引文格式：单毅. 不同分析中心电离层 TEC 产品精度评估[J]. 地理空间信息, 2023, 21(4): 126-129. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.04.032

不同分析中心电离层 TEC 产品精度评估

单　毅[1]
（1. 山东正元数字城市建设有限公司，山东 烟台 264000）

摘　要：针对不同电离层产品精度存在差异的问题，对国际全球卫星导航系统（GNSS）服务员组织（IGS）、美国喷汽动力实验室（JPL）、欧洲定轨中心（CODE）、国际GNSS监测评估系统（iGMAS）、欧空局欧洲空间运行中心（ESOC）分析中心电离层产品进行精度评估，实验结果表明：在中国地区CODE和ESOG的中心电离层产品电离层格网数据（GIM）时间序列结果表现出高度的一致性；在欧洲地区CODE、ESOG和IGS中心电离层产品GIM的时间序列结果表现出高度的一致性；JPL中心电离层产品在中国地区、欧洲地区VTEC日平均值均最大；iGMAS中心电离层产品在中国地区、欧洲地区电离层VTEC日平均值均最小。IGS、JPL、CODE、iGMAS、ESOC分析中心电离层产品在中国地区VTEC的互差在3.6 TECU内，在欧洲地区VTEC的互差在3.2 TECU内，IGS、JPL、CODE、iGMAS、ESOC分析中心电离层产品在中国地区VTEC值相关系数均大于0.90，在欧洲地区相关系数均大于0.94，均表现出强相关性。

关键词：全球卫星导航系统；电离层；格网数据；球谐函数；相关性
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）04-0126-04

Accuracy Evaluation of Ionospheric TEC Products from Different Analysis Centers

SHAN Yi[1]
(1. Shandong Zhengyuan Digital City Construction Co., Ltd., Yantai 264000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the accuracy of different ionospheric products is different, we evaluated the accuracy of ionospheric products of international global navigation satellite system(GNSS) service, jet propulsion laboratory(JPL), center for orbit determination in Europe(CODE), international GNSS monitoring and assessment system(iGMAS) and European space operations center(ESOC) of ESA. The experimental results show that the GIM time series results of code and ESOG in China are highly consistent. In Europe, the time series results of CODE, ESOG and GIM are highly consistent. The daily average values of ionospheric products of JPL center in China and Europe are the largest. The daily average values of ionospheric VTEC in China and Europe are the smallest. The ionospheric products of IGS, JPL, CODE, iGMAS and ESOC are within 3.6 TECU of VTEC in China and 3.2 TECU of VTEC in Europe. The correlation coefficients of ionospheric products of IGS, JPL, CODE, iGMAS and ESOC are all greater than 0.90 in China and 0.94 in Europe, showing strong correlation.

Key words: GNSS, ionospheric, grid data, spherical harmonics, relevance

电离层作为日地空间的重要组成部分，是影响导航、定位重要因素之一。当电磁波信号穿越电离层时，会发生反射、折射、散射和吸收的现象[1-3]。定位过程中产生的电离层延迟无法完全消除，因此削弱电离层延迟，减少定位误差是全球卫星导航卫星系统领域重要研究对象之一[4]。美国喷汽动力实验室（JPL）的学者首次提出了基于GNSS原始观测量确定电离层总电子含量（TEC）的基本方法[5]，国际GNSS服务员组织（IGS）在1995开始发布全球电离层总电子含量电离层格网数据（GIM）[6]。到目前为止，IGS分析中心计算全球电离层格网的方法被认为是电离层监测和建模最具代表性的方法[7]。虽然IGS提供的电离层TEC数据具有较好的时间连续性，但是IGS监测站呈现出在欧美分布密集、中国稀疏的状况，导致中国地区GIM数据精度较低[8]。国内外学者一直致力于进一步削弱电离层延迟对导航定位的影响，文献[9]基于北斗三号卫星对北斗三号电离层模型进行精度评估，实验结果表明：北斗三号电离层模型在中国地区的改正率达到75%以上，北斗三号GIM模型的电离层误差值小于全球定位系统GIM模型的电离层误差值，北斗三号GIM模型在垂直方向的均方根误差值优于6 TECU。文献[10]借助IGS中心发布的电离层产品对不同地区的电离层模型精度进行精度分析，实验结果表明：电离层模型的精度受测

收稿日期：2021-11-25；修回日期：2022-01-18。
项目来源：山东省自然科学基金资助项目（ZR201709260285）。
作者简介：单毅（1971—），工程师，研究方向为大地测量数据处理，E-mail：shanyi197110@126.com。

站的影响，太阳活动也会对电离层模型的精度造成影响。文献[11]对国际GNSS监测评估系统（iGMAS）全球电离层TEC格网数据进行精度分析，结果表明：iGMAS发布的GIM产品与其他电离层产品表现出高度相关性，且iGMAS电离层产品内符合精度优于1.5 TECU。

针对不同分析中心电离层产品精度存在差异的问题，本文对IGS、JPL、欧洲定轨中心（CODE）、国际GNSS监测评估系统（iGMAS）、欧空局欧洲空间运行中心（ESOC）等分析中心提供的电离层产品文件进行精度评估，旨在为不同地区提供最佳电离层产品，提高导航定位的精度。

1　GNSS数据反演电离层TEC

利用测距码和载波相位观测值可以测定从卫星到接收机之间的距离，其中伪距和载波相位观测方程分别为[12-14]：

$$\rho=\rho_0+c\Delta t+v_1 \tag{1}$$

$$\lambda(\phi+N)=\rho_0+c\Delta t+v_2 \tag{2}$$

在式（1）和式（2）中，$\rho_0 i$为测站与卫星之间的几何距离；ρ为观测值；Δt为钟差；v_1、v_2为测量噪声；N为整周模糊度；ϕ为相位观测值的小数部分；λ为波长。基于GNSS双频观测数据计算电离层总电子含量TEC，即：

$$\begin{cases}\rho_0=\rho_1-\dfrac{40.3}{f_1^2}\mathrm{TEC}\\ \rho_0=\rho_2-\dfrac{40.3}{f_2^2}\mathrm{TEC}\end{cases} \tag{3}$$

同理，采用载波相位观测值计算电离层总电子含量TEC，即：

$$\mathrm{TEC}=\frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_2^2-f_1^2)}(\lambda_1\varphi_1-\lambda_2\varphi_2+\lambda_1 N_1-\lambda_2 N_2) \tag{4}$$

式中，f_1、f_2、λ_1、λ_2、φ_1、φ_2和N_1、N_2分别为L1、L2的频率、波长、相位观测值的小数部分和整周模糊度。

将电离层电子总量TEC转换为电离层垂直总电子含量（VTEC），可以更好地反映电离层的时空特性特征，一般常用的映射函数为：

$$\begin{cases}f(z')=\dfrac{1}{\cos z'}\\ \sin z'=\dfrac{\mathrm{R}}{\mathrm{R}+H}\sin z\\ \mathrm{VTEC}=\mathrm{TEC}\cdot\cos z\end{cases} \tag{5}$$

式中，H为单层高度；R为地球平均半径；z为测站处信号路径方向的天顶距；z'为穿刺点处的信号路径方向的天顶距。

2　构建电离层模型方法

球谐函数模型是利用球谐展开级数函数来描述单层电离层模型的，基于球谐函数建立全球或地区的电离层模型，VTEC球谐函数模型表达式为[5]：

$$\mathrm{VTEC}(\varphi,\ \omega)=\sum_{n=0}^{n_{\max}}\sum_{n=0}^{n}(A_{nm}\ \cos(m\omega)+B_{nm}\ \sin(m\omega))\ P_{nm}\ \cos\varphi \tag{6}$$

式中，VTEC为垂直方向电子含量；φ为穿刺点地理纬度；ω为穿刺点地理经度；m为球谐函数的阶数；$n_{\max}$为球谐函数展开最大度数；A_{nm}和B_{nm}为球谐函数模型的系数，即电离层模型参数，可利用观测站的双频观测数据由最小二乘估计方法进行估计；$P_{nm}\cos\varphi$为规格化后伴随勒让德多项式。

单层电离层多项式展开模型是将VTEC值看作是纬度差$\varphi-\varphi_0$和太阳时角差$S-S_0$的函数[15]。

$$\mathrm{VTEC}(\phi,\lambda)=\sum_{n=0}^{n_{\max}}\sum_{m=0}^{m_{\max}}E_{nm}(\phi_{\mathrm{IPP}}-\phi_0)^n(S-S_0)^m \tag{7}$$

式中，$(\phi_{\mathrm{IPP}},\lambda_{\mathrm{IPP}})$为穿刺点的日固纬度和经度；$(\varphi_0,\lambda_0)$为测区中心的日固纬度和经度；$S$为穿刺点太阳时角；$S_0$为测区中心点在计算时段太阳时角，时角差为$(S-S_0)=(\lambda_{\mathrm{IPP}}-\lambda_0)-(t-t_0)$；$t$为观测时刻；$t_0$为观测时段的中心时刻；$n_{\max}$、$m_{\max}$为泰勒级数展开的最大阶数；$E_{nm}$为泰勒级数展开的系数。泰勒级数函数的系数可以由最小二乘或卡尔曼滤波估计方法进行估计。

3　案例分析

为了对不同分析中心电离层TEC进行精度评估，借助不同分析中心（IGS、JPL、CODE、iGMAS、ESOC）2018年年积日001~365共计365 d电离层产品GIM数据进行对比分析，不同产品的时间分辨率均为2 h，空间分辨率均为2.5°×5°。

3.1　不同分析中心中国地区TEC精度评估

将IGS、JPL、CODE、iGMAS、ESOC中心发布的全球电离层产品GIM数据中提取中国地区（15°~55°N，70°~140°E）电离层VTEC值，中国地区电离层VTEC日均值的时间序列如图1所示，各个中心产品在中国地区最大互差统计结果如表1所示。对不同中心中国地区电离层VTEC值进行线性回归分析，结果如表2

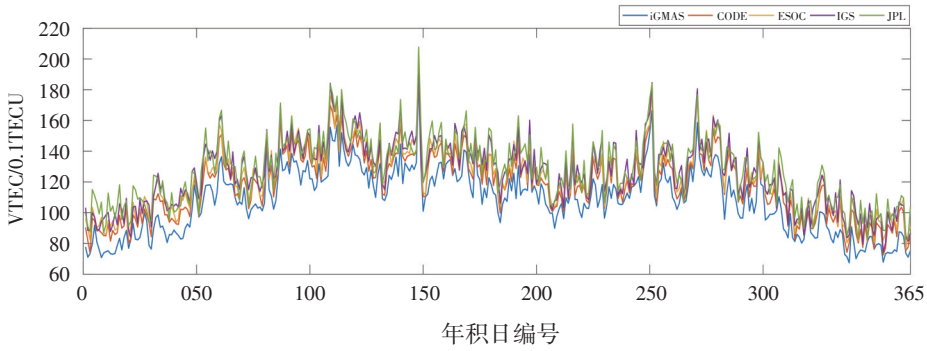


图1 不同分析中心中国地区GIM时间序列图

所示。

表1 不同分析中心中国地区VTEC最大互差统计表/TECU

最大互差	IGS	JPL	CODE	iGMAS	ESOC
IGS	0				
JPL	2.2	0			
CODE	2.5	3.0	0		
iGMAS	3.2	3.6	2.5	0	
ESOC	2.7	3.0	1.8	2.3	0

由图1可知，在中国地区CODE和ESOG的中心电离层产品GIM时间序列结果表现出高度的一致性，分析其原因可能是CODE和ESOG中心电离层产品均采用15阶球谐函数建立的全球电离层模型；JPL在中国地区电离层VTEC日平均值最大，iGMAS在中国地区电离层VTEC日平均值最小，IGS在中国地区VTEC日平均值介于CODE与JPL之间，同时IGS产品是基于15阶球谐函数建立的全球电离层模型，分析其原因可能是IGS产品是两者间加权平均得到的；不同分析中心电离层产品在中国地区VTEC的互差在3.6 TECU内。

由表2可知，不同分析中心（IGS、JPL、CODE、iGMAS、ESOC）电离层产品在中国地区VTEC值相关系数均大于0.90，表现出强相关性，其中CODE中心与ESOC中心电离层产品VTEC值在中国地区相关性最强，相关系数为0.98，JPL中心与iGMAS中心电离层产品VTEC值在中国地区相关性最弱，相关系数为0.90，分析其原因可能是CODE和ESOG中心电离层产品建模均采用相同的数学模型，只是在全球测站选取上存在个别差异，而JPL和iGMAS采用不同的数学模型，前者采用球面双三次样条曲线模型，后者是由各家分析中心加权平均得到。

表2 不同分析中心中国地区VTEC相关性分析

相关系数	IGS	JPL	CODE	iGMAS	ESOC
IGS	1				
JPL	0.95	1			
CODE	0.95	0.92	1		
iGMAS	0.92	0.90	0.95	1	
ESOC	0.94	0.92	0.98	0.95	1

3.2 不同分析中心欧洲地区TEC精度评估

将IGS、JPL、CODE、iGMAS、ESOC中心发布的全球电离层产品GIM数据中提取欧洲地区（30°N~60°N，5°W~45°E）电离层VTEC值，欧洲地区电离层VTEC日均值的时间序列如图2所示，各个中心产品在欧洲地区最大互差统计结果如表3所示。对不同中心欧洲地区电离层VTEC值进行线性回归分析，结果如表4所示。

由图2可知，在欧洲地区CODE、ESOG和IGS中心电离层产品GIM的时间序列结果表现出高度的一致性，分析其原因可能是CODE和ESOG中心电离层产品均采用15阶球谐函数建立的全球电离层模型，IGS

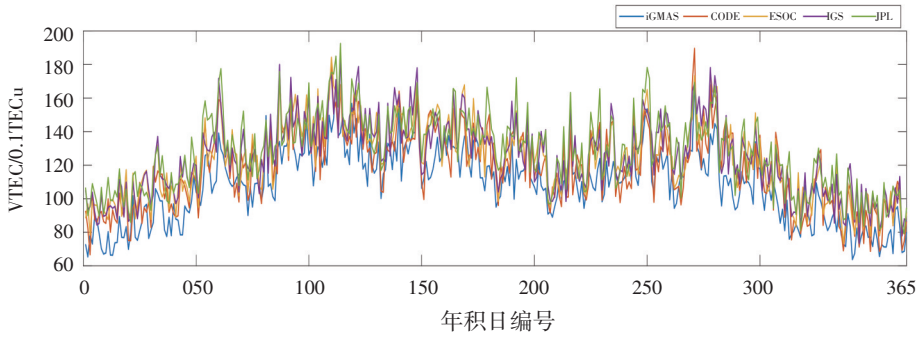


图2 不同分析中心欧洲地区GIM时间序列图

是通过CODE加权平均得到的。JPL在欧洲地区电离层VTEC日平均值最大；iGMAS在欧洲地区电离层VTEC日平均值最小；不同分析中心电离层产品在欧洲地区VTEC的互差在3.2 TECU内。

表3　不同分析中心欧洲地区VTEC最大互差统计表/TECU

最大互差	IGS	JPL	CODE	iGMAS	ESOC
IGS	0				
JPL	2.9	0			
CODE	1.5	2.4	0		
iGMAS	2.8	3.2	3.1	0	
ESOC	1.5	2.8	1.6	3.0	0

表4　不同分析中心欧洲地区VTEC相关性分析

相关系数	IGS	JPL	CODE	iGMAS	ESOC
IGS	1				
JPL	0.94	1			
CODE	0.99	0.96	1		
iGMAS	0.94	0.94	0.94	1	
ESOC	0.98	0.95	0.98	0.94	1

由表4可知，不同分析中心（IGS、JPL、CODE、iGMAS、ESOC）电离层产品在欧洲地区VTEC值相关系数均大于0.94，表现出强相关性，其中IGS中心与CODE中心电离层产品VTEC值在欧洲地区相关性最强，相关系数为0.99，iGMAS中心与其他（IGS、JPL、CODE、ESOC）中心电离层产品VTEC值的相关系数均为0.94，分析其原因可能是IGS和CODE中心电离层产品建模均采用相同的数学模型，而iGMAS产品是由各家分析中心加权平均得到，和各个中心产品相关系数较为相同。

4　结　语

本文借助IGS、JPL、CODE、iGMAS、ESOC分析中心2018年年积日001~365共计365 d电离层产品GIM数据进行精度评估分析，实验结果表明：

在中国地区CODE和ESOG的中心电离层产品GIM时间序列结果表现出高度的一致性，JPL在中国地区电离层VTEC日平均值最大；iGMAS在中国地区电离层VTEC日平均值最小；IGS在中国地区VTEC日平均值介于CODE与JPL之间。

在欧洲地区CODE、ESOG和IGS中心电离层产品GIM的时间序列结果表现出高度的一致性，JPL在欧洲地区电离层VTEC日平均值最大；iGMAS在欧洲地区电离层VTEC日平均值最小。

不同分析中心电离层产品在中国地区VTEC的互差在3.6 TECU内，在欧洲地区VTEC的互差在3.2 TECU内。IGS、JPL、CODE、iGMAS、ESOC分析中心电离层产品在中国地区VTEC值相关系数均大于0.90，在欧洲地区相关系数大于0.94，均表现出强相关性。

虽然不同分析中心建模所用测站数量和建模方法存在差异，但在各中心发布产品精度范围内（精度为2~8 TECU），IGS、JPL、CODE、iGMAS和ESOC中心电离层产品在中国和欧洲地区精度相当。

参考文献

[1] 李征航,黄劲松. GPS测量与数据处理. 第三版[M]. 武汉:武汉大学出版社,2016

[2] 朱永兴. 北斗系统全球电离层建模理论与方法研究[J]. 测绘学报,2021,50(5):710

[3] 王格,王宁波,李子申,等. 地磁暴期间北半球高纬度地区电离层变化特征及对精密定位的影响[J]. 空间科学学报,2021,41(2):261-272

[4] 宋大鹏,李玉海,崔素梅,等. GPS/Galileo/QZSS精密单点定位精度分析[J]. 地理空间信息,2021,19(5):63-67

[5] 杨芸珍. 中国地区GNSS电离层延迟建模研究[D]. 桂林:桂林理工大学,2020

[6] 徐佳佳. 基于GPS观测数据的电离层STEC提取研究[D]. 北京:中国地质大学,2020

[7] 陈秀德,贾小林,朱永兴,等. 不同电离层格网产品的精度分析[J]. 大地测量与地球动力学,2017,37(8):849-855

[8] 朱永兴,谭述森,任夏,等. GNSS全球广播电离层模型精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(5):768-775

[9] 许龙霞,李孝辉,何雷. 北斗三号电离层模型性能分析[J]. 空间科学学报,2020,40(3):341-348

[10] 侯威震,张绍成,黄龙强,等. 地方时的全球电离层格网精度评价[J]. 测绘科学,2019,44(1):151-156

[11] 李涌涛,马洪磊,李建文,等. iGMAS全球电离层TEC格网产品精度分析[J]. 测绘科学,2021,46(2):7-14+41

[12] 刘航. 多源数据融合的全球电离层建模研究[D]. 西安:西安科技大学,2020

[13] 从建锋. 基于SDCORS数据建立地区电离层模型及电离层扰动在地震监测中的应用[D]. 青岛:山东科技大学,2020

[14] 张正协,高成发,潘树国,等. 基于实时Kalman滤波的电离层建模及精度分析[J]. 测绘工程,2020,29(3):9-14

[15] 周金宁. 北斗广播电离层模型的评估与改进分析[D]. 武汉:武汉大学,2020