

中文核心期刊要目总览

- 中国科技核心期刊
- 中国科学引文数据库 (CSCD)
- •中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)
- 中国学术期刊文摘数据库(CSAD)
  中国学术期刊(网络版)(CNKI)

• 国家科技学术期刊开放平台

• 中文科技期刊数据库

• 万方数据知识服务平台

• 中国超星期刊域出版平台

- •荷兰文摘与引文数据库(SCOPUS)
- •日本科学技术振兴机构数据库 (JST)

#### 基于陆态网和IGS站联合数据的中国区域电离层建模方法

徐 鹏, 祝芙英

# Modeling of the regional ionosphere in China based on the combined CMONOC and IGS GPS data

XU Peng and ZHU Fuying

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12265/j.cjors.2023007

## 您可能感兴趣的其他文章

## Articles you may be interested in

# 基于GNSS的武汉区域电离层TEC建模

Modeling of ionospheric TEC around Wuhan based on GNSS 电波科学学报. 2022, 37(1): 146-152

## 一种可选的电离层TEC区域重构方法

An optional algorithm for ionosphere TEC region reconstruction 电波科学学报. 2022, 37(5): 875-882

# 一种基于LSTM与IRI模型的电离层层析TEC组合预测方法

A combined forecasting method of ionospheric tomography TEC based on LSTM and IRI model 电波科学学报. 2022, 37(5): 852-861

## 一种联合地基GNSS和测高仪数据的电离层层析成像新算法

A new hybrid ionospheric tomography algorithm by combining ground-based GNSS and ionosonde data 电波科学学报. 2022, 37(5): 751-760

## 基于深度学习的全球电离层TEC预测

Global ionospheric TEC prediction based on deep learning 电波科学学报. 2021, 36(4): 553-561

一种基于离散余弦变换-惩罚最小二乘回归的区域高分辨率电离层TEC地图重构方法

Regional high spatial and temporal resolution ionospheric TEC map reconstruction base on DCT-PLS algorithm 电波科学学报. 2022, 37(3): 419-425



关注微信公众号,获得更多资讯信息

徐鹏,祝芙英. 基于陆态网和 IGS 站联合数据的中国区域电离层建模方法[J]. 电波科学学报, 2024, 39(4): 777-784. DOI: 10.12265/j.cjors.2023007 XU P, ZHU F Y. Modeling of the regional ionosphere in China based on the combined CMONOC and IGS GPS data[J]. Chinese journal of radio science, 2024, 39(4): 777-784. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2023007

# 基于陆态网和 IGS 站联合数据的中国区域 电离层建模方法

徐鹏<sup>1,3</sup> 祝芙英<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国地震局地震研究所地震大地测量重点实验室,武汉 430071;2. 武汉引力与固体潮国家野外科学观测研究站, 武汉 430071;3. 襄阳市测绘研究院,襄阳 441003)

摘要为了提高中国区域电离层垂直总电子含量 (vertical total electron content, VTEC) 建模的精度, 减少 区域建模边缘误差, 利用中国地壳运动观测网络 (Crustal Movement Observation Network of China, CMONOC) 和 国际 GNSS 服务组织 (International GNSS Service, IGS) GPS 数据联合进行电离层建模,并对中国区域电离层建模 策略进行定量考察, 对比给出各类建模策略对中国区域电离层建模精度的影响, 从而给出更符合中国区域的电离 层建模方式。将建模后的结果同 IGS 中心的全球电离层格网产品进行比对, 结果显示: 基于本文方法对中国区域 电离层建模的结果精度更高, 与 IGS 数据中心发布的电离层格网产品相比误差平均值为 1.210 9 TECU, 与卫星 实测电离层 TEC 的内符合精度误差为 1.050 TECU。说明利用联合数据建模能一定程度上提高中国区域建模的 精度, 同时减少区域建模边缘的误差。

关键词 电离层总电子含量 (TEC); 电离层格网; 球谐函数; 多项式函数; 电离层模型阶数

中图分类号 P228 文献标志码 A 文章编号 1005-0388(2024)04-0777-08 DOI 10.12265/j.cjors.2023007

# Modeling of the regional ionosphere in China based on the combined CMONOC and IGS GPS data

XU Peng<sup>1,3</sup> ZHU Fuying<sup>1,2\*</sup>

(1. Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China; 2. Wuhan Gravitation and Solid Earth Tides, National Observation and Research Station, Wuhan 430071, China; 3. Xiangyang Institute of Surveying and Mapping, Xiangyang 441003, China)

**Abstract** In order to enhance the precision of modeling the ionospheric vertical total electron content (VTEC) in China and reduce errors at the regional modeling boundaries, this study utilizes data from the Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC) and GNSS Services (IGS) GPS for ionospheric modeling. It also quantitatively examines the modeling strategies for the ionosphere in China and compares the impact of various modeling strategies on the accuracy of ionospheric modeling results with the IGS GIM products, the results show that the accuracy of ionospheric modeling in China based on this method is higher. Compared with the GIM products published by IGS, the mean error is 1.210 9 TECU. Additionally, the internal consistency precision error of modeled ionospheric TEC based on this approach is 1.050 TECU when compared with satellite-measured ionospheric TEC. This indicates that joint data modeling can improve regional model accuracy while reducing edge errors.

**Keywords** total electron content(TEC); Global Ionosphere Map(GIM); spherical harmonic function; ionosphere polynomial model; ionosphere model order

通信作者: 祝芙英 E-mail: fyzhu027@gmail.com

## 0 引 言

电离层为地球上空 60 km 至磁顶层高度范围的 大气电离空间,在卫星导航定位过程中,电离层会对 各类导航信号产生各不相同的散射、反射、折射和 吸收等各类干扰,影响导航定位的精度<sup>[1]</sup>。可通过利 用多频观测值组合数据相减的方式去除电离层误 差,也可通过研究电离层对卫星导航信号产生的影 响建立电离层分布模型,从而精确求解电离层总电 子含量(total electron content, TEC)的信息。

近些年来,有学者不断提出各类关于电离层建 模的技术与方法。早在1988年,Lanyi等<sup>[2]</sup>提出一种 通过 GPS 原始观测数据确定电离层 TEC,并利用二 阶或者三阶多项式模型建模解算单站垂直 TEC (vertical TEC, VTEC)的方法。1995年 Schaer等<sup>[3]</sup>提 出利用球谐函数模型进行全球电离层建模。 2017年,任晓东<sup>[4]</sup>对多系统 GNSS 电离层 TEC 建模 和差分码偏差 (differential code bias, DCB)估计进行 了研究。2021年,陈永贵<sup>[5]</sup>对中国区域电离层建模 方法进行了精度评估,得出较好的结果。随着 GNSS 技术的日益完善、数据处理方式的精化,以及 全球卫星观测站的建立,利用 GNSS 数据对地球上 空电离层建模已经成为电离层 TEC 计算的主要手段。

1998年国际 GNSS 服务组织 (International GNSS Service, IGS)成立了电离层工作组 (Ionosphere Working Group, IWG)<sup>[6-7]</sup>,通过全球卫星观测站的数 据解算全球电离层 VTEC 的数据并进行建模,然后 向全球用户发布全球电离层格网 (Global Ionosphere Map, GIM)产品。目前 IGS 所发布的 GIM 产品均基 于 IGS 站数据进行建模,中国区域 IGS 站点分布较 少,缺少卫星观测数据量,电离层分布精度较低。由 于建立的是全球格网模型,格网的分布较为稀疏,两 个网格点间隔为经度 5°、纬度 2.5°。同时,由于电离 层区域建模存在"边缘现象",远离建模中心区域的 地方缺少测站分布,得到的建模精度低,甚至会出现 大量负值现象。

本文拟通过利用覆盖范围广、测站分布密集的 中国地壳运动观测网络(Crustal Movement Observation Network of China, CMONOC)(以下简称陆 态网),来进行中国区域的电离层 VTEC 建模。针对 缺少覆盖的中国海洋地区及中国周边区域陆态网情 况,引入周边相关的 IGS 观测站参与数据解算,以弥 补单陆态网数据解算电离层 VTEC 对海洋区域的误 差。利用分布密度较高的陆态网测站提高中国区域 电离层建模的精度,利用分布范围更广的 IGS 测站 数据减少区域建模的边缘误差。 在解算时,将卫星和接收机的 DCB 作为未知参数引入建模方程组,与电离层模型系数同步进行解算,解算后可以得到测站和卫星接收机的 DCB,并与 IGS 数据中心发布的卫星 DCB 进行对比验证。同时,建立自己的电离层 TEC 格网,同 IGS 数据中心发布的电离层格网产品和利用单陆态网数据求得的中国区域电离层格网进行对比,进行精度验证分析,并利用卫星实测 TEC 数据与建模得到的结果进行对比,作为内符合精度,从而验证模型建立的精度。同时,目前中国电离层建模各类方式对精度影响没有定论,本文通过定量分析的方式验证各类建模策略对电离层建模精度的影响,来确定最适合中国区域的电离层建模方式。

# 1 电离层建模方法

利用 GNSS 卫星在传播方向上受电离层影响产生的延迟,可解算得到卫星到观测站路线上的倾斜 TEC(slant TEC, STEC):

$$d_{\rm ion} = \frac{40.3}{f^2} \text{STEC} \tag{1}$$

同时卫星信号在传播过程中所受总延迟可以表示为电离层误差延迟以及卫星和测站接收机的 DCB,由式(1)可得

STEC = 
$$-\frac{f_1^2 f_1^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)} \left( P_{4,sm} - c DCB_j - c DCB^i \right)$$
 (2)

式中:  $f_1$ ,  $f_2$ 为载波频率;  $P_{4,sm}$ 为载波平滑伪距观测值; DCB<sub>j</sub>和DCB<sup>i</sup>分别为接收机和卫星的 DCB, 是影响电 离层建模的主要误差因素。

#### 1.1 电离层单层模型假设

电离层分布结构较为复杂,为简化建模计算,将 地球上空电离层垂直方向上的电子全部压缩至一个 无限薄的球面上<sup>[8]</sup>,假设薄层高度为 350~450 km。 卫星至测站的信号传播路线与薄层会产生一个交 点,称为电离层穿刺点 (ionosphere pierce point, IPP), 其数量和分布直接影响建模的精度。

#### 1.2 投影函数

通过不同的投影函数可以将卫星至测站传播方向上的 STEC 转换到 IPP 垂直方向上的 VTEC。电离层单层模型 (single layer model, SLM) 投影函数<sup>[9-10]</sup>为最经典的电离层投影模型,基本函数为

$$MF(Z) = \frac{1}{\cos(Z')} = \frac{1}{\sqrt{1 - (\sin Z')^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{R + H_{ion}} \sin Z\right)^2}}$$
(3)

式中: Z'为 IPP 处的卫星天顶距; R为地球半径; Z为 测站接收机处的卫星天顶距; H<sub>ion</sub>为电离层单层高度。

Schaer 通过对比电离层单层模型和 Chapman 函数,提出了一种改进后的单层电离层模型 (modified single layer model, MSLM)<sup>[8]</sup>:

$$VTEC = \cos\left(\arcsin\left(\frac{R}{R+H}\sin\left(\alpha z\right)\right)\right)STEC \qquad (4)$$

式中, α为投影系数, 设置为 0.978 2; 地球半径 *R*设置 为 6 371 km; *H*为 506.7 km, 此高度仅为计算投影函 数时采用<sup>[11]</sup>。

#### 1.3 球谐函数模型

球谐函数模型为电离层建模的最常用函数,具 有优秀的模型结构<sup>[8,11-12]</sup>:

$$\text{VTEC} = \sum_{n=0}^{n_{\text{max}}} \sum_{m=0}^{n} \tilde{P}_{nm}(\sin\beta) \left( C_{nm} \cos(ms) + S_{nm} \sin(ms) \right)$$
(5)

式中:  $n \to m$  为球谐函数的阶数和次数;  $\tilde{P}_{nm}$ 为正交 化的缔和勒让德函数;  $\beta$ 为 IPP 处的地磁纬度;  $C_{nm}$ 、  $S_{nm}$ 为待求球谐函数系数; s为 IPP 处的日固经度。

#### 1.4 多项式函数模型

多项式函数模型结构简单、小范围区域拟合情况较好,多用于区域电离层建模<sup>[4]</sup>,函数模型为

VTEC = 
$$\sum_{i=0}^{n} \sum_{k=0}^{m} E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (S - S_0)^k$$
 (6)

式中:  $E_{\mu}$ 为多项式模型待求系数;  $\varphi$ 为 IPP 的地理纬度;  $\varphi_0$ 为所测区中心点; S为 IPP 的太阳时角,  $S_0$ 为计算时间内区域中心位置的太阳时角, 可表示为

$$(S - S_0) = (\lambda - \lambda_0) + (t - t_0)$$
(7)

式中: $\lambda$ 为 IPP 的地理经度; $\lambda_0$ 为测区中心点地理经度; $t_0$ 为观测时刻; $t_0$ 为观测时段的中心时刻<sup>[13]</sup>。

以球谐函数模型为例,联立式(1),(2),(4)和(5), 可得到电离层球谐函数建模的总体公式为

$$\sum_{n=0}^{nmax} \sum_{m=0}^{n} \tilde{P}_{nm}(\sin\beta) \left(C_{nm}\cos(ms) + S_{nm}\sin(ms)\right)$$
$$= \cos\left(\arcsin\left(\frac{R}{R+H}\sin(\alpha Z)\right)\right)$$
$$\left[-\frac{f_1^2 f_1^2}{40.3 \left(f_1^2 - f_2^2\right)} \left(P_4 - c\text{DCB}_j - c\text{DCB}^i\right)\right]$$
(8)

本文选取 2019-01-01—14 和 2019-06-01—07 中 国陆态网 100 个观测站的卫星数据,以及中国内陆 及其周边区域 32 个 IGS 站的观测数据进行电离层 建模。对电离层建模来说, IPP 的数量和分布十分关 键,大量测站能够大幅度增加 IPP 的覆盖完善程度。 2019-01-02 GPS 卫星和建模所选测站范围 (70°~ 140°E, 15°~55°N) 内的 IPP 分布如图 1 所示。可以 看到:图 1(a) 中陆态网数据所产生的 IPP 能够十分 密集地覆盖中国内陆区域,但 15°N 左右的图像边缘 IPP 十分稀少;图 1(b) 中引入周边的 IGS 观测站后,海洋区域 IPP 数据明显增加,这部分 IPP 对电离层周 边区域的建模影响很大。



# 2 结果分析

DCB 会影响卫星信号传播, 电离层建模时必须 去除此误差。假设卫星和测站的 DCB 在一天内为 常数<sup>[14]</sup>, 在建模时, 将其作为未知观测量同步参与解 算。解算时卫星和测站的 DCB 无法分离, 导致法方 程亏秩。采用各电离层分析中心的方法, 将各卫星 每日的 DCB 之和设为 0<sup>[15]</sup>, 可将卫星和测站接收机 DCB 分离, 得到各自的 DCB。

图 2 所示为将陆态网+IGS 建模计算得到的卫星 DCB 同 IGS 数据中心发布的 DCB 进行对比得到的 DCB 解算结果,横坐标为 32 颗卫星。可以看出, DCB 解算结果的误差很小,多数卫星误差都小于 0.2 ns, 仅有一个卫星的 DCB 误差超过 0.5 ns。综合计算每天的 DCB 误差,平均误差仅为 0.227 5 ns, 优于陈永贵<sup>[5]</sup>利用陆态网数据进行中国区域球谐函数建模得到的平均误差 0.3 ns 的结果,也优于 Rui Jin 等<sup>[16]</sup>多站解算卫星 DCB 得到的 0.4 ns 的结果。





由于卫星和接收机的 DCB 同步解算,为避免卫 星的 DCB 误差转移至接收机 DCB,将陆态网+IGS 建模计算得到的部分地面 IGS 站点的 DCB 与 IGS 数据中心发布的测站 DCB 进行对比,来验证模 型精度。图 3 所示为 2019-01-02 陆态网+IGS 建模解 算的部分地面 IGS 站点 DCB 和 IGS 发布的 DCB 对 比。可以看出,多数测站所解得的 DCB 都与 IGS 所 发布的 DCB 差异较小,求得这些测站的平均 DCB 为 2.709 5 ns,整体误差也非常小,说明建模解算的 误差没有向测站 DCB 转移, DCB 整体解算的精度 很高。



图 3 2019-01-02 陆态网+IGS 建模解算的部分地面 IGS 站点 DCB 和 IGS 发布的 DCB 对比

# Fig. 3 Comparison between the modeled DCB of partial ground IGS stations by using CMONOC+IGS data and the IGS DCB on 2019-01-02

综合以上结果,利用大量陆态网+IGS 联合数据 建模的精度很高,所解得的 DCB 与 IGS 站发布的数 据误差很小。因此将接收机和卫星的仪器误差作为 未知量参与解算,建模后即可得到陆态网+IGS 站接 收机每天的硬件延迟,完全满足电离层建模求解 DCB 的需求。

#### 2.1 外符合精度评估

解算完成后对所解算的结果进行精度评估,分别从外符合精度以及内符合精度两方面进行验证<sup>[17]</sup>。 外符合精度是指与其他格网产品比较的一致性评 估。本文选择 IGS 数据中心发布的电离层产品进行 精度对比,该电离层格网模型为数据处理中心综合 分析目前7家电离层数据分析机构的特点,通过加 权处理得到的IGS电离格网产品。同时,与使用单 陆态网数据采用球谐函数方式建模解算得到的电离 层产品进行对比。IGS发布的格网产品为每隔2 h的一组电离层 VTEC 数据,格网点分布为纬度每 隔2.5°、经度每隔5°发布一个格网点数据。本文利 用联合数据解算可以根据自身需求生成时间跨度1 h,格网点经度每隔1°、纬度每隔1°的电离层 VTEC 数据。

本文采用球谐函数6阶模型,截止高度角10°,

投影函数模型为 MSLM,将建模得到的数据绘制成 分布图与其他数据进行对比。选择能显示中国内陆 大部分地区及周边范围电离层分布状况的 70°~ 140°E,15°~55°N 来进行对比。

图 4 所示为 2019-01-02 利用陆态网+IGS 建模解 算图, IGS 发布的格网产品和单陆态网数据电离层产 品得到的不同时刻的中国区域电离层 VTEC 分布 图。可以看到, 三种方法绘制出的分布图大致相同, 只在部分区域出现了较小的数据量差异。10:00时 太阳引起低纬地区 140°E VTEC上升, 随着纬度上 升 VTEC减小; 14:00时偏高纬地区 VTEC都较大; 18:00时随着太阳落下 VTEC高的地区转移至 70°E 左右。三种方法之间差异不大, 说明建模解算 能够正确反映 VTEC 的分布。





以 2019-01-02T12:00 为例,将陆态网+IGS 建模 得到的电离层 TEC 分别与 IGS 发布的电离层格网产 品以及单陆态网数据建模的结果求差,得到的误差图如 图 5 所示。图 5(a) 为建模结果与 IGS 电离层格网结 果的误差,可以看出整体的误差都不大,只在低纬度 区域出现误差稍大的现象。这是由于陆上观测站数 据很多,而低纬区域只在部分陆地上分布有 IGS 站 点,导致精度不均匀。图 5(b)为陆态网+IGS 建模结 果与单陆态网数据得到结果的误差,可以看到在中 间区域两者之间的差异很小,而在低纬地区出现了 两者之间差异较大的现象。图 5(c)为利用单陆态网 数据得到的结果与 IGS 站电离层格网图的误差,同 样是在低纬度地区出现较大的差异。



Fig. 5 Ionospheric VTEC error distribution map at 2019-01-02T12:00 by 3 methods

#### 造成以上现象的原因有:

1) 首先 IGS 格网产品选择全球的 IGS 站点数据 进行建模, 中国区域只有很少的站点, 所以中国区域 建模精度不高。

2) 只采用陆态网观测站进行建模, 陆上区域建 模精度有所提高, 但低纬区域陆态网没有海上的站 点数据, 如图 1 所示。且从实际电离层格网数据来 看, 单陆态网数据的建模结果, 在 TEC 较低的夜间低 纬度地区会出现较多的负值点分布, 这与实际情况 是不符的。

而本文选择陆态网数据+IGS 站点数据联合建 模,在整个建模区间都有较平滑的 IPP 分布。将观测 数据分别与上述两种数据在各自格网点处相减,然 后将解算的全部时间内所求的差异做平均。建模结 果同 IGS 格网的平均误差为 1.2109 TECU, 均方根 误差 (root mean square error, RMSE) 为 1.743 2 TECU; 建模结果同单陆态网数据电离层产品的平均误差为 1.848 9 TECU, RMSE 为 2.002 3 TECU; 单陆态网数 据建模成果同 IGS 中心产品的平均误差为 2.013 3 TECU, RMSE为 2.558 4 TECU。同时针对不同季度 选取 2019-06-01—07 的数据进行建模,此时电离层 活跃程度较高,相同时间 TEC 有所上升,解得建模结 果同 IGS 格 网 产 品 的 平 均 误 差 为 1.346 TECU, RMSE 为 1.833 TECU, 这说明这种建模方式在不同 季节均具有较高的建模精度。从误差情况来看,采 用联合数据建模在总体上明显优于使用单陆态网数 据建模的精度。

综上所述,利用陆态网数据+IGS数据联合建模 在总体上与 IGS 格网产品有较好的符合情况,整体 误差很小,且误差的分布较为平均。利用陆态 网+IGS 数据联合解算结果与单陆态网数据建模的结 果在中国内陆区域拟合很好,且利用联合数据建模 在海洋区域也有更好的建模效果。

#### 2.2 内符合精度评估

GNSS 数据值包括很多类型,处理数据时将不同 类型观测值之间求差可以得到不同作用的观测值组 合,本文利用载波相位观测值 P<sub>1</sub>和 P<sub>2</sub>求差得到载波 相位无几何距离观测组合 P<sub>4</sub>,利用伪距观测值 L<sub>1</sub>和 L<sub>2</sub>求差可以得到伪距无几何距离观测值 L<sub>4</sub>,再将 P<sub>4</sub>进行相位平滑可以得到载波平滑伪距:

 $P_{4,sm} = \omega_t P_4(t) + (1 - \omega_t) P_{4,p}(t)(t > 1)$ (9) 式中: t 为历元数;  $\omega_t$ 为权重因子, 与历元 t 有关;

$$P_{4,p}(t) = P_{4,sm}(t-1) + [L_4(t) - L_4(t-1)](t>1) \quad (10)$$

载波平滑伪距观测值和卫星的延迟直接相关,结合式(1)可以得到:

$$P_{4,\rm sm} = 40.3 \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \text{STEC} + \text{DCB}^i + \text{DCB}_j \qquad (11)$$

利用 GPS 卫星观测值可以获得具体的电离层延迟,以 IGS 数据中心所发布的卫星和部分测站接收机的 DCB 作为真值,结合之前解算得到的陆态网接收机 DCB,将计算得到的卫星延迟量去除 DCB 后的结果作为电离层延迟准确值,将其与陆态网+IGS 联合建模得到的结果、IGS 格网数据和单陆态网数据建模电离层结果进行比较,可以得到建模的内符合精度。

首先将格网数据按照双线性插值的方法得到实 测数据点位的 TEC 数据, 两者求差得到建模数据与 实测数据的差值,如图 6 所示。图 6(a) 为利用陆态 网+IGS 网联合数据的建模结果,可以看出,中国内陆 区域建模数据与 GPS 卫星数据实测 TEC 数据的差 距很小,误差基本在2 TECU 以下,结果相对较差的 点位基本出现在远离中国内陆的边界区域,误差基 本都在 4 TECU 以内。从 IGS 发布的格网数据可以 明显看到,在许多点位出现了较大的误差,比利用联 合数据建模得到的结果要高,且误差的分布也比较 平均,海洋陆地都有较大误差。因此,联合数据相对 于 IGS 发布的电离层格网有更高的精度。经过计算 得到利用联合数据解算与实测数据计算点的 TEC 平 均误差为 1.050 TECU, RMSE 为 1.427 TECU; IGS 发 布的格网同实测点的平均误差为 2.058 TECU, RMSE 为 2.425 TECU。



图 6 误差分布散点图 Fig. 6 Scatter plot map of error

# 3 建模方式选择与精度评估

本文采用不同的建模模型、不同的投影函数,建 模时采用不同的阶数、次数,以及选择不同角度的数 据截止高度角分别对电离层进行建模,分别从平均 误差、RMSE 对比建模结果的差异,如表1所示,获 得更符合中国区域模型的建模方式。

表1 电离层建模精度评估表

#### Tab. 1 Evaluation of ionospheric modeling accuracy

函数模型选择	建模方式		平均误差/TECU RMSE/TECU	
球谐函数	模型阶数选择	4阶	1.113	1.523
		5阶	1.083	1.498
		6阶	1.051	1.417
		7阶	1.033	1.436
		8阶	1.023	1.397
		9阶	1.019	1.383
	截止高度角	5°	1.157	1.798
		10°	1.051	1.427
		15°	1.031	1.424
		20°	1.059	1.448
		25°	1.090	1.544
		30°	1.144	1.764
	投影函数	SLM模型	1.102	1.534
		MSLM模型	1.051	1.427
多项式函数	模型阶数选择	4阶4次	1.263	1.727
		5阶5次	1.232	1.695
		6阶6次	1.195	1.607
		7阶7次	1.190	1.594

从表1可以看出,多项式和球谐函数建模都能 够较好反映出中国区域上空的电子分布状态,精度 也都较高,但基于球谐函数的建模精度总体上要略 高于多项式函数建模的结果。对于球谐函数建模来 说,平均误差随着球谐函数的阶数上升而下降, RMSE 总体也呈下降趋势,但是球谐函数从6阶变 为7阶时, RMSE 略有上升, 虽然总体平均误差下降, 但出现了部分点位与真值误差增大的情况;且对中 国区域来说,随着阶数的增大,计算量会不断增加, 而整体的误差变化不是十分明显。对于卫星数据的 截止高度角,在10°和15°时取得最好的精度结果;截 止高度角过低,会影响数据的精度;如果截止高度角 继续增加,虽然卫星数据的精度提升,但所获取的数 据量减小了,建模范围内的建模数据减少了,若截止 高度角一直增加会出现卫星数据不能覆盖整个建模 范围的情况。因此推荐使用卫星截止高度角 10°或 者 15°进行建模, 经验证可以满足精度需求。若建模 所使用的卫星数据量更大、覆盖范围更广,则可以考 虑选用截止高度角更大的角度进行建模。对于电离 层 STEC 的投影函数来说,采用改进后的单层电离层 模型 MSLM 精度更高。

综上所述,在进行中国区域电离层建模时,推荐 使用 6 阶球谐函数进行建模,卫星截止高度角采用 10°或 15°,投影函数采用 MSLM 模型。

# 4 结 语

针对 IGS 数据中心发布的电离层 VTEC 格网产品精度不够,不符合中国区域电离层电子分布的状况,本文采用陆态网数据+IGS 站数据联合建模的策略,将建模后的结果同 IGS 格网产品和单陆网数据建模结果进行对比,同时定量考察了中国区域电离层建模策略对建模精度的影响,得出如下结论:

1)相较于 IGS 发布的格网数据产品,由于单陆 网数据+IGS 站联合数据在中国区域有更加密集的测 站分布,经实际测定,这种建模方式总体上提高了建 模的精度。

2) 对于区域建模边缘误差升高现象,利用联合数据的建模结果在海洋上空以及中国周边区域的误差显著减小,明显优于单陆态网数据的建模精度,较电离层实测 TEC 的内符合精度也更高。可见,联合数据建不仅可以提高总体建模精度,还可以减小区域建模的边缘误差。

3) 相对于 IGS 数据中心电离层格网产品和单陆 态网数据建模所计算电离层产品,本文在进行建模 时可以根据实际需要获得比 IGS 格网产品时间跨度 更小、经纬度分布更加密集的数据产品,同时解算得 到可靠的卫星和测站的 DCB。

4) 针对中国区域, 定量考察了具体建模策略对 精度的影响情况, 得到了更为符合中国区域的电离 层建模策略。对于中国区域的电离层 VTEC 建模, 推荐使用 6 阶球谐函数, 卫星截止高度角选择 10°或 15°, 投影函数模型选择 MSLM 模型, 能够获得最高 精度的建模结果。

#### 参考文献

[1] 章红平. 基于地基 GPS 的中国区域电离层监测与延迟改 正研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院 (上海天文台), 2006.

> ZHANG H P. Regional ionospheric monitoring and delay correction in China based on ground-based GPS [D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)

- [2] LANYI G E, ROTH T. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron-content using global positioning system and beacon satellite-observations[J]. Radio science, 1988, 23(4): 483-492.
- [3] SCHAER S, BEUTLER G, MERVART L, et al. Global

and regional ionosphere models using the GPS double difference phase observable [C]// 1995 IGS Workshop, Potsdam, May 15-17.

- [4] 任晓东. 多系统 GNSS 电离层 TEC 高精度建模及差分码 偏差精确估计[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
   REN X D. Theory and methodology of ionospheric TEC modelling and differential code biases estimation with multi-GNSS[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese)
- [5] 陈永贵. 中国区域电离层建模及其精度分析[J]. 导航定 位学报, 2021, 9(2): 104-108.
  CHEN Y G. Modeling and accuracyevaluation of ionosphere in China[J]. Journal of navigation and positioning, 2021, 9(2): 104-108. (in Chinese)
- [6] FELTENS J. The International GPS Service (IGS) Ionosphere Working Group[M]//BILITZA D, RAWER K, REINISCH B W. Workshop on Description of the Low Latitude and Equatorial Ionosphere in International Reference Ionosphere; 2003: 635-644.
- [7] LIZS, YUAN Y B, FAN L, et al. Determination of the differential code bias for current BDS satellites [J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2014, 52(7): 3968-3979.
- [8] SCHAER S. Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the global positioning system[D]. Bern: Astronomisches Institute of University Bern, 1999.
- [9] 魏莹莹. 中国区域电离层建模方法及其应用研究[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2021.
   WEI Y Y. Research on ionospheric modeling methods and applications in Chinese region [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021. (in Chinese)
- [10] YAN X, YANG G. An enhanced mapping function with ionospheric varying height[J]. Remote sensing, 2019, 11(12): 1497.
- [11] 张强. 多源多系统数据融合全球电离层 TEC 监测理论与 方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
   ZHANG Q. Study on the monitoring of global ionospheric TEC based on multi-GNSS and multi-source space observation techniques[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019. (in Chinese)
- [12] 袁运斌, 霍星亮, 张宝成. 近年来我国 GNSS 电离层延迟 精确建模及修正研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10):

#### 1364-1378.

YUAN Y B, HUO X L, ZHANG B C, et al. Research progress of precise models and correction for GNSS ionospheric delay in china over recent years [J]. Acta geodaetica et cartographica sinica, 2017, 46(10): 1364-1378. (in Chinese)

- [13] 王宇晨. 基于地基 GNSS 的电离层 TEC 研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2020.
  WANG Y C. Research of ionosphere based on ground based GNSS [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020. (in Chinese)
- [14] SARDON E, ZARRAOA N. Estimation of total electron content using GPS data: how stable are the differential satellite and receiver instrumental biases?[J]. Radio science, 1997, 32(5): 1899-1910.
- [15] 张强,赵齐乐,章红平,等.利用北斗观测实验网解算北斗 卫星差分码偏差[J].武汉大学学报(信息科学版),2016, 41(12):1649-1655.
  ZHANG Q, ZHAO Q L, ZHANG H P, et al. BDS differential code bias estimation using BeiDou Experimental Track-

ing Stations[J]. Geomatics and information science of Wuhan University, 2016, 41(12): 1649-1655. (in Chinese)

- [16] JIN R, JIN S, FENG G. M\_DCB: Matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases[J].
   GPS solutions, 2012, 16(4): 541-548.
- [17] 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.

ZHANG Q, ZHAO Q L. Evaluation and analysis of the global ionosphere maps from Wuhan University IGS Ionosphere Associate Analysis Center[J] Chinese journal of geophysics, 2019, 62(12): 4493-4505. (in Chinese)

## 作者简介



徐鹏 (1996—),男,河南
人,硕士研究生,主要从事
GNSS 数据处理与电离层研究。
E-mail: 13383962917@163.com

**祝芙英** (1980—), 男, 副研究员, 主要从事地震 电离层处理分析研究。E-mail: fyzhu027@gmail.com