

LIU Ang, WANG Ningbo, LI Zishen, ZHANG Yan, LI Ang. Prediction of Global Ionospheric Map Using the Theory of Maximum Posterior Estimation (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, 42(6): 1089–1099. DOI:10.11728/cjss2022.06.210812085

基于极大验后推估理论的全球电离层地图预报*

刘 昂^{1,2} 王宁波¹ 李子申¹ 张 研^{1,2} 李 昂^{1,2}

1(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

2(中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049)

摘 要 提出了一种基于极大验后估计理论的全球电离层预报方法, 基于中国科学院电离层分析中心(CAS)提供的快速全球电离层地图(GIM), 实现了1天、2天和5天GIM的预报。以国际GNSS服务组织(IGS)最终GIM、Jason测高卫星提供的电离层观测信息及全球GNSS基准站实测电离层总电子含量(TEC)为基准, 评估了2008–2017年CAS电离层预报GIM在全球大陆及海洋区域的精度, 并与欧洲定轨中心(CODE)、欧洲空间局(ESA)和西班牙加泰罗尼亚理工大学(UPC)的预报GIM进行对比。在评估时段内, 与IGS-GIM相比, CAS预报GIM精度为2.4~3.1 TECU; 与测高卫星TEC相比, CAS预报GIM的精度为5.1~6.6 TECU; 与全球基准站实测TEC相比, CAS预报GIM的电离层延迟修正精度优于80%。总体来看, CAS预报GIM与CODE预报GIM精度相当, 显著优于ESA和UPC预报GIM。

关键词 全球电离层地图, 电离层TEC预报, 球谐函数, 极大验后估计

中图分类号 P352

Prediction of Global Ionospheric Map Using the Theory of Maximum Posterior Estimation

LIU Ang^{1,2} WANG Ningbo¹ LI Zishen¹ ZHANG Yan^{1,2} LI Ang^{1,2}

1(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

2(School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract A method based on maximum posterior estimation is proposed for the prediction of global ionosphere. Using the rapid ionospheric products from the Chinese Academy of Sciences (CAS), the 1-, 2- and 5-day predicted Global Ionospheric Maps (GIM) are routinely generated with the proposed algorithm. The qualities of CAS predicted GIMs as well as those from the Center for Orbit Determination of Europe (CODE), European Space Agency (ESA) and the Polytechnic University of Catalonia (UPC), are evaluated during 2008–2017 using Total Electron Content (TEC) references derived from the final GIMs of the International GNSS Service (IGS), Jason altimetry and global GNSS reference stations. The

* 国家自然科学基金项目(42074043)和中国科学院仪器专项(YJKYYQ20190071)共同资助

2021-08-11 收到原稿, 2022-03-30 收到修定稿

E-mail: liuang@aircas.ac.cn

consistency between CAS predicted GIMs and IGS final GIMs is 2.4~3.1 TECU during the test period. Compared to Jason derived TEC observables, the precision of CAS predicted GIMs is on the level of 5.1~6.6 TECU over global oceanic regions. Compared to the TECs derived by global reference stations, the ionospheric delay correction accuracy of CAS predicted GIMs is better than 80%. Overall, the quality of CAS predicted GIM performs at the same level with that from CODE, which is significantly better than ESA and UPC predicted ones.

Key words Global ionospheric map, Ionospheric TEC prediction, Spherical harmonic expansion, Maximum post-test estimate

0 引言

全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite Systems, GNSS)精密定位技术日趋成熟并得到广泛应用,对于高精度实时定位的需求日益迫切^[1]。随着导航卫星载荷(星载原子钟等)质量的不断提升以及卫星轨道、钟差等精密改正信息精度的不断提高,地球电离层对 GNSS 信号产生的延迟误差已成为影响卫星导航高精度定位精度的主要误差源之一^[2]。为满足卫星导航高精度位置服务需求,国际 GNSS 服务组织(IGS)2017 年起实施了全球实时电离层实验项目。受限于实时 GNSS 测站的数量与分布,GNSS 实时电离层观测信息主要集中于陆地区域且分布不均匀;实际应用中,GNSS 实时数据流并不十分稳定且存在数据流中断的情况,严重制约了实时全球电离层的建模精度与可靠性。针对此,中国科学院(CAS)电离层分析中心和西班牙加泰罗尼亚理工大学(UPC)分别提出了基于“预报+实测”与“压缩传感”的实时全球电离层建模方法^[3, 4],其核心是引入不同的预报电离层信息作为先验电离层约束,实现实时全球电离层模型的稳定解算。可以看出,电离层预报 GIM 不仅可用于不同时间尺度电离层信息的预测,还可辅助进行实时电离层 GIM 的可靠计算。实现电离层信息的精确预报具有重要研究意义。

从预报方法上看,全球电离层总电子含量(TEC)预报方法可分为直接法和间接法^[5]。直接法基于事后全球电离层地图(GIM)的历史格网点 TEC 数据构建模型,逐格网点进行电离层 TEC 预报;间接法则基于全球电离层 TEC 函数模型(例如球谐函数或 B 样条函数等),构建电离层系数对应的预报模型,进而利用预报的模型系数重新构建电离层模型,实现全球电离层 TEC 的预报。从数学模型分析,电离层 TEC 预报

方法一般包括滑动平均自回归法^[6, 7]、最小二乘配置法^[8, 9]、神经网络^[10-12]等。滑动平均自回归法是统计学中对宽平稳时间序列的建模方法,其在对 TEC 建模时需要先采用最小二乘等方法扣除趋势项,进而将残差视为宽平稳随机信号进行模型的构建。最小二乘配置法是广义测量平差中的基本平差方法,该方法在考虑电离层 TEC 趋势项的同时引入随机项参数,实现对 TEC 趋势项和随机项的同步外推。神经网络方法能够较好地拟合非平稳时间序列中隐含的非线性关系,基于该方法对电离层 TEC 的预报效果较好^[12],但是神经网络模型的物理意义并不明确,如著名的“黑匣子”问题^[18]。

能够提供全球电离层预报 GIM 的 IGS 电离层分析中心有欧洲定轨中心(CODE)、欧洲空间局(ESA)和 UPC^[13]。目前,UPC 仅提供 2 天的预报 GIM, CODE 与 ESA 提供 1, 2 天的预报 GIM。UPC 预报 GIM 基于直接法实现,首先对 GIM 进行离散余弦变换提取频域主成分,进而基于自回归理论对每个频域分量进行预测,最后利用离散余弦逆变换实现预报 GIM 的重构^[14]; CODE 预报 GIM 基于间接法实现,利用最小二乘配置理论实现球谐模型系数的预测外推^[15]; ESA 预报 GIM 的处理策略目前尚未公开。

中国科学院空天信息创新研究院联合精密测量科学与技术创新研究院,筹建了亚太地区首家 IGS 电离层分析中心,代表中国科学院向全球用户提供高精度电离层科学数据服务。CAS 例行提供实时、快速与最终 GIM,其中,实时 GIM 每 60 s 播发一次,精度为 1.5~3.0 TECU(1 TECU 对应 GPS L1 频率上 16.2 cm 的伪距延迟),快速 GIM 延迟 1~2 天发布,最终 GIM 延迟 5 天发布,事后 GIM 精度与 CODE 及 UPC 等相当,实时 GIM 与事后 GIM 相比精度低 1.7%~4.9%^[16-19]。为丰富 CAS 分析中心电离层

GIM 并服务于 CAS 实时电离层 GIM 的例行稳定解算, 本文提出基于极大验后推估理论的全球电离层预报方法。以 CAS 快速电离层 GIM 为基础, 通过功率谱分析提取各阶球谐系数的变化周期, 将球谐系数的主周期项纳入趋势函数进行拟合, 进而基于极大验后推估的方法预报趋势项未拟合的宽平稳信号, 实现 1 天、2 天和 5 天全球电离层 TEC 的预报。

1 极大验后推估电离层 TEC 预报模型

CAS 快速 GIM 基于 15 阶球谐函数实现全球电离层 TEC 模型的构建, 同时采用广义三角级数逐基准确实现局域电离层 TEC 模型的构建, 结合球谐函数全球覆盖和广义三角级数区域高精度的优势, 基于站际分区法逐个格网点计算电离层 TEC, 进而生成 IONEX 格式的电离层 TEC 格网^[20]。本文以 CAS 快速 GIM 对应的球谐系数序列作为输入, 开展全球电离层 TEC 预报。

各阶球谐系数不仅具有明确的物理含义(例如零阶系数表征全球电离层 TEC 的平均值), 还表现出较强的周期性变化规律。通过对各阶球谐系数时间序列进行功率谱分析, 可以获得各阶球谐系数对应的周期项。为准确表征球谐系数中周期项的变化, 同时准确描述随机变化项的特征, 本文提出了基于极大验后推估模型的球谐系数预测方法, 并基于预测球谐系数实现了全球电离层 TEC 的预报。

1.1 极大验后推估模型

传统的最小二乘法预报电离层 TEC, 未考虑 TEC 序列中包含的随机项参数, 即未考虑 TEC 残差中具有统计意义的宽平稳信号。白噪声与随机项参数的区别在于白噪声信号在不同时刻互不相关, 而随机项参数之间具有时间相关性。因此, 本文在 TEC 时间序列预测研究中, 通过分析 TEC 历史数据中随机项参数的统计规律, 进而采用极大验后推估模型, 实现对未来时刻随机项参数的预测。球谐系数序列可写为如下同时包含傅里叶级数描述的趋势项与随机项参数的形式:

$$C_{mn}(t) = \sum_{i=0}^K [a_i \cos(2\pi f_i t) + b_i \sin(2\pi f_i t)] + S + N. \quad (1)$$

式中, $C_{mn}(t)$ 表示 m 度 n 阶球谐系数值, t 表示球谐系数值对应的时刻, a_i 和 b_i 表示傅里叶级数对应的待估参数, K 表示预先选定的球谐系数周期数, f_i 表示各周期项对应的频率(由 1.2 节功率谱估计得到), S 表示球谐系数未拟合参数, N 表示随机白噪声向量。

最小二乘配置理论中, 将球谐系数未拟合参数残差与高斯白噪声同等看待, 使得球谐系数未拟合参数的取值拟合于期望, 损害了推估的质量。这里球谐系数未拟合参数的求解参照文献^[21]的“拟合推估新解之——两步解法”, 能够更准确地推估球谐系数未拟合参数, 即

$$\begin{cases} \hat{X} = [G^T(D_S + D_N)^{-1}G]^{-1} \cdot G^T(D_S + D_N)^{-1}C_{mn}, \\ D_{\hat{X}} = [G^T(D_S + D_N)^{-1}G]^{-1}, \\ \hat{S} = C_{mn} - G\hat{X}. \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\hat{X}$ 表示 a_i 和 b_i 构成的待估参数向量, G 表示由 $\cos(2\pi f_i t)$ 和 $\sin(2\pi f_i t)$ 构成的系数矩阵, D_S 和 D_N 分别表示球谐系数未拟合参数和随机白噪声的方差协方差阵, C_{mn} 表示 m 度 n 阶球谐系数时间序列。

基于极大验后估计准则, 计算得到球谐系数未拟合参数的预报值为

$$\hat{S}' = \mu_{S'} + D_{S'S}(D_S + D_N)^{-1}(C_{mn} - G\hat{X}). \quad (3)$$

式中, $\hat{S}'$ 表示球谐系数未拟合参数预报值的估计值, $\mu_{S'}$ 表示球谐系数未拟合参数预报值的期望, $D_{S'S}$ 表示球谐系数未拟合参数预报值与球谐系数未拟合参数方差的协方差阵(由 2.3 节自协方差函数得到)。

综上可知, 随机项参数预报值 $\hat{S}'$ 与傅里叶级数描述的趋势项参数 $\hat{X}$ 共同构成球谐系数推估模型, 实现了未来时刻球谐系数的预报。

1.2 功率谱估计

球谐系数趋势项的拟合基于傅里叶级数开展, 通常提取傅里叶级数周期的策略是, 对时间域观测数据作傅里叶变换到频率域, 考虑到球谐系数时间序列具有周期振荡的特性, 球谐系数在时间域并非绝对可积, 这违背了傅里叶变换的正则条件。为此, 引入功率谱估计作为提取傅里叶级数周期的方法^[22]。离散随机信号的功率谱定义为

$$S_x(\omega) = \lim_{N \rightarrow \infty} E \left[\frac{1}{N} \left| \sum_{k=1}^N C_{mn}(k) e^{-j\omega k} \right|^2 \right]. \quad (4)$$

式中, $S_x(\omega)$ 表示球谐系数的功率谱, ω 表示角频率,

E 表示期望算子, j 表示虚数单位, N 表示观测值时间序列总数。

实际上不存在数量无穷的球谐系数时间序列, 通常采用周期图^[24]作为功率谱密度的实际估值公式, 即

$$\hat{S}_x(\omega) = \frac{1}{N} \left| \sum_{k=1}^N C_{mn}(k) e^{-j\omega k} \right|^2. \quad (5)$$

式中, $\hat{S}_x(\omega)$ 表示球谐系数功率谱的估计值。

需要说明的是, 周期图对功率谱的振幅估计是有偏估计。数据量越大振幅估计越准确, 但振幅的方差并不随数据量的增大而减小; 需要折中考虑准确度与精确度, 选取合适的数据长度。本文采用将球谐系数序列拆分为多份并分别进行功率谱估计后取平均的策略, 以减小周期图的方差。图 1 给出了零阶球谐系数时间序列以及应用周期图法的功率谱分析结果。

1.3 自协方差估计

以拟合后的残差计算球谐系数未拟合参数的协方差值, 有

$$\hat{D}_S(t_j - t_k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{ [S_i(t_j) - m_i] [S_i(t_k) - m_S] \}, \quad (6)$$

$$\hat{\mu}_S = \frac{1}{N_u} \sum_{i=1}^N S_i. \quad (7)$$

式中, $\hat{D}_S$ 为球谐系数未拟合参数的协方差, t_j 和 t_k 为不同时刻, l 为拟合后的球谐系数残差, n 为球谐系数未拟合参数在固定时间段内的观测个数, N_u 为球谐系数

未拟合参数的总个数。

球谐系数拟合残差中不仅包含球谐系数未拟合参数, 还包括随机白噪声的影响, 计算得到的自协方差曲线是关于自变量时间间隔的一系列散点。这里采用多项式函数拟合自协方差值的离散点, 得到自协方差函数, 进而处理得到式(2)和式(3)中未拟合参数的先验协方差阵。

1.4 球谐函数预报

将预测的各阶球谐系数代入式(9)的球谐函数, 即可实现全球电离层 TEC 预报, 即

$$\begin{cases} I(\phi, \lambda) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \phi) [\tilde{A}_{nm} \cos(m\lambda) + \tilde{B}_{nm} \sin(m\lambda)], \\ \tilde{P}_{nm}(\sin \phi) = \delta(n, m) P_{nm}(\sin \phi). \end{cases} \quad (8)$$

式中, $I(\phi, \lambda)$ 为电离层穿刺点处的 VTEC, ϕ 与 λ 为日固地磁坐标系下电离层穿刺点的纬度和经度, $n_{\max}$ 为球谐函数的最大度数, $\tilde{P}_{nm}(\sin \phi)$ 为 n 度 m 阶的归化勒让德函数, $\delta(n, m)$ 为归化函数, $\tilde{A}_{nm}$ 与 $\tilde{B}_{nm}$ 分别为待估的球谐系数。

基于极大验后推估算法预报全球电离层 TEC 的流程如下。

步骤 1 通过功率谱估计方法确定各阶球谐系数对应的趋势项周期。

步骤 2 基于最小二乘法实现球谐系数趋势项拟合并获得各球谐系数的拟合残差序列。

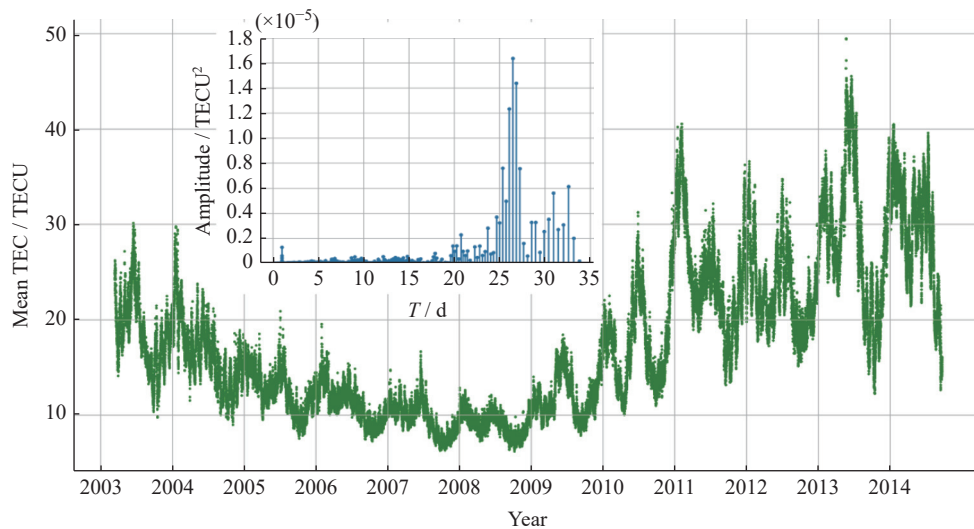


图 1 电离层零阶球谐系数时间序列及其功率谱分析

Fig. 1 Zero-order spherical harmonic coefficient time series and its spectrum analysis diagram

步骤 3 利用球谐系数的拟合残差计算球谐系数未拟合参数的自协方差,并基于多项式计算得到的自协方差函数,构造球谐系数未拟合参数方差的协方差阵。

步骤 4 基于极大验后推估法得到球谐系数未拟合参数,对球谐系数未拟合参数进行时间外推,利用球谐系数趋势项与球谐系数未拟合参数构造球谐系数预报模型,实现球谐系数的预报。

步骤 5 利用预报的球谐系数及球谐函数,实现全球电离层 TEC 的预报以及提前 1 天、2 天、5 天预报 GIM 的生成。

2 CAS 预报 GIM 精度分析

2.1 评估方法

采用 7 天 CAS 快速 GIM 对全球电离层 TEC 进行 1 天和 2 天的预报,采用 21 天 CAS 快速 GIM 进行 5 天的预报。CAS 快速 GIM 时间分辨率为 1 h,每个时刻对应 256 个球谐系数,时间延迟为 1 天。为分析预报 GIM 在全球不同地区的精度情况,分别以 IGS 最终 GIM、Jason-2 测高卫星电离层 TEC 以及全球 70 个 IGS 基准站实测 TEC 为参考,评估 CAS 预报 1 天、2 天和 5 天 GIM 在全球海洋及陆地区域的实际精度。

IGS 最终 GIM 由各电离层分析中心的最终 GIM 综合得到,能够准确描述全球电离层 TEC 的分布情况^[23]。Jason-2 海洋测高卫星 TEC 可以评估 GIM 预报 GIM 在海洋地区的性能,评估时需要对预报的 GIM 进行时间和空间域插值,得到测高卫星观测处的 TEC 预报值^[24]。基于 IGS 基准站的 TEC 评估采用绝对 TEC 和相对 TEC 两种方法评估,测站绝对 TEC 由相位平滑伪距方法处理得到,相对 TEC 由载波相位差分法处理得到^[25]。

2.2 IGS-GIM VTEC 评估

利用 2015 年 6 月 29 日 06:00:00 UTC 时刻 CAS, CODE, ESA 和 UPC 的电离层预报 GIM (XXXP1 和 XXXP2 分别表示不同机构的预报 1 天和预报 2 天 GIM, IGSG 表示 IGS 最终 GIM),由于 IGS-GIM 的残差直观反映各分析机构预报 GIM 在全球的残差分布。结果表明, CODP2 在全球大部分区域的残差不超过 ± 5 TECU; ESAP2 在中国南部、印度

以及印度洋北部等地区给出的 TEC 偏低,在南海等地区给出 TEC 偏高; CASP2 在太平洋和澳大利亚等地区给出的 TEC 偏高; UPCP2 除在亚太地区给出的 TEC 偏低之外,在全球大部分地区给出的 TEC 均偏高,南半球高纬度地区较为明显。为分析不同预报 GIM 的残差特点,图 2 给出了 2015 年 6 月 29 日 06:00 时不同预报 GIM 以 IGSG 为参考的全球残差频率分布直方图。总体而言, CODE, ESA, CAS, UPC 预报 2 天的 GIM 在全球范围内的残差基本符合正态分布,但 UPCP2 与 IGS-GIM 相比存在显著偏差且 STD 较大,这可能与 UPC 分析中心采取的处理策略有关。

以 IGS-GIM 为参考,评估 2008 年第 1 天至 2017 年第 365 天各电离层分析中心预报的 GIM 在全球范围内的总体精度情况。图 3 给出了不同预报 GIM 与 IGS-GIM 相比的均方根误差时间序列。可以看出,各电离层分析中心预报 GIM 与 IGSG 之间的一致性与太阳活动水平之间存在较高相关性。CAS 与 CODE 预报 GIM 之间的一致性较好, ESA 与 UPC 的预报 GIM 精度略差于 CAS 与 CODE。CAS, CODE, ESA 和 UPC 预报的 GIM 均存在部分时刻 RMS 较大的现象。考虑到电离层预报 GIM 基于历史 TEC 时间序列处理得到,其主要原因可以归为两方面:一是历史 TEC 数据中包含突变值而引起预报值的失真;二是实际 TEC 数据受电离层扰动等异常效应的影响,预报 GIM 难以反映 TEC 的异常变化。

以 IGS-GIM 为参考,表 1 进一步给出了不同预报 GIM 在评估时段内的精度统计情况, CODP1, CASP1 和 ESAP1 GIM 对应的 RMS 分别为 3.02, 3.06, 4.13 TECU, CODP2, CASP2 和 ESAP2 GIM 对应的 RMS 分别为 2.32, 2.45, 3.33 TECU, UPCP2 的精度略差,其 RMS 为 4.32 TECU。总体而言, CASP1 和 CASP2 预报的 GIM 与 IGS-GIM 相比,相对误差在 20% 以内,基于极大验后推估法能够有效实现全球电离层 TEC 信息的预测。需要说明的是,表 1 中未给出 UPCP1 精度统计的原因在于, UPC 未提供预报 1 天的 GIM,各分析中心统计天数不一致是由 IGS 数据中心对应预报 GIM 的缺失引起的。

2.3 Jason-2 VTEC 评估

以 Jason-2 测高卫星数据反演的 VTEC 观测为参考,评估不同 GIM 预报 GIM 在全球海洋区域内的

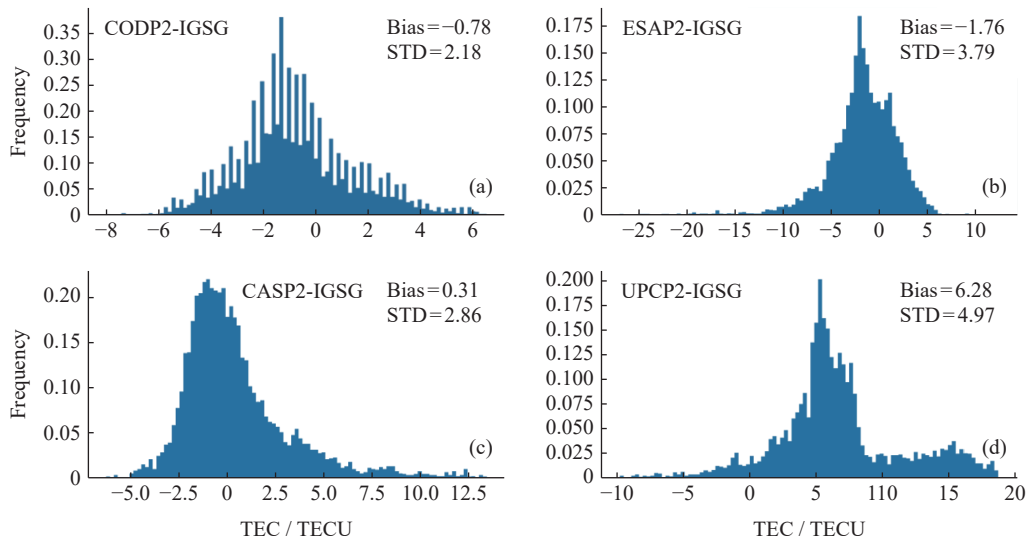


图2 不同预报 GIM 与 IGSG 相比电离层 VTEC 残差频率分布的直方图 (2015 年 6 月 29 日 06:00:00 UTC)

Fig. 2 Ionospheric TEC residual histogram of different predicted GIMs compared to IGSG at 06:00:00 UTC on 29 June 2015

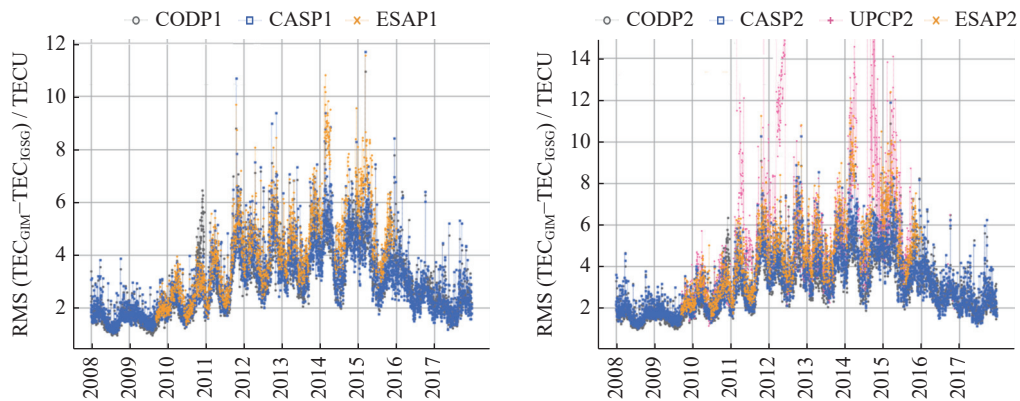


图3 2008—2017 年 CAS, CODE, ESA, UPC 预报 1 天和 2 天 GIM 的 RMS 序列

Fig. 3 RMS series of CAS/CODE/ESA/UPC 1- and 2-day predicted GIMs compared to IGS-GIM during 2008–2017

应用精度。为避免测高卫星与 GNSS 卫星轨道高度以及测高卫星硬件标定偏差引入的测高卫星 TEC 观测测量系统性偏差,在讨论分析时,以 Jason-VTEC 与预报 GIM-VTEC 之间的 STD 为准,忽略 Jason-VTEC 与 GNSS-VTEC 之间系统性常数偏差的影响。以 2015 年年积日(DOY) 030~130 为例,图 4 给出了 Jason-2 VTEC 和各分析中心预报 GIM 随地理纬度和地方时的变化,图 5 给出了各分析中心预报 GIM 与 Jason-2 VTEC 相比的残差分布。从图 4 和图 5 可以清楚看出, CASP1, CODP2, CASP2, ESAP2, UPCP2 给出的 TEC 分布与 Jason-2 TEC 结果相

近。ESAP2, UPCP2 预报的 GIM 与 Jason-2 VTEC 相比残差相对较大。以 Jason-2 VTEC 为参考的对比结果相比 IGS-GIM 评估结果比较大,其原因一是 Jason 卫星高度约为 1300 km,而 GNSS 卫星高度约为 20000 km,导致 Jason 卫星 VTEC 实测值与 GIM-VTEC 之间存在着系统性偏差;二是 Jason 卫星电离层观测位于海洋区域,而 GIM 主要基于陆地区域的 GNSS 数据计算得到,因而预报 GIM 在海洋区域的应用精度相对较差。图 5 中存在较多负值,即 GIM-VTEC 预报值低于 Jason-VTEC 实测值的情况。其可能的原因一是 Jason 卫星硬件延迟标定误差引起

表 1 2008—2017 年 CAS, CODE, ESA, UPC 预报 1 天和 2 天 GIM 与 IGS-GIM 相比的精度统计
Table 1 Analysis result of CAS, CODE, ESA, UPC 1- and 2-day predicted GIMs compared with IGS-GIM from 2008 to 2017

机构	测评时长/d	精度/TECU			相对误差/(%)
		偏差	STD	RMS	
CASP1	3640	-0.79	2.79	3.06	18.7
CODP1	3636	-0.68	2.78	3.02	18.4
ESAP1	1885	-0.98	3.86	4.13	21.4
CASP2	3640	-0.73	2.14	2.45	19.7
CODP2	3637	-0.58	1.98	2.32	18.5
ESAP2	1848	-0.96	3.02	3.33	22.1
UPCP2	1919	0.58	3.44	4.32	26.8

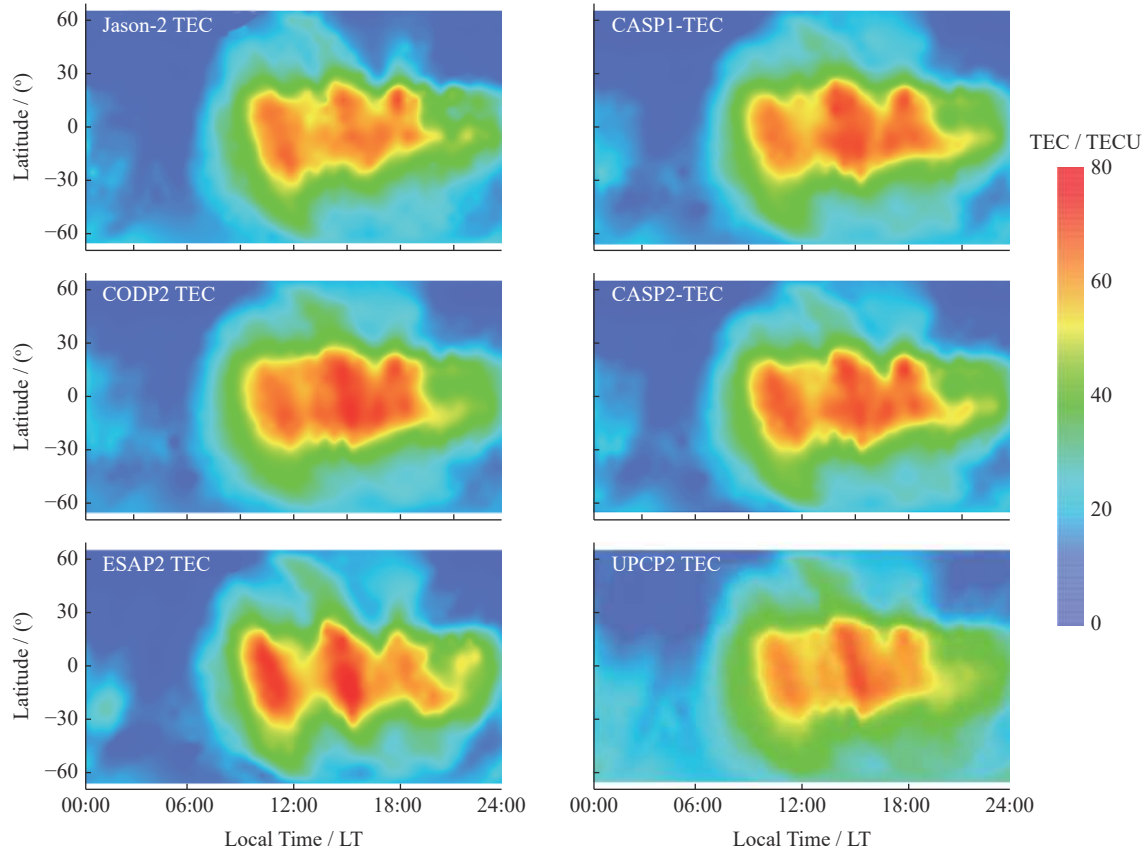


图 4 不同预报 GIM 随地理纬度和地方时的分布

Fig. 4 Global VTEC map in geographic latitude and local time coordinates

Jason-VTEC 实测值存在系统性偏差,二是当前基于单薄层假说计算得到的 GIM 自身存在模型误差,特别是在高纬度地区^[26]。

图 6 给出了 2008 年至 2017 年不同预报 GIM 与 Jason-2 VTEC 相比的偏差和标准差序列。图 6(a)

显示,各分析中心预报的 GIM 与 Jason-2 VTEC 相比,均存在着一定系统偏差。图 6(b)显示,不同分析中心预报 GIM 的标准差在太阳活动程度低的年份普遍小于 5.0 TECU;在太阳活跃程度高的年份,各分析中心预报 GIM 的标准差普遍变大。总体而言,电离

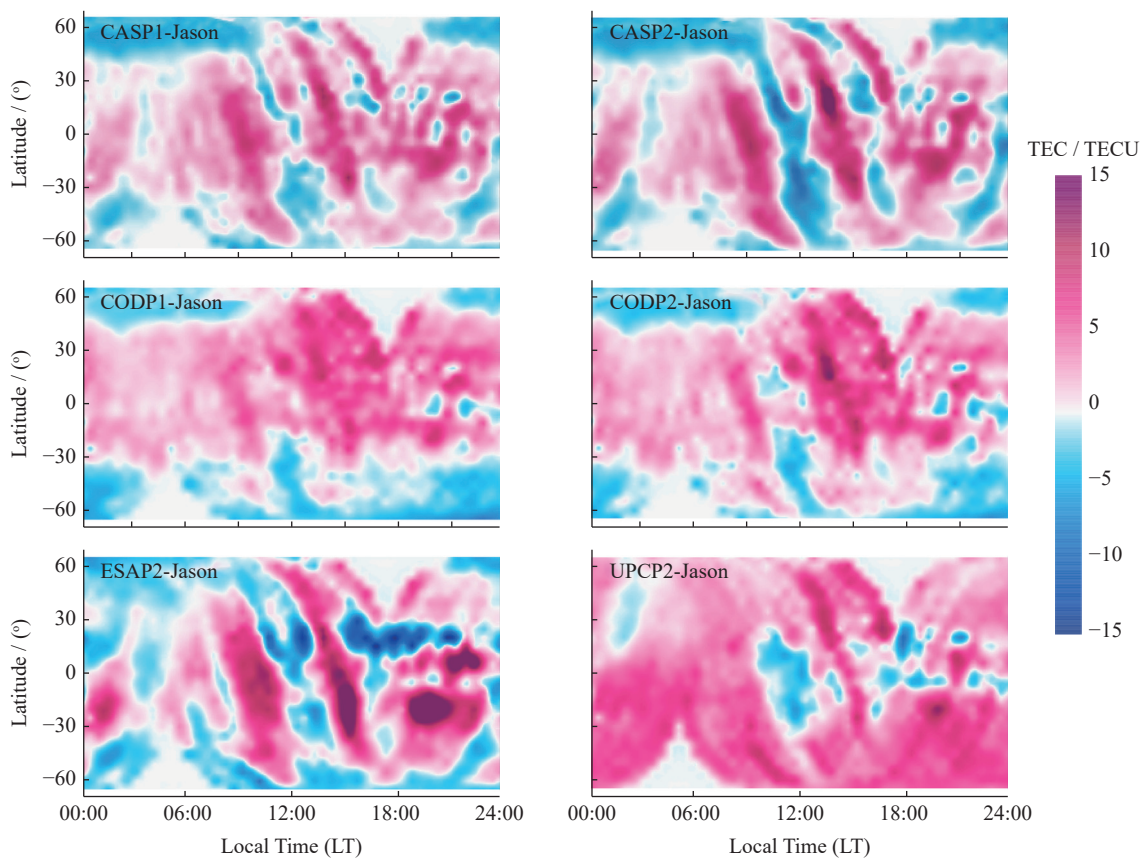


图 5 不同预报 GIM 与 Jason-2 VTEC 相比残差随地理纬度和地方时的分布

Fig. 5 Different predicted GIMs difference map in geographic latitude and Local Time (LT) coordinates compared to Jason-2 VTEC

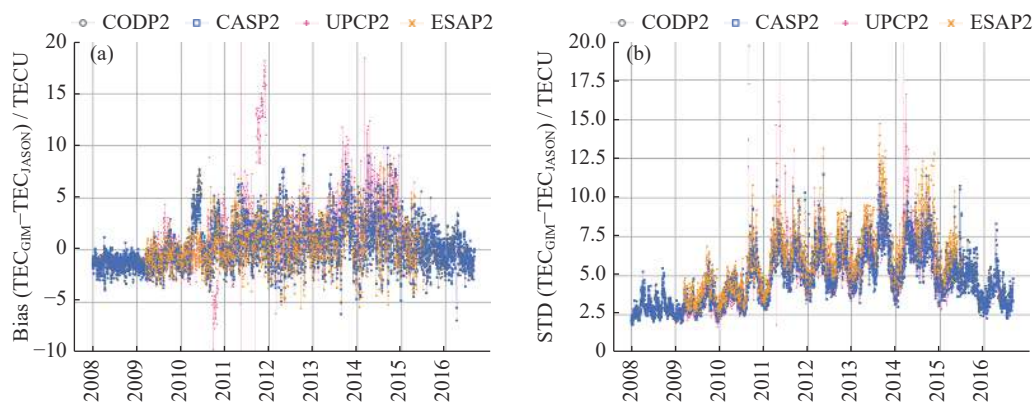


图 6 不同预报 GIM 与 Jason-2 TEC 相比的 Bias (a) 和 STD (b) 随时间的变化

Fig. 6 Different predicted GIMs bias (a) and STD (b) with time compared to Jason-2 TEC

层 TEC 预报 GIM 的精度与太阳活动水平呈现较强的相关性。表 2 中列出了评估期间 CAS, CODE, ESA 及 UPC 预报 GIM 与 Jason-2 TEC 相比的总体精度统计情况。CASP1 预报 GIM 精度比 CODP1 和 ESAP1 高 0.5% 与 2.5%, CASP2 预报 GIM 比

ESAP2 和 UPCP2 高 3.2% 与 2.1%; CAS 预报 5 天 GIM 的误差较大,这是因为随着外推时间增长,电离层趋势发生变化,准确预测难度增加,而球谐系数未拟合参数也由于时间间隔过长而降相关,使得预测的球谐系数未拟合参数时间相关性变弱。

2.4 基准站 GPS TEC 评估

为分析太阳地磁活动对电离层预报 GIM 精度的影响,以高、中、低纬度地区 6 个测站为例,分析 2017 年 9 月发生的太阳耀斑对电离层预报 GIM 精度的影响。图 7 给出了 9 月 7—9 日各测站 GPS TEC 与预报 GIM 内插 TEC 序列的对比情况,所选用的测站及其坐标如子图左上角所示,图 7 中 CASG 表示

CAS 最终 GIM。可以看出,在太阳活动平静时期,各测站的预报 TEC 与 GPS 实测 TEC 之间一致性较好;但随着电离层扰动效应的发生,测站上空的 TEC 预报值与实测 TEC 值产生较大偏差。比较而言,事后 GIM 的计算由于采用了较多的全球 GNSS 测站实测数据,能够准确反映测站电离层 TEC 的变化。

表 2 2008—2016 年 CAS, CODE, ESA 及 UPC 预报 GIM 与 Jason-2 TEC 相比的精度统计
Table 2 Analysis result of CAS, CODE, ESA and UPC predicted GIMs compared with Jason-2 TECs during 2008—2016

机构	测评时长/d	精度/TECU			相对误差/(%)
		偏差	STD	RMS	
CASP1	3074	0.41	4.79	5.09	25.3
CODP1	3070	0.31	4.88	5.17	25.8
ESAP1	1869	0.43	5.87	6.08	27.8
CASP2	3074	0.42	4.89	5.31	26.4
CODP2	3071	0.38	4.85	5.19	26.0
ESAP2	1836	0.46	6.12	6.49	29.6
UPCP2	1888	1.99	5.47	6.67	28.5
CASP5	3074	0.48	5.97	6.58	32.6

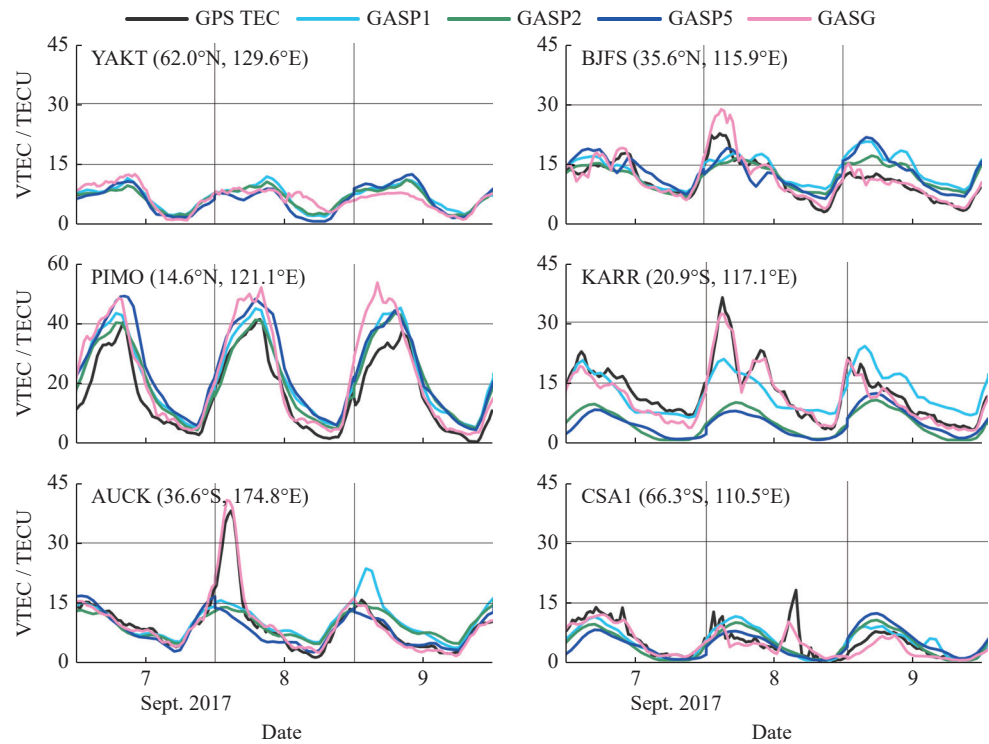


图 7 预报的 GIM-TEC 与实测的测站上空 TEC 对比

Fig. 7 Comparison between the predicted GIM-TEC and the measured TEC over the station

表 3 CODE 与 CAS 预报 GIM 与实测的 dSTEC 相比的精度统计
Table 3 Analysis result of CODE and CAS predicted GIMs compared with GPS-dSTEC

机构	精度/TECU			相对误差/(%)
	偏差	STD	RMS	
CASP1	0.06	2.32	2.40	16.9
CODP1	0.16	2.35	2.43	16.5
CASP2	0.07	2.35	2.44	17.4
CODP2	0.13	2.34	2.49	16.9
CASP5	0.07	2.81	2.91	20.6

为进一步评估预报 GIM 在全球的精度情况,选取全球均匀分布的 70 个 IGS 基准站。表 3 列出了预报 GIM 与测站 dSTEC 相比的误差统计结果。从偏差统计结果看, CODE 和 CAS 分析中心的预报 GIM 没有明显系统性偏差, 偏差值在 0.20 TECU 以内。从均方根误差统计指标结果看, CASP1 和 CASP2 的 GIM 精度与 CODP1 和 CODP2 相当, CAS 预报 GIM 的平均 RMS 误差为 2.58 TECU。CAS 和 CODE 预报 1 天和 2 天的 GIM 对电离层延迟的修正精度优于 80%。

3 结论

提出了基于极大验后推估理论的全球电离层 TEC 预报方法。预报 GIM 以 CAS 快速 GIM 对应的球谐系数序列为基础, 首先基于功率谱估计方法对各球谐系数的时间序列周期项进行分析, 再利用傅里叶三角级数拟合各阶球谐系数获得拟合残差, 基于自协方差函数计算得到自协方差阵并预测球谐系数未拟合参数; 在实现球谐系数预测基础上, 最终生成 CAS 预报 1 天、2 天和 5 天的 GIM。

以 IGS 最终 GIM、Jason-2 测高卫星电离层 TEC 以及全球 GNSS 基准站实测 TEC 为参考, 分析 2008 年至 2017 年 CAS 预报 GIM 的精度统计情况。结果如下。

(1) 与 IGS-GIM 相比, CAS 预报 1 天、2 天的 GIM 的 RMS 分别为 3.06 和 2.45 TECU, 与 CODE 预报的 GIM 精度相当, 显著优于 ESA 和 UPC;

(2) 与 Jason-2 测高卫星 TEC 相比, CAS 预报 1 天的 GIM 精度分别比 CODE、ESA 预报 GIM 高 0.5% 和 2.5%, CAS 预报 2 天 GIM 精度分别比 ESA 和 UPC 预报 GIM 高 3.2% 和 2.1%, 且太阳活动低年

的预报效果显著优于太阳活动高年;

(3) 与基准站 GNSS TEC 相比, CAS 预报 GIM 的 RMS 误差为 2.40~2.91 TECU。基于极大验后推估理论的全球电离层预报方法, 已用于 CAS 电离层分析中心 1 天、2 天、5 天预报 GIM 的例行解算。

参考文献

[1] CHEN Junping, LI Haojun, WU Bin, *et al.* Performance of real-time precise point positioning[J]. *Marine Geodesy*, 2013, **36**(1): 98-108

[2] DING Wenwu, OU Jikun, LI Zishen, YUAN Yunbin. Instantaneous re-initialization method of real time kinematic PPP by adding ionospheric delay constraints[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(6): 1720-1731 (丁文武, 欧吉坤, 李子申, 等. 附加电离层延迟约束的实时动态 PPP 快速重新初始化方法[J]. *地球物理学报*, 2014, **57**(6): 1720-1731)

[3] LI Zishen, WANG Ningbo, HERNÁNDEZ-PAJARES Manuel, *et al.* IGS real-time service for global ionospheric total electron content modeling[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, **94**(3): 1-16

[4] YANG Heng, MONTE-MORENO Enric, HERNÁNDEZ-PAJARES Manuel, *et al.* Real-time interpolation of global ionospheric maps by means of sparse representation[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, **95**(6): 1-20

[5] WANG XiJiang, BIAN Shaofeng, LI Zishen, *et al.* 2020. Prediction of global ionospheric TEC using the semiparametric kernel estimation method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **63**(4): 1271-1281 (王喜江, 边少锋, 李子申, 等. 利用半参数核估计法预报全球电离层总电子含量[J]. *地球物理学报*, 2020, **63**(4): 1271-1281)

[6] RATNAM D Venkata, OTSUKA Yuichi, SIVAVARAPRASAD G, *et al.* Development of multivariate ionospheric TEC forecasting algorithm using linear time series model and ARMA over low-latitude GNSS station[J]. *Advances in Space Research*, 2019, **63**(9): 2848-2856

[7] REN Xiaodong, WU Fengbo, ZHANG Xiaohong, *et al.* Short-term prediction of ionospheric TEC based on ARIMA model[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, **2**(1): 9-16

- [8] CUI Xizhang. Generalized Survey Adjustment[M]. second edition. Wuhan: Wuhan University Press, 2009 (崔希璋. 广义测量平差[M]. 第2版. 武汉: 武汉大学出版社, 2009)
- [9] ZHANG Qiang, ZHANG Hongping, ZHAO Qile, *et al.* Global Ionospheric TEC Prediction Based on Least-Squares Collocation Method[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014, **34**(6): 86-91 (张强, 章红平, 赵齐乐, 等. 利用最小二乘配置预报全球电离层总电子含量[J]. *大地测量与地球动力学*, 2014, **34**(6): 86-91)
- [10] TEBABAL A, RADICELLA Sm, NIGUSSIE M, *et al.* Local TEC modelling and forecasting using neural networks[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, **172**: 143-151
- [11] XU Fulong, LI Zishen, ZHANG Kefei, *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
- [12] ZHANG F B, ZHOU C, WANG C, *et al.* Global ionospheric TEC prediction based on deep learning[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, **36**(4): 553-561 (张富彬, 周晨, 王成, 等. 基于深度学习的全球电离层TEC预测[J]. *电波科学学报*, 2021, **36**(4): 553-561)
- [13] LI Min, YUAN Yunbin, WANG Ningbo, *et al.* Performance of various predicted GNSS global ionospheric maps relative to GPS and JASON TEC data[J]. *GPS Solutions*, 2018, **22**(2): 55
- [14] GARCÍA-RIGO A, MONTE E, Hernández-Pajares M, *et al.* Global prediction of the vertical total electron content of the ionosphere based on GPS data[J]. *Radio science*, 2011, **46**(6): 1-3
- [15] SCHAER S, Géodésique Société Helvétique Des Sciences Naturelles. Commission. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System [M]. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidg. Technische Hochschule Zürich, 1999
- [16] LI Zishen, WANG Ningbo, LI Min, *et al.* Evaluation and analysis of the global ionospheric TEC map in the frame of international GNSS services[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, **60**(10): 3718-3729 (李子申, 王宁波, 李敏, 等. 国际 GNSS 服务组织全球电离层 TEC 格网精度评估与分析[J]. *地球物理学报*, 2017, **60**(10): 3718-3729)
- [17] HERNÁNDEZ-PAJARES M, JUAN Jm, SANZ J, *et al.* The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, **83**(3/4): 263-275
- [18] ZHANG Qiang, ZHAO Qile. 2019. Evaluation and analysis of the global ionosphere maps from Wuhan University IGS Ionosphere Associate Analysis Center[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **62**(12): 4493-4505 (张强, 赵齐乐. 武汉大学 IGS 电离层分析中心全球电离层产品精度评估与分析[J]. *地球物理学报*, 2019, **62**(12): 4493-4505)
- [19] LI Zishen, WANG Ningbo, LIU Ang, *et al.* Status of CAS global ionospheric maps after the maximum of solar cycle 24[J]. *Satellite Navigation*, 2021, **2**(1): 1-15
- [20] LI Zishen. Research on Theory and Method of GNSS/Compass Ionospheric Delay Correction and TEC Monitoring[D]. Wuhan: Institute of Surveying and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2012 (李子申. GNSS/compass电离层时延修正及TEC监测理论与方法研究[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2012)
- [21] ZHOU Jiangwen. One of the new solutions for fitting estimation——two-step solution[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2002, **31**(3): 189-191 (周江文. 拟合推估新解之一——两步解法[J]. *测绘学报*, 2002, **31**(3): 189-191)
- [22] STOICA P, MOSES RANDOLPH L. Spectral Analysis of Signals[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2005
- [23] REDDYBATTULA K Durga, PANDA S Kumar, ANSARI K, *et al.* Analysis of ionospheric TEC from GPS, GIM and global ionosphere models during moderate, strong, and extreme geomagnetic storms over Indian region[J]. *Acta Astronautica*, 2019, **161**: 283-292
- [24] WANG Ningbo, YUAN Yunbin, LI Zishen, *et al.* Performance Analysis of Different NeQuick Ionospheric Model Parameters[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, **46**(4): 421-429 (王宁波, 袁运斌, 李子申, 等. 不同 NeQuick 电离层模型参数的应用精度分析[J]. *测绘学报*, 2017, **46**(4): 421-429)
- [25] LIU Ang, WANG Ningbo, LI Zishen, *et al.* Assessment of NeQuick and IRI-2016 models during different geomagnetic activities in global scale: comparison with GPS-TEC, dSTEC, Jason-TEC and GIM[J]. *Advances in Space Research*, 2019, **63**(12): 3978-3992
- [26] HERNÁNDEZ-PAJARES M, ROMA-DOLLASE D, KRANKOWSKI A, *et al.* Methodology and consistency of slant and vertical assessments for ionospheric electron content models[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, **91**(12): 1405-1414