doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.01.031

基于河北省CORS的区域电离层模型精度分析

吴文坛[1]，王新广[1]，石少坚[1]，史进志[1]，郧晓光[1]
（1. 河北省自然资源档案馆，河北 石家庄 050031）

摘　要：为提高区域电离层模型和导航定位服务的精度，利用河北省连续运行参考站系统（CORS）6个基准站的GPS卫星观测数据进行区域电离层建模和接收机差分码偏差（DCB）估计，并引入中国科学院（CAS）发布的电离层产品内插得到的垂直总电子含量（VTEC）进行区域电离层模型精度验证。实验结果表明，估计的单日GPS卫星DCB与产品值精度相当，偏差控制在0.5 ns以内；河北省CORS站GPS系统接收机DCB稳定性较好，5 d的标准偏差均小于0.1 ns；利用河北省CORS建立的区域电离层TEC在地磁平静期与磁暴期均与CAS产品值具有较高的一致性，TEC偏差控制在2 TECU以内。河北省区域电离层模型能有效监测电离层TEC在不同地磁状态下的时空变化，提高区域导航定位服务水平。

关键词：CORS；区域电离层模型；DCB；VTEC
中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）01-0148-04

Accuracy Analysis of Regional Ionospheric Model Based on Hebei CORS

WU Wentan[1], WANG Xinguang[1], SHI Shaojian[1], SHI Jinzhi[1], YUN Xiaoguang[1]
(1. Hebei Province Natural Resources Archives, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: To improve the accuracy of regional ionospheric model and navigation and positioning service, we used GPS observations from 6 stations of continuous operational reference system(CORS) in Hebei Province to establish regional ionospheric model and estimate differential code bias(DCB) of receivers. Then, we used the ionospheric product provided from Chinese Academy of Sciences(CAS) to verify the accuracy of regional ionospheric model. The results show that the accuracy of GPS satellite DCB is consistent with the products. The bias of satellite DCB is less than 0.5 ns. The DCB of GPS receivers from Hebei CORS has a good stability, and the 5-day standard bias is less than 0.1 ns. The regional ionospheric TEC established by Hebei CORS has a high consistency with CAS product in geomagnetic calm period and geomagnetic storm period. The TEC bias is controlled within 2 TECU. The regional ionospheric model in this paper can effectively monitor the spatio-temporal variation of ionospheric TEC under different geomagnetic conditions, and provide services for regional navigation and positioning.

Key words: CORS, regional ionospheric model, DCB, VTEC

电离层作为空间大气的组成部分，会对无线电波通信、导航定位系统、供电系统以及航空设备运行等产生重要影响[1]。因此，监测电离层在不同空间环境状态下的变化情况，有助于人类生产、生活的正常进行。地磁暴是地球磁场产生剧烈扰动的一种现象。研究表明，当发生强烈的地磁场扰动时，电离层也会随之产生不同程度的扰动响应，主要表现为电离层正、负相暴响应特征（即电离层电子密度出现明显的增强、减弱）[2]。研究发生磁暴时电离层异常变化规律不仅有助于实现电离层高精度建模，而且可以消除电离层延迟误差，实现高精度导航定位服务[1]。区域连续运行参考站系统（CORS）作为一种具备多功能服务特性的基础设施，越来越受到国家以及各省市地区的重视。建立区域CORS来提供高精度导航定位服务已成为当前的一个热点。

在电离层建模方面，国内外学者做了许多研究，如从建锋[3]等利用球谐函数模型对山东区域电离层进行建模分析，结果表明区域电离层模型精度与CODE中心解算电离层产品值的偏差为1~1.5 TECU，且区域电离层模型有助于提升定位精度；陈永贵[4]借助中国大陆构造环境监测网络提供的GPS卫星原始观测数据进行中国区域电离层建模，结果表明模型得到的电离层TEC与CODE中心TEC产品值的偏差在2 TECU以内；李涌涛[5]等利用不同阶次球谐函数模型对欧洲区域16个测站进行单站电离层建模精度分析，结果表明不同阶次的单站电离层模型与CODE中心提供的TEC精度相当，偏差在1 TECU内；吴伟铨[6]等利用多项式模型、球谐函数模型等对武汉地区17个CORS站观测

收稿日期：2021-12-28。
项目来源：河北省技术创新引导计划项目科技冬奥专项资助项目（21477603D）；河北省自然资源厅科技资助项目（324-0801-JBN-NX2P）。

数据进行电离层TEC建模，结果表明不同模型得到的电离层TEC与CODE中心提供的产品值具有较好的一致性，其中低阶球谐函数模型精度效果最佳；陈鹏[7]等利用全球区域测站的GPS/GLONASS双系统观测数据，基于高阶球谐函数模型对全球电离层进行建模，结果表明双系统观测数据的电离层模型精度与GPS单系统模型精度差异不大。近年来，随着我国各省市地区CORS站的快速发展，建立区域性电离层模型成为提升导航定位服务的一项强有力的技术[8-10]。

基于上述研究，本文利用河北省境内CORS站的GPS系统观测数据建立省区域电离层模型，并分析河北省区域电离层在地磁平静期与磁暴状态下的时空变化特征，为区域用户导航定位服务提供了高精度电离层产品，提升了精准导航定位服务水平。

1　数据来源与研究方法

1.1　数据来源

本文选取河北省境内的保定站（BDLY）、沧州站（CZCZ）、承德站（CDWC）、唐山站（TSQA）、邢台站（XTNH）、张家口站（ZJCL）6个CORS站进行区域电离层建模，GPS卫星观测数据采样间隔为30 s，卫星截止高度角设置为15°。河北省境内CORS站位置示意图如图1所示，河北省主要位于中纬度区域（36°~43°N、113°~120°E）。此外，本文引入中国科学院（CAS）提供的差分码偏差（DCB）产品值与电离层TEC产品值进行对比，以验证河北省CORS解算得到的电离层TEC精度。

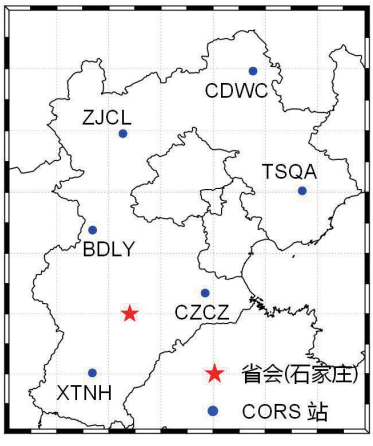


图1　河北省CORS站分布以及省会位置示意图

1.2　区域电离层建模方法

电离层延迟作为高精度定位服务的主要误差源，其解算精度直接关系到导航定位服务的精度。本文采用非组合PPP的方法解算电离层延迟[11-12]，其表达式为：

$$\hat{I}_1 = I_1 + \frac{1}{1-\gamma_2}(\mathrm{DCB}^{\mathrm{r}} - \mathrm{DCB}^{\mathrm{s}}) \tag{1}$$

式中，$\hat{I}_1$为非组合PPP解算的电离层延迟；I_1为f_1频率下的接收机到卫星视线上的实际电离层延迟；$\mathrm{DCB}^{\mathrm{r}}$、$\mathrm{DCB}^{\mathrm{s}}$分别为接收机和卫星的DCB；$\gamma_2 = f_1^2/f_2^2$，本文中$f_1 = 1\,575.42$ MHz，$f_2 = 1\,227.60$ MHz。

由式（1）可知，非组合PPP解算得到的电离层延迟吸收了卫星和接收机DCB的影响[13]，因此需进一步分离实际的电离层延迟与DCB偏差。本文利用电离层单层假设模型将斜电离层TEC（STEC）通过投影函数转换为垂直电离层TEC（VTEC），并引入低阶球谐函数模型对VTEC进行建模，从而分离卫星和接收机DCB对电离层延迟的影响。具体计算公式为[14]：

$$\mathrm{VTEC} = MF(z)\left[\frac{f_1^2}{40.28} I_{\mathrm{ion}} + \frac{f_1^2 f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)40.28}(\mathrm{DCB}^{\mathrm{r}} - \mathrm{DCB}^{\mathrm{s}})\right]$$

$$= \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{n} \tilde{P}_{nm}(\sin\beta)(a_{nm}\cos ms + b_{nm}\sin ms) \tag{2}$$

式中，MF为投影函数；z为卫星高度角，单位：rad；I_{ion}为非组合PPP解算得到的电离层延迟；β为电离层穿刺点的地理纬度；s为穿刺点处的日固经度；$\tilde{P}_{nm}$为正则化的勒让德多项式。

建立上述方程后，结合GPS卫星双频观测数据，利用最小二乘法同时对球谐函数系数、卫星和接收机DCB进行解算。

2　研究结果与分析

2.1　CORS站DCB精度分析

为分析本文解算的GPS卫星DCB估计值的精度，引入CAS提供的GPS卫星DCB产品值进行实验对比。2017年9月7日GPS系统32颗卫星DCB估计值与产品值的对比和残差变化如图2所示，可以看出，河北省CORS解算的GPS卫星DCB估计值与CAS产品值精度

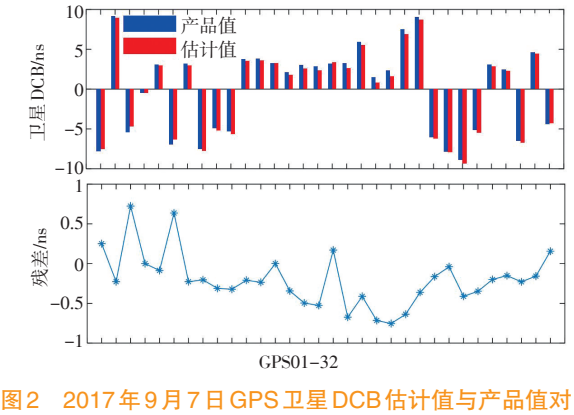


图2　2017年9月7日GPS卫星DCB估计值与产品值对比

基本一致，残差变化基本控制在0.5 ns以内；其中G03、G06卫星DCB估计值精度略低，与产品值的残差达到了0.6~0.7 ns。

2017年9月6日—10日河北省6个CORS站的接收机DCB估计值变化情况如图3所示。由于河北省CORS站作为区域站不会播发接收机DCB产品值，因此本文通过球谐函数模型和最小二乘算法估计接收机DCB值。由图3可知，河北省6个CORS站GPS系统接收机DCB估计值主要在-7~-10 ns范围内，6个CORS站5 d的接收机DCB均值分别为-8.828 3 ns（BDLY）、-8.045 0 ns（CDWC）、-8.625 5 ns（CZCZ）、-9.784 1 ns（TSQA）、-7.621 9 ns（XTNH）、-9.537 9 ns（ZJCL）。2017年9月6日—10日连续5 d解算的接收机DCB估计值以及相应标准差（STD）如表1所示，可以看出，河北省6个CORS站的GPS系统接收机DCB稳定性较好，STD分别为0.078 1 ns（BDLY）、0.141 5 ns（CDWC）、0.080 7 ns（CZCZ）、0.065 7 ns（TSQA）、0.059 4 ns（XTNH）、0.084 2 ns（ZJCL），基本控制在0.1 ns以内，表明河北省CORS站稳定性较好，可观测得到质量更高的卫星数据。

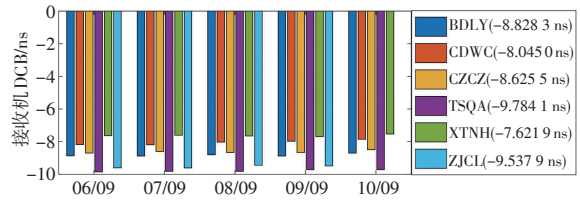


图3 2017年9月6日—10日接收机DCB估计值变化趋势

表1 2017年9月6日—10日接收机DCB估计值和STD

测站	9月6日	9月7日	9月8日	9月9日	9月10日	STD
保定（BDLY）	-8.873 4	-8.880 5	-8.801 3	-8.883 7	-8.702 5	0.078 1
承德（CDWC）	-8.174 9	-8.192 9	-8.028 8	-7.972 1	-7.856 1	0.141 5
沧州（CZCZ）	-8.698 9	-8.603 9	-8.664 7	-8.665 3	-8.494 9	0.080 7
唐山（TSQA）	-9.854 3	-9.818 3	-9.819 9	-9.712 9	-9.714 8	0.065 7
邢台（XTNH）	-7.630 4	-7.608 4	-7.653 0	-7.688 1	-7.529 7	0.059 4
张家口（ZJCL）	-9.605 8	-9.612 3	-9.444 4	-9.489 2	-	0.084 2

2.2 区域电离层TEC精度分析

在剔除卫星和接收机DCB后，通过式（2）可计算得到不受DCB偏差影响的电离层VTEC值。保定站、唐山站的GPS卫星观测数据剔除DCB影响后2017年9月6日—10日电离层VTEC变化情况如图4所示，不同颜色的曲线表示不同GPS系统卫星对应的VTEC数值，可以看出，利用CORS站观测数据解算得到的电离层VTEC值在9月8日出现了明显增强，其他年积日的VTEC值相差不大，说明利用河北省CORS站可精准监测电离层产生的扰动变化。

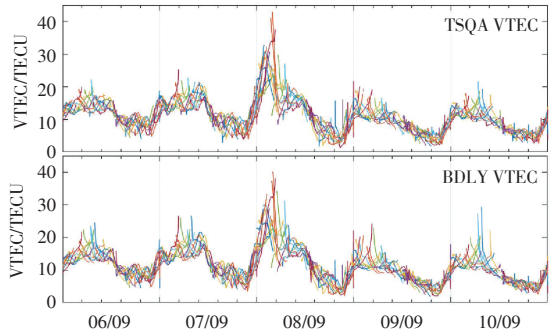


图4 2017年9月6日—10日保定站、唐山站电离层VTEC值变化

结合图4中的电离层VTEC值异常变化，本文绘制了2017年9月6日—10日地磁指数Dst、Kp的变化趋势图（图5），研究表明地磁指数的变化可定量反映地磁场，可以看出，从9月7日18:00 UT开始，Dst指数突然负向减小，表明此时磁暴进入主相阶段，直至9月8日01:00 UT，数值达到了-142 nT；与此同时，Kp指数在该时刻数值达到最大值8，表明产生了强烈磁暴。与一般磁暴发展过程不同的是，本次磁暴进入恢复相阶段后，产生了较强烈的二次扰动，即从9月8日12:00 UT开始，逐渐恢复平静状态的Dst指数突然发生再次扰动，直至17:00 UT达到最小值-124 nT；同时，Kp指数再次达到量级8，表明在磁暴恢复相阶段发生了与主相阶段规模相当的地磁暴过程。18:00 UT后各项指数数值逐渐恢复到平静状态，此次磁暴过程全部结束。通过上述分析，本文将研究此次磁暴发生期间，河北省区域电离层所表现出的变化特征；并引入CAS提供的电离层TEC产品值与区域CORS站解算的电离层TEC进行对比分析。

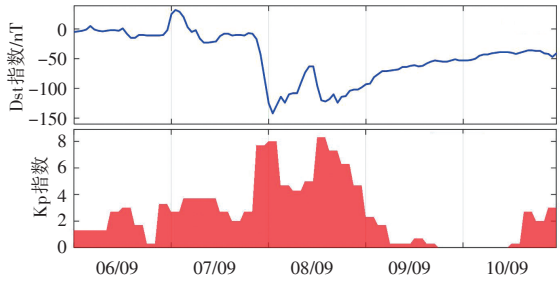


图5 2017年9月6日—10日地磁指数Dst、Kp的变化

2017年9月6日—10日不同测站位置对应的电离层穿刺点处的VTEC值和CAS产品值变化趋势如图6所示，可以看出，河北省CORS站建模得到的电离层TEC与CAS产品值变化趋势基本一致，残差控制在2 TECU以内，表明利用省级CORS站GPS卫星观测数据得到的电离层TEC精度与CAS中心解算的TEC精度相当。根据图5中的地磁指数变化，9月8日可以看到电离层TEC出现了明显的增强，最大值接近30 TECU，这与磁暴进入主相阶段的时间一致，表明在此次磁暴发生后，河北省区域电离层TEC受磁暴影响，出现显著增强，省级CORS站解算的TEC与CAS产品值均对此次磁暴产生了响应，而后磁暴进入恢复相阶段后，电离层TEC逐渐恢复平静状态。此外，从图6中还可以看出，河北省范围内不同空间位置处的电离层TEC时空变化差异不大。

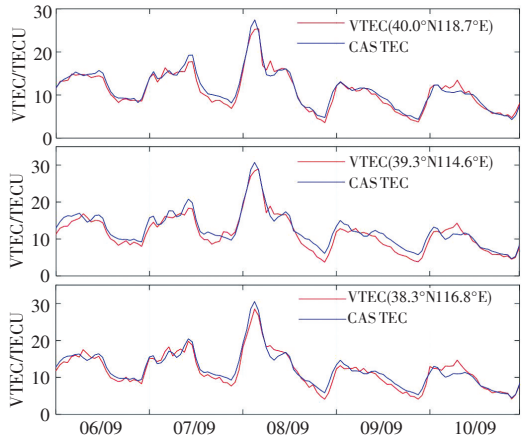


图6　2017年9月6日—10日不同穿刺点处VTEC与CAS产品TEC对比

3　结　语

针对区域电离层模型精度有待提高的问题，本文利用河北省境内6个CORS站的GPS卫星观测数据建立了高精度的区域电离层模型，同时估计了GPS系统卫星和接收机的DCB值。考虑到河北省CORS站的接收机DCB还不存在相应的产品值，本文的解算结果可作为CORS站DCB的参考值。实验结果表明，河北省CORS站的接收机DCB具有较好的稳定性，5 d接收机DCB标准偏差变化小于0.1 ns，这为获取高精度的电离层TEC信息提供了有力保证。本文引入CAS提供的电离层产品值来验证省级CORS站建立的区域电离层模型精度，并分析了在地磁平静期与磁暴期间区域电离层TEC的变化。结果表明，省级CORS站建立的电离层模型精度与CAS产品值基本一致。本文进一步证明了利用河北省CORS站建立的区域电离层模型可有效监测电离层的时空变化，为区域用户提供高精度的导航定位服务。未来省级CORS系统的完善优化建设中将引入更多导航定位系统的观测信息，以提高实时高精度导航定位服务水平。

参考文献

[1] 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):1 364-1 378

[2] 李涌涛,李建文,魏绒绒,等. 全球电离层TEC格网时空变化特性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(5):776-783

[3] 从建锋,刘智敏,陈汉林. 山东区域电离层模型的建立及精度评估[J]. 测绘科学,2020,45(1):48-53

[4] 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

[5] 李涌涛,赵昂,李建文,等. 单站区域电离层TEC建模及精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(1):69-78

[6] 吴伟铨,周晨,禹智斌,等. 基于GNSS的武汉区域电离层TEC建模[J]. 电波科学学报,2022,37(1):146-152

[7] 陈鹏,陈家君. GPS/GLONASS融合的全球电离层格网模型结果分析[J]. 大地测量与地球动力学,2014,34(5):70-74

[8] 梁川,符杰林,王俊义,等. 基于BDS/GPS和经验模型的区域电离层建模[J]. 空间科学学报,2020,40(1):20-27

[9] 靳婷婷,丁克良,王喜江,等. 京津冀地区电离层时空特性分析[J]. 测绘科学,2020,45(8):57-63

[10] 朱农. 2005年至2015年拉萨地区电离层变化特性分析[J]. 科技资讯,2021,19(5):101-107

[11] 张宝成,欧吉坤,袁运斌,等. 基于GPS双频原始观测值的精密单点定位算法及应用[J]. 测绘学报,2010,39(5):478-483

[12] 张宝成. GNSS非差非组合精密单点定位的理论方法与应用研究[J]. 测绘学报,2014,43(10):1 099

[13] 申健,赵文,安向东. 基于非组合精密单点定位的区域电离层建模[J]. 测绘地理信息,2019,44(6):31-34

[14] 王雪艳,郭承军. 区域电离层TEC建模及其在磁暴上的应用[J]. 全球定位系统,2017,42(3):7-10

第一作者简介：吴文坛（1979—），硕士研究生，高级工程师，主要从事省级卫星定位连续运行基准站网建设、管理、运行维护、应用研究与用户服务等工作。