

# GPS 和 GLONASS 组合的全球 实测电离层 TEC 建模

谢益炳<sup>1,2</sup> 伍吉仓<sup>1,3</sup> 陈俊平<sup>2</sup> 刘伟洲<sup>1</sup>

1. 同济大学测绘与地理信息学院,上海,200092

2. 中国科学院上海天文台,上海,200030

3. 现代工程测量国家测绘地理信息局重点实验室,上海,200092

**摘要:**根据高精度卫星导航和电离层活动监测的需要,利用全球 238 个 GPS 基准站的双频实测数据,通过建立球谐函数模型的同时解算电离层电子含量以及 GPS 与 GLONASS 卫星 DCB 及其相应的接收机 DCB;将其结果与 CODE、IGS 分析中心的结果进行比较分析,表明该方法建立的模型是可靠的,其 GPS 和 GLONASS 卫星 DCB 相对于 CODE 精度优于 0.1 ns,相对于 IGS 精度优于 0.2 ns,其 GPS 测站 DCB 和 GLONASS 测站 DCB 相对于 CODE 和 IGS 精度优于 1 ns,垂直总电子含量相对 CODE 和 IGS 精度优于 3 TECU,组合结果精度高于组合前。

**关键词:**GPS;GLONASS;垂直电子含量;电离层;球谐函数

**中图法分类号:**P228.42

**文献标志码:**A

电离层对无线电波的传播有显著的影响,其引起的电离层时延是影响 GPS 测量、导航、定位与定轨精度的主要误差源之一。电离层引起的距离误差在白天一般可达 15 m,夜晚可达 3 m;天顶方向最大可达 50 m,水平方向最大可达 150 m,对于导航定位而言,这种误差是不能忽视的<sup>[1]</sup>。自 20 世纪 90 年代以来,随着 GPS 技术的发展和测站的广泛分布,GPS 已然成为全天候、连续、高精度监测电离层的有力工具,成为监测全球电离层变化和活动的一种手段<sup>[2]</sup>。

目前,解决电离层延迟误差的方法一般有双频改正法、差分 GPS 定位法、半和改正法和电离层模型法<sup>[3]</sup>等。目前普遍应用的电离层延迟改正模型是 GPS 广播星历文件中的 Klobuchar 模型,但其仅能改正 50%左右<sup>[4]</sup>;而 IGS 各分析中心采用不同的模型来描述电离层 TEC 的分布,如 CODE 采用球谐函数展开,JPL 则是在单层电离层球壳上用一个统一的三角格网来描述,ESA 采用一个非线性的高斯型电离层指数模型等。国内外这方面的研究主要包括:蔡昌盛等利用 GPS 载波相位观测值建立区域电离层模型<sup>[5]</sup>;袁运斌仅

利用 GPS 资料确定全球电离层 TEC<sup>[6]</sup>;张小红、章红平等利用 GPS 双频数据建立区域电离层模型<sup>[7-8]</sup>;William Rideout 和 Afraimovich 同样仅对利用 GPS 确定全球 TEC 进行研究<sup>[9-10]</sup>;Denise Dettmering 利用地基和空间 GPS 数据、测高数据和 VLBI 数据来组合研究电离层 TEC<sup>[11]</sup>。这些研究对于全球实测电离层模型的研究较少,特别是对于组合不同卫星系统则更少。基于此,本文利用全球 238 个 GPS 基准站的双频实测数据研究 GPS 和 GLONASS 组合观测确定全球电离层模型,并分析不同年份的计算结果,实验结果表明,组合解精度优于 GPS 单系统解算精度。

## 1 利用 GPS/GLONASS 建立电离层 TEC 模型

利用载波相位平滑伪距观测量形成电离层残差组合(GF)<sup>[12]</sup>:

$$\tilde{P}_4 = - \left( \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) F(\varepsilon) \cdot I_r + c \cdot \Delta b^s + c \cdot \Delta b_r \quad (1)$$

收稿日期:2013-05-07

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41174024,11273046,40974018);国家 863 计划资助项目(2013AA122402);上海市科学技术委员会资助项目(12DZ2273300);中科院百人计划资助项目。

第一作者:谢益炳,硕士生,主要研究方向为 GNSS 数据处理和 GNSS 电离层模型。E-mail:xiyibingai@163.com

式中,  $c$  为光速;  $f_1, f_2$  分别为卫星载波 1、2 上的频率;  $\Delta b^s$  是卫星系统硬件延迟 (differential code bias, DCB);  $\Delta b_r$  是接收机 DCB;  $I_r$  是接收机垂直方向的电离层延迟, 其值与频率和总电子含量有关, 因此当引用 GLONASS 数据时, 要考虑不同卫星的频率影响;  $F(z)$  是电离层投影函数, 其计算公式为:

$$F(Z) = \frac{1}{\cos Z'}, \sin Z' = \frac{R}{R+H} \sin(\alpha Z) \quad (2)$$

单层高度  $H$  取 450 km;  $\alpha$  为 0.978 2;  $R$  为 6 387;  $z$  为卫星的天顶距。

采用球谐函数模型对全球电离层垂直 TEC 进行建模, 其勒让德多项式展开式为:

$$\text{VTEC}(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin\beta) (a_{nm} \cos ms + b_{nm} \sin ms) \quad (3)$$

式中,  $\text{VTEC}(\beta, s)$  为垂直总电子含量 (Vertical Total Electron Content);  $n_{\max}$  为二维泰勒级数展开纬度方向的最大阶数。为与 CODE 等分析中心进行比较, 本文取 15 阶展开;  $\beta$  表示穿刺点的地理纬度或地磁纬度;  $s$  为日固系中穿刺点经度, 与地方时有关:

$$s = \lambda - \lambda_0 \approx \text{UT} + \lambda - \pi \quad (4)$$

式中,  $\text{UT}$  为世界时;  $\lambda$  为穿刺点对应的地理经度;  $\lambda_0$  是太阳的经度;  $\tilde{P}_{nm}$  为  $n$  阶  $m$  次归一化缔合勒让德函数,  $\tilde{P}_{nm} = \Lambda(n, m) P_{nm}$ , 正则化函数  $\Lambda$  定义为:

$$\Lambda(n, m) = \sqrt{\frac{(n-m)! (2n+1)(2-\delta_{0m})}{(n+m)!}} \quad (5)$$

式中,  $\delta_{0m}$  表示克罗内克函数;  $a_{nm}$  和  $b_{nm}$  为待估模型参数。

将式(3)代入式(1), 最终形成观测方程:

$$\tilde{P}_4 = -\frac{40.3}{f_1^2} \left( \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) F(z) \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm} \cdot \sin\beta (a_{nm} \cos ms + b_{nm} \sin ms) + c \cdot \Delta b^s + c \cdot \Delta b_r \quad (6)$$

式(6)即为最终解算方程, 这里假定 DCB 每 1 d 解算一次, 而模型参数  $a_{nm}$  和  $b_{nm}$  每 2 h 解算一组, 卫星高度角设置为  $15^\circ$ , 而 GPS 和 GLONASS 伪距观测值的权定位  $5 : 1^{[13]}$ 。对于任意时刻某穿刺点的电离层 VTEC 的求解, 可以采用分段线性的方法, 内插得到该时刻的球谐系数, 从而计算总电子含量。在求解过程中, 由于卫星和接收机 DCB 系数一样, 会导致方程秩亏, 因此分别加入 GPS 卫星与 GLONASS 卫星 DCB 和均为零两个约束条件。

## 2 计算结果分析

本文采用 2012 年 6 月 28 日全球分布的 238 个 IGS 测站观测数据进行建模, 测站分布图如图 1 所示, 基本上实现了全球覆盖。从图 1 中可以看出, 海洋、非洲北部以及赤道附近海洋区域的测站空间分辨率较差, 特别是南半球的海洋区域。

根据上述球谐模型解算得到的 DCB 值与 CODE 和 IGS 发布的卫星及测站 DCB 的比较

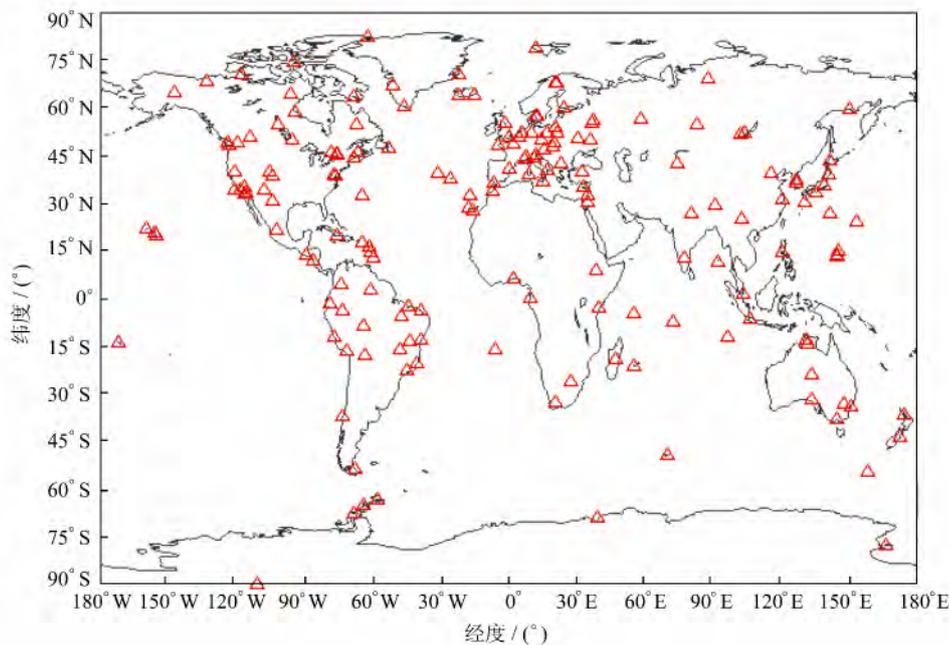


图 1 测站分布图

Fig. 1 Station Distribution Map

见图2~7。由图2可以看出,本文解算得到的GPS卫星DCB与CODE吻合较好,差值在±0.2 ns以内,其RMS为0.05 ns;而相对于IGS的卫星DCB吻合较差,其RMS为0.19 ns,存在一个系统偏差。分析原因,主要是由于在解算卫星DCB时,CODE分析中心在解算时缺少24号卫星,而IGS则利用了全部32颗GPS卫星进行解算。图3是当天CODE与IGS的卫星DCB差值图,CODE相对于IGS的卫星DCB的RMS为0.19 ns,这正好说明了图2中存在的系统偏差。图4给出了本文解算的GLONASS卫星DCB与CODE的差值图,差值都在±0.5 ns以内,其

RMS均为0.16 ns。图5给出了本文解算的GPS测站DCB与CODE和IGS之间的差值图,差值都在±3 ns以内,大部分都在±1.5 ns以内,其相对于CODE的RMS为0.45 ns,相对于IGS的RMS则为0.84 ns。图6给出的是CODE与IGS两个分析中心的GPS测站DCB差值图,其RMS为0.56 ns,这也是由于两者之间解算时卫星数不同,导致其测站DCB也存在系统偏差。图7给出的是GLONASS测站DCB与CODE之间的差值图,差值大部分也在±2 ns以内,其相对CODE的RMS为0.57 ns。

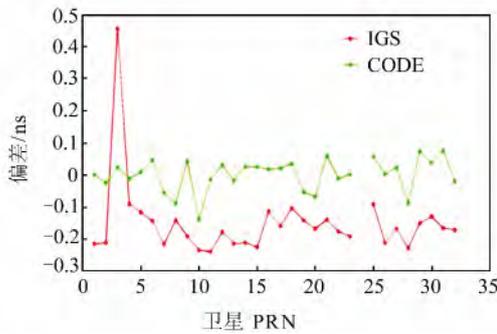


图2 GPS卫星DCB与CODE/IGS差值  
Fig. 2 GPS Satellite DCB Bias with CODE/IGS

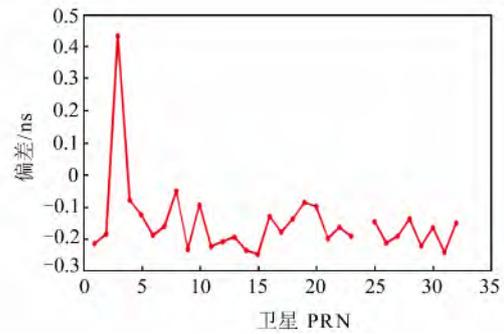


图3 CODE与IGS GPS卫星DCB差值  
Fig. 3 GPS Satellite DCB Bias Between CODE and IGS

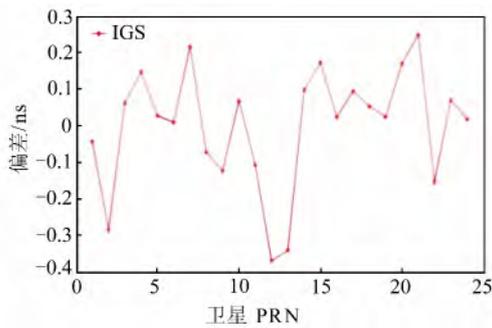


图4 GLONASS卫星DCB与CODE差值  
Fig. 4 GLONASS Satellite DCB Bias with CODE/IGS

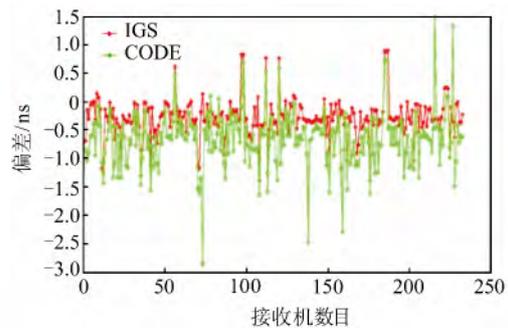


图5 GPS测站DCB与CODE/IGS差值  
Fig. 5 GPS Receiver DCB Bias with CODE/IGS

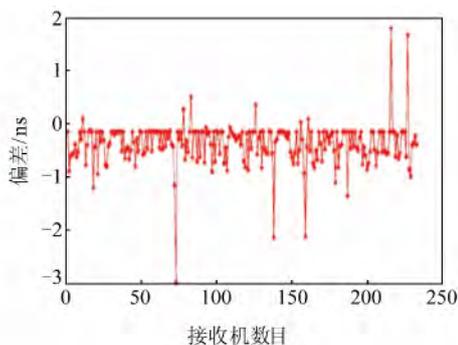


图6 CODE与IGS GPS测站DCB差值  
Fig. 6 GPS Receiver DCB Bias Between CODE and IGS

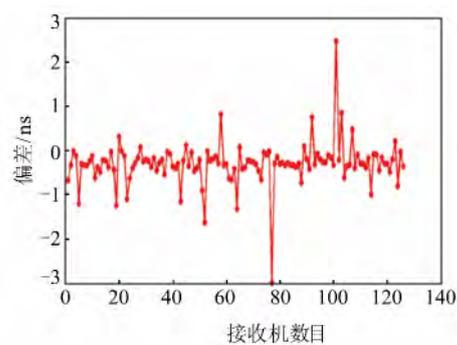


图7 GLONASS测站DCB与CODE差值  
Fig. 7 GPS Receiver DCB Bias with CODE

为比较方便,根据模型参数生成纬度分辨率为  $2.5^\circ$ 、经度分辨率为  $5^\circ$  的全球格网 VTEC 分布图。选取当天 16:00(UT)的一幅 GIM(Global Ionospheric Model)与 CODE 发布的 GIM 相比,其差值图如图 8 所示。图 8(a)为只利用 GPS 时得到的 GIM 与 CODE 差值图,图 8(b)为利用 GPS/GLONASS 组合得到的 GIM 与 CODE 差值图。从图 8 中可以看出,仅利用 GPS 和 GPS/GLONASS 组合时,相对于 CODE,其 RMS 分别为  $2.5$  TECU 和  $2.0$  TECU。其相对于 IGS 的 RMS 分别为  $2.3$  TECU 和  $2.1$  TECU。

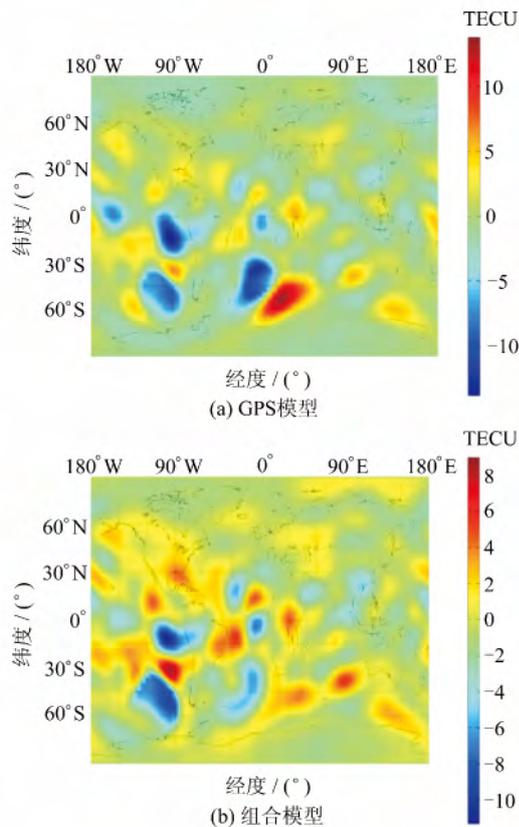


图 8 不同模型下 GIM 与 CODE GIM 差值

Fig. 8 GIM Bias with CODE GIM in Different Models

从图 8 可以看出,VTEC 模型值与 CODE 分析中心发布的情况大体一致,在南半球海洋区域和赤道附近地区存在较大的异常。参照图 1 测站分布图可以看出,这些区域基本上是没有测站或者测站较少的区域,因此残差较大的原因是 RMS 相对测站覆盖率低导致实测数据匮乏。另外,选取 2011 年 6 月 28 日数据进行解算,其 RMS 相对与 CODE 分别为  $2.5$  TECU 和  $2.0$  TECU,前者为 GPS 单系统,后者为 GPS 和 GLONASS 组合系统,而 2013 年 6 月 28 日则为  $4.8$  TECU 和  $4.1$  TECU。

### 3 结 语

本文基于 GPS 和 GLONASS 组合观测数据,采用 15 阶球谐函数展开模型计算全球电离层 TEC,解算得到的结果与 CODE 和 IGS 分析中心相比基本一致,表明利用该方法建立的模型是可靠的,其得到的 GPS 卫星 DCB 相对于 CODE 和 IGS 的 RMS 分别为  $0.05$  ns 和  $0.19$  ns,其存在偏差的原因主要是 CODE 解算参数时只考虑观测到的卫星,而 IGS 则利用全部 32 颗卫星。GLONASS 卫星 DCB 相对于 CODE 和 IGS 结果的 RMS 都为  $0.16$  ns;而 GPS 测站的 DCB 相对于 CODE 和 IGS 的结果精度均优于  $1$  ns;GLONASS 也能达到  $1$  ns 以内。VTEC 相对于 CODE 和 IGS 提供的 GIM 产品,其精度都在  $3$  TECU,而且组合解算精度略高于仅利用 GPS 时的精度。由于南半球海洋区域和非洲沙漠地区测站较少,VTEC 模型结果拟合精度较差,仅仅利用模型系数来解算这些区域的 VTEC 可能会导致精度较差,需要引入其他数据来进一步联合解算或者采用插值的方法来内插这些区域的 VTEC。

### 参 考 文 献

- [1] Zhou Zhongmo, Yi Jiejun, Zhou Qi. GPS Satellite Measurement Principle and Application [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1997(周忠谟, 易杰军, 周琪. GPS 卫星测量原理及应用[M]. 北京:测绘出版社, 1997)
- [2] Yuan Yunbin. Ionospheric Monitoring and Delay Correction Theory and Method Research Based on GPS[D]. Wuhan: Institute of Measurement and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2002(袁运斌. 基于 GPS 的电离层监测及延迟改正理论与方法的研究[D]. 武汉:中国科学院测量与地球物理研究所, 2002)
- [3] Li Zhenghang, Zhang Xiaohong. New Technology of Satellite Navigation and Positioning and High Precision Data Processing Method [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009(李征航, 张小红. 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2009)
- [4] Zhang Hongping, Ping Jinsong, Zhu Wenya, et al. Ionospheric Delay Correction Model Review [J]. Journal of Astronomy, 2006, 24(1): 16-26(章红平, 平劲松, 朱文耀, 等. 电离层延迟改正模型综述

- [J]. *天文学进展*, 2006, 24(1): 16-26)
- [5] Cai Changsheng, Li Zhenghang, Zhang Xiaohong. Using GPS Combination Observations to Establish Regional Ionospheric Model [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2002, 11: 14-16(蔡昌盛, 李征航, 张小红. 利用 GPS 组合观测值建立区域电离层模型研究[J]. *测绘通报*, 2002, 11: 14-16)
- [6] Yuan Yunbin, Ou Jikun. Using IGS Data to Determine the Global Ionosphere TEC Preliminary Results and Analysis [J]. *Progress in Natural Science*, 2003, 8: 885-888 (袁运斌, 欧吉坤. 利用 IGS 的 GPS 资料确定全球电离层 TEC 的初步结果与分析[J]. *自然科学进展*, 2003, 8: 885-888)
- [7] Zhang Hongping, Shi Chuang, Tang Weiming. Ionospheric Region Polynomial Model and Hardware Delay Unified Solution Analysis Based on GPS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(8): 806-809 (章红平, 施闯, 唐卫明. 地基 GPS 区域电离层多项式模型与硬件延迟统一解算分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2008, 33(8): 806-809)
- [8] Zhang Xiaohong, Li Zhenghang, Cai Changsheng. Small Area of Ionospheric Delay Model by Using Dual-frequency GPS Observation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(2): 140-143 (张小红, 李征航, 蔡昌盛. 用双频 GPS 观测值建立小区域电离层延迟模型研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2001, 26(2): 140-143)
- [9] Rideout W, Coster A. Automated GPS Processing for Global Total Electron Content Data [J]. *GPS Solution*, 2006, 10: 219-228
- [10] Aframovich E L, Astafyeva E I, Zhivetiev I V, et al. Global Electron Content During Solar Cycle 23 [J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2008, 48(2): 187-200
- [11] Dettmering D, Schmidt M, Heinkelmann R, et al. Combination of Different Space-geodetic Observations for Regional Ionosphere Modeling [J]. *Geo.*, 2011, 85: 989-998
- [12] Rolf D, Urs H, Pierre F, et al. Bernese GPS Software Version 5.0 [M]. Bern: Astronomical Institute, University of Bern, 2007
- [13] Duan Juju, Shen Yunzhong. Based on the Variance Component Estimation of GPS/GLONASS Combination Point Positioning [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2011, 4: 4-8 (段举举, 沈云中. 基于方差分量估计的 GPS/GLONASS 组合点定位[J]. *测绘通报*, 2011, 4: 4-8)

## Global Ionospheric TEC Modeling Using Measured GPS and GLONASS

XIE Yibing<sup>1,2</sup> WU Jicang<sup>1,3</sup> CHEN Junping<sup>2</sup> LIU Weizhou<sup>1</sup>

1 College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

2 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

3 Key Laboratory of Modern Engineering Surveying, SBSM, Shanghai 20009, China

**Abstract:** According to the requirements of high precision satellite navigation and ionosphere activity monitoring, double-frequency measurement data from 238 IGS stations are used to calculate vertical ionosphere electron content (VTEC), DCB of GPS, GLONASS and the corresponding receiver based on the spherical harmonic function model. The results show that this implemented model is reliable. The DCB precision of GPS and GLONASS obtained is less than 0.1 ns when compared with the results of CODE and less than 0.2 ns when compared with that of IGS. The DCB precision of GPS and GLONASS receivers are less than that 2 ns, while the precision of VTEC is better than 3 TECU in comparison with that of CODE and IGS, and better than before combination.

**Key words:** GPS; GLONASS; VTEC; ionosphere; spherical harmonic function

**First author:** XIE Yibing, postgraduate, specializes in GNSS data processing and ionospheric model. E-mail: xieyibing@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41174024, 11273046, 40974018; the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program), No. 2013AA122402; the Shanghai Committee of Science and Technology Fund, No. 12DZ2273300; the Chinese Academy of Sciences One Hundred Plans to Sponsor.