针对星载SAR法拉第旋转估计的NeQuick-2模型精度分析

訾海峰[1],门志荣[2],陈筠力[3],孙永岩[1],刘艳阳[1]
(1.上海卫星工程研究所,上海201109;2.北京航空航天大学 电子信息工程学院,北京100191;
3.上海航天技术研究院,上海201109)

摘 要: P波段星载合成孔径雷达(SAR)凭借其较强的穿透能力,在对森林、沙地等观测方面具有较强的优势,但易受法拉第旋转等电离层干扰的影响,其图像质量严重下降。本文针对现有电离层模型的精度开展分析,以基于GPS的CODE GIM全球电离层实测数据为参考,对比评估NeQuick-2模型的电离层总电子量表征能力。在分析CODE GIM实测数据特点的基础上,讨论其在星载SAR领域的局限性;在解析NeQuick-2模型和方法的基础上,研究其表征精度的影响因素;通过对比该模型生成的电离层数据与CODE GIM数据,验证NeQuick-2模型的估计精度。结果表明:NeQuick-2模型可满足P波段星载SAR的法拉第旋转角估计和校正的需求。

关键词: 星载合成孔径雷达(SAR); P波段; CODE GIM数据; NeQuick-2模型; 电离层TEC

中图分类号: TN 957 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.05.012

Accuracy Evaluation of NeQuick-2 Model for Faraday Rotation Estimation of Space-Borne SAR

ZI Haifeng[1], MEN Zhirong[2], CHEN Junli[3], SUN Yongyan[1], LIU Yanyang[1]
(1.Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China;
2.School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
3.Shanghai Academy of Space Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: Due to the strong penetrating ability, P-band space-borne synthetic aperture radar (SAR) has significant advantages in the observation of forests, sandy land, etc. However, its image quality will be seriously degraded by the ionospheric interferences such as the Faraday rotation angle. In this paper, the accuracy of the existing ionospheric model is analyzed. The GPS-based CODE GIM global ionospheric data are used as a reference to compare and evaluate the ability of the NeQuick-2 model in estimating the total electron content (TEC) of ionosphere. First, the limitations of the CODE GIM data in the field of space-borne SAR are discussed. Then, based on the analysis of the NeQuick-2 model, the influencing factors are studied. Finally, the estimation accuracy of the NeQuick-2 model is verified by comparing the ionospheric data generated by the model with the CODE GIM data. The results show that the NeQuick-2 model can meet the requirements of estimating and correcting the Faraday rotation angle for P-band space-borne SAR.

Key words: space-borne synthetic aperture radar (SAR); P-band; CODE GIM data; NeQuick-2 model; total electron content (TEC) of ionosphere

收稿日期: 2019-12-13; **修回日期:** 2020-01-19
基金项目: 上海航天科技创新基金(SAST2018-040)
作者简介: 訾海峰(1980—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为卫星总体、精度测量技术。
通信作者: 门志荣(1988—),男,博士,主要研究方向为星载SAR工作体制、数据处理和计算机仿真。

0 引言

受太阳辐射的影响,大气层中的空气分子被电离为自由电子和带正电荷的离子,进而形成电离层,其一般位于地球表面60~1 000 km范围内。电离层随时间、季节、纬度、太阳黑子数目等发生变化,同时作为一种介电常数随机起伏的色散媒质,其对电磁波的幅度、相位、时延和极化状态等产生了一定的影响,从而导致信号发生畸变[1-2]。在星载SAR领域,对于低频段(P、L波段),其发射的电磁波信号在穿过电离层的过程中会引入电离层效应误差(包括色散效应、闪烁效应以及法拉第旋转效应等),最终严重影响了图像质量[3-4]。为保证图像质量,日本的在轨合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar,SAR)卫星ALOS-2开展了电离层效应误差补偿处理,欧空局(European Space Agency,ESA)正在研制的"BIOMASS"计划,也重点针对电离层效应补偿问题开展了相关研究[5-6]。如何精确探测和表征电离层,进而补偿电离层效应误差已成为P波段星载SAR领域的研究热点。

随着航天技术的发展,星载雷达成为探测电离层的重要手段。第一颗电离层探测雷达卫星Alouette-I于1962年发射成功[7]。此后,许多国家相继发射了多颗电离层探测雷达卫星。星载或地基设备发射的无线电信标穿过电离层时,其相位和振幅受到电离层效应的影响发生变化,通过测量该变化可反演传播路径上总电子含量(Total Electron Content, TEC)[8-9]。包括CODE (Center for Orbit Determination in Europe)、ESA (European Space Agency)和JPL(Jet Propulsion Laboratory)等在内的多个研究机构对GNSS数据进行了处理,发布了各自的电离层总电子量数据库,并提供更新和下载。

然而,受GNSS卫星轨道高度的影响,CODE等机构发布的数据均为沿地表至GNSS卫星高度的总电子量,而星载SAR在工作时,平台具有特定的高度和姿态控制策略[10],且电磁波总是以一定的入射角度照射目标。因此,基于GNSS的全球TEC数据无法直接用于星载SAR的电离层效应误差补偿。为了表征和估计电磁波在任意高度、沿任意方向传播时所经历的电离层电子总量,意大利的阿卜杜勒·萨拉姆国际理论物理中心建立了NeQuick-2三维电子密度模型,可沿任意方向进行积分,进而获取传播路径上电子总量[11]。

为了验证该模型的精度,本文对CODE发布的电离层垂直方向总电子量(Vertical Total Electron Content,VTEC)产品和NeQuick-2模型开展了对比分析。

1 基于GPS的电离层CODE数据库

CODE采用全球接近200个GPS/GLONASS接收站的数据,反演垂直于地表方向的电离层总电子量。CODE采用的接收站分布如图1所示。图中可见,南半球、海洋等区域的接收站分布较少,因此数据精度相比北美、欧洲等区域较低[12]。目前,CODE在其服务器(ftp://ftp. aiub. unibe. ch/CODE/)上提供了1994年至今的全球TEC数据,并提供更新和下载。该数据分辨率为经度5°、纬度2.5°,时间分辨率为2 h,精度为2~8 TECU(电子量单位,1 TECU=10^{16} m^{-2})[13]。在CODE电离层数据中,2002年之前的测量时间为世界标准时(Universal Time,UT)的奇数小时,即1:00 UT、3:00 UT等,2002年之后的测量时间为世界标准时的偶数小时,即0:00 UT、2:00 UT等。

考虑到任意目标区域的卫星过境时刻是可以根据卫星轨道参数进行预测的,因此,可以基于CODE GIM模型,生成卫星工作状态下的电离层TEC分布图。以晨昏轨道为例,卫星在地方时(Local Time,LT)的6:00或18:00过境。经度、地方时和国际标准时三者之间有如下关系:

$$L=\mathrm{mod}\left[\left(T_{\mathrm{L}}-T_{\mathrm{U}}\right)\cdot 15,180\right] \tag{1}$$

式中:L为经度(Longitude);T_{L}为地方时;T_{U}为世界标准时;mod[*]为取余运算。

此时,通过经度、地方时、标准时之间的关系,可从CODE GIM数据中提取出晨昏轨道TEC分布图。2008年1月1日全球地方时6:00的电离层TEC分布情况如图2所示,即卫星在晨昏轨道上所面临的电离层TEC分布。

然而,基于GPS测量的电离层分布是沿垂直于地表方向,从接收站至GPS卫星高度范围内的总电子量,因此,测得的全球电离层分布数据是二维的,无法提供高度维的电子量分布信息。对于P波段星载SAR系统,卫星平台高度一般位于500~800 km范围内,且电磁波以一定的入射角度照射地面目标,因此,无法直接采用基于GPS测量的电离层数

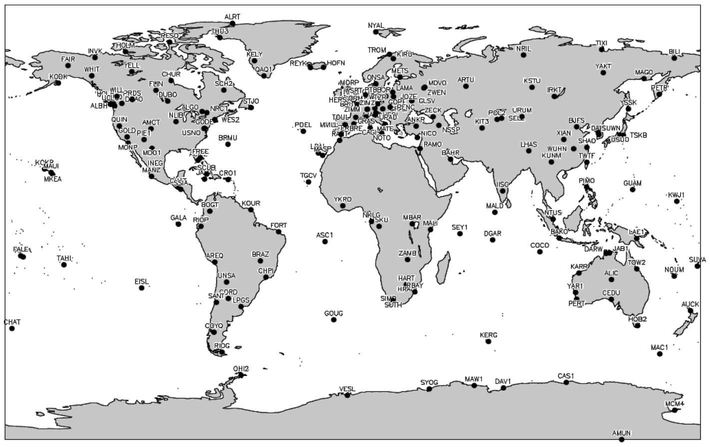


图 1　CODE 采用的接收站分布图

Fig.1　Distribution of GPS ground stations considered at CODE

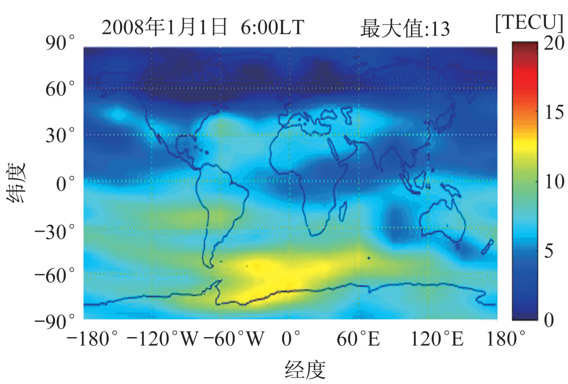


图 2　2008 年 1 月 1 日全球地方时 6:00 的电离层 TEC 分布

Fig.2　Distribution of the TEC at 6:00 LT on Jan. 1, 2008

据进行法拉第旋转角估计和误差补偿。此外，基于GPS获取的CODE GIM数据经纬度分辨率和时间分辨率均较低，进一步限制了其在P波段星载SAR领域的应用效能。

2　NeQuick-2电离层模型

为了表征电磁波沿任意方向传播时所经历的电子总量，意大利的阿卜杜勒·萨拉姆国际理论物理中心利用电离层测量数据，建立了NeQuick-2三维电子密度模型，可沿任意方向进行积分，进而获取传播路径上的电子总量。在NeQuick-2模型中，针对电离层的垂直分布情况，分别对E层、F1层、F2层和顶层建立了表征模型，如图3所示。

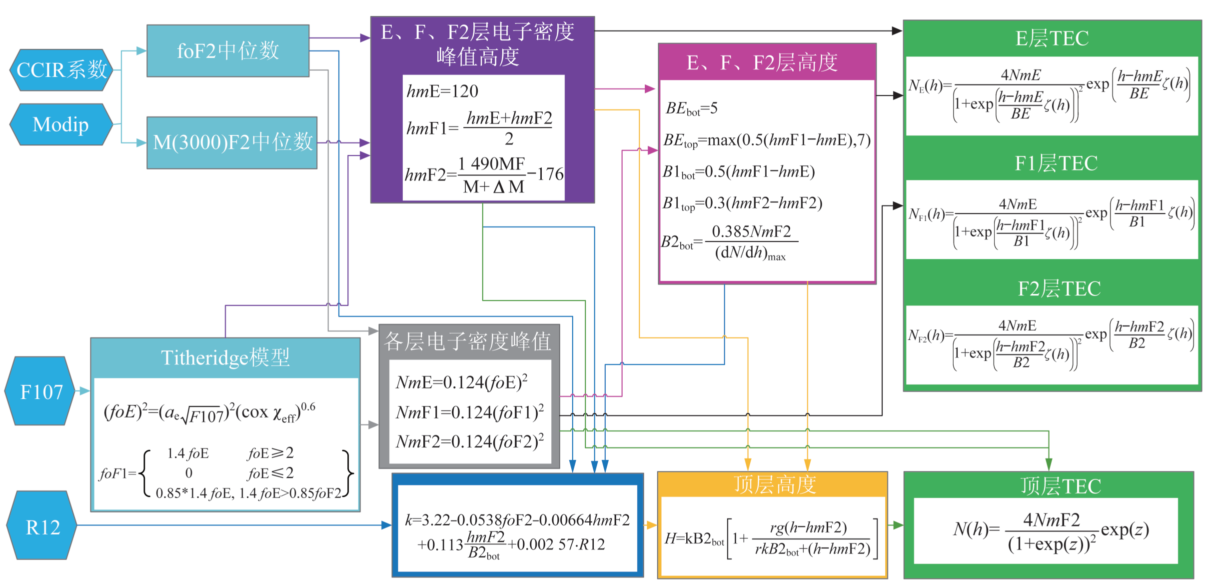


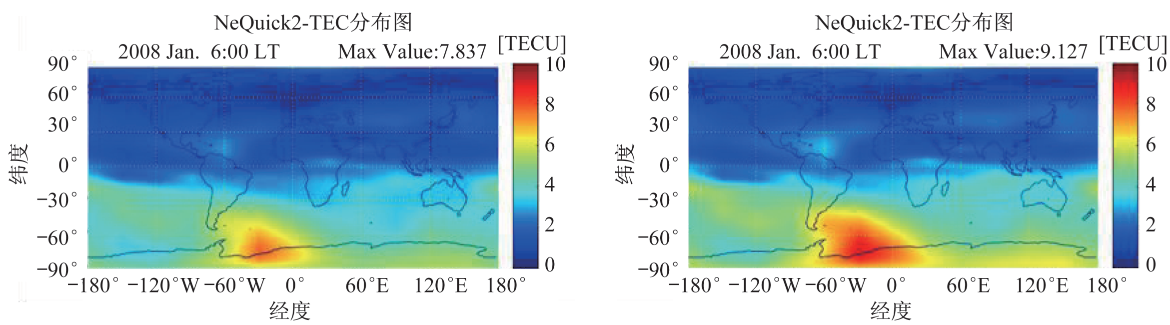
图 3　NeQuick-2电离层分层表征模型

Fig.3　Ionospheric model of NeQuick-2

该模型的关键输入参数包括：国际无线电通信委员会（International Radiocommunication Consultative Committee，CCIR）提供的电离层系数、电离层映射纬度（Modifieddip latitude，Modip）、10.7 cm太阳无线电噪声通量（$F107$），以及太阳黑字数（$R12$）。NeQuick-2电离层分层表征模型如图3所示[11]。由图3可见，由于目前提供的CCIR系数和Modip均为每月的中位数，所以，NeQuick-2模型给出的电离层TEC也是每个月的中位数，暂时无法表征任意一天的电离层电子量分布情况。

2008年1月，地方时6:00，轨道高度500 km和800 km条件下的电离层TEC分布图如图4所示。由图4可以看出，随着卫星高度的变化，电磁波传播过程中所经历的TEC将存在差异，NeQuick-2模型可以根据给定的高度估计传播路径上的TEC，从而为P波段星载SAR电离层效应补偿奠定基础。

与图2相比，相同时间条件下，CODE GIM仅能给出20 000 km轨道高度的TEC，最大值为13 TECU，NeQuick $ 2给出的500 km轨道高度TEC最大值为7.837 TECU，800 km轨道高度最大值为9.127 TECU。因此，针对低轨P波段SAR卫星，NeQuick-2模型具有较高的适用性，但需要与CODE GIM实测数据进行对比，分析其估计精度。



(a) 轨道高度500 km　(b) 轨道高度800 km

图4　2008年1月地方时6:00，轨道高度500 km和800 km条件下电离层分布

Fig.4　TEC distributions for the orbit altitudes of 500 km and 800 km at 6:00 LT on Jan. 2008

3　电离层数据对比分析与仿真结果

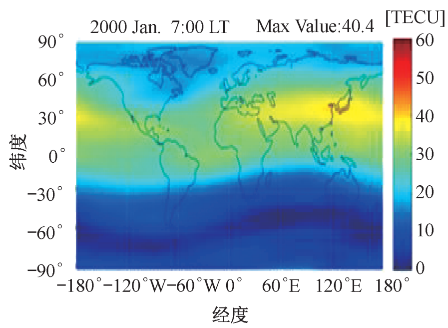
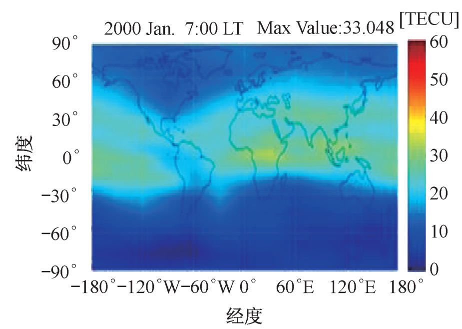
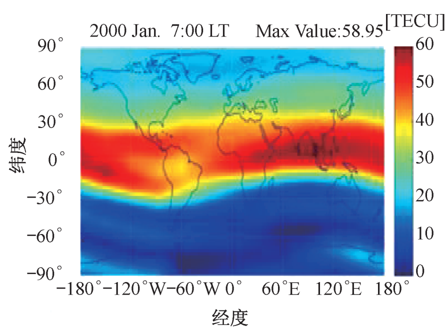
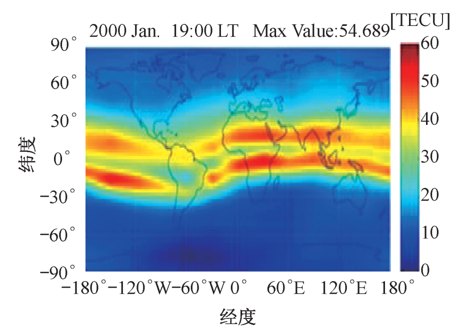
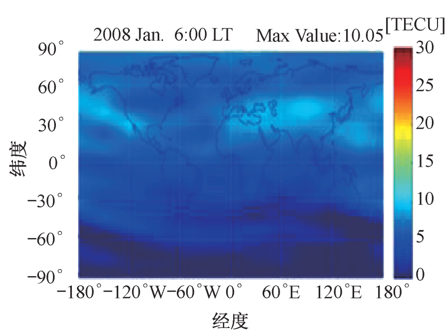
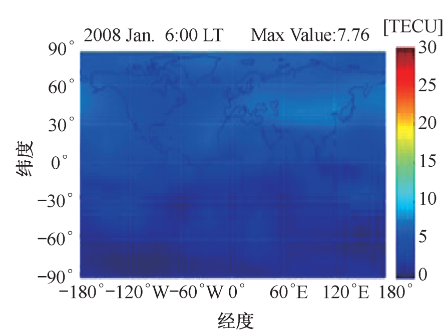
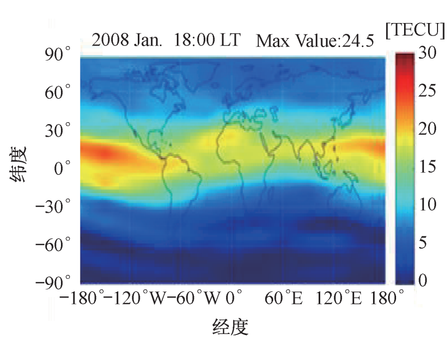
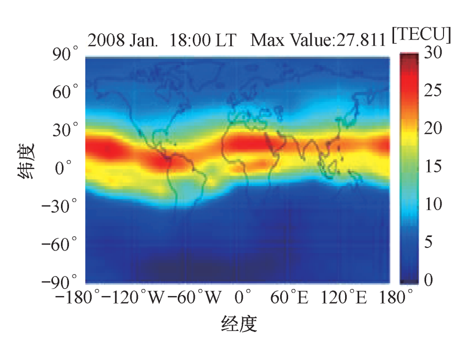
考虑到太阳活动强度通常以11 a为一个周期，为了对模型精度进行全面的分析，选定太阳活动强、弱两种情况下的电离层数据进行对比。其中，太阳活动强的年份选为2000年，太阳活动弱的年份选为2008年。

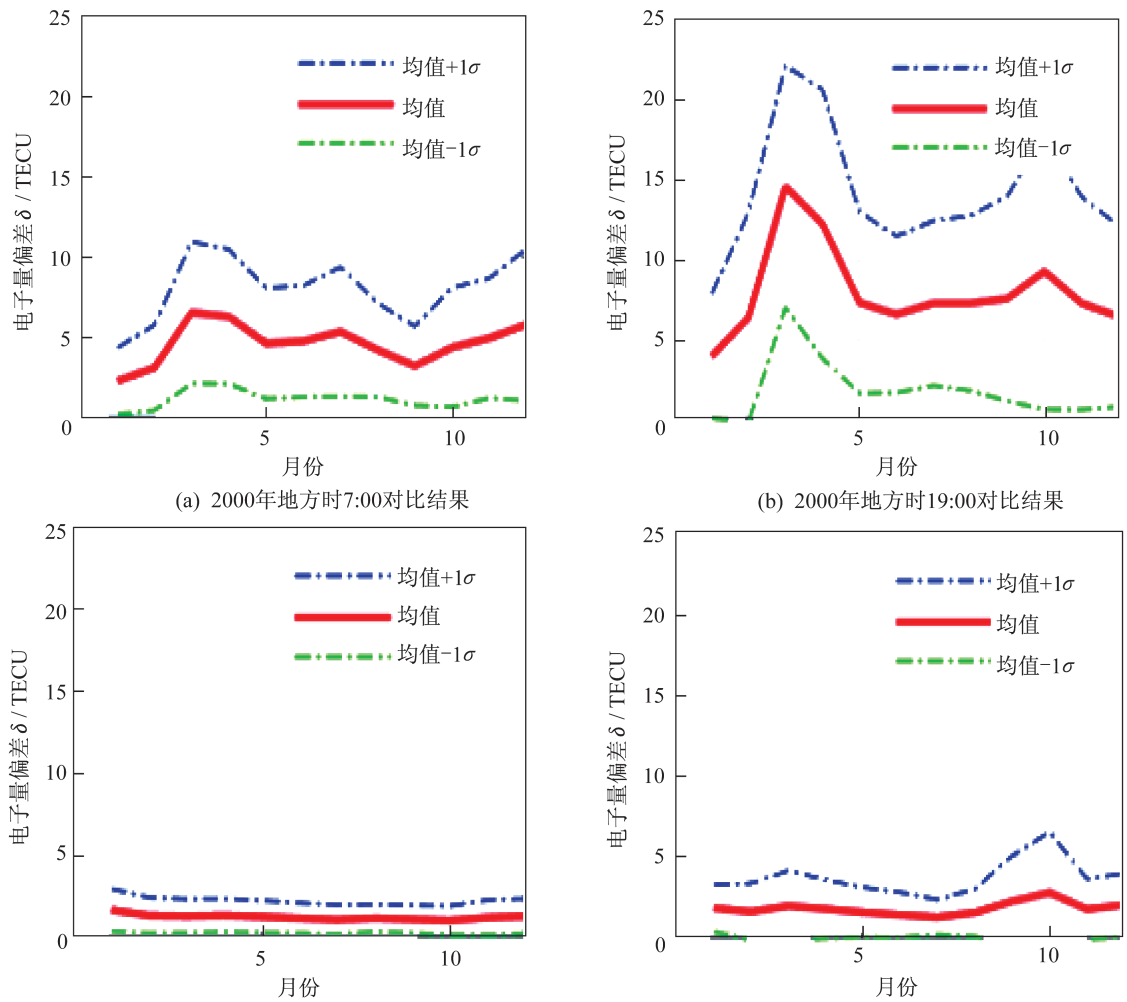
欧空局BIOMASS森林生物量探测星载SAR计划为了降低电离层闪烁效应的影响，采用了晨昏轨道，因此，本文的仿真也选用晨昏轨道。此外，为了与CODE发布的VTEC产品进行比较，仿真轨道高度选用20 180 km。考虑到CODE GIM数据库特点，选取2000年6月地方时7:00和19:00，以及2008年6月地方时6:00和18:00的全球TEC分布进行对比。CODE GIM实测结果和NeQuick-2的估计结果在各月份的TEC中位数全球分布情况见表1。需要注意，2000年的标尺范围为0～60 TECU，2008年的标尺范围为0～30 TECU。可以看出，赤道附近的TEC值高于两极地区，并且NeQuick-2模型很好地表征了电离层分布的赤道异常现象。

2000年和2008年各月份晨昏轨道CODE GIM实测结果和NeQuick-2估计结果之差的统计分析结果，如图5所示。红色实现为误差的均值，蓝色和绿色虚线为1σ的误差范围。可以看出，NeQuick-2模型在太阳活动低峰年（2008年）的估计结果优于其在太阳活动高峰年（2000年）的估计结果，在各地早晨的估计结果优于在黄昏的估计结果。在太阳活动低峰年，偏差均值为2～3 TECU，1σ偏差仍小于8 TECU。由于CODE GIM测量误差为2～8 TECU，因此，可以判断NeQuick-2模型在太阳活动低峰年的表征能力与CODE GIM相当。CHEN和QUEGAN于2010年指出，对于P波段BIOMASS卫星，10 TECU的电离层TEC估计误差满足对法拉第旋转角的估计要求，因此，NeQuick-2模型可以用于P波段星载SAR的法拉第旋转角的估计处理，并且在太阳活动较弱的年份应用效果将更好。

表 1 CODE GIM 实测结果和 NeQuick-2 的估计结果对比

Tab.1 Comparison of the measured data by CODE GIM and the estimated results by the NeQuick-2 model

<table>
<tr><th></th><th>CODE GIM TEC 分布</th><th>NeQuick-2 TEC 分布</th></tr>
<tr><td>2000年6月7:00 LT</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>2000年6月19:00 LT</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>2008年6月6:00 LT</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>2008年6月18:00 LT</td><td>
</td><td>
</td></tr>
</table>



(a) 2000年地方时7:00对比结果

(b) 2000年地方时19:00对比结果

(c) 2008年地方时6:00对比结果

(d) 2008年地方时18:00对比结果

图5　CODE GIM数据和NeQuick-2模型之差的统计分析结果

Fig.5　Statistic analysis results of the difference between the measured data by the CODE GIM and the estimated results by the NeQuick-2 model

4　结束语

本文以基于GPS获得的CODE GIM全球电离层TEC实测数据为参考,对比评估了NeQuick-2模型的电离层TEC表征能力。从研究结果可以看出:NeQuick-2模型在太阳活动高峰年的估计误差最大;在太阳活动低峰年的估计误差较小,能够满足P波段星载SAR法拉第旋转角的估计要求。此外,该模型为三维电子密度模型,具备沿任意方向积分的能力,因此,更加适用于星载SAR系统。

参考文献

[1] XU Z W, WU J, WU Z S. A survey of ionospheric effects on space-based radar [J]. Waves in Random Media, 2004, 14(2): S189-S273.

[2] DAVIES K. Ionospheric radio [M]. London: IET, 1990:1-2.

[3] LI Z, QUEGAN S, CHEN J, et al. Performance analysis of phase gradient autofocus for compensating ionospheric phase scintillation in BIOMASS P-band SAR data [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(6): 1367-1371.

[4] 王卓群,李亚军,李雁斌,等.考虑电离层对GEOSAR影响的改进CS成像算法[J].上海航天,2018,35(6):98-102.

[5] LE TOAN T, QUEGAN S, DAVIDSON M, et al. The BIOMASS mission: mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(11): 2850-2860.

[6] ARIKAWA Y, SARUWATARI H, HATOOKA Y, et al. ALOS-2 launch and early orbit operation result [C]// 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 3406-3409.

[7] FLORIDA C. The development of a series of ionospheric satellites [J]. Proceedings of the IEEE, 1969, 57(6): 867-75.

[8] RUFFINI G, FLORES A, RIUS A. GPS tomography of the ionospheric electron content with a correlation functional [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36 (1) : 143-153.

[9] 王晓岚，马冠一，万庆涛，等.基于全球卫星导航系统观测网的全球总电子含量快速反演方法[J].上海交通大学学报，2017，51(2): 214-223.

[10] 谭天乐，尹俊雄，郑翰清.卫星姿态大角度机动的轨迹规划和模型预测与反演控制[J].飞控与探测，2019，2(1)：17-23.

[11] NAVA B, COISSON P, RADICELLA S. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2008, 70(15): 1856-1862.

[12] JEE G, LEE H B, KIM Y, et al. Assessment of GPS global ionosphere maps (GIM) by comparison between CODE GIM and TOPEX/Jason TEC data: ionospheric perspective [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2010, 115(A10).

[13] FENG J, HAN B, ZHAO Z, et al. A new global total electron content empirical model [J]. Remote Sensing, 2019, 11(6): 706.

（上接第78页）

参考文献

[1] 张育林.卫星星座理论与设计[M].北京：科学出版社，2008：2-6.

[2] IRENE A B. Roldsdesign and deployment of a satellite constellation usingcollaborative optimization [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2004, 41(6): 956-963.

[3] 李勇军，赵尚弘，吴继礼.一种低轨卫星星座覆盖性能通用评价准则[J].宇航学报，2014，35(4)：410-417.

[4] 张海涛，张占月，吴帅，等.地球静止轨道卫星碰撞碎片短期演化风险分析[J].上海航天，2019，36(1)：66-77.

[5] 闫野，任萱.关于星座设计中碰撞检测问题的探讨[J].中国空间科学技术，1999，6(2)：13-19.

[6] BALLARD A H. Rosette constellations of earth satelltes [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980, 16(5): 656-673.

[7] 刘广军，沈怀荣.星座设计中避免卫星碰撞问题的研究[J].航天控制，2004，22(6)：66-70.

[8] 王春明，邓勇，胡晓惠.基于Walker星座拓扑结构的碰撞分析[J].计算机仿真，2010，27(10)：49-53.

[9] WALKER J G. Some circular orbit patterns providing continuous whole Earth coverage [J]. Journal of the BritishInterplanetary Society, 1971, 24(1): 369-384.

[10] 陈长春，林滢，沈鸣.一种考虑摄动影响的星座构型稳定性设计方法[J].上海航天，2020，37(1)：33-37.

[11] 陈雨，赵灵峰，刘会杰.低轨Walker星座构型演化及维持策略分析[J].宇航学报，2019，40(11)：113-120.

[12] 刘广军，张帅，沈怀荣.星座设计中的安全性问题研究[J].航天控制，2005，23(3)：69-73.

[13] 胡松杰，陈立，刘林.卫星星座的结构演化[J].天文学报，2003，44(1)：46-54.

[14] 陈宏宇.微小卫星轨道工程应用与STK仿真[M].北京：科学出版社，2016：55-61.

[15] 柴霖，袁建平，方群.基于STK的星座设计与性能评估[J].宇航学报，2003，24(4)：421-423.