

# 联合 BDS/GPS 的北斗广域差分实时电离层 延迟格网改正方法研究

房成贺<sup>1,2</sup> 陈俊平<sup>3</sup> 兰孝奇<sup>4</sup> 张磊<sup>5</sup>

1 中国航天电子技术研究院卫星导航系统工程中心,北京市,100094

2 中国卫星导航系统管理办公室测试评估研究中心,北京市,100094

3 中国科学院上海天文台,上海市南丹路 80 号,200030

4 河海大学地球科学与工程学院,南京市西康路 1 号,211100

5 南京高等职业技术学校,南京市黄山路 58 号,210019

**摘要:** 研究并实现中国区域北斗广域差分实时电离层延迟格网改正算法,针对北斗单系统实时建立电离层延迟格网的不足,提出联合 BDS/GPS 的北斗广域差分实时电离层延迟改正方法。比较 BDS、GPS 以及 BDS/GPS 观测的实时电离层延迟格网,并利用北斗单频单点伪距定位进行精度验证。结果表明,在有效格网点覆盖充足的地区,BDS 与 GPS 实时电离层延迟格网定位效果相当;而联合 BDS/GPS 观测的实时电离层延迟格网极大提高了偏远地区的单频定位精度与可定位历元数,也使原本单系统格网覆盖充足的地区定位效果得到进一步增强和稳定。

**关键词:** BDS/GPS; 实时; 广域差分; 电离层延迟; 格网改正

**中图分类号:** P228

**文献标识码:** A

对于 GNSS 导航定位的用户端而言,电离层延迟误差是最显著的误差源。电离层延迟模型对于单频用户非常重要<sup>[1]</sup>,而且也会对精密单点定位的收敛时间产生一定的影响。虽然局域差分技术能够在小范围内达到 1~5 m 的定位精度,但在电离层电子浓度梯度变化很大的地方(如赤道附近)误差甚至会达到 30 m<sup>[2]</sup>。

美国 FAA 建立的广域差分增强系统 WAAS 利用格网模型校正动态用户电离层时延,其改正效果在中纬度地区能达到 80%<sup>[3-4]</sup>。欧盟的 EGONS 考虑到电离层电子含量随纬度变化的差异,针对不同纬度采用不同的格网分辨率<sup>[5]</sup>。印度的 GAGAN 广域增强系统处于电离层变化异常复杂多变的低纬度区域,其需要面对和克服的难点就是要使用可靠的电离层格网解算策略,进而提供稳定的电离层格网改正信息<sup>[6]</sup>。对于我国区域尤其是赤道以北中低纬度区域的电离层异常区,通常的电离层延迟模型改正效果较差,只能通过实时格网电离层改正获得较高精度的电离层时延校正效果<sup>[7-9]</sup>。基于美国 WAAS 的完好性监测思想,我国建立了卫星导航广域增强系统,北斗二号一期系统

除向用户提供基本的导航电文参数(卫星星历、钟差参数和电离层延迟模型参数)外,还利用布设在全国广大地区的北斗参考站观测数据计算广域差分改正信息(包括格网电离层延迟改正数),并通过 GEO 卫星向授权用户发播使用<sup>[10-12]</sup>。

考虑到目前北斗广域差分实时电离层延迟格网产品仍有其自身局限性,本文利用北斗参考站和陆态网 GPS 观测站的观测数据,进行联合 BDS/GPS 观测的实时电离层延迟格网的建立及其相对 BDS、GPS 单系统格网产品的精度和优势分析,并利用北斗单频单点伪距定位进行精度验证。

## 1 广域差分实时电离层延迟改正格网计算原理与方法

GNSS 双频电离层延迟的计算详见文献<sup>[13-14]</sup>。

### 1.1 实时格网电离层解算策略

#### 1.1.1 格网点天顶方向电离层延迟解算策略

当格网点周围有效的穿刺点象限至少为 3 时,可进行解算;利用格网点周围有效穿刺点电离层延迟,按照穿刺点与格网点的球面几何距离反

比加权计算格网点的天顶方向电离层延迟,并根据  $K_{14}$  参数模型作为背景场,采用式(1)计算格网点天顶方向电离层延迟:

$$\text{IGP\_delay}_j = \frac{\sum_{i=1}^m W_i \cdot \text{IPP\_delay}_i \cdot \frac{\text{IGP\_Model}_j}{\text{IPP\_Model}_i}}{\sum_{i=1}^m W_i} \quad (1)$$

$$W_i = \frac{1}{d_{ij}}$$

$$d_{ij} = 6378.1 \cdot \arccos(\sin\varphi_j \sin\varphi_i + \cos\varphi_j \cos\varphi_i \cos(\lambda_j - \lambda_i))$$

式中,  $j$  为格网点编号,  $m$  为格网点周围的有效穿刺点个数,  $\text{IGP\_delay}_j$  为格网点处的电离层延迟,  $\text{IPP\_delay}_i$  为穿刺点处的电离层延迟,  $\text{IGP\_Model}_j$  为格网点处根据  $K_{14}$  参数计算得到的电离层延迟,  $\text{IPP\_Model}_i$  为穿刺点处根据  $K_{14}$  参数计算得到的电离层延迟,  $\varphi_i, \varphi_j$  分别为穿刺点和格网点的地理纬度,  $\lambda_i, \lambda_j$  分别为穿刺点和格网点的地理经度,  $d_{ij}$  为穿刺点与格网点之间的球面几何距离, 权值  $W_i$  取为距离的倒数。

### 1.1.2 格网电离层精度解算

解算出一组格网电离层天顶延迟后,采用式(2)评估各格网点的解算精度:

$$e_{\text{IPP}} = I_{\text{IPP}} - \hat{I}_{\text{IPP}}, \hat{e}_{\text{IGP}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n W_i (e_{\text{IPP}})^2}{\sum_{i=1}^n W_i}} \quad (2)$$

式中,  $I_{\text{IPP}}$  为穿刺点处的垂直电离层延迟,  $\hat{I}_{\text{IPP}}$  为根据该穿刺点所在格网的 4 个或 3 个格网点二元线性插值计算得到的该穿刺点处的电离层延迟估计值,  $e_{\text{IPP}}$  为  $I_{\text{IPP}}$  和  $\hat{I}_{\text{IPP}}$  的差值,  $\hat{e}_{\text{IGP}}$  为格网点电离层延迟的解算精度,  $W_i$  为权值(具体定义同式(1))。

### 1.1.3 异常数据剔除

经过 2 轮异常数据剔除:①解算出一组格网电离层  $\text{IGP\_Delay}$ (格网点处垂直电离层延迟)之后,将  $\text{IGP\_Delay}$  与穿刺点  $\text{VTEC}$  差值超过一定阈值(如 5 m 或 30  $\text{TECU}$ )的穿刺点剔除,再重新加权计算  $\text{IGP\_Delay}$ ,直到没有数据剔除;②格网电离层精度计算时,将  $e_{\text{IPP}}$  绝对值超过一定阈值(如 2 m 或 12  $\text{TECU}$ )的穿刺点剔除,计算格网电离层精度,根据剔除后的数据重新加权计算  $\text{IGP\_Delay}$ 。

## 1.2 实时电离层延迟格网 GIVE 解算策略

### 1.2.1 采用另一路数据计算 GIVE(电离层格网点垂直延迟误差)值

具体步骤如下:

首先,计算穿刺点处由观测数据计算的  $I_{\text{IPP}}$  与由格网数据计算的电离层延迟  $\hat{I}_{\text{IPP}}$  的差值:

$$e_{\text{IPP}} = I_{\text{IPP}} - \hat{I}_{\text{IPP}} \quad (3)$$

然后,统计该格网点周围 4 个格网内有效穿刺点的标准差:

$$\sigma = \text{std}(e_{\text{IPP}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (e_{\text{IPP}})^2}{m-1}} \quad (4)$$

$$E_{\text{IPP}} = |e_{\text{IPP}}| + k(p_r) \cdot \sigma$$

$$|e_{\text{IPP}}| + k(p_r) \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (e_{\text{IPP}})^2}{m-1}} \quad (5)$$

式中,  $k(p_r)$  为 99.9% 置信概率的分位数,其值为 3.290 5。

最后,计算格网点的 GIVE:

$$\text{GIVE} = E_{\text{IPP}} + \hat{e}_{\text{IGP}}$$

$$\hat{e}_{\text{IGP}} = \frac{\sum_{i=1}^m W_i |e_{\text{IPP}}|}{\sum_{i=1}^m W_i} \quad (6)$$

式中,  $\hat{e}_{\text{IGP}}$  为绝对误差;  $W_i$  为权值,取值见式(1)。

### 1.2.2 异常数据剔除

GIVE 计算时,将  $e_{\text{IPP}}$  绝对值超过一定阈值(如 2 m 或 12  $\text{TECU}$ )的穿刺点剔除,根据剔除后的数据重新加权计算 GIVE。

### 1.2.3 计算格网点 GIVEI 完好性等级信息

根据实时电离层延迟格网各个有效格网点 GIVE 值,按照表 1 给出对应格网点 GIVEI 完好性等级信息。当 GIVEI 值小于 14 时表示该格网点可用,格网点 GIVEI 为 15 时代表此格网点不可用。

表 1 电离层格网点 GIVEI 完好性信息等级划分

Tab. 1 The grading of ionospheric grid GIVEI integrity information

GIVE/m	GIVEI
$0 \leq \text{GIVE} \leq 0.3$	0
$0.3 < \text{GIVE} \leq 0.6$	1
$0.6 < \text{GIVE} \leq 0.9$	2
$0.9 < \text{GIVE} \leq 1.2$	3
$1.2 < \text{GIVE} \leq 1.5$	4
$1.5 < \text{GIVE} \leq 1.8$	5
$1.8 < \text{GIVE} \leq 2.1$	6
$2.1 < \text{GIVE} \leq 2.4$	7
$2.4 < \text{GIVE} \leq 2.7$	8
$2.7 < \text{GIVE} \leq 3.0$	9
$3.0 < \text{GIVE} \leq 3.6$	10
$3.6 < \text{GIVE} \leq 4.5$	11
$4.5 < \text{GIVE} \leq 6.0$	12
$6.0 < \text{GIVE} \leq 9.0$	13
$9.0 < \text{GIVE} \leq 14.0$	14
$\text{GIVE} > 14.0$	15

### 1.3 实时电离层延迟格网内外符合精度解算

若对于格网电离层的建立有 A、B 两路数据,将 A 路数据用于实时解算建立电离层格网以及对格网进行内符合精度评定,B 路数据则用来进行格网的外符合精度评定。待解算出一组格网电离层天顶延迟后,采用式(7)评估整个格网的内外符合精度:

$$e_{IPP} = I_{IPP} - \hat{I}_{IPP}, \text{RMS}_{in/out} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (e_{IPP})^2 / n} \quad (7)$$

式中,  $I_{IPP}$  为利用实测观测数据计算得到的扣除卫星和接收机 DCB 之后的穿刺点处垂直电离层延迟值,  $\hat{I}_{IPP}$  为根据该穿刺点所在格网的 4 个或 3 个格网点二元线性插值得到的该穿刺点处垂直电离层延迟值<sup>[13]</sup>,  $e_{IPP}$  为二者的差值,  $\text{RMS}_{in/out}$  为格网内或外符合精度,  $n$  为所有参与符合精度计算的穿刺点个数。

## 2 北斗广域差分实时电离层延迟格网改正的精度和可靠性分析

### 2.1 实验数据概况

实验数据来自 31 个分布于中国区域的北斗参考站(图 1 中圆点)以及 26 个来自中国地壳运动观测网络 CMONOC 的 GPS 观测站(图 1 中三角点)。可以看出,这些北斗参考站与 GPS 观测站在地理位置上的整体分布相差不大。北斗参考站观测数据具有  $B_1$ 、 $B_2$  频点的伪距观测值以及相位观测值,GPS 观测站数据类型为  $C_1$ 、 $P_2$ 、 $L_1$ 、 $L_2$ 。本节对 2016-08-01 上述北斗和 GPS 观测站的数据进行实时处理,截止高度角设为  $15^\circ$ ,广域差分实时电离层延迟格网的滑动窗口为 3 min,全天共计 480 个格网,电离层单层模型高度为 375 km,实时电离层格网点延迟信息的播发单位均基于北斗  $B_1$  频点。电离层格网区域定义为  $70^\circ \sim 140^\circ \text{E}$ 、 $7.5^\circ \sim 55^\circ \text{N}$ ,按纬度间隔  $2.5^\circ$ 、经度间隔  $5^\circ$  划分 320 个格网点。图 2 中十字点为图 1 中的 26 个 GPS 观测站在某历元时刻所形成的穿刺点分布,圆点为图 1 中 31 个 BDS 参考站在某历元时刻所形成的穿刺点分布。

### 2.2 基于 BDS 观测的电离层延迟格网的实时建立及精度分析

利用图 1 中 31 个北斗参考站 2016-08-01 的观测数据,进行基于 BDS 观测的广域差分实时电离层延迟格网的实时建立及内符合精度的实时计算,并利用图 1 中 26 个 GPS 观测站同一天的观

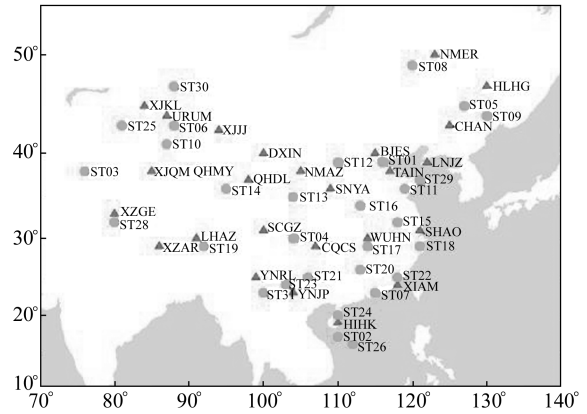


图 1 所选测站分布

Fig. 1 Distribution of station of A/B road

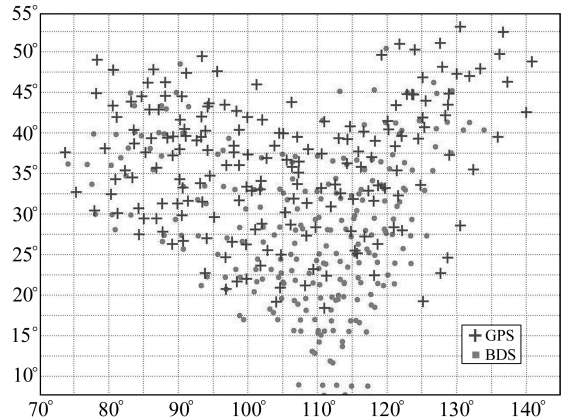


图 2 某历元时刻的穿刺点分布

Fig. 2 The IPP distribution of the data of A road at one epoch

测数据进行外符合精度的实时计算。

图 3(a)为根据式(1)计算的 2016-08-01 BDT 08:00 左右第 144 个 BDS 格网基于北斗  $B_1$  频点的格网点电离层延迟信息,图 3(b)为根据式(2)计算的对应于图 3(a)中各个格网点电离层延迟值的解算精度,图 3(c)为根据式(6)及表 1 计算得到的对应于图 3(a)中各个格网点电离层延迟值的完好性信息 GIVEI 值。从图 3(a)可以看出,在 BDT 08:00 位于中低纬度上的电离层延迟值明显高于高纬度地区;从图 3(b)、3(c)可以看出,在高纬度地区的格网点延迟解算精度和格网点 GIVEI 值明显优于中低纬度,其主要原因应该是在当地时间下午时分高纬度的阳光照射强度要比中低纬度弱得多,这样直接造成中低纬度的电离层延迟值要比高纬度大得多,而且由于赤道异常等现象的存在,使处于低纬区域的电离层变化更加频繁和复杂。

图 4 为根据式(7)计算的全天所有实时 BDS 格网内、外符合精度的时间序列。从图 4 能够发现,在地方时上午和晚上这 2 段时间内,实时 BDS 格网的内符合精度绝大部分优于 0.3 m,外

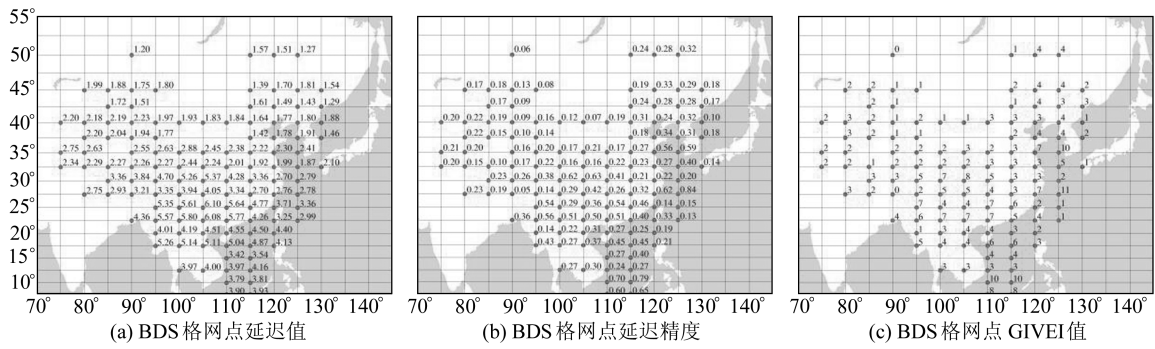


图3 2016-08-01第144个BDS电离层格网的格网点延迟信息

Fig. 3 The 144th BDS ionospheric grid delay information on August 1, 2016

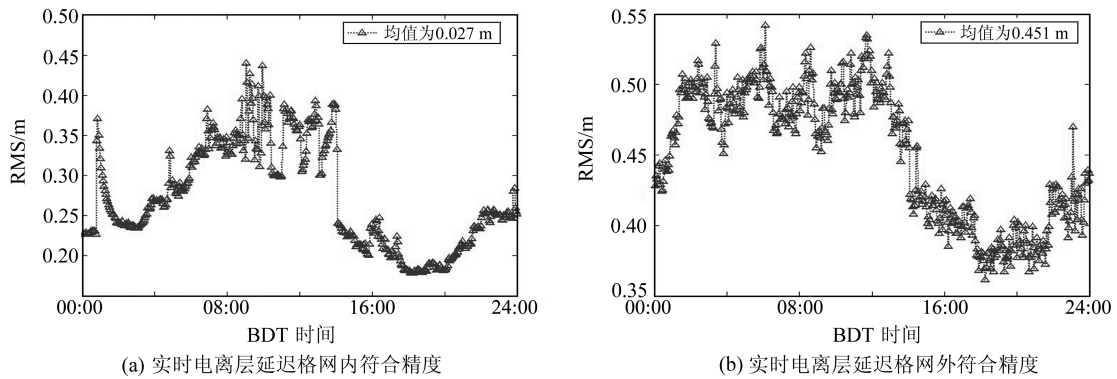


图4 2016-08-01全天所有实时BDS电离层延迟格网内符合精度和外符合精度的时间序列

Fig. 4 The inner precision and the outer precision of all real-time BDS ionospheric delay grids on August 1, 2016

符合精度在0.4 m左右;午后BDS格网的内外符合精度明显变差,内符合精度在0.3~0.45 m波动,外符合精度在0.4~0.55 m间;其全天所有实时BDS格网的内符合精度的平均值为0.272 m,外符合精度的平均值为0.451 m。

### 2.3 基于BDS/GPS观测的电离层延迟格网的实时建立及精度与优势分析

利用2016-08-01图2中的26个GPS站数据进行实时电离层延迟格网的建立,并将其与前述BDS格网进行分析比较,利用图1中31个北斗参考站和26个GPS站2016-08-01的观测数据进行联合BDS/GPS观测的电离层延迟格网的实时建立及精度与优势分析。

图5为2016-08-01BDT 08:00左右第144

个GPS电离层格网的格网点电离层延迟信息。可以看出,GPS格网相较图3中BDS格网在北部边境地区的有效格网点覆盖范围有较大改善,但还是不能完全覆盖,且其在东海和南海区域不如BDS格网的有效格网点覆盖效果好。

图6为2016-08-01BDT 08:00左右第144个BDS/GPS电离层格网的格网点延迟信息。可以看出,BDS/GPS格网的有效格网点基本覆盖了所有的边境地区,弥补了BDS或GPS单系统格网在中国部分边境地区覆盖不足的缺陷。

表2为对2016-08-01第144个BDS、GPS和BDS/GPS格网有效格网点的解算精度的统计结果。可以看出,GPS/BDS格网的有效格网点总数相比单系统明显增多,而且从解算精度统计来看,

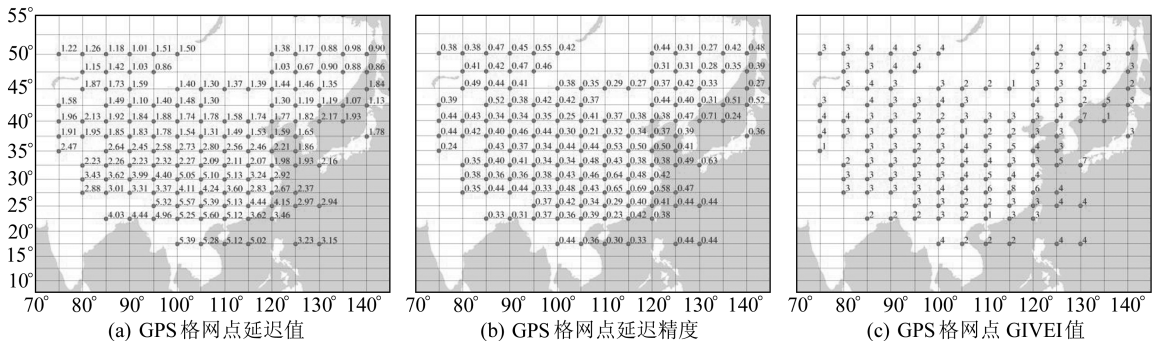


图5 2016-08-01第144个GPS电离层格网的格网点延迟信息

Fig. 5 The 144th GPS ionospheric grid delay information on August 1, 2016

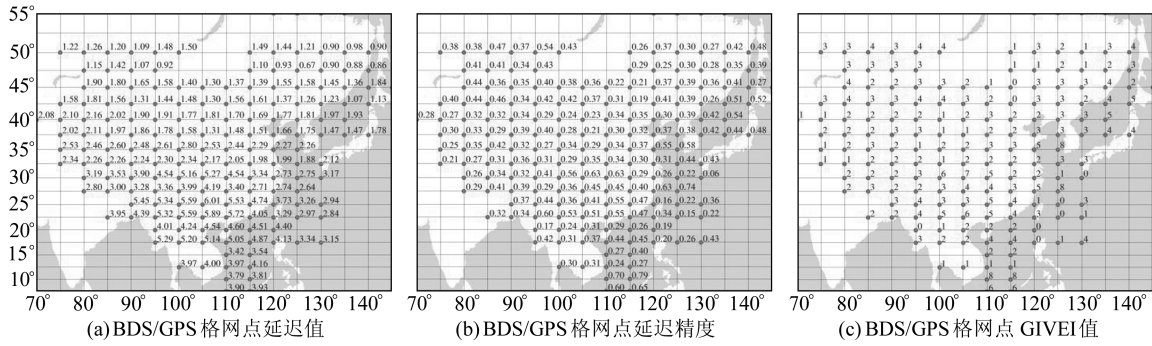


图 6 2016-08-01 的第 144 个 BDS/GPS 电离层格网的格网点延迟信息  
Fig. 6 The 144th BDS/GPS ionospheric grid delay information on August 1, 2016

在所有 169 个有效格网点中,解算精度小于 0.5 m 的格网点为 152, 占总数的比例为 89.35%, 完全满足  $1\sigma$  条件下解算精度优于 0.5 m 的常用实时电离层延迟格网精度指标。

表 2 2016-08-01 第 144 个格网不同方案解算的有效格网点个数统计

Tab. 2 The effective point number of the 144th grid for calculating different scheme on August 1, 2016

格网类型	各精度范围内的有效格网点数			总数
	$\hat{\epsilon}_{IGP} < 0.5\text{ m}$	$0.5\text{ m} \leq \hat{\epsilon}_{IGP} \leq 1\text{ m}$	$\hat{\epsilon}_{IGP} > 1\text{ m}$	
BDS 格网	98	17	0	116
GPS 格网	121	12	0	133
GPS/BDS 格网	151	18	0	169

图 7 为 2016-08-01 BDS、GPS 以及 BDS/GPS 全天所有实时电离层延迟格网的有效格网点数对比图。可以看出,虽然 BDS 参考站和 GPS 观测站的个数及地理分布基本相同,但是由于北斗系统现阶段卫星尚不充分,以至于同一时间 BDS 格网的有效格网点数相较于 GPS 格网点要少,而且在夜间 BDT 时 15:00~22:00 BDS 格网的有效格网点个数呈现减少趋势,这可能是由于该时段内北斗可见卫星减少造成的; BDS/GPS 格网的有效格网点数相比 BDS 格网的有效格网点数大大增加,整体平均增加约 40 个。

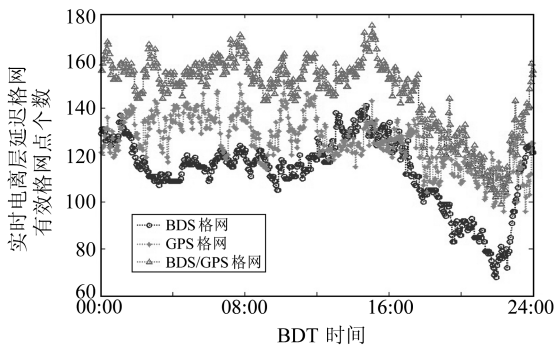


图 7 2016-08-01 BDS、GPS 和 BDS/GPS 全天所有实时电离层延迟格网的有效格网点数对比  
Fig. 7 The effective point number of BDS, GPS, BDS/GPS real-time ionospheric delay grids on August 1, 2016

表 3 给出了 2016-08-01 图 1 中 3 个位于西北和东北部边境地区的 ST08、ST09、ST30 以及 2 个位于中国中东部地区的 ST13、ST17 北斗参考站根据单点单频定位计算得到的位置误差 RMS 以及全天可解算的历元个数,观测数据采样间隔为 30 s,全天共 2 880 个历元。除了电离层延迟改正不同之外,单点单频定位计算时其他误差改正均相同,且在利用实时电离层延迟格网进行定位时,若是某历元某颗卫星至测站的信号传播方向与电离层形成的穿刺点所在格网的有效格网点数少于 3 个,则该历元这个卫星不参加定位计算;如果最后可以参加解算的卫星个数少于 4 个,则该历元不进行定位解算。

图 8、图 9、图 10 分别给出了位于中国东北边境地区的 ST09、西北边境地区的 ST30 以及中东部地区的 ST13 北斗参考站采用 GPS 格网、BDS 格网和 BDS/GPS 格网改正电离层延迟的  $B_1$  频单频伪距单点定位的结果。

由表 3 可以看出,ST09、ST30 和 ST08 站采用 GPS 格网的定位结果优于 BDS 格网,这是因为 GPS 格网在这 3 个测站所处的中国西北和东北边境地区的有效格网点的覆盖效果要略优于 BDS 格网。还可以看出,相比于 BDS 网格,采用 BDS/GPS 格网进行电离层改正的单频伪距定位,使位于偏远边境地区的 ST08、ST09、ST30 三个站的位置误差改善了 0.6~2.8 m,而且 3 个站的全天可定位解算历元数增加了 432~858 个;相比 GPS 格网,BSD/GPS 网格使 ST08、ST09、ST30 三个站的位置误差改善了 0.4~0.9 m,全天可定位解算历元数增加了 391~701 个。而位于境内中东部地区的 ST13、ST17 两个测站,采用 BDS 与 GPS 实时电离层延迟格网的定位效果相当;采用 BDS/GPS 格网相比采用 BDS、GPS 单系统格网的单频伪距定位结果的位置误差略微改善,全天可定位解算的历元个数基本相当。从图 8、图 9 中

表3 2016-08-01 各测站采用 BDS、GPS 和 BDS/GPS 格网的单频定位结果

Tab. 3 The results of single frequency positioning using BDS, GPS, BDS/GPS grids on August 1, 2016

测站编号	BDS 格网		GPS 格网		BDS/GPS 格网	
	位置误差 RMS/m	解算历元个数	位置误差 RMS/m	解算历元个数	位置误差 RMS/m	解算历元个数
ST09	4.218	1 727	4.055	1 827	3.463	2 397
ST30	8.942	714	6.928	1 181	6.038	1 572
ST08	4.384	2 006	4.077	1 731	3.689	2 438
ST13	2.686	2 807	2.666	2 753	2.639	2 807
ST17	1.675	2 802	1.698	2 745	1.635	2 802

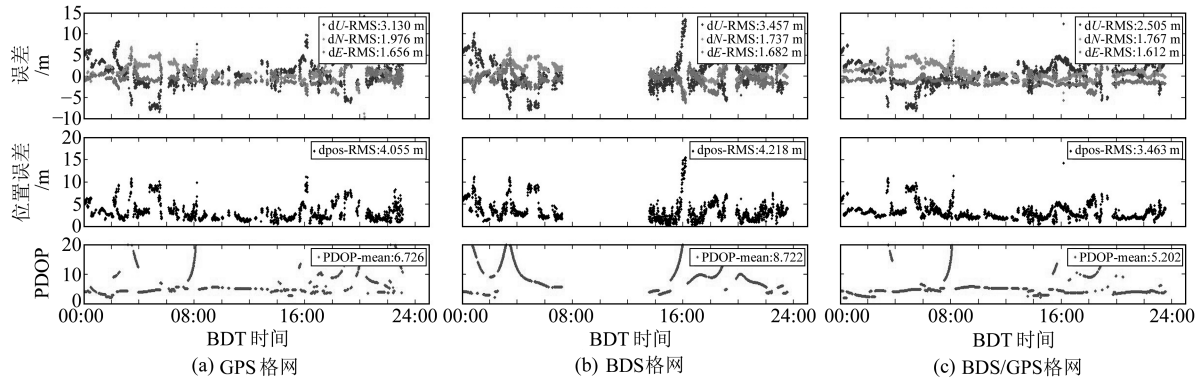


图8 2016-08-01 ST09 站分别采用 BDS、GPS 和 BDS/GPS 格网的单频定位结果

Fig. 8 The single frequency positioning results of ST09 station using BDS, GPS and BDS/GPS grids on August 1, 2016

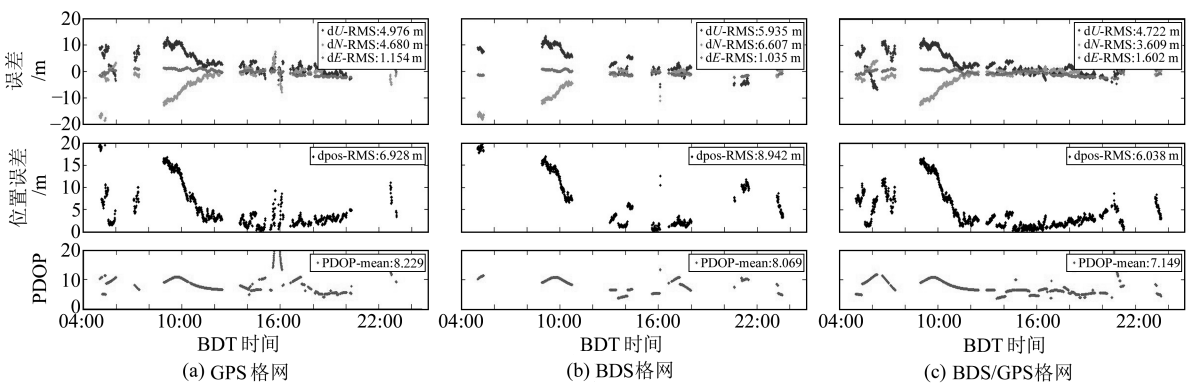


图9 2016-08-01 ST30 站分别采用 GPS、BDS 和 BDS/GPS 格网的单频定位结果

Fig. 9 The single frequency positioning results of ST30 station using BDS, GPS and BDS/GPS grids on August 1, 2016

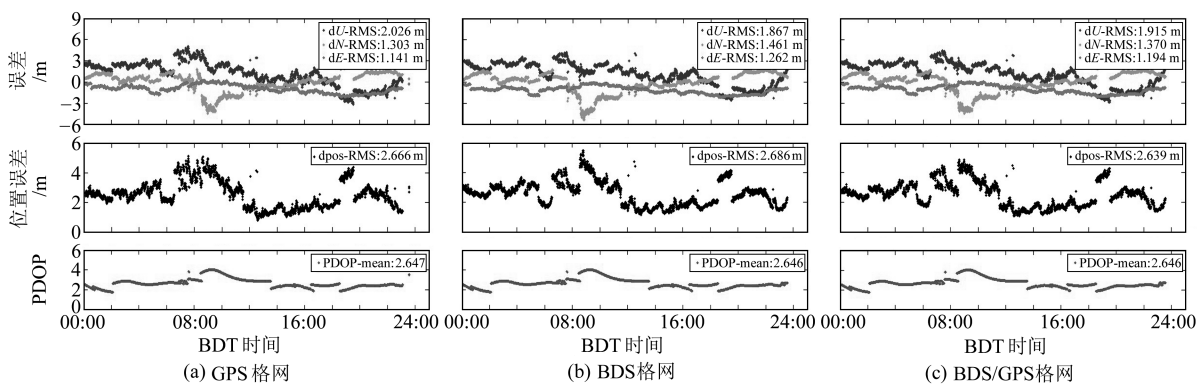


图10 2016-08-01 ST13 站分别采用 GPS、BDS 和 BDS/GPS 格网的单频定位结果

Fig. 10 The single frequency positioning results of ST13 station using BDS, GPS and BDS/GPS grids on August 1, 2016

ST09 和 ST30 站的定位结果可以看出,相比于 BDS 格网,BDS/GPS 格网可以大大改善由于北斗系统现阶段在轨卫星数目尚不充分造成的全国

境内部分偏远地区(西部及北部边境地区)的覆盖效果不足以满足稳定的格网点解算与预报的缺陷,使这一区域的单频用户可以获得精度更高、更

稳定的定位结果以及全天更多可定位解算历元数。从图 10 可以看出,相比于 GPS 或 BDS 单系统格网,BDS/GPS 格网在中国中东部覆盖地区的单频定位效果进一步增强,虽改善不大,但双系统具有更多实时数据,能够使格网稳定性进一步得到保证。

综上所述,在有效格网点覆盖充足的区域,BDS 与 GPS 的实时电离层延迟格网定位效果相当;而 BDS/GPS 实时电离层延迟格网极大提高了偏远地区的单频定位精度与可定位历元数,也使原本单系统格网覆盖充足的地区定位效果得到进一步增强和稳定。

### 2.4 BDS/GPS 实时电离层格网与其他几种模型的定位结果分析比较

表 4(单位 m)给出了 2016-08-01 ST01、ST12、ST16 站以及 IGS 九峰站(JFNG)  $B_1$  频点单频伪距单点定位计算得到的位置误差 RMS,除了电离层延迟改正不同之外,定位计算时其他误差改正均相同。可以看出,采用 BDS/GPS 实时电离层延迟格网相比于采用  $K_{14}$  参数的单频伪距定位结果,4 个站的位置误差改善 1.8~3.5 m;相比于采用 CODE GIM 全球电离层格网的单频

伪距定位结果,4 个站的位置误差改善 0.3~1.6 m;同时,4 个站的位置误差均优于双频伪距定位结果。

表 4 2016-08-01 各站三维位置误差 RMS  
Tab. 4 The three station position error RMS on August 1, 2016

测站	$K_{14}$ 模型	CODE GIM	BDS/GPS 格网	双频
ST01	3.577	2.125	1.756	2.028
ST12	5.283	2.622	2.314	3.383
ST16	4.047	2.516	1.861	2.032
JFNG	6.245	4.431	2.745	4.228

图 11 给出了 JFNG 站分别采用电离层  $K_{14}$  参数模型、BDS/GPS 实时电离层延迟格网和 CODE GIM 全球 VTEC 格网的单频伪距定位以及利用双频消电离层组合的双频伪距定位结果。可以看出,JFNG 站采用  $K_{14}$  参数模型和 CODE GIM 格网的单频伪距定位结果的位置误差 RMS 在 BDT 06:00~09:00(北京时 14:00~17:00)均存在明显的峰值变化段,在 BDT 08:00 左右达到峰值,两边递减;而采用 BDS/GPS 实时格网的定位结果在同时段内则不存在明显的峰值变化段,且 RMS 值比前两者小。采用  $K_{14}$  参数模型没有采用 BDS/GPS 实时格网的单频伪距定位精度

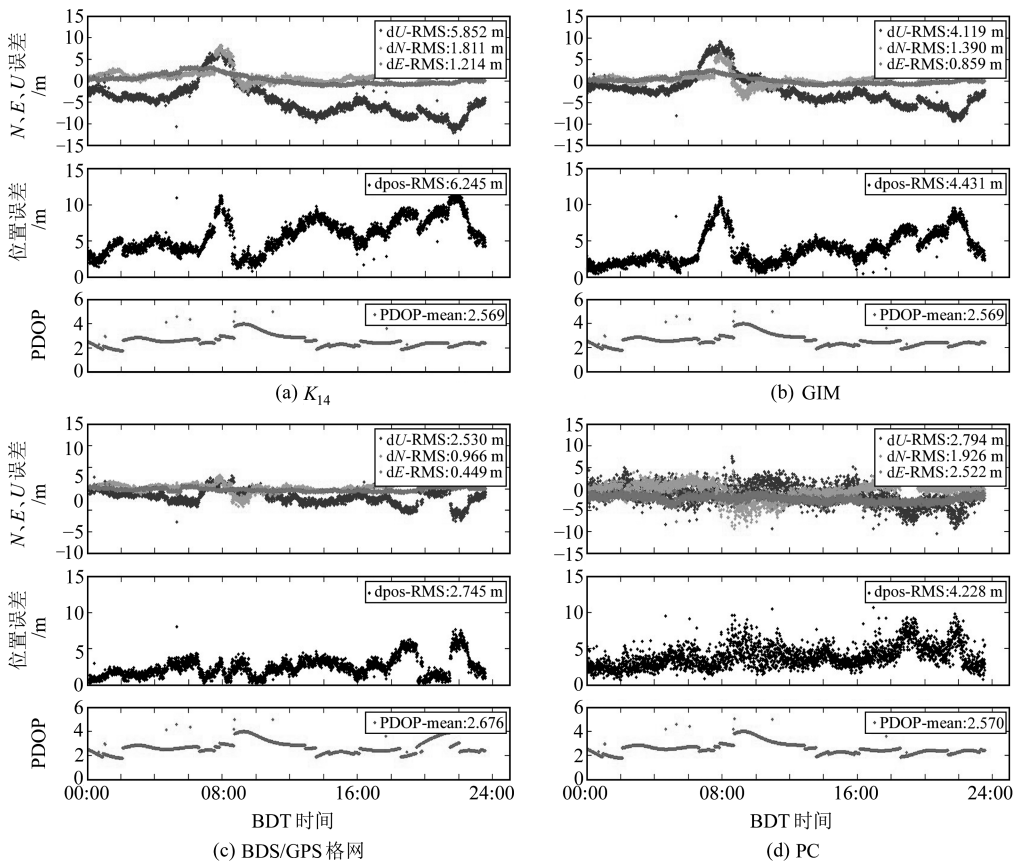


图 11 2016-08-01 JFNG 站采用不同改正电离层延迟方法的单频/双频伪距定位结果

Fig. 11 The positioning results of JFNG station using different ionospheric correction delay methods on August 1, 2016

高,这可能是由于模型自身参数设定的限制所致;而采用 BDS/GPS 实时格网优于 CODE GIM 格网的单频伪距定位结果,这说明对于中国区域而言,由于位于中国境内的 IGS 站数量较少,以至于 CODE 分析中心利用全球分布的 IGS 站观测数据采用基于球谐函数的全球电离层建模生成的全天每小时一组  $5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  的 CDOE GIM 全球 VTEC 格网,不如本章采用的基于大量在中国境内分布均匀的 BDS 和 GPS 参考站实时观测数据每隔 3 min 生成的  $5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  实时电离层延迟格网能更好地反映电离层电子含量的局部实时变化。从图 11 可以看出,在 1 d 中,相比于单频定位结果,双频消电离层组合的定位结果整体平稳,不存在峰值段,但噪声较大,这是因为双频(PC)组合后能够消除绝大部分电离层影响,但是观测噪声、多路径效应等误差被放大为原来的 3 倍多,这也是双频定位结果较采用 BDS/GPS 实时格网单频定位结果差的原因。

### 3 结 语

本文研究实现了中国区域北斗广域差分实时电离层延迟格网改正算法,并针对 BDS 和 GPS 单系统实时建立电离层延迟格网的不足,提出联合 BDS/GPS 的北斗广域差分实时电离层延迟改正方法。对基于 BDS 观测、GPS 观测和联合 BDS/GPS 观测的实时电离层延迟格网进行比较分析结果表明,从有效格网点覆盖情况及个数来看,BDS/GPS 格网的有效格网点基本覆盖了所有的边境地区,弥补了 BDS 或 GPS 单系统格网在中国部分边境地区覆盖不足的缺陷,其中,BDS/GPS 格网与 BDS 格网相比,全天所有格网平均增加约 40 个有效格网点;从定位结果来看,在有效格网点覆盖充足的地区,BDS 与 GPS 格网的定位效果相当,而 BDS/GPS 格网极大提高了偏远地区的单频定位精度与可定位历元数,也使原本单系统格网覆盖充足地区的定位效果得到进一步增强和稳定。将 BDS/GPS 实时电离层格网定位结果与其他几种电离层模型进行比较,相比于  $K_{14}$  参数的定位结果,4 个站的位置误差改善 1.8~3.5 m;相比于 CODE GIM 全球电离层格网的定位结果,4 个站的位置误差改善 0.3~1.6 m;4 个站位置误差均优于双频结果。

### 参考文献

- [1] Beutler E. Rapid Static Positioning Based on the Fast Ambiguity Resolution Approach FARA: Theory and First Results[J]. *Manuscripta Geodaeica*, 1990, 15(6):325-356
- [2] 刘经南,陈俊勇,张燕平,等. 广域差分 GPS 原理和方法[M]. 北京:测绘出版社,1999(Liu Jingnan, Chen Junyong, Zhang Yanping, et al. *Wide Area Differential GPS Principles and Methods* [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1999)
- [3] El-Arini M B, Conker R S, Albertson T W, et al. Comparison of Real-Time Ionospheric Algorithms for a GPS Wide-Area Augmentation System (WAAS)[J]. *Navigation*, 1994, 41(4):393-414
- [4] Prasad N, Sarma A D. Ionospheric Time Delay Estimation Using IDW Grid Model for GAGAN[J]. *J Indian Geophys Union*, 2004, 8(4):319-327
- [5] Arbesser-Rastburg B. Ionospheric Corrections for Satellite Navigation Using EGNOS[C]. XXVII URSI General Assembly, Maastricht, 2002
- [6] Rao K N S. GAGAN -The Indian Satellite Based Augmentation System[J]. *Indian Journal of Radio & Space Physics*, 2007, 36:293-302
- [7] 王永澄,黄建宇,周其焕. GPS 广域增强系统的电离层延迟网格校正法[J]. *通信学报*, 1998(12):38-41(Wang Yongcheng, Huang Jianyu, Zhou Qihuan. Grid Correction Method of Ionospheric Delay for GPS Wide Area Augmentation System [J]. *Journal of Communications*, 1998(12):38-41)
- [8] 黄智,袁洪,万卫星. WAAS 电离层网格改正算法在中国地区部分站点的试算精度[J]. *全球定位系统*, 2003, 28(6):5-10(Huang Zhi, Yuan Hong, Wan Weixing. The WAAS Ionospheric Grid Correction Algorithm in the China Region Part of the Site's Trial Accuracy[J]. *Global Positioning System*, 2003, 28(6):5-10)
- [9] 王刚,魏子卿. 格网电离层延迟模型的建立方法与试算结果[J]. *测绘通报*, 2000(9):1-2(Wang Gang, Wei Ziqing. Establishment Method and Calculation Results of Grid Ionospheric Delay Model [J]. *Surveying and Mapping Bulletin*, 2000(9):1-2)
- [10] 周善石. 简化广域差分 GPS 系统在中国区域的建立与试算[D]. 上海:同济大学,2007(Zhou Shanshi. *Simplified Wide Area Differential GPS System in the Establishment of Regional Trial and Chinese* [D]. Shanghai: Tongji University, 2007)
- [11] 窦长江. 北斗一号民用现状与发展[C]. 中国全球定位系统技术应用协会第八次年会,2005(Dou Changjiang. *Beidou No. 1 Civil Status and Development* [C]. 8th China Global Positioning System Technology Application Association Meeting, 2005)
- [12] 曹月玲. Beidou 区域导航系统广域差分及完好性监测研究[D]. 上海:中国科学院大学,2014(Cao Yueling. *Research on Wide Area Difference and Integrity Monitoring of Beidou Regional Navigation System* [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2014)
- [13] 房成贺,陈俊平,兰孝奇,等. 综合伪距相位观测的实时电离层延迟格网改正算法研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2018(10):1 011-1 015(Fang Chenghe, Chen Junping, Lan Xiaoqi, et al. Research of Real-Time Ionospheric Delay Grid Correction Algorithm Based on Pseudo-Range and Phase Observation[J]. *Journal of Geodesy and Geodynam-*



ics, 2018(10):1011-1015)

[14] 詹先龙, 刘瑞华, 杨兆宁. 北斗系统格网电离层延迟算法研究[J]. 航天控制, 2012, 30(1):15-19 (Zhan Xianlong,

Liu Ruihua, Yang Zhaoning. The Algorithm of Beidou System Grid Ionospheric Delay[J]. Aerospace Control, 2012, 30(1): 15-19)

## Research on Beidou Wide Area Real-Time Differential Ionospheric Delay Grid Correction Based on BDS/GPS Observations

FANG Chenghe<sup>1,2</sup> CHEN Junping<sup>3</sup> LAN Xiaoqi<sup>4</sup> ZHANG Lei<sup>5</sup>

1 GNSS System Engineering Center, China Academy of Aerospace Electronics Technology, Beijing 100094, China

2 Test and Assessment Research Center, China Satellite Navigation Office, Beijing 100094, China

3 Shanghai Astronomical Observatory, CAS, 80 Nandan Road, Shanghai 200030, China

4 School of Earth Science and Engineering, Hohai University, 1 Xikang Road, Nanjing 211100, China

5 Nanjing Technical Vocational College, 58 Huangshan Road, Nanjing 210019, China

**Abstract:** This paper studies the realization of the Beidou wide-area differential real-time ionospheric delay grid correction algorithm in China, and the short-term establishment of the ionospheric delay grid for the Beidou system. Results of BDS-only, GPS-only, and BDS/GPS combined ionospheric delay grid corrections are analyzed and compared. Results show that BDS-only and GPS-only ionospheric delay grid corrections performance are equivalent in the region, with sufficient effective grid point coverage, and the BDS/GPS combined ionospheric delay grid corrections have higher accuracy and improve the positioning accuracy of single frequency user.

**Key words:** BDS/GPS; real-time; wide area differential; ionospheric delay; grid corrections

**About the first author:** FANG Chenghe, postgraduate, majors in the processing of GNSS observation data, E-mail: 534871372@qq.com.

(上接第 116 页)

## GNSS Monitoring Dynamic Variation Characteristics of Crustal Deformation in the Sichuan-Yunnan Region

DANG Yamin<sup>1</sup> YANG Qiang<sup>1</sup> XUE Shuqiang<sup>1</sup> YUE Caiya<sup>2</sup> LIU Zongqiang<sup>3</sup>

1 Chinese Academy of Surveying & Mapping, 28 West-Lianhuachi Road, Beijing 100830, China

2 China University of Mining & Technology, Beijing, D11 Xueyuan Road, Beijing 100083, China

3 College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, 579 Qianwangang Road, Qingdao 266590, China

**Abstract:** We study crustal dynamic deformation in the Sichuan-Yunnan region based on 1999-2015 GNSS data of CMONOC and Sichuan province CORS network. We divide into six periods of 1999—2004, 2004—2007, 2007—2009, 2009—2011, 2011—2013 and 2013—2015, establish three crustal deformation models respectively, and conduct the contrast analysis. The research shows that the crustal horizontal movement is mainly inherited movement in Sichuan-Yunnan region. The crustal movement trend and the acting force are not changed by the Wenchuan earthquake, but the velocity field variations are more complex with time and increase in magnitude. Especially on the west side of the Longmenshan fault, crustal movement velocity increases obviously after the Wenchuan earthquake. The strain rate and state show obvious dynamic characteristics with time, and the high value areas are mainly located around the deep faults such as the Longmenshan, Xianshuihe and Xiaojiang faults. It shows that the fracture activity has a significant influence on crustal deformation control in the Sichuan-Yunnan region.

**Key words:** Sichuan-Yunnan region; GNSS velocity field; crustal deformation; strain rate; dynamic variation

**Foundation support:** National Natural Science Foundation of China, No. 41474011.

**About the first author:** DANG Yamin, PhD, researcher, PhD supervisor, majors in geodetic datum and geodynamics, E-mail: dangym@casm.ac.cn.

**Corresponding author:** YANG Qiang, PhD, associate professor, majors in geodetic data processing and geodynamics, E-mail: yangqiang@casm.ac.cn.