TEC observations in order to evaluate the applicability of different algorithms in the polar ionosphere. In addition, two revisit SAR cases were selected to investigate how TEC enhancements related to auroral activity are reflected in SAR signal characteristics. This analysis makes it possible to assess both the relative performance of the four inversion methods and the response of polarimetric SAR observables to auroral ionospheric disturbances. Results show clear differences among the four algorithms. Of the tested methods, the Bickel and Bates (B&B) algorithm gives TEC estimates that agree best with the ground-based GNSS-TEC measurements, suggesting that it is more suitable for polar TEC retrieval. The revisit cases further show that TEC enhancements associated with auroral arcs can produce distinct changes in SAR observations. In regions affected by enhanced ionization, FRA increases noticeably, whereas the cross-circular polarization product decreases. These changes indicate a deterioration in SAR signal quality, especially a reduction in signal-to-noise ratio. Overall, the results indicate that fully polarimetric SAR, combined with an appropriate FRA inversion method, can provide useful information on polar ionospheric TEC and its disturbance characteristics during auroral activity. This approach offers a practical way to support high-latitude ionospheric studies and to examine the relationship between auroral processes and TEC variability.

Key words Synthetic Aperture Radar (SAR), Faraday Rotation Angle (FRA), Total Electron Content (TEC), Aurora, Polar ionosphere

0 引言

极区电离层是空间天气变化最剧烈的区域之一, 其动力学过程受到太阳风–磁层–电离层耦合作用的调制, 表现为频繁的极光粒子沉降、不均匀体等复杂现象[1–3]. 这些物理过程会显著改变极区电离层电子密度的时空分布特征, 其引发的电离层不均匀性也可能被雷达探测到.

星载合成孔径雷达 (SAR) 作为一种主动微波遥感系统, 具备探测这些电离层不均匀性的能力. 特别是工作在 L 波段 (1～2 GHz) 的 SAR 系统, 凭借其全天候观测能力、高空间分辨率 (米级) 和一定的障碍物穿透特性[4], 已广泛应用于地物特征监测[5–7](包括海冰动态变化监测、土壤湿度及生物量反演等), 已成为对地观测设备中不可或缺的天基遥感手段[8]. 然而, 当 SAR 发射的电磁波信号穿透电离层时, 会与电离层中的自由电子发生相互作用, 可能产生电离层闪烁、法拉第旋转 (FR) 等多种复杂效应, 这些效应会

显著影响雷达信号的传播特性[9,10]. 其中法拉第旋转效应是指电磁波在磁化等离子体介质中传播时, 其线极化方向相对于初始极化方向发生旋转, 旋转的角度即为法拉第旋转角 (FRA), 通常用于量化 FR 效应的剧烈程度. FRA 的数值大小与信号传播路径上总电子含量 (TEC) 及地磁场强度矢量具有直接的函数关系[9]. 因此, 星载全极化 SAR 可利用全极化方式 (HH, HV, VH, VV) 的散射矩阵精确测量 FRA, 并基于此反演电离层参数, 为开展高空间分辨率、高精度的电离层探测提供了一种新颖且极具潜力的技术方案[11].

近年来, 随着星载全极化 SAR 数据的日益丰富, 利用实测 SAR 数据提取 FRA 以反演电离层 TEC 已成为电离层研究的一种重要手段, 一系列基于全极化 SAR 的 FRA 反演算法也被相继提出. 例如 Bickel 和 Bates 等[12] 基于极化散射矩阵特征值分解提出了 B&B 算法; Freeman[13] 基于目标散射对称性假设发展了相应的估计算法, 此外, 还有 Li 等[14] 针对加性噪声, 以及 Wang 等[15] 以雷达系统通道相位不平衡为主要误差源构建的 FRA 反演算法等. 这些反演算法在不同地理环境与电离层环境下的反演性能存在差异. 例如 Zhu 等[16] 利用 ALOS PALSAR 数据对比了不同 FRA 反演算法在中低纬地区的性能, 结果表明, B&B 算法在该区域表现良好. 然而, 目前针对高纬极区这一电离层环境复杂多变区域, 不同 FRA 反演算法的性能评估仍较为缺乏. 同时, 极区特有的空间天气现象 (例如极光现象) 对 SAR 信号传播特性及 FRA 反演精度的影响机制尚不明确. 此外, 得益于 SAR 成像本身的高空间分辨率, 基于 FRA 反演的 TEC 能够提供比传统手段 (例如地基 GNSS-TEC) 更精细的电离层 TEC 信息. 例如, Wright 等[10,17–19] 将 SAR 反演结果与非相干散射雷达 (ISR) 观测以及 IRI, NeQuick 等经验模型进行对比, 初步验证了 SAR 用于电离层探测的独特优势; Pi 等[9] 通过多源数据联合观测, 证实了 SAR 雷达能够观测到电离层不均匀体现象导致的电离层电子密度扰动, 例如极区极光弧、电离层行进式扰动、赤道等离子体泡等; Wang 等[19] 则验证了利用 SAR 反演的 TEC 结合北极高纬电离层经验模型 (E-CHAIM 模型) 进行层析建模的可行性. 除直接运用 FRA 反演 TEC 外, 对全极化 SAR 数据的深入处理也有助于研究不同扰动源的影响. 例如 Sato 等[20,21] 从 SAR 图像中的条纹结构中识别出电离层闪烁的影响, 并提出了相应的补偿方案; Wang 等[22] 利用全极化 SAR 数据反演出的交叉圆极化基的幅值, 探讨了不同地物类型 (例如海洋、陆地、河流) 对 FRA 反演的影响, 证实了地物散射特性会改变信号的信噪比, 进而影响反演结果, 但是尚未进一步辨析其中电离层扰动与地表散射的耦合影响机制.

本文基于日本 ALOS-1 卫星搭载的 PALSAR-1 传感器获取的 2007 年 4 月 1 日 31 景全极化 SAR 数据, 聚焦高纬阿拉斯加地区, 应用四种不同的 FRA 反演算法获取高分辨率 TEC 数据. 通过将反演结果与同区域的 GNSS-TEC 观测数据进行交叉验证与定量对比分析, 系统评估了极光活动这一典型空间天气事件影响下, 四种 FRA 反演算法在极区电离层 TEC 反演中的精度与可靠性. 此外, 针对同一区域, 分别选取 2007 年 4 月 1 日和 2010 年 4 月 9 日各 1 景 SAR 影像数据, 通过分析 FRA 与交叉圆极化积值 (Cross-Polarization) 的相关性, 深入研究了极光活动对 SAR 极化信号散射特性的影响, 揭示其背后的物理机制.

1 数据介绍

1.1 ALOS PALSAR-1

采用的 SAR 数据来源于日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 的先进陆地观测卫星 (ALOS). 该卫星于 2006 年 1 月 24 日成功发射, 在高度约 692 km 的太阳同步轨道飞行, 其搭载的相控阵 L 波段合成孔径雷达 (PALSAR-1) 是本研究的关键数据源[23]. 影像数据可从美国国家航空航天局 (NASA) 的阿拉斯加卫星设施 (ASF) 数据门户*下载获取.

PALSAR-1 雷达工作于 L 波段 (中心频率 1.27 GHz), 具备全极化观测能力. 相较于 C 波段或 X 波段, L 波段电磁波具有更强的穿透性和更弱的大气衰减, 支持全天候、全天时对地观测. 然而, 当信号穿越电离层时, 显著受到电离层色散效应和法拉第旋转效应的影响. 这一特性使得 L 波段 SAR 信号在受到电离层干扰的同时, 也成为反演电离层参数的独特

* https://search.asf.alaska.edu/#/

信息载体.

选取 L1.1 级单视复数数据 (SLC), 极化方式为全极化 (HH, HV, VH, VV), 即通过系统地发射和接收两种正交极化波, 完整获取目标对电磁波的极化散射响应矩阵, 其标准扫描方式是条带模式. 在这种模式下, 雷达采用脉冲交替极化技术, 沿卫星轨道连续照射一个狭窄的带状区域, 生成包含完整散射矩阵信息的单视复数数据. 需要说明的是, 本研究中数据处理与分析的基本空间单元为 1 景. 对于本研究所用的特定数据, 1 景定义为一次连续扫描所获取的经过系统几何校正后的标准数据块, 每景典型的 SLC 数据在距离向和方位向的像素维度分别为 1248 和 18432, 对应的平均地面分辨率约为 23.1 m 和 3.6 m. 通过对这些数据进行定标等预处理, 最终得到用于分析的全极化散射矩阵. 针对高纬极区电离层实验需求, 共筛选出 32 景 PALSAR 数据.

1.2 MIT GNSS-TEC 数据

用于验证和评估的全球导航卫星系统总电子含量 (GNSS-TEC) 数据来源于美国麻省理工学院 (MIT) 海斯塔克天文台 (Haystack Observatory) 发布并维护的全球网格化数据. 该数据基于 MIT 运营的全球超过 2000 个 GNSS 监测站网络, 持续接收并处理来自美国 GPS、中国 BDS、欧洲 GALILEO 和俄罗斯 GLONASS 等主要卫星导航系统的双频信号. 通过对这些原始观测数据进行精密处理, 生成了时空分辨率分别为 1°×1° (经纬度网格) 和 5 min 的 TEC 数据. 该数据存储于 Madrigal 数据库[*], 可公开获取[24]. 本文 GNSS-TEC 数据用于评估四种 SAR 法拉第旋转角反演算法在极区反演 TEC 的精度与可靠性.

1.3 THEMIS ASI

THEMIS ASI (Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms All-Sky Imager) 是 NASA THEMIS 空间科学探测项目中的重要地面观测设备, 专用于对极光进行高时空分辨率的全天空成像观测. 这些成像仪部署于北美洲和阿拉斯加的多个地面台站, 构成一个协同观测网络, 能够连续监测极光活动的时空演化, 为研究磁层–电离层耦合、亚暴动力学等空间物理过程提供关键数据. 数据可通过官网[**]获取. 本文特别选取位于阿拉斯加 Gako 的 ASI 台站 (地理坐标: 62.39°N, –145.13°W) 的观测数据, 与 SAR 成像进行联合观测.

2 研究方法

2.1 法拉第旋转角计算 TEC

星载 SAR 发射的线性极化电磁波信号在穿透电离层时, 会与其中的自由电子及局地地磁场发生相互作用, 分解为两个幅值相等、旋转方向相反的圆极化波 (即寻常波与非寻常波). 由于电离层的色散特性, 这两个圆极化波的传播相速度存在差异, 其在穿出电离层后重新合成的线极化波的极化面相对于入射时发生了旋转, 旋转角度即为法拉第旋转角, 有

$$\Omega = \int \frac{1}{2}\frac{\omega}{c}\left(\mu_{\mathrm{O}} - \mu_{\mathrm{E}}\right)\mathrm{d}s. \tag{1}$$

其中, μ为信号折射率, 下标 O 和 E 分别表示寻常波和非寻常波, $\omega = 2\pi f$为角信号频率, c 为光速, $\mathrm{d}s$ 为传播路径上的路径微分.

电离层折射率公式是电离层基本公式之一, 常引用 Appleton-Hartree 公式[25]. 在磁化的各向异性和电离的介质中, 无线电波分裂成具有不同相速度的寻常波和非寻常波. 相应的折射率是电子密度、环境磁场和无线电信号频率的函数. 忽略高阶项后, Appleton-Hartree 公式可以表示为

$$\mu_{\mathrm{O,E}} \approx 1 - \frac{1}{2}X(1 \pm Y). \tag{2}$$

其中, 参数$\mu_{\mathrm{O,E}}$为寻常波和非寻常波在磁介质中的折射率; $X = \left(\dfrac{\omega_{\mathrm{p}}}{\omega}\right)^2$, $\omega_{\mathrm{p}} = \left(\dfrac{n_{\mathrm{e}}e^2}{\varepsilon_0 m_{\mathrm{e}}}\right)^{1/2}$是磁介质中的磁化等离子体角频率, n_{e}为电子密度, e 为基本电荷, ε_0为真空介电常数, m_{e}为电子质量. 参数$Y = \dfrac{\omega_{\mathrm{H}}}{\omega}$, $\omega_{\mathrm{H}} = \dfrac{|e|B}{m_{\mathrm{e}}}$为电子回旋频率, B 为磁场强度. 将式 (1) 和式 (2) 联立, 再将常量代入可得

$$\Omega = \frac{|e|^3}{8\pi^2 c\varepsilon_0 m_{\mathrm{e}}^2 f^2}\int n_{\mathrm{e}}\boldsymbol{B}\cos\theta\mathrm{d}s = \frac{2.365\times10^4}{f^2}\int n_{\mathrm{e}}\boldsymbol{B}\cos\theta\,\mathrm{d}s. \tag{3}$$

其中, θ为磁场矢量和电磁波矢量的夹角, f为信号的

[*] https://cedar.openmadrigal.org/

[**] https://themis.ssl.berkeley.edu/

载频. 对于典型的星载 SAR 雷达的观测, $\cos\theta$沿雷达信号射线路径的变化不大, 磁场$\boldsymbol{B}$随高度的变化而变化. 同时, 电离层和磁层电流引起的磁场波动几乎可以忽略不计, 即使在强磁暴情况下, 极区的电离层和磁层电流对总磁场的影响通常不到 1% [9], 因此 $\boldsymbol{B}\cos\theta$ 可以用射线路径的平均值或中值代替. 在 SAR 的实际应用中, TEC (用符号 δ_{TEC} 表示) 计算公式为

$$\delta_{\mathrm{TEC}}=\frac{f^2}{2.365\times10^4\left\langle \boldsymbol{B}\cos\theta\right\rangle}\Omega. \tag{4}$$

其中, $\delta_{\mathrm{TEC}}=\int n_{\mathrm{e}}\mathrm{d}s$, $\langle\cdot\rangle$表示求平均值.

研究所用到的磁场矢量 $\boldsymbol{B}$ 由国际地磁场模型 (IGRF) 提供, 基于电离层薄层理论[26], 将模型高度设定为 400 km. 在实际计算中, f, B, θ 均可以获取, 因此式 (4) 建立了 Ω与 TEC 之间的直接关系. 此外, FRA 可由卫星获取的散射矩阵 $\boldsymbol{M}$ 计算得到, 从而进一步求解该卫星信号路径上的 TEC 值.

2.2 法拉第旋转角反演算法

自从 1965 年 Bickel 和 Bates[12] 利用圆极化基 Z 推导 FRA 后, 许多研究提出了 FRA 反演算法, 这里选取 Bickel 和 Bates[12]、Freeman[13]、Li 等[14]、Wang 等[15] 提出的四种算法对北极阿拉斯加地区进行 FRA 计算.

首先对雷达测量出的散射矩阵进行数据预处理, 降低串扰和通道不平衡的影响, 去除系统误差. Pi 等[9] 描述了 FRA 对雷达偏振测量的影响, 引入雷达偏振测量的基本方程, 即

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix}\boldsymbol{M}_{\mathrm{hh}} & \boldsymbol{M}_{\mathrm{vh}}\\ \boldsymbol{M}_{\mathrm{hv}} & \boldsymbol{M}_{\mathrm{vv}}\end{bmatrix}=&A\left(r,\theta\right)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi}\begin{bmatrix}1 & \delta_2\\ \delta_1 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & \mathrm{f}_1\end{bmatrix}\cdot\\ &\begin{bmatrix}\cos\Omega & \sin\Omega\\ -\sin\Omega & \cos\Omega\end{bmatrix}\begin{bmatrix}S_{\mathrm{hh}} & S_{\mathrm{vh}}\\ S_{\mathrm{hv}} & S_{\mathrm{vv}}\end{bmatrix}\cdot\\ &\begin{bmatrix}\cos\Omega & \sin\Omega\\ -\sin\Omega & \cos\Omega\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & f_2\end{bmatrix}\cdot\\ &\begin{bmatrix}1 & \delta_3\\ \delta_4 & 1\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}N_{\mathrm{hh}} & N_{\mathrm{vh}}\\ N_{\mathrm{hv}} & N_{\mathrm{vv}}\end{bmatrix}.\end{aligned} \tag{5}$$

其中, $\boldsymbol{M}_{ij}(i,\,j$ 为 h 或 v) 是处理后的散射测量矩阵, 简称散射矩阵; S_{ij}为测量获取的散射测量矩阵; N_{ij}为系统噪声; A 表示雷达系统的总增益, 是距离 (r) 和仰角 (θ) 的函数; δ为串扰项; f_1和f_2为通道振幅和相位不平衡; Ω为法拉第旋转角.

在小 FRA 的条件下, 即 $(\sin\Omega\approx\Omega,\cos\Omega=1)$, 式 (5) 可简化为

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix}\boldsymbol{M}_{\mathrm{hh}} & \boldsymbol{M}_{\mathrm{vh}}\\ \boldsymbol{M}_{\mathrm{hv}} & \boldsymbol{M}_{\mathrm{vv}}\end{bmatrix}=&A\left(r,\theta\right)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi}\begin{bmatrix}1 & \delta_2+\Omega\\ \delta_1-\Omega f_1 & f_1\end{bmatrix}\\ &\begin{bmatrix}S_{\mathrm{hh}} & S_{\mathrm{vh}}\\ S_{\mathrm{hv}} & S_{\mathrm{vv}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & \delta_3+\Omega f_2\\ \delta_4-\Omega & f_2\end{bmatrix}+\boldsymbol{N}.\end{aligned} \tag{6}$$

使用 Quegan[27] 的算法对雷达系统标定后, 式 (6) 可写为

$$\boldsymbol{M}=\boldsymbol{R}_F\boldsymbol{S}\boldsymbol{R}_F. \tag{7}$$

其中, $\boldsymbol{M}$ 是校准后的极化测量矩阵, 式 (6) 中的 $\boldsymbol{N}$ 可被忽略, 在数据处理阶段进行滤波或者平均时会使其影响最小化.

散射矩阵 $\boldsymbol{M}$ 中包含法拉第旋转角的信息, 目前很多算法可以将其提取出来, 这里将列举如下四种.

Bickel 和 Bates[12] 提出的算法 (简称 B&B 算法), 其应用如下变换对散射测量矩阵 $\boldsymbol{M}$ 进行处理:

$$\begin{bmatrix}Z_{11} & Z_{12}\\ Z_{21} & Z_{22}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & j\\ j & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}M_{\mathrm{hh}} & M_{\mathrm{vh}}\\ M_{\mathrm{hv}} & M_{\mathrm{vv}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & j\\ j & 1\end{bmatrix}. \tag{8}$$

其中, $\boldsymbol{M}$ 为散射矩阵; 矩阵内 $\boldsymbol{M}$ 分量的下角标 h, v 分别表示不同的极化方式, 例如M_{hh}为水平发射水平接收的极化散射信号; $\boldsymbol{Z}$ 为圆极化基矩阵. 而后利用单站雷达极化散射矩阵的互易性, 可以求解出 B&B 算法的 FRA, 有

$$\Omega_{\mathrm{B\&B}}=\frac{1}{4}\arg(\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}). \tag{9}$$

其中, arg (·) 表示取角运算, *是对复数矩阵取共轭的运算.

Freeman[13] 运用空间平均算法抑制噪声, 提出一种 FRA 估计器, 该估计器可由散射测量矩阵 $\boldsymbol{M}$ 对应的极化协方差矩阵 $\boldsymbol{C}$ (PCM) 描述, 如下式所示

$$\begin{aligned}&\begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14}\\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24}\\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34}\\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44}\end{bmatrix}=\\ &\begin{bmatrix}\langle\boldsymbol{M}_{\mathrm{hh}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{hh}}^{*}\rangle & \langle\boldsymbol{M}_{\mathrm{hh}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{vh}}^{*}\rangle & \langle\boldsymbol{M}_{\mathrm{hh}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{hv}}^{*}\rangle & \langle\boldsymbol{M}_{\mathrm{hh}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{vv}}^{*}\rangle\\ \langle\boldsymbol{M}_{\mathrm{vh}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{hh}}^{*}\rangle & \langle\boldsymbol{M}_{\mathrm{vh}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{vh}}^{*}\rangle & \langle\boldsymbol{M}_{\mathrm{vh}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{hv}}^{*}\rangle & \langle\boldsymbol{M}_{\mathrm{vh}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{vv}}^{*}\rangle\\ \langle\boldsymbol{M}_{\mathrm{hv}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{hh}}^{*}\rangle & \langle\boldsymbol{M}_{\mathrm{hv}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{vh}}^{*}\rangle & \langle\boldsymbol{M}_{\mathrm{hv}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{hv}}^{*}\rangle & \langle\boldsymbol{M}_{\mathrm{hv}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{vv}}^{*}\rangle\\ \langle\boldsymbol{M}_{\mathrm{vv}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{hh}}^{*}\rangle & \langle\boldsymbol{M}_{\mathrm{vv}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{vh}}^{*}\rangle & \langle\boldsymbol{M}_{\mathrm{vv}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{hv}}^{*}\rangle & \langle\boldsymbol{M}_{\mathrm{vv}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{vv}}^{*}\rangle\end{bmatrix}.\end{aligned} \tag{10}$$

其中, $\boldsymbol{M}$ 为散射矩阵, $\boldsymbol{C}$ 为极化协方差矩阵. 得到协方差矩阵后, 可求解出 Freeman 算法的 FRA, 即

$$\Omega_{\mathrm{Freeman}}=\frac{1}{2}\arctan\left[\sqrt{\frac{C_{22}+C_{33}-2\mathrm{Re}(C_{32})}{C_{11}+C_{44}+2\mathrm{Re}(C_{14})}}\right]. \tag{11}$$

其中, Re (·) 表示取实部函数, C_{ij}为极化协方差矩阵中对应的分量, $(i或j=1,2,3,4)$.

Li 等[14] 使用极化协方差矩阵 $\boldsymbol{C}$ 中更全面的参量计算 FRA, 有

$$\Omega_{\mathrm{Li}}=\frac{1}{2}\arctan\left[\frac{\mathrm{Re}(C_{13}+C_{24}-C_{12}-C_{34})}{C_{11}-C_{44}}\right]. \quad (12)$$

其中, C_{ij}为极化协方差矩阵中的对应分量 $(i,j=1,2,3,4)$.

Wang 等[15] 则使用圆极化基矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 的极化协方差矩阵 $\boldsymbol{C}_{_\mathrm{cir}}$ 推导 FRA, 有

$$\begin{bmatrix} C_{11_\mathrm{cir}} & C_{12_\mathrm{cir}} & C_{13_\mathrm{cir}} & C_{14_\mathrm{cir}} \\ C_{21_\mathrm{cir}} & C_{22_\mathrm{cir}} & C_{23_\mathrm{cir}} & C_{24_\mathrm{cir}} \\ C_{31_\mathrm{cir}} & C_{32_\mathrm{cir}} & C_{33_\mathrm{cir}} & C_{34_\mathrm{cir}} \\ C_{41_\mathrm{cir}} & C_{42_\mathrm{cir}} & C_{43_\mathrm{cir}} & C_{44_\mathrm{cir}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle \boldsymbol{Z}_{11}\boldsymbol{Z}_{11}^{*}\rangle & \langle \boldsymbol{Z}_{11}\boldsymbol{Z}_{12}^{*}\rangle & \langle \boldsymbol{Z}_{11}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}\rangle & \langle \boldsymbol{Z}_{11}\boldsymbol{Z}_{22}^{*}\rangle \\ \langle \boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{11}^{*}\rangle & \langle \boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{12}^{*}\rangle & \langle \boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}\rangle & \langle \boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{22}^{*}\rangle \\ \langle \boldsymbol{Z}_{21}\boldsymbol{Z}_{11}^{*}\rangle & \langle \boldsymbol{Z}_{21}\boldsymbol{Z}_{12}^{*}\rangle & \langle \boldsymbol{Z}_{21}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}\rangle & \langle \boldsymbol{Z}_{21}\boldsymbol{Z}_{22}^{*}\rangle \\ \langle \boldsymbol{Z}_{22}\boldsymbol{Z}_{11}^{*}\rangle & \langle \boldsymbol{Z}_{22}\boldsymbol{Z}_{12}^{*}\rangle & \langle \boldsymbol{Z}_{22}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}\rangle & \langle \boldsymbol{Z}_{22}\boldsymbol{Z}_{22}^{*}\rangle \end{bmatrix}. \quad (13)$$

其中, $\boldsymbol{Z}$ 为圆极化基矩阵, $\boldsymbol{C}_{_\mathrm{cir}}$ 为圆极化基矩阵的极化协方差矩阵.

$$\Omega_{\mathrm{Wang}}=\frac{1}{2}\left(\frac{\pi/2-\arg(C_{13_\mathrm{cir}}+C_{24_\mathrm{cir}})}{2}+\frac{\arg(C_{12_\mathrm{cir}}+C_{34_\mathrm{cir}})-\pi/2}{2}\right). \quad (14)$$

通过不同算法计算出 FRA 后, 将其带入式 (4) 中, 即可求得对应 SAR 信号传播路径的 TEC 值.

2.3 交叉圆极化积

B&B 算法用于计算 FRA 的交叉圆极化基$\boldsymbol{Z}_{12}$和$\boldsymbol{Z}_{21}$的共轭积的幅值, 即式 (13) 中的C_{23_cir}的幅值, 在一定程度上可以被视为信号信噪比的有效反映[28,29]. 基于式 (8) 得到

$$\begin{aligned}\boldsymbol{Z}_{12}&=[M_{\mathrm{VH}}-M_{\mathrm{HV}}+j(M_{\mathrm{HH}}+M_{\mathrm{VV}})],\\ \boldsymbol{Z}_{21}&=[M_{\mathrm{HV}}-M_{\mathrm{VH}}+j(M_{\mathrm{HH}}+M_{\mathrm{VV}})].\end{aligned} \quad (15)$$

根据式 (15) 计算$\boldsymbol{Z}_{12}$和$\boldsymbol{Z}_{21}$的共轭乘积, 并取其幅值

$$|\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}|=(M_{\mathrm{HH}}+M_{\mathrm{VV}})^{2}-(M_{\mathrm{VH}}-M_{\mathrm{HV}})^{2}. \quad (16)$$

从物理意义上理解, 对于一个完全极化的目标, 其交叉极化通道的接收功率理论上应为零. 然而在实际观测中, 由于系统噪声、地物目标以及电离层去极化效应的影响, 交叉极化通道中会出现非零能量. 因此, 如式 (16) 所示, 交叉极化积的幅值$|\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}|$可等价于主极化通道功率与交叉极化通道功率之差, 该差值能够有效表征信号的信噪比水平.

3 不同 FRA 反演算法的极区电离层 TEC 反演性能评估

选取发生在北极阿拉斯加地区 (地理坐标范围: 57°N−73°N, 142°W−154°W) 的事件, 携带 PALSAR-1 雷达的 ALOS-1 卫星于 2007 年 4 月 1 日 07:28 UT 经过该地区上空, 对地面进行观测. 基于系统标定、去噪和极化分解后的 PALSAR-1 全极化数据, 这里利用 B&B, Freeman, Wang 和 Li 四种 FRA 反演算法分别计算得到 SAR-TEC, 并与 GNSS 实测 TEC 进行对比验证, 评估不同算法在极区极光活动 (极光弧) 影响下的反演性能.

图 1 给出了 2007 年 4 月 1 日 07:26:19−07:30:25 UT, 基于 PALSAR-1 雷达于阿拉斯加上空对地拍摄的 31 景 SAR 图像拼接数据, 分别采用 B&B, Freeman, Wang, Li 的四种经典 FRA 反演算法, 通过式 (4) 计算获得 SAR-TEC 分布. 四种反演算法依次对应于图 1(a)～(d), 其中 TEC 的单位为 TECU (1 TECU=10^{16} m^{-2}). 对于反演计算出的 SAR-TEC 数据, 为了除去噪音, 参考 Pi 等[9] 使用的 boxcar 平均算法, 对数据做了滑动窗口平均 (21×41), 对应的地面分辨率降低至 486 m 和 146 m.

从图 1 中可以看出, 四种算法反演得到的 TEC 空间分布整体形态相似, 均于地理纬度 62°N 和 65°N 附近呈现弧状增强特征, 其中 62°N 处结构分别在各图中用箭头标识并放大表示, 并标注出该图像成像时刻 07:27:22 UT. 本研究利用 THEMIS 项目中地面全天空成像仪 (ASI) 的 Gakona 台站验证了该弧状 TEC 增强结构对应极光弧现象, 如图 2 所示. 另外, 该台站与美国国防气象卫星 (DMSP) 搭载的紫外光谱成像仪 (SSUSI) 联合观测证实了该区域中极光弧的存在[9,28]. B&B 算法 (图 1a) 反演的 TEC 值平滑连续, 其高值区的弧状结构最为明显[30]; Freeman 算法 (图 1b) 反演的 TEC 在数值上相对其他算法存在普遍性高估, 在地理纬度 61°N 和 70°N 附近存在数值接近, 甚至超过 20 TECU 的异常点; Wang 算法 (图 1c) 和 Li[16] 算法 (图 1d) 反演的 TEC 值也存在椒盐状噪声, 该噪声是地物影响的结果.

图 2 给出了 2007 年 4 月 1 日极光活动事件的联

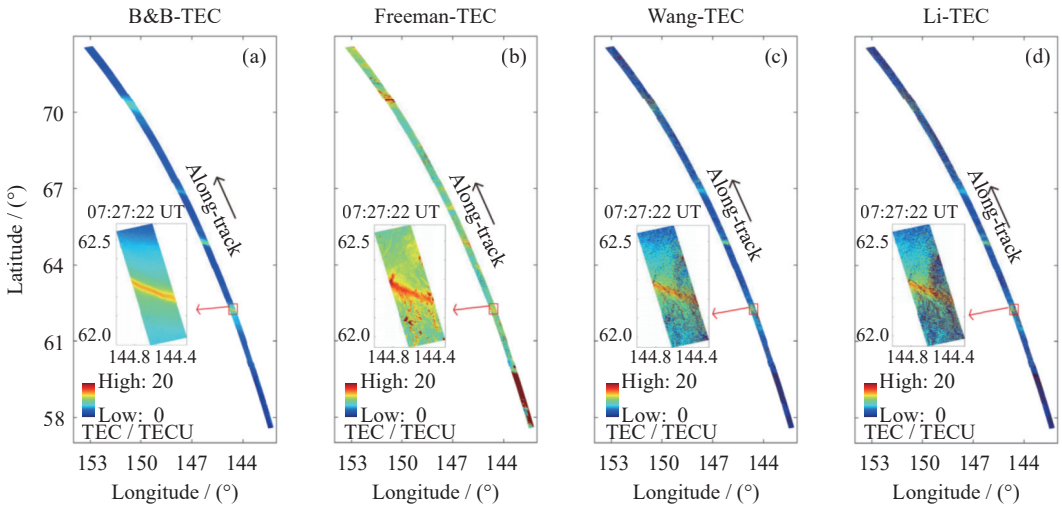


图 1 2007 年 4 月 1 日基于四种 FRA 反演算法的 TEC 结果

Fig. 1 TEC map based on four FRA inversion methods on 1 April 2007

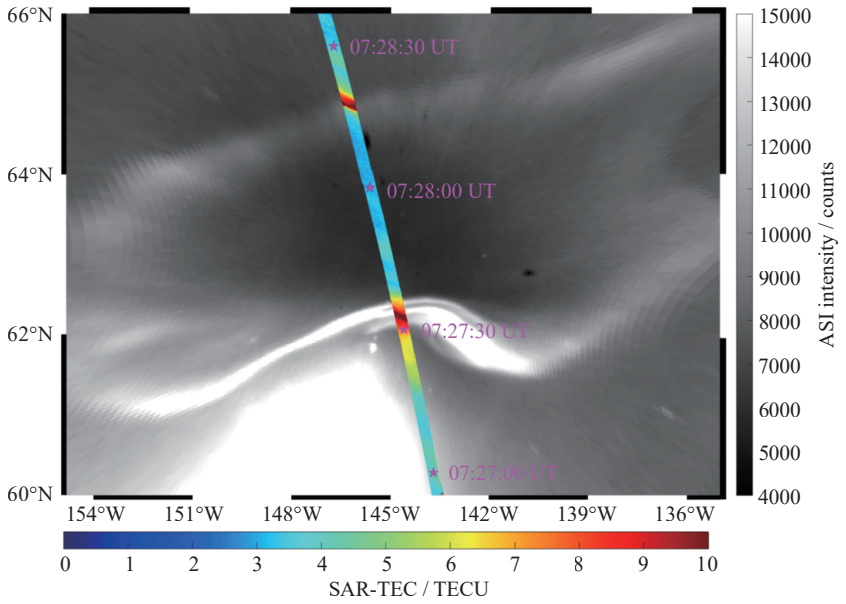


图 2 2007 年 4 月 1 日 THEMIS Gako 台站 ASI 观测与 SAR 反演 TEC 的对比

Fig. 2 Comparison between ASI observation and SAR inversion TEC at THEMIS Gako station on 1 April 2007

合观测结果. 背景为 Gako 台站全天空成像仪 (ASI) 在 07:28:00 UT 时刻的观测图像, 叠加的彩色区域为基于 B&B 算法反演的 SAR-TEC 分布, 图中紫色星标及旁边的紫色时间标注指示了 ALOS-1 卫星飞行至对应地理经纬度的时刻信息. 需要说明的是, SAR-TEC 结果由 PALSAR 沿轨扫描数据反演得到, 其数据采集时间范围约为 07:27:00—07:28:40 UT, 因此, 图中 TEC 分布是此时间窗口内不同空间位置观测的合成. 从图中可见, ASI 图像在 62°N 和 65°N 附近记录到两条明显的极光弧结构, 而 SAR-TEC 图像在相应的地理区域呈现出空间对应的增强特征. 这一对应关系表明, SAR 雷达通过反演电离层 TEC, 能够有效探测到由极光粒子沉降所引发的电离层电子密度扰动, 从而为研究极区电离层空间天气过程提供了高空间分辨率的雷达响应观测视角.

值得注意的是, 在对比分析时需考虑两种观测模式的时空匹配性差异. THEMIS ASI 以约 3 s·frame^{-1} 的时间分辨率进行全天空成像, 而 SAR 的条带扫描模式导致其图像是历时合成的. 尽管事件期间两条极光弧的主体位置相对稳定, 但快速演化的

细节可能导致 SAR-TEC 增强区的精细形态与特定瞬时 ASI 图像存在微小偏移. 为此, 选取卫星飞越两条极光弧之间关键区域时刻 (07:28:00 UT) 的 ASI 图像进行叠加对比, 以最大限度地保证时间参考的一致性, 并保证独立观测手段在捕获同一极光现象时的一致性. 此外, ASI 图像中 60°N 附近的亮斑结构经确认源于太阳的直射光, 而非极光信号.

为了利用 GNSS-TEC 观测评估四种反演算法获取 SAR-TEC 的准确性, 将图 1 中 SAR-TEC 的反演结果按照 GNSS-TEC 数据的 1°×1°空间分辨率进行网格化处理, 结果如图 3(a)～(d) 所示. GNSS-TEC 在 SAR 卫星附近的实际观测值如图 3 所示, 单位为 TECU. 其中, 纬度低于 59°N 和高于 67°N 的区域因 GNSS-TEC 观测数据空缺而未显示. 对比可知, 四种算法反演的 TEC 以及 GNSS-TEC 在地理纬度 62°N 和 65°N 存在明显的增强, 这与图 2 中极光弧引起的 TEC 增强相一致. 然而在数值上, B&B 算法、Wang 算法和 Li 算法反演的 SAR-TEC 普遍低于 GNSS-TEC, Freeman 算法则呈现明显的高估现象.

表 1 中统计了四种算法反演的 SAR-TEC 与 GNSS-TEC 在数据重合区域的对比结果. 在此次事件中, B&B 算法的均方根误差 RMSE 最小, 为 2.40 TECU, 而 Freeman 算法的 RMSE 最大, 达 9.80 TECU. 同时, B&B 算法的平均值为 4.22 TECU, 与 GNSS-TEC 的平均值 5.31 TECU 最为接近; Freeman 的平均值则为 12.83 TECU, 与 GNSS-TEC 的平均值差距最大. 这些数据表明, B&B 算法反演的 TEC 值最接近 GNSS-TEC 观测值. 因此, B&B-TEC 具有良好的稳定性和反演精度, 能可靠地反映极区电离层 TEC 的真实空间分布, 与中低纬地区的相关研究结果一致[16]. 基于此结果, 本文后续将采用 B&B 算法对 PALSAR 数据进行处理.

4 极光活动对 SAR 极化信号质量的影响

由于 FRA 及 SAR-TEC 反演的精度高度依赖于 SAR 信号的质量, 而极光现象中伴随的粒子沉降

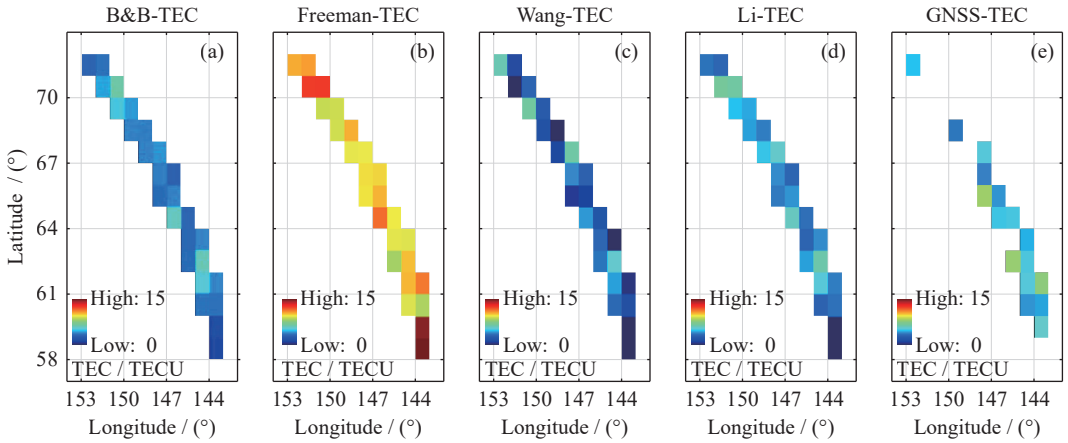


图 3 2007 年 4 月 1 日基于四种 FRA 反演算法的 TEC (a)～(d) 与 GNSS-TEC (e) 对比

Fig. 3 Comparison of TEC maps based on four FRA inversion methods (a)–(d) with GNSS-TEC (e) on 1 April 2007

表 1 2007 年 4 月 1 日事件四种 FRA 反演算法计算的 TEC 与 GNSS-TEC 的统计结果

Table 1 Statistics of TEC calculated by four FRA inversion methods and GNSS-TEC for the event on 1 April 2007

Method	B&B	Freeman	Wang	Li	GNSS
max	6.97	42.33	6.50	8.00	8.65
min	2.17	8.10	0.33	1.92	3.70
mean	4.22	12.83	4.01	4.11	5.31
RMSE/TECU	2.40	9.80	5.60	4.86	—

等过程会显著影响电离层电离程度, 并产生不均匀体等结构, 造成穿越该区域的 SAR 信号畸变, 进而影响 FRA 和 SAR-TEC 的反演精度. 为探索极光活动对 SAR 信号的具体影响, 本文基于全极化 SAR 数据, 对比分析了由 B&B 算法反演的 FRA 与 SAR 图像交叉圆极化积, 即式 (9) 中 $\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$ 幅值[22] 的统计分布特征, 并讨论其可能的物理联系.

图 4 和图 5 分别给出了同一区域 (图 1 中放大的区域) 不同极光活动条件下的 SAR 观测数据, 图 4 为 2007 年 4 月 1 日发生极光弧时的观测结果, 图 5 为 2010 年 4 月 9 日无极光现象的观测结果. 在每个事件中, 反演的 FRA 的值用于辨别极光活动区域, 交叉圆极化积abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$)用于确定地物散射情况, 进而反映信号质量, 相应数据的统计分析结果见表 2.

图 4 给出了 2007 年 4 月 1 日 07:29 UT 极光活动事件的 FRA 与 abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) 的关系分析, 其中图 4(a) (c) 分别为利用 B&B 算法反演出的 FRA 值和 abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) 值, 与图 1 中放大部分的子图对应, 该图像的地理经纬度覆盖范围为 (61.96°N−62.56°N, 144.25°W−145.03°W). 由图 4(a) 可看出, FRA 所反映的电离层影响情况, 其中红色弧状结构对应极光弧引起的 FRA 变化; 可以看到该弧中心的 TEC 值最大, 且 TEC 通量增加的范围, 在卫星运动方向 (方位向) 上远大于相反方向, 即方位向上的 TEC 梯度显著大于反方向的 TEC 梯度. 图 4(c) 能够体现出地物散射特性, 可识别出地面山脊、河流等区域, 图中, 粉红色方框标示该极光事件中极光弧的中心区域, 该区域记为 Region 1; 蓝色方框标示极光弧附近的区域, 该区域记为 Region 2. 图 4(b) (d) 分别为上述两个区域内 FRA 与 abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) 的散点分布及其统计关系. 其中图 4(b) 是基于 FRA 和 abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) 的二维核密度估计, 揭示数据聚集特征. 从图中可明显看出, 在有极光情况下, 两个区域的 FRA 覆盖范围差距变大, Region 1 的 FRA 值在 5°附近, 而 Region 2 的值在 3°附近, 两个区域的 FRA 差异表明 B&B 算法能通过 FRA 显示电离层的影响; 同时, 由于 Region 1 的 abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) 的最小值显著低于 Region 2, 表明 Region 1 区域信号的主极化通道的能量小于 Region 2, 即 Region 1 的雷达回波信噪比低于 Region 2.

上述结果表明, 极光活动通过特定的物理机制显著调制了 SAR 信号的极化信息. 其影响主要体现在两个方面. 首先, 极光粒子沉降会急剧增强路径上的

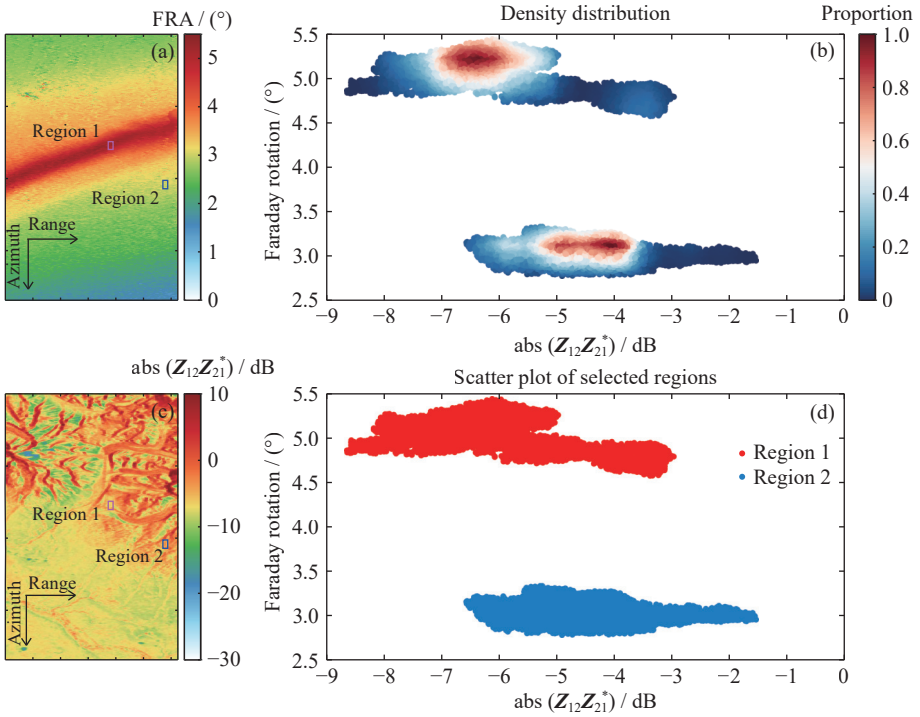


图 4 极光活动时 FRA 与 abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) 分布及其相关分析

Fig. 4 Distribution and correlation analysis of FRA and abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) during aurora activity

电离层电离度, 导致局部 TEC 增加. 根据式 (4), FRA 与 TEC 成正比, 因此穿越极光弧区域的信号会经历更强的法拉第旋转效应, 表现为反演得到的 FRA 值显著增大 (见图 4 中 Region 1), 该效应直接改变了信号的极化方向. 其次, 极光活动伴生的电离层不规则体会对电磁波产生强烈的去极化散射. 这种散射导致一部分信号能量从主极化通道泄漏至交叉极化通道, 从而降低了主极化与交叉极化通道的能量比, 即反映为交叉圆极化积幅值的减小 (见图 4 与表 2), 造成信号信噪比下降. 因此, FRA 增大与信噪比降低这两类观测现象, 共同揭示了极光活动通过“增强电离度”和“引发去极化散射”这两条路径对雷达极化信息的综合调制作用.

为了排除地物对信号的影响, 图 5 利用与图 4 对应的卫星重访数据, 即 2010 年 4 月 9 日 07:29 UT 的 SAR 图像, 反演出了该事件的 FRA 图像图 5(a) 和 abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) 二维图像图 5(c) 及其相关关系图像图 5(b) (d). 从图 5(a) 中可以看到图像无明显变化, 表明无电离层扰动现象, 其中仅图像左上角存在异常值, 这是地物 (山峰顶部) 散射所贡献, 表示地物类型也会在一定程度上对 FRA 产生影响. 图 5(c) 与图 4(c) 进行对比可以看出, 该景数据是 2007 年事件的重访数据. 这里利用红色方框选出地理位置与 Region 1 相同的区域, 记为 Region 3; 利用蓝色方框选

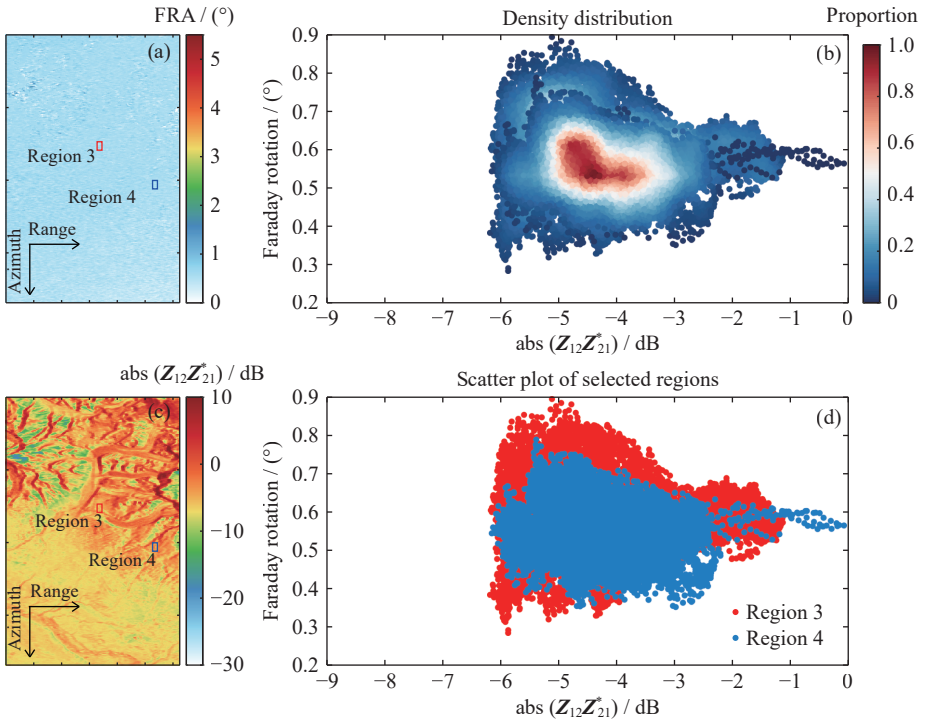


图 5 无极光活动时 FRA 与 abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) 分布及其相关性分析

Fig. 5 Distribution and correlation analysis of FRA and abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) without aurora activity

表 2 有无极光活动下各区域 FRA 与交叉圆极化积的统计特征对比

Table 2 Comparison of statistical characteristics of FRA and Cross-Polarization product in different regions with and without aurora activity

Item	abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$)/dB				FRA/(°)			
	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4
min	–8.642	–6.570	–6.173	–6.143	4.574	2.780	0.284	0.352
max	–2.970	–1.541	–1.123	–0.082	5.439	3.332	0.893	0.787
mean	–6.141	–4.443	–4.179	–4.209	5.068	3.014	0.585	0.556
STD	1.566	0.822	0.799	0.764	0.127	0.057	0.065	0.060

出地理位置与 Region 2 相同的区域, 记为 Region 4, 需特别说明的是, 红框与蓝框的采样规模完全相同. 在图 5(b) (d) 中, 红色散点为 Region 3 数据, 蓝色散点为 Region 4 数据, 可以看到, 所选的 Region 3 和 Region 4 的 FRA 值和 abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) 覆盖范围和集中区域基本相同, 因此可以从图 5 初步验证 Region 3 和 Region 4 的地物散射特性基本相同.

表 2 定量对比了两个事件中 4 个区域 (Region 1～4) 的 abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) 与 FRA 统计特征. 对比 4 个 Region 的 abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) 统计数据可知, Region 3 和 Region 4 的最小值与平均值较为接近, Region 4 的最小值和平均值相对于 Region 3 相差不到 1%, 由 abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) 体现地物的散射特性可说明两个 Region 的散射特性相近. 另外两个区域的值均大于 Region 1, 略大于 Region 2, 表明受到极光活动影响时, 信号的信噪比会降低, 暗示主极化通道能量可能向交叉极化通道转移. 由标准差 (STD) 可知, Region 1 的信号离散程度显著大于 Region 3, Region 4, 说明极光活动使信号起伏变大, 导致信号的稳定性降低. 此外, 4 个 Region 的 FRA 值也表现出类似的统计规律. Region 1 FRA 的平均值最大, Region 3 和 Region 4 区域的平均值最小且相近, 也证明 Region 3 和 Region 4 区域的电离层扰动相对较小, 同时由 Region 1 的 STD 最大, 进一步说明了此时的电离层扰动使信号起伏变大, 稳定性降低. 该统计特征与电离层不规则体引发的扰动理论相符, 表明在极光活动期间, FRA 和 abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) 的反演结果呈现出更高的空间变异性与不稳定性.

综上所述, 基于 abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) 和 FRA 的平均值、最小值以及标准差等统计特征, 可见不同极光活动条件下的 SAR 信号存在显著差异. 这些差异表明极光弧活动对信号的信噪比和稳定性会产生影响, 具体表现为加剧信号去极化并引入更强扰动, 进而加大反演结果的不稳定性.

5 讨论

在极光活动影响的极区电离层环境下, 对比了 4 种基于 31 景全极化 SAR 数据的 FRA 反演算法反演出的 SAR-TEC 结果. 实验表明, B&B 算法的反演结果与 GNSS 实测 TEC 数据的吻合最好. 该发现与中低纬平静电离层条件下的研究结论一致[16]. 由于极区电离层存在极光粒子沉降、等离子体对流等复杂过程, 其电子密度分布呈现强烈的时空不对称性和各向异性, 电离层不规则体可能破坏散射矩阵的互易性, 导致高度依赖互易性或均匀介质假设的算法[15] 在极区产生显著误差. 因此, 证明 B&B 算法在复杂的极区极光活动条件下表现出的精确性与鲁棒性, 体现了该算法的抗噪能力.

需要指出的是, 本文中基于法拉第旋转角反演得到的 SAR-TEC 是沿雷达信号传播路径的斜路径总电子含量 (Slant TEC), 而用于验证的 GNSS-TEC 数据是经过模型映射函数处理后的垂直总电子含量 (vTEC). 二者在几何定义上存在本质差异, 斜 TEC 反映了信号整个传播路径上的电子总数, 其值通常大于同一位置天顶方向的垂直 TEC. 在本文研究的极区, ALOS-1 卫星的观测天顶角相对较小, 一定程度上减小了这种几何差异对空间分布形态对比的影响. 此外, GNSS 信号源自约 20000 km 高的卫星, 其 vTEC 反映了从地面至卫星高度的整层电离层电子含量; 而 ALOS-1 卫星轨道高度约为 692 km, 其 L 波段信号主要受其轨道高度以下电离层的影响. 因此, 反演的 SAR 斜 TEC 主要表征了 692 km 高度以下的电离层电子含量, 这使得其数值普遍小于 GNSS vTEC(见表 1). 这种差异源于观测高度本身的不同, 而非反演误差. 本文的核心目的是评估不同 FRA 算法在反演同一 SAR 信号路径 TEC 时的相对性能, 而非获取绝对垂直 TEC 值. 在明确上述物理背景的前提下, 将 SAR 斜 TEC 的空间分布及相对数值与 GNSS vTEC 进行对比, 足以有效区分不同算法的反演精度与稳健性, 得出的“B&B 算法最优”的结论是稳健的.

基于在极区极光条件下具有更高性能的 B&B 算法, 借鉴 Wang 等[22] 所使用的算法, 即利用 FRA 与 abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) 的二维图像进行联合分析, 首次探究了极光活动对全极化 SAR 信号的调制作用. 研究结果显示, 在极光事件发生时, FRA 值显著增大, 同时交叉极化通道的回波功率同步显著提升. 该联合变化模式证明, 极光活动能有效调制全极化 SAR 信号. 其物理机制在于: 极光粒子沉降一方面增强了电离层的电离度, 直接导致法拉第旋转效应增强 (表现为 FRA 值增大); 另一方面产生了小尺度的电离层不规则

体, 这些不规则体对电磁波产生强烈的散射和去极化效应, 致使雷达信号能量从主极化通道泄漏至交叉极化通道, 表现为 abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) 变小. 该分析为“极光活动–电离层扰动–雷达信号调制”这一物理链条提供了直观、可靠的观测证据, 也从信号层面解释了极光扰动条件下不同 FRA 反演算法出现性能分化的原因.

需要指出的是, 研究进行的区域对比尚未能完全排除不同地物散射特性对观测结果的潜在影响. 尽管图 3(a) 与图 4(a) 中对比区域的地理经纬度相互对应, 但不同时间对比区域内的微观地表构成并非绝对恒定, 本文仅可尽量保证地物散射特性相近, 从而降低地物带来的影响. 因此, 观测到的信号差异更合理地解释为极光 (电离层) 效应与地物散射共同作用的结果, 但结果也能在一定程度上说明极光活动在该实验中占主要的影响作用. 此外, 除 2010 年 4 月 9 日事件外, 还对其他时间的卫星重访事件 (例如 2009 年 4 月 6 日事件) 进行了相同实验, 实验结果与本文中结果一致, 有力地支持了本文结论.

研究结果证实, 搭载于 ALOS-1 卫星的 L 波段全极化 SAR 具备监测极区电离层二维精细结构的独特能力. 基于 SAR 反演的高分辨率 TEC 图像不仅能够定位极光弧, 更能揭示其亚千米级的细节、陡峭的边缘梯度, 如图 1 和图 2 所示. 这种精细的空间细节是传统探测手段难以全面获取的, 地基 ASI 虽能提供二维图像, 但是其分辨率通常为千米级, 并且观测结果受大气辉光积分效应的影响, 会平滑掉小尺度结构, 而 SAR 的 TEC 成像能力恰好弥补了该观测空白. 从物理机制上看, SAR 图像中极光弧边缘的梯度现象, 均直接对应沉降粒子所处加速电场的不同区域, 导致其能量和电离度不同而产生梯度. 因此, 以全极化 SAR 为代表的天基遥感设备反演 TEC, 提供了一种全新的雷达响应视角, 研究电离层 TEC 扰动和极光活动. 未来可选取开阔海洋等表面性质均匀的区域开展个案研究; 同时, 期待获取更多全极化 SAR 数据, 通过扩大样本量进行统计分析, 从而更清晰地揭示并量化极光活动对 SAR 信号的具体影响机制. 另外, 针对不同电离层现象 (例如舌状电离结构、等离子体云块等) 开展多频段 (例如 P, C, X 波段)SAR 的对比观测, 将是重要的研究方向.

6 结论

基于 31 景 ALOS-1 全极化 PALSAR 数据, 系统分析了极光活动影响下的全极化 SAR 不同 FRA 反演算法的性能, 并探究了极光活动对全极化 SAR 信号的调制机制. 研究首先表明, 在极区极光活动影响的电离层环境下, B&B 算法反演的 TEC 与 GNSS-TEC 最为吻合, 体现出较高的准确性与算法鲁棒性. 其次, 通过应用 FRA 与 abs ($\boldsymbol{Z}_{12}\boldsymbol{Z}_{21}^{*}$) 的联合分析算法, 证实极光活动会通过增强电离层电离度或产生去极化效应的方式调制全极化 SAR 信号. 此外, 本研究证实全极化 SAR 具备监测极区电离层精细结构的独特潜力, 为研究电离层 TEC 扰动、不均匀体分布及极光活动演化提供了高空间分辨率的雷达观测新途径. 随着 ALOS-4 PALSAR-3 及更多新一代全极化 SAR 系统的投入运行, 未来有望获取更丰富的观测数据, 从而进一步系统揭示极光活动对 SAR 信号的定量影响机制, 推动极区空间环境遥感探测的发展.

医学伦理 研究不涉及人体或动物实验.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] WANG X Y, ZHANG Q H, WANG C, *et al*. Unusual shrinkage and reshaping of Earth's magnetosphere under a strong northward interplanetary magnetic field[J]. *Communications Earth & Environment*, 2023, **4**(1): 31

[2] ZHAO B L, ZHANG J J, ZHANG Q H, *et al*. Simultaneous observation of duskside and dawnside subauroral polarization streams during an intense magnetic storm[J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, **52**(17): e2024GL114160

[3] LU S, XING Z Y, ZHANG Q H, *et al*. Ionospheric scintillation and geomagnetic disturbance caused by space hurricanes[J]. *Space Weather*, 2025, **23**(7): e2025SW004435

[4] WANG Cheng. Study of Ionospheric Effects and Correction Methods on Space-Borne SAR Imaging[D]. Xi'an: Xidian University, 2015

[5] JI Y F, DONG Z, ZHANG Y S, *et al*. Equatorial ionospheric scintillation measurement in advanced land observing satellite phased array-type L-band synthetic aperture radar observations[J]. *Engineering*, 2025, **47**: 70-85

[6] HALLBERG B, SMITH G, OLOFSSON A, *et al*. Performance simulation of spaceborne P-band SAR for global biomass retrieval[C]//Proceedings of 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Anchorage: IEEE, 2004: 503-506

[7] ABE T, OHKI M, TADONO T. Observation of huge ice-

berg detachment from Larsen-C ice shelf in Antarctic peninsula by ALOS-2/PALSAR-2[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia: IEEE, 2018: 5172-5175

[8] JI Y F, DONG Z, ZHANG Y S, *et al*. Transionospheric Synthetic Aperture Radar Observation: a comprehensive review[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2025, **13**(2): 273-313

[9] PI X Q, FREEMAN A, CHAPMAN B, *et al*. Imaging ionospheric inhomogeneities using spaceborne synthetic aperture radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A4): A04303

[10] 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

[11] PI X Q. Ionospheric effects on spaceborne synthetic aperture radar and a new capability of imaging the ionosphere from space[J]. *Space Weather*, 2015, **13**(11): 737-741

[12] BICKEL S H, BATES R H T. Effects of magneto-ionic propagation on the polarization scattering matrix[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1965, **53**(8): 1089-1091

[13] 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

[14] LI L, ZHANG Y S, YANG L, *et al*. Faraday rotation angle estimation from polarimetric covariance matrix[C]//*Proceedings of the IET International Radar Conference*. Xi'an: IET, 2013: 174

[15] WANG C, LIU L, CHEN L, *et al*. Improved TEC retrieval based on spaceborne PolSAR data[J]. *Radio Science*, 2017, **52**(3): 288-304

[16] ZHU Yixun, XIONG Chao, WANG Fengjue. The analysis of TEC inversion algorithms based on full-polarization SAR observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2024, **67**(11): 4015-4029

[17] WANG C, GUO W L, ZHANG Q H, *et al*. 3-D computerized ionospheric tomography with GPS, SAR, and ionosonde[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, **61**: 5210109

[18] WANG C, WANG L M, ZHAO H S, *et al*. Ionospheric electron density reconstruction based on space-borne SAR in Alaska regions[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2024, **21**: 4011805

[19] WANG C, ZHAO H S, WANG L M, *et al*. GPS-based ionospheric tomography from the combination of PolSAR and E-CHAIM[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, **62**: 5205714

[20] SATO H, KIM J S, OTSUKA Y, *et al*. L-band synthetic aperture radar observation of ionospheric density irregularities at equatorial plasma depletion region[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(16): e2021GL093541

[21] MOHANTY S, SINGH G, CARRANO C S, *et al*. Ionospheric scintillation observation using space-borne synthetic aperture radar data[J]. *Radio Science*, 2018, **53**(10): 1187-1202

[22] WANG X, ZHANG Y H, LI D. Estimation of ionospheric Faraday rotation over ocean areas using L-band spaceborne PolSAR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2024, **45**(9): 3054-3074

[23] IWATA T, ISHIDA H, OSAWA Y, *et al*. Advanced Land Observing Satellite (ALOS): development and on-orbit status[J]. *The Journal of Space Technology and Science*, 2007, **23**(1): 1_1-1_13

[24] RIDEOUT W, COSTER A. Automated GPS processing for global total electron content data[J]. *GPS Solutions*, 2006, **10**(3): 219-228

[25] APPLETON E V, BEYNON W J G. The application of ionospheric data to radio-communication problems: part I[J]. *Proceedings of the Physical Society*, 1940, **52**(4): 518-533

[26] GUO W, CHEN J, YANG W, *et al*. Impact of vertical electron density distribution on ionospheric total electron content measurements based on spaceborne low-frequency SAR[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Fort Worth: IEEE, 2017: 4421-4424

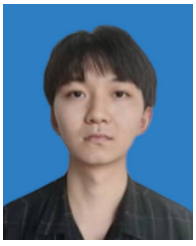
[27] QUEGAN S. A unified algorithm for phase and cross-talk calibration of polarimetric data-theory and observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, **32**(1): 89-99

[28] MEYER F J, 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

[29] JI Y F, ZHANG Y S, ZHANG Q L, *et al*. Retrieval of ionospheric faraday rotation angle in low-frequency polarimetric SAR data[J]. *IEEE Access*, 2019, **7**: 3181-3193

[30] ZHU Y X, XIONG C, JI Y F, *et al*. Influence of monoenergetic and broadband aurora on SAR imaging: a case study[J]. *Advances in Space Research*, 2025, **76**(7): 3815

作者简介



李长浚（第一作者） 男, 硕士研究生, 研究方向为基于 SAR 的电离层扰动.
E-mail: 202417818@mail.sdu.edu.cn



邢赞扬（通信作者） 男, 博士, 副教授, 研究方向为极区电离层–磁层耦合和极光物理.
E-mail: xingzanyang@sdu.edu.cn