

联合全极化SAR和IRI估计三维电子密度分布

陈镜渊, 朱武, 张勤, 李振洪

引用本文:

陈镜渊, 朱武, 张勤, 等. 联合全极化SAR和IRI估计三维电子密度分布[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(11): 1677–1685.
CHEN Jingyuan, ZHU Wu, ZHANG Qin, et al. Estimation of Three-Dimensional Electron Density Distribution Using Polarimetric SAR and IRI Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(11): 1677–1685.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[融合InSAR和GNSS的三维形变监测:利用方差分量估计的改进SISTEM方法](#)

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1598–1608 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210113>

[星基反演TEC与地基GNSS TEC数据融合可行性分析](#)

Feasibility of the Data Fusion Between Space-Borne and Ground-Based TEC Products

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 557–564 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180293>

[基于通讯信号塔RCS建模的SAR影像绝对辐射定标](#)

SAR Image Absolute Radiometric Calibration Based on RCS Modeling of Communication Tower

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(11): 1746–1755 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210052>

[川藏铁路沿线Sentinel-1影像几何畸变与升降轨适宜性定量分析](#)

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1450–1460 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210130>

[附加高水平分辨率PWV约束的GNSS水汽层析算法](#)

GNSS Water Vapor Tomography Algorithm Constrained with High Horizontal Resolution PWV Data

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(11): 1627–1635 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210055>



联合全极化SAR和IRI估计三维电子密度分布

陈镜渊^{1,2} 朱武¹ 张勤¹ 李振洪¹

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

2 中国电子科技集团公司第二十研究所,陕西 西安,710068

摘要:三维电子密度是研究电离层空间结构的关键参数,现有的技术和方法存在空间分辨率不足的缺陷。基于此,提出一种联合全极化合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)和国际参考电离层(international reference ionosphere, IRI)模型估计高空间分辨率三维电子密度分布的方法。首先利用全极化SAR计算法拉第旋转(Faraday rotation, FR)角;然后根据FR角结合磁场信息估计垂直总电子含量(vertical total electron content, VTEC);最后联合估计的VTEC和IRI电子密度剖面求解三维空间电子密度分布。为了验证所提方法的可行性,利用覆盖美国阿拉斯加地区的先进陆地观测卫星(advanced land observing satellite, ALOS)-1全极化SAR影像进行了实验,并获取GPS及Poker Flat测站的非相干散射雷达(incoherent scattering radar, ISR)数据对实验结果进行验证。结果发现,相对于IRI三维电子密度,所提方法获取的高空间分辨率三维电子密度整体误差减少了33.57%,其中高于133 km的电子密度误差减少了47.98%。

关键词:合成孔径雷达;法拉第旋转;国际参考电离层;电子密度

中图分类号:P237

文献标志码:A

电离层是日-地空间系统的重要组成部分,会对无线电波产生折射、散射、极化面旋转等影响,对基于无线电波的对地观测技术造成延迟误差,如GPS的电离层延迟^[1]、合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)的相位超前、群延迟以及法拉第旋转(Faraday rotation, FR)等^[2]。此外,电离层变化与地震也存在一定关系^[3-4]。因此,研究电离层不仅可以了解整个日-地空间系统,而且可以估计空间环境效应对无线电通信的影响。

总电子含量(total electron content, TEC)和电子密度是研究电离层的两个关键参数。TEC表示穿过电离层的单位截面柱体中电子数之和,反映了电离层的二维空间信息;而电子密度则描述了电离层三维空间结构信息,不仅包含电离层的水平结构信息,还包含了垂直结构信息。目前,GPS通过发射不同频率的信号获取垂直总电子含量(vertical total electron content, VTEC)^[5-6];电离层与气候星座观测系统(the constellation observing system for meteorology, ionosphere, and climate, COSMIC)通过掩星事件获取电子密度剖面^[7];非相干散射雷达

(incoherent scattering radar, ISR)利用散射信号获取连续时间段内的电子密度剖面^[8];电离层测高仪通过发射高频脉冲波并测量反射回波延迟获取F2层临界频率(foF2)等电离层参数^[9];国际参考电离层(international reference ionosphere, IRI)^[10]和差分整合移动平均自回归模型^[11]等也可获取VTEC和电子密度。然而,上述方法都存在空间分辨率不足的问题,而星载SAR凭借全天时、全天候、空间分辨率高等优点,已成为研究高空间分辨率电离层参数的重要手段。

文献[12]根据FR角与TEC之间的关系,利用全极化SAR数据计算了地磁北极及加科纳地区的TEC,证明了使用星载SAR数据反演TEC的可能性;文献[13]提出了利用距离分频法获取TEC的方法,将获取高空间分辨率TEC的方法拓展到单极化SAR领域;文献[14]提出了利用双波段路径延迟获取TEC的方法,进一步证实了分频法估计TEC的可行性;文献[15]利用全极化先进陆地观测卫星(advanced land observing satellite, ALOS)/相控合成孔径雷达(phased array type L-

收稿日期:2021-05-29

项目资助:国家自然科学基金(42074040, 41941019);国家重点研发计划(2019YFC1509802)。

第一作者:陈镜渊,硕士,主要研究方向为利用SAR/InSAR进行三维电离层建模。2018126022@chd.edu.cn

通讯作者:朱武,博士,教授。zhuwu@chd.edu.cn

band synthetic aperture radar, PALSAR)数据,分别计算了高、中、低纬度地区的TEC分布,并分析了不同纬度的电离层特征;基于传统双波段路径延迟的方法,文献[16]提出了三波段路径延迟法,该方法可获取去除多重散射误差后的TEC;文献[17]提出了利用方位向子波段获取hmF2以及漂移速度场等电离层参数的方法,并使用ALOS-1/2数据进行实验,获取了相应的电离层参数结果;文献[18]使用全极化ALOS PALSAR数据反演了3组VTEC结果,并将其与ISR在几乎同一时空的实测数据进行比较,首次利用实测数据验证了利用全极化SAR反演VTEC的有效性。

目前利用SAR估计电离层参数只能获取二维的VTEC分布,难以获取精细化的三维电子密度分布。基于此,本文利用全极化SAR计算得到的VTEC联合IRI的电子密度剖面信息,提出了

$$\begin{bmatrix} M_{HH} & M_{VH} \\ M_{HV} & M_{VV} \end{bmatrix} = A e^{j\varphi} \begin{bmatrix} 1 & \delta_2 \\ \delta_1 & f_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Omega & \sin\Omega \\ -\sin\Omega & \cos\Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{VH} \\ S_{HV} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Omega & \sin\Omega \\ -\sin\Omega & \cos\Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \delta_3 \\ \delta_4 & f_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{HH} & N_{VH} \\ N_{HV} & N_{VV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, A 为雷达系统的总体增益; j 为复数; φ 为双程相位延迟; $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ 为因发射与接收的非完全独立性导致的串扰; f_1, f_2 为通道失配; Ω 为单程FR角; S 为真实散射系数; N 为附加噪声;角标代表不同极化方式,HH(horizontal horizontal)表示水平发射水平接收的同向极化方式,VV(vertical vertical)表示垂直发射垂直接收的同向极化方式,VH(vertical horizontal)表示垂直发射水平接收的交叉极化方式,HV(horizontal vertical)表示水平发射垂直接收的交叉极化方式。经系统误差改正后的观测值散射矩阵为^[20-21]:

$$\begin{bmatrix} M_{HH} & M_{VH} \\ M_{HV} & M_{VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Omega & \sin\Omega \\ -\sin\Omega & \cos\Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{VH} \\ S_{HV} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Omega & \sin\Omega \\ -\sin\Omega & \cos\Omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据真实散射矩阵的散射互易性($S_{HV} = S_{VH}$),式(2)可变为:

$$\begin{cases} M_{HH} = S_{HH} \cos^2\Omega - S_{VV} \sin^2\Omega \\ M_{VH} = S_{HV} + (S_{HH} + S_{VV}) \sin\Omega \cos\Omega \\ M_{HV} = S_{HV} - (S_{HH} + S_{VV}) \sin\Omega \cos\Omega \\ M_{VV} = S_{VV} \cos^2\Omega - S_{HH} \sin^2\Omega \end{cases} \quad (3)$$

由于法拉第旋转效应,观测值散射矩阵的 $M_{HV} \neq M_{VH}$,因此可根据式(3)解算FR角 Ω 。由式(3)可导出多种FR角估计器^[22-24],其中Bickel and Bates估计器最为稳定,计算如下:

一种三维电子密度分布估计方法。

1 本文方法

本文方法的具体流程如图1所示,首先利用全极化SAR数据计算FR角;然后根据得到的FR角结合磁场信息计算VTEC;最后联合IRI模型电子密度剖面求解三维空间电子密度分布。

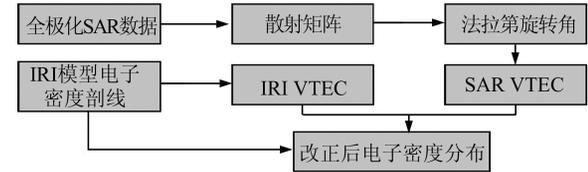


图1 本文方法流程图

Fig. 1 Flowchart of the Proposed Method

1.1 利用全极化SAR数据计算FR角

对于全极化SAR系统,观测值散射矩阵 M 可表示为^[19]:

$$\Omega = \frac{1}{4} \arg(Z_{12} Z_{21}^*), -\frac{\pi}{4} < \Omega < \frac{\pi}{4} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{HH} & M_{VH} \\ M_{HV} & M_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $\arg(\cdot)$ 表示取幅角函数; $*$ 表示共轭数。

1.2 由法拉第旋转角反演VTEC

SAR信号穿过电离层产生的FR角可表示为^[13]:

$$\Omega = \frac{2.365 \times 10^4}{f^2} \int n_e B \cos\theta ds \quad (6)$$

式中, f 为信号频率; n_e 为电子密度; B 为磁场强度; θ 为磁场与SAR信号夹角; $\int n_e ds$ 表示沿信号传播路径对电子密度积分。考虑到积分路径(信号传播路径)上 B 近似成线性变化,且 $\cos\theta$ 几乎不变,因此取路径上的平均磁场强度 B_0 作为 B ,式(6)可变为:

$$\Omega = \frac{2.365 \times 10^4}{f^2} B_0 \cos\theta \sec\phi \text{VTEC} \quad (7)$$

式中, ϕ 为SAR入射角。对式(7)进行变换后得:

$$\text{VTEC} = \Omega \frac{f^2}{2.365 \times 10^4 \times B_0 \cos\theta \sec\phi} \quad (8)$$

由此可知,在磁场信息已知的情况下,可由FR角计算VTEC。

1.3 联合 IRI 电子密度剖面估计三维空间电子密度分布

IRI 是根据真实观测数据结合电离层模式形成的经验模型,可提供高时空分辨率的全球电离层参数。然而,由于观测数据相对较少,电离层特性不稳定,IRI 模型计算得到的 VTEC 以及电子密度的精度不理想。由于 SAR 数据计算的 VTEC 具有较高的可靠性,因此本文基于 SAR 数据计算的 VTEC 对 IRI 模型的电子密度进行改正,得到较高可靠性的三维空间电子密度分布。IRI 可提供全球 60~2 000 km 的电子密度,根据 VTEC 的定义,可得到 IRI 模型的 VTEC,计算如下:

$$\text{VTEC}_{\text{IRI}} = \sum_{h=H_{\min}}^{H_{\max}} N(h) \quad (9)$$

式中, VTEC_{IRI} 为 IRI 模型的 VTEC; $N(h)$ 为 IRI 高度为 h (单位: km) 处的电子密度; H_{\max} 、 H_{\min} 分别为计算 VTEC 时的最大、最小高度。由于 IRI 提供的电子密度存在误差,从而导致估计的 VTEC 也存在误差。本文利用 SAR 数据计算的 VTEC 对 IRI 电子密度进行改正,计算如下:

$$\hat{N}(h) = N(h) \times \frac{\text{VTEC}_{\text{SAR}}}{\text{VTEC}_{\text{IRI}}} \quad (10)$$

式中, $\hat{N}(h)$ 为改正后高度 h (单位: km) 处的电子密度; VTEC_{SAR} 为 SAR 数据计算的 VTEC。为了验证改正方法的合理性,对改正后的电子密度求和得到:

$$\sum_{h=H_{\min}}^{H_{\max}} \hat{N}(h) = \frac{\text{VTEC}_{\text{SAR}}}{\text{VTEC}_{\text{IRI}}} \sum_{h=H_{\min}}^{H_{\max}} N(h) \quad (11)$$

将式(9)代入式(11)中得到:

$$\sum_{h=H_{\min}}^{H_{\max}} \hat{N}(h) = \text{VTEC}_{\text{SAR}} \quad (12)$$

综上,经改正后,IRI 模型 VTEC 与 SAR 计算的 VTEC 相等。

2 实验结果

2.1 数据及研究区域

为了验证本文方法的可行性,利用全极化的 ALOS-1/PALSAR 数据进行实验。实验区域位于美国阿拉斯加地区,分别采用升轨(实验一)和降轨(实验二)数据来验证 VTEC 和电子密度结果,数据详细参数如表 1 所示。

表 1 实验使用的 SAR 影像

Tab. 1 SAR Images Used in the Experiment

实验	日期	入射角 $\phi/^\circ$	飞行方向	轨道高度/km	轨道号	影像号	采集时间
实验一	2007-04-01	23.94	升轨	695	243	1250~1260	07:28
实验二	2009-08-03	23.98	降轨	695	618	2270~2310	21:08

数据覆盖范围如图 2 所示,褐色矩形为实验一研究区域,黑色矩形为实验二研究区域,红色星号为 ISR 测站(Poker Flat 测站),红色三角形为 GPS 观测站所在的费尔班克斯城。为了验证实验结果,收集了 SAR 对应时间和位置的 ISR 数据。

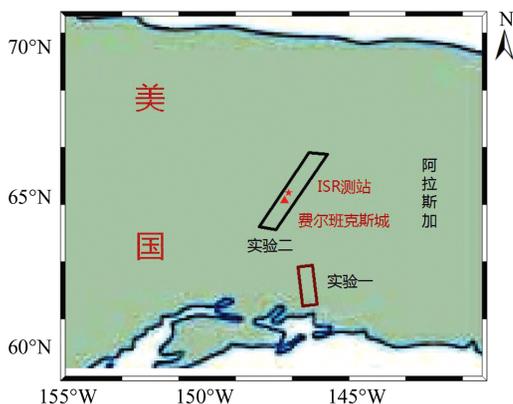


图 2 研究区域

Fig. 2 Study Area

2.2 利用 SAR 数据计算 FR 角

本文利用收集到的全极化数据计算 FR 角,首先,读取全极化 SAR 数据并构建观测值散射矩阵 M ;其次,采用 Bickel and Bates FR 角估计器计算 FR 角,根据式(5)计算 $Z_{12}Z_{21}^*$;然后,对计算的 $Z_{12}Z_{21}^*$ 进行多视处理以减小运算量,本文实验中多视比距离向为 2,方位向为 14;最后,利用自适应光谱滤波器对多视后的 $Z_{12}Z_{21}^*$ 进行滤波,并根据式(4)计算 FR 角,结果如图 3 所示。

图 3(a)为实验一 FR 角分布图,可以看出明显的 FR 角异常现象。对数据进行统计可知 FR 角最大值为 13.4° ,最小值为 3.2° ,平均值为 6.1° 。根据法拉第效应分析,该研究区域上空的磁场和电离层的共同作用使得 SAR 信号发生了极化面的旋转,从而产生了 FR 角。图 3(b)为实验二 FR 角分布图。对 FR 角进行统计分析发现 FR 角最小值为 2° ,最大值为 2.2° ,平均值为 2.1° 。该研究

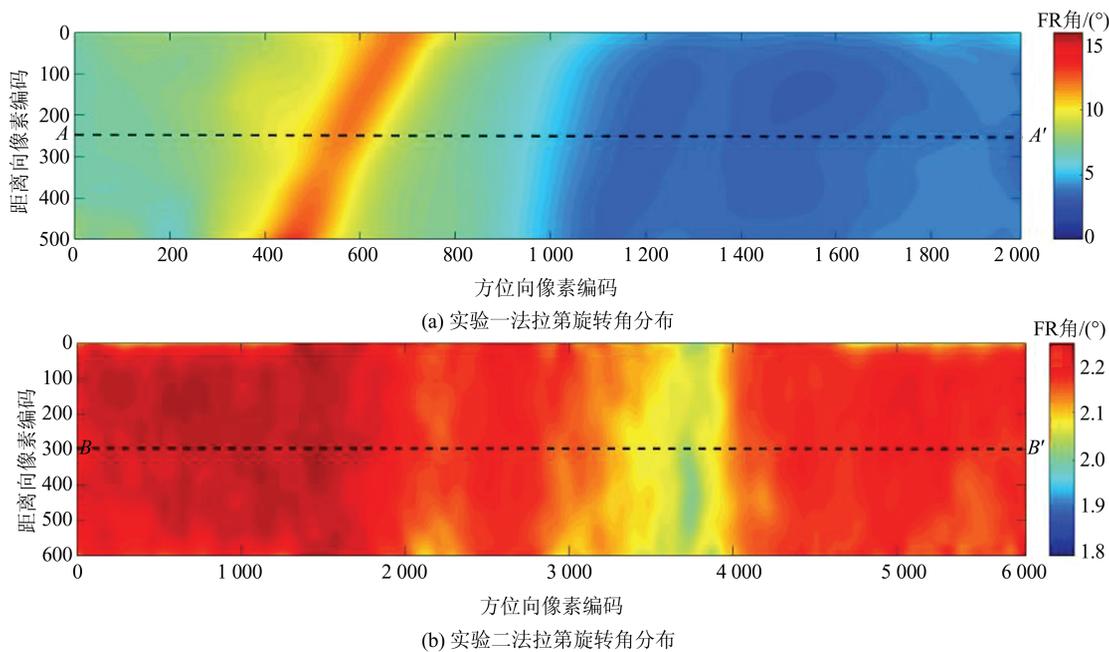


图3 研究区法拉第旋转角分布

Fig.3 Distribution of FR Angles in Study Area

区域FR角较为稳定,变化区间大小仅为 0.2° ,推断实验二没有电离层异常事件。

2.3 计算VTEC

首先,基于FR角,可由式(8)计算VTEC分布,获取国际参考地磁场(international geomagnetic reference field, IGRF)提供的磁场强度、磁倾角以及磁偏角,由于ALOS卫星飞行高度为700 km左右,地磁场在高度向近似成线性变化,且分析电离

层模型得出电离层通常在300 km左右电子密度达到峰值,本文使用高度为300 km的值作为磁场信息平均值;其次,利用数字高程模型(digital elevation model, DEM)和SAR成像参数计算SAR入射角 ϕ 的分布图;然后,将SAR入射角 ϕ 以及磁场信息转换到SAR坐标系下,并计算磁场与SAR入射角 ϕ 之间的夹角 θ 的分布;最后,根据式(8)计算研究区域VTEC分布图,结果如图4所示。

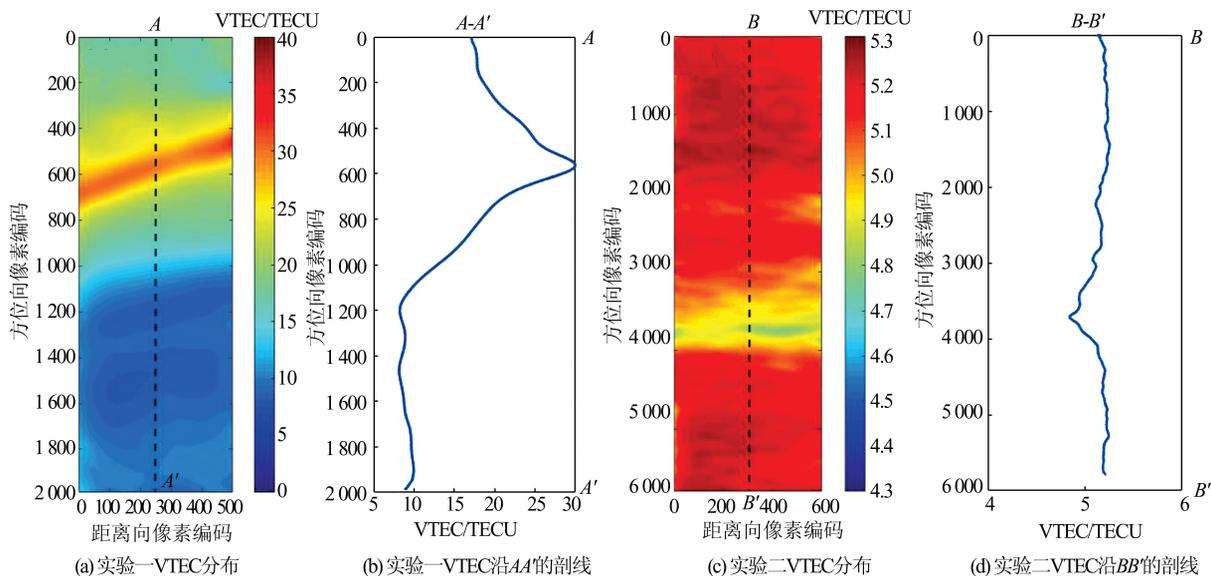


图4 研究区域VTEC分布图

Fig. 4 Distribution of VTEC in Study Area

从图4可以看出,实验一的VTEC最大值为33.4 TECU,最小值为7.9 TECU,平均值为15.2

TECU;实验二的VTEC最大值为5.3 TECU,最小值为4.8 TECU,平均值为5.2 TECU。结合图

3 可以看出, VTEC 分布与 FR 角分布趋势相似。这是因为 VTEC 由 FR 角和磁场信息共同得到, 且本实验中, 磁场信息的变化相对于 FR 角的变化较小, 因此得到的 VTEC 和 FR 角高度相关。在实验一中, VTEC 变化区间较大, VTEC 变化可达 20 TECU 左右, 推测存在电离层异常事件; 在实验二中, VTEC 变化较小, 仅为 0.5 TECU, 不存在电离层异常事件。但在图 4(d) 中, 方位向 4 000 行左右出现了一个较小的沟壑, 通过查看研究区域的卫星影像发现该位置为费尔班克斯城的水域, 推测为该水域影响了 SAR 信号后向散射系数, 导致 VTEC 出现误差。

2.4 联合 IRI 估计三维电子密度分布

首先根据 IRI 模型获取研究区域的电子密度剖面; 然后由 SAR 数据计算的 VTEC 对电子密度剖面进行改正, 从而获得整个区域三维电子密度分布。在计算 IRI VTEC 时, IRI 模型的输入值为时间、经纬度以及高度范围, 其中时间为 2009 年年积日第 215 天 21:08, 经纬度与实验二 SAR 数据覆盖范围相同, 高度范围为 80~700 km。IRI 模型输出值为对应时空 80~700 km 的电子密度, 将 IRI 模型输出的电子密度相加可获取 VTEC。由于 SAR 飞行高度约为 700 km, 假设空间中每千米的电子密度分布均匀, 且电离层通常位于 80 km 上方, 因此式 (10) 中 h 为 80~700 km, 按每千米分层, 约 620 层。考虑到后续验证的需要, 这里只显示了实验二的三维电子密度。

图 5 为实验二不同高度处的电子密度分布。由图 5 可知, 电子密度在 300 km 和 400 km 处较大, 在其他高度则较小。

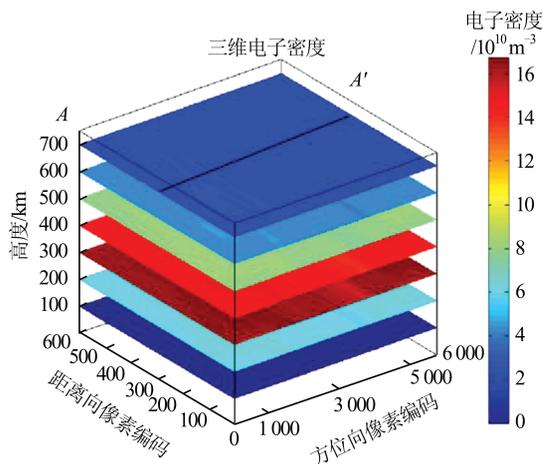


图 5 实验二的三维电子密度分布

Fig.5 Estimated 3D Electron Density Distribution in Experiment 2

图 6 为图 5 中 AA' 连线的剖面, 反映了不同高度的电子密度在方位向的变化趋势。由图 6 可知, 研究区域不同高度的电子密度在方位向有着相似的变化趋势, 且该趋势近似于图 4(d) 的 VTEC 变化趋势; 同时由剖面可知, VTEC 中的沟壑现象同样出现在了电子密度剖面中; 在本文方法中, 电子密度结果与使用的 VTEC 密切相关。

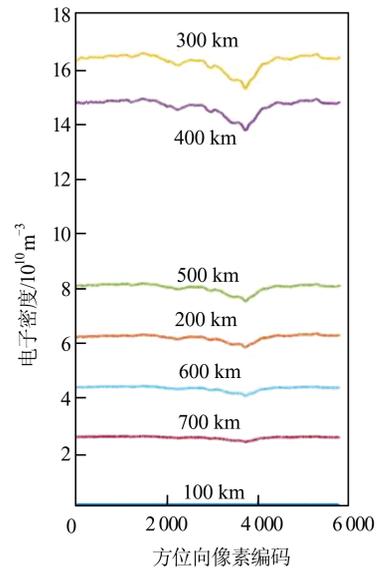


图 6 不同高度处水平电子密度剖面

Fig. 6 Profiles of Electron Density at Different Altitudes

3 误差分析

3.1 VTEC 结果验证

为验证 FR 角估计 VTEC 的可靠性, 分别利用 GPS 和 ISR 数据验证实验一和实验二结果。实验一中 SAR 获取位置和时刻无对应 ISR 数据, 因此使用附近的 GPS 数据进行验证。图 7(a) 为 GPS 在实验一 SAR 获取时间段内的轨迹, 红色矩形为实验一研究区域, 红色五角星为 GPS 测站, 图 7(b) 为 GPS 估计的 VTEC 数据, 棕色虚线为 SAR 数据采集时间。由图 7(b) 可知, 在 07:30 左右, GPS VTEC 突然上升, 验证了之前对电离层异常的推测。此外, GPS 在 SAR 采集时间的 VTEC 为 18.3 TECU, SAR 数据 VTEC 平均值为 15.2 TECU, 差值为 3.1 VTEC。两者虽有一定差距, 但考虑到 GPS 数据在时间和空间上与 SAR 数据范围并未完全对应, 会导致两者存在误差, 可以认为两者在电离层扰动情况下计算的 VTEC 有相当的一致性。对于实验二, SAR 获取位置和时刻附近 GPS 轨迹相隔较远, 因此利用精度更高的 ISR 数据进行验证。对实验二 SAR 卫

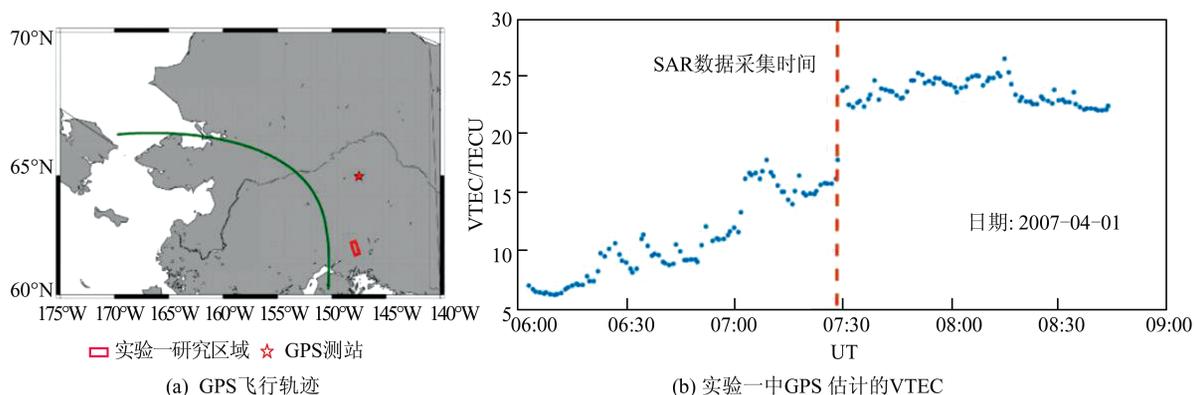


图7 GPS飞行轨迹以及实验一得到的VTEC

Fig. 7 GPS Flight Trajectory and GPS-Derived VTEC at SAR-Acquired Time in Experiment 1

星时刻的ISR电子密度进行积分,计算出ISR VTEC为5.5 TECU, SAR VTEC为5.3 TECU,两者相差0.2 TECU,进一步验证了SAR估计VTEC的可靠性。

3.2 三维电子密度结果验证

为验证本文方法估计三维电子密度的可靠性,使用ISR实测的电子密度对三维电子密度结果进行验证。由于在实验一的研究区域及时

间没有对应的ISR数据,因此使用Poker Flat测站2009年年积日第215天21:06 ISR的电子密度数据验证实验二的电子密度结果。考虑到ISR数据与实验二SAR数据采集时间仅相差2 min,且该时间段电离层没有异常活动,因此认为可将ISR电子密度数据作为真实的电子密度结果与本文结果进行比较分析,结果如图8所示。

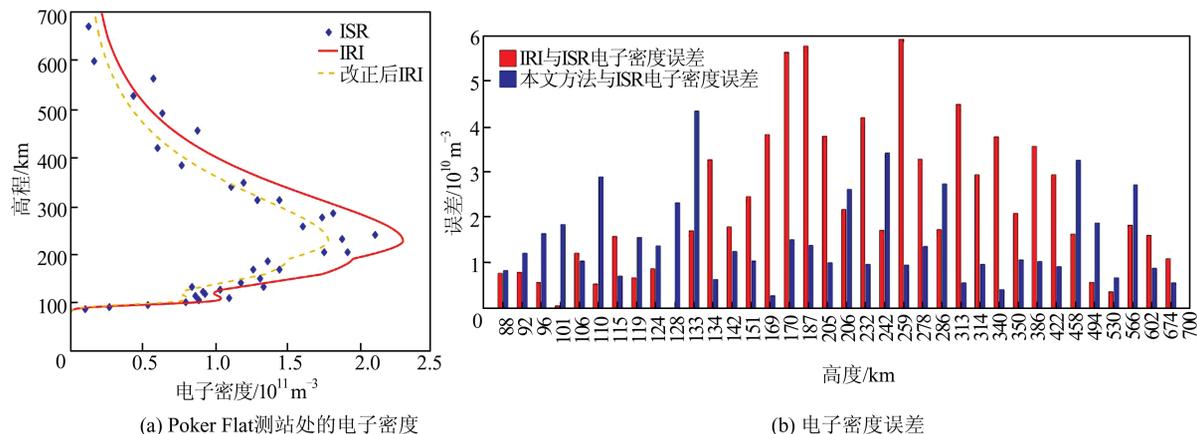


图8 SAR估计的电子密度误差分布

Fig. 8 Errors Distribution of Electron Density Estimated by SAR

图8(a)为ISR、IRI及本文方法获取的电子密度数据,其中蓝色菱形符号为ISR数据,红色实线为IRI电子密度剖面,棕色虚线为经本文方法改正后的电子密度剖面。由图8(a)可知,改正前IRI的电子密度普遍高于ISR电子密度,推测原因为IRI的VTEC估值偏高导致其电子密度也偏高。在改正后,电子密度偏高现象得到明显改善,分析原因为SAR数据计算的VTEC与真实的VTEC更为接近,因此使用SAR计算的VTEC进行改正后改善了原来电子密度偏高的现象。对误差进行统计发现,改正前IRI电子密度误差和为 $8.14 \times 10^{11}/\text{m}^3$,改正后电子密度误差

和为 $5.41 \times 10^{11}/\text{m}^3$,整体误差减少了33.57%。

为进一步对比不同高度处的电子密度精度,将ISR获取的电子密度作为真值,计算了IRI与本文方法的误差,如图8(b)所示,红色条形图为IRI与ISR电子密度差值的绝对值,蓝色条形图为本文方法与ISR电子密度差值的绝对值。由图8(b)可知,对于低于地球表面133 km部分的电子密度结果,本文方法获取的电子密度误差更大;对于高于地球表面133 km部分的电子密度结果,本文方法获取的电子密度精度明显高于IRI模型。统计结果发现,IRI在133 km以下误差为 $7.2 \times 10^{10}/\text{m}^3$,133 km以上误差为 $7.42 \times 10^{11}/\text{m}^3$;

本文方法133 km以下误差为 $1.55 \times 10^{11}/\text{m}^3$,133 km以上误差为 $3.86 \times 10^{11}/\text{m}^3$,误差减少了47.98%。通过查询相关资料后发现,IRI模型在低空部分使用的是垂测站和火箭探测的数据,而在高空部分使用的是卫星探测数据^[25]。再考虑到在研究区域附近存在ELELSON垂测站,因此推测在该研究区域IRI模型低空部分的电子密度本身可靠性较高,而本文方法改正时对所有高度进行了等比例的调整,导致低空部分改正后误差增大。

4 结 语

本文提出一种利用全极化SAR数据结合IRI模型估计高空间分辨率三维电子密度分布的方法,并选择覆盖阿拉斯加地区的ALOS-1全极化数据进行实验,对结果进行分析得出如下结论:

1)利用全极化SAR能够获取高空间分辨率的VTEC分布。基于FR角与VTEC之间的关系,利用全极化SAR数据计算了研究区域VTEC分布,并利用GPS和ISR数据验证可靠性。结果发现,实验一获取的含有电离层异常扰动的VTEC与GPS估计的VTEC相差3.1 TECU,实验二利用SAR估计的VTEC与ISR的VTEC相差0.2 TECU,证明了利用全极化SAR估计VTEC分布的可靠性。

2)基于SAR获取了高精度VTEC,并联合IRI电子密度剖面获取了研究区域三维电子密度分布。结果发现,在不同高度处的三维电子密度不同,300~400 km处较大,而在其他高度处相对较小,且不同高度的电子密度在水平方向具有相似分布趋势。将结果与ISR数据对比后发现,本文方法获取的电子密度在整体误差上比IRI模型少33.57%,在低于133 km高度的误差比IRI模型大,在高于133 km高度的误差比IRI模型少47.98%,这与IRI模型所使用的数据相关。

参 考 文 献

- [1] Chen J Y, Zebker H A. Ionospheric Artifacts in Simultaneous L-Band InSAR and GPS Observations [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(4): 1 227-1 239
- [2] Zhu W, Ding X L, Jung H S, et al. Mitigation of Ionospheric Phase Delay Error for SAR Interferometry: An Application of FR-Based and Azimuth Offset Methods [J]. *Remote Sensing Letters*, 2017, 8(1): 58-67
- [3] Calais E, Minster J B. GPS Detection of Ionospheric Perturbations Following the January 17, 1994, Northridge Earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(9): 1 045-1 048
- [4] Ma Yifang, Jiang Weiping, Xi Ruijie. Analysis of Seismo-Ionospheric Anomalies in Vertical Total Electron Content of GIM for Lushan Earthquake [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(9): 1 274-1 278 (马一方, 姜卫平, 席瑞杰. 利用全球电离层地图分析芦山地震电离层异常变化[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2015, 40(9): 1 274-1 278)
- [5] Jakowski N, Heise S, Wehrenpfennig A, et al. GPS/GLONASS-Based TEC Measurements as a Contributor for Space Weather Forecast [J]. *Journal of Atmospheric and Solar - Terrestrial Physics*, 2002, 64(6): 729-735
- [6] Xu Chaoqian, Yao Yibin, Zhang Bao, et al. Impact of the Ionosphere and GPS Surveying Caused by Solar Storms on August 1, 2010 [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(6): 689-693 (许超钤, 姚宜斌, 张豹, 等. 2010-08-01太阳风暴对电离层及GPS测量的影响分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2013, 38(6): 689-693)
- [7] Wu M J, Guo P, Fu N F, et al. Topside Correction of IRI by Global Modeling of Ionospheric Scale Height Using COSMIC Radio Occultation Data [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, 121(6): 5 675-5 692
- [8] Liu L B, Le H J, Chen Y D, et al. New Aspects of the Ionospheric Behavior over Millstone Hill During the 30-Day Incoherent Scatter Radar Experiment in October 2002 [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, 124(7): 6 288-6 295
- [9] Xu F L, Li Z S, Zhang K F, et al. An Investigation of Optimal Machine Learning Methods for the Prediction of ROTI [J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2020, 3(2): 1-15
- [10] Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 [J]. *Radio Science*, 2001, 36(2): 261-275
- [11] Ma Chaozhong, Zhu Jianqing, Han Songhui. Model Selection Method Based on ARIMA Model in Outliers Detection of Satellite Clock Offset [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(2): 167-172 (马朝忠, 朱建青, 韩松辉. 基于ARIMA模型的卫星钟异常值探测的模型选择方法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2020, 45(2): 167-172)
- [12] Meyer F, Nicoll J. Mapping Ionospheric TEC Using Faraday Rotation in Full-Polarimetric L-

- Band SAR Data[C]//The 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany, 2008
- [13] Rosen P A, Hensley S, Chen C. Measurement and Mitigation of the Ionosphere in L-Band Interferometric SAR Data [C]// IEEE Radar Conference, Arlington, Texas, USA, 2010
- [14] Jehle M, Frey O, Small D, et al. Measurement of Ionospheric TEC in Spaceborne SAR Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(6): 2 460-2 468
- [15] 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
- [16] Wang C, Zhang M, Xu Z W, et al. TEC Retrieval from Spaceborne SAR Data and Its Applications[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, 119(10): 8 648-8 659
- [17] Kim J S, Papathanassiou K. SAR Observation of Ionosphere Using Range/Azimuth Sub-Bands[C]// The 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Berlin, Germany, 2014
- [18] Wang C, Guo W L, Zhao H S, et al. Improving the Topside Profile of Ionosonde with TEC Retrieved from Spaceborne Polarimetric SAR [J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 516-526
- [19] Freeman A. Calibration of Linearly Polarized Polarimetric SAR Data Subject to Faraday Rotation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(8): 1 617-1 624
- [20] 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
- [21] 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): 1 089-1 091
- [22] Chen J, Quegan S. Improved Estimators of Faraday Rotation in Spaceborne Polarimetric SAR Data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(4): 846-850
- [23] Li L, Zhang Y S, Dong Z, et al. New Faraday Rotation Estimators Based on Polarimetric Covariance Matrix [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(1): 133-137
- [24] Kim J S, Papathanassiou K. Correction of Ionospheric Effects on SAR Interferometry Using a Combined TEC Estimator [J]. *Acta Cybernetica*, 2013, 20(1): 127-146
- [25] Zhang Jing, Liu Jingnan, Li Cong. Research and Discussion on the International Reference Ionosphere Model [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2017, 37(1): 114-119 (张静, 刘经南, 李丛. 国际参考电离层模型的研究与探讨 [J]. *桂林理工大学学报*, 2017, 37(1): 114-119)

Estimation of Three-Dimensional Electron Density Distribution Using Polarimetric SAR and IRI Observations

CHEN Jingyuan^{1,2} ZHU Wu¹ ZHANG Qin¹ LI Zhenhong¹

¹ School of Geological Engineering and Surveying and Mapping, Chang'an University, Xi'an 710054, China

² The 20th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Xi'an 710068, China

Abstract: Objectives: The ionosphere, extending from about 60 km to 1000 km above the earth's surface, is an important part of the solar-terrestrial space environment. To better understand and characterize the ionosphere, it is necessary to observe the ionospheric parameters such as total electron content (TEC) and three-dimensional (3D) electron density. However, the three-dimensional electron density derived by the current methods is limited due to the low-spatial resolution. A new method combining of full-polarimetric synthetic aperture radar (SAR) and the international reference ionosphere (IRI) model is proposed to estimate high-spatial 3D electron density distribution. **Methods:** Firstly, we calculate Faraday rotation (FR) angles from full polarimetric SAR data. Then, we estimate vertical total electron content (VTEC) using FR angles and geomagnetic field information, and reconstruct 3D electron density distribution by combining IRI electron

density profile with SAR-derived VTEC. **Results:** Application of the proposed method to ALOS-1 full-polarization SAR images with descending and ascending orbits over the region of Alaska shows that, for Experiment 1 with ascending orbit, SAR-derived VTEC is consistent with GPS-derived VTEC and the difference between them is about 3.1 TECU (total electron content unit). For Experiment 2 with descending orbit, the difference between SAR-derived VTEC and incoherent scattering radar (ISR) VTEC is only 0.2 TECU. When comparing with the electron density derived from ISR, the standard deviations has decreased by 33.57% for the proposed method, and the standard deviations has decreased by 47.98% at the attitude over 133 km. **Conclusions:** It can be concluded that it is capable to estimate high-spatial-resolution VTEC and 3D electron density from full-polarization SAR images. These products can help us better understand the characteristics of ionospheric variation in space.

Key words: synthetic aperture radar; Faraday rotation; international reference ionosphere; electron density

First author: CHEN Jingyuan, master, majors in modeling of three-dimensional electron density with SAR/InSAR. E-mail: 2018126022@chd.edu.cn

Corresponding author: ZHU Wu, PhD, professor. E-mail: zhuwu@chd.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (42074040, 41941019); the National Key Research and Development Program of China (2019YFC1509802).

引文格式: CHEN Jingyuan, ZHU Wu, ZHANG Qin, et al. Estimation of Three-Dimensional Electron Density Distribution Using Polarimetric SAR and IRI Observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(11): 1677-1685. DOI: 10.13203/j.whugis20210061(陈镜渊, 朱武, 张勤, 等. 联合全极化 SAR 和 IRI 估计三维电子密度分布[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(11): 1677-1685. DOI: 10.13203/j.whugis20210061)

(上接第 1626 页)

7.04 cm and 0.20 mm/s, respectively. **Conclusions:** The proposed method is feasible and effective.

Key words: GPS real-time orbit determination; orbit and clock corrections; low earth orbit (LEO) satellite; International Global Navigation Satellite System Service real-time service (IGS-RTS)

First author: ZHANG Wanwei, PhD candidate, specializes in the theory and method of GNSS navigation and satellite orbit determination. E-mail: wwzhang@sgg.whu.edu.cn

Corresponding Author: WANG Fuhong, PhD, professor, E-mail: fhwang@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (91638203, 62073044); the Open Research Fund of the Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University(19-02-03).

引文格式: ZHANG Wanwei, WANG Fuhong, GONG Xuewen, et al. A Centimeter-Level Real-Time Orbit Determination Method Using Space-Borne GPS Measurements Considering IGS-RTS Data Receiving Interruption[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(11): 1620-1627, 1685. DOI: 10.13203/j.whugis20200432(张万威, 王甫红, 龚学文, 等. 一种顾及 IGS-RTS 数据接收中断的厘米级星载 GPS 实时定轨方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(11): 1620-1627, 1685. DOI: 10.13203/j.whugis20200432)