

# 利用 GPS 双频数据进行区域电离层 TEC 提取

聂文锋<sup>1,2</sup> 胡伍生<sup>2</sup> 潘树国<sup>3</sup> 宋玉兵<sup>4</sup>

1 浙江水利水电学院工程实验实训中心,浙江 杭州,310018

2 东南大学交通学院测绘工程系,江苏 南京,210096

3 东南大学仪器科学与工程学院,江苏 南京,210096

4 江苏省测绘地理信息局,江苏 南京,210013

**摘要:**从利用 GPS 提取区域电离层总电子含量(total electron content, TEC)的基本原理出发,解决了伪距观测值优化以及硬件延迟(DCB)处理问题,并将提取的 TEC 信息与欧洲定轨中心(CODE)计算的全球电离层(GIM)模型内插值应用在单频精密单点定位中,进行电离层延迟改正实验。结果表明,利用本文提取的 TEC 值进行单频精密单点定位电(PPP)电离层延迟改正时,点位精度能提高到 0.2~0.4 m 左右,明显优于利用 GIM 内插值的改正精度。

**关键词:**TEC;提取;GPS;区域电离层

中图分类号:P228.42 文献标志码:A

作为日地空间环境的重要组成部分,电离层对现代无线电工程系统和人类的空间活动有着重要影响。研究电离层不仅有利于认识电离层本身、寻找克服电离层可能造成的灾害的途径和探求利用电离层为人类造福的方法,而且有助于推动地球科学领域电离层理论和应用问题的研究与发展<sup>[1]</sup>。总电子含量(total electron content, TEC)是描述电离层形态和结构的重要参量,因此,电离层 TEC 的准确提取尤其重要<sup>[2-3]</sup>。正是由于 GPS 具有高可靠性、数据量大、全方位、全天候和连续观测等优点,利用 GPS 提取区域 TEC 信息受到人们的普遍关注<sup>[4]</sup>。

精确提取电离层 TEC 是一个重要的研究课题<sup>[5]</sup>,是电离层预报和监测的基础与前提。利用 GPS 精确提取电离层延迟信息取决于几个方面:① 模拟区域电离层延迟变化特性的函数模型和参考框架;② 电离层投影函数;③ 电离层延迟观测的精度;④ 电离层观测中的系统误差;⑤ 电离层延迟观测的空间分布特点<sup>[1]</sup>。国内外学者在这几个方面进行了相当的研究。文献<sup>[6]</sup>研究了高度截止角和等效高度在太阳活动弱的中纬地区对 TEC 提取的影响。结果表明,不同高度截止角对 TEC 的估计有 2 TECU(1 TECU

= $10^{16}$  电子数/ $m^2$ )的影响,而对硬件延迟估计没有影响,等效高度的影响则会随着测站位置和所处时段的不同而有所不同。文献<sup>[7]</sup>通过研究广播星历、Q 因子、champan 剖面以及 SLM 投影函数发现,当高度角大于  $15^\circ \sim 20^\circ$  时,各类投影函数计算效果并无较大差别。文献<sup>[8]</sup>通过分析发现,在硬件延迟处理(DCB)过程中,分段常数的多项式模型全天解能获得一致性、稳定性更好的 DCB 值。

这些研究都为本文精确提取 TEC 信息提供了必要的基础,因此,本文在总结以上研究的基础上,系统研究了区域电离层 TEC 的提取算法,并将提取的 TEC 应用在单频精密单点定位中进行精度验证。

## 1 利用 GPS 提取 TEC 原理

GPS 的伪距观测方程为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} P_{1j}^i = \rho_j^i + c(dt^i - dt_j) + d_{\text{tropj}}^i + d_{\text{ion1j}}^i + dq_{1j} + dq_1^i \\ P_{2j}^i = \rho_j^i + c(dt^i - dt_j) + d_{\text{tropj}}^i + d_{\text{ion2j}}^i + dq_{2j} + dq_2^i \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\rho_j^i$  为  $i$  星到  $j$  站的卫地距; $P_{1j}^i$ 、 $P_{2j}^i$  为双频观测值, $P$  码伪距观测值; $c$  为真空光速; $dt^i$ 、 $dt_j$  分

收稿日期:2013-04-15

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41274028,41074021)。

第一作者:聂文锋,硕士生,研究方向为 GNSS 电离层提取建模以及 GNSS 精密定位。E-mail: wenfengnie@126.com

通讯作者:胡伍生,博士,教授,博士生导师。E-mail: wusheng.hu@163.com

别是卫星与接收机的钟差;  $d_{tropj}^i$  为对流层延迟;  $dq_{kj}$ 、 $dq_k^i$  为不同频率 ( $k=1,2$ ) 的接收机与卫星硬件延迟;  $d_{ionkj}^i$  是不同频率的电离层延迟。同时,若忽略电离层高阶项的影响,电离层延迟的一阶级数表达式为<sup>[9]</sup>:

$$d_{ion} = 40.28 \frac{TEC}{f^2} \quad (2)$$

其中,TEC 为信号路径上的电离层电子总含量,单位是  $10^{16}$  电子数/ $m^2$ ;  $f$  为信号频率,其单位是 Hz,  $d_{ion}$  的单位为 m。结合式(1)、(2),方程可以写成如下形式:

$$P_{kj}^i = \Psi + d_{ion} + dq_{kj} + dq_k^i \quad (3)$$

其中,  $\Psi = \rho_j^i + c(dt^i - dt_j) + d_{tropj}^i$ 。

对双频 GPS 观测,采用双频 P 码之差来进行电离层研究,有:

$$P_{2j}^i - P_{1j}^i = 40.28 \frac{TEC}{f_2^2} - 40.28 \frac{TEC}{f_1^2} + dq_j + dq^i \quad (4)$$

其中,  $dq_j = dq_{2j} - dq_{1j}$ 、 $dq^i = dq_2^i - dq_1^i$  分别是接收机、卫星硬件延迟部分。由此,对于双频 GPS 观测数据,将两个频率值代入,可得测站至卫星路径上 TEC 含量的观测方程为:

$$TEC = 9.52437(P_{2j}^i - P_{1j}^i - dq_j - dq^i) \quad (5)$$

由式(5)可以看出,准确获取 TEC 值的关键在于伪距差的精度以及卫星和接收机 DCB 的分离。

## 2 伪距观测值的优化

由于伪距观测值的噪声较大,为了提高 TEC 的提取精度,本文采用载波相位观测值  $L_1$ 、 $L_2$  对相应伪距观测值进行平滑处理。伪距观测值的优化包括预处理与滤波平滑两部分。

### 2.1 预处理

伪距观测值的预处理包括对卫星失锁、卫星周跳、观测粗差以及高度截止角的处理。对于失锁和周跳卫星,本文均设置相应的标志使其不参与解算。顾及到各投影函数的影响,本文选取高度截止角为  $15^\circ$ 。对于粗差的判断,本文在研究中发现,在卫星升起后的几个历元以及卫星降落前的几个历元,卫星伪距观测值通常不稳定。

图 1 所示的是 2010-11-20 江苏省全球导航卫星连续运行参考站综合服务系统(Jiangsu Continuously Operating Reference Stations, JSCORS) 中 NJHZ 站观测的 G27 号卫星全天升降状态下伪距差的质量情况。卫星可见性指数为 1 时表示卫星可见,因此,全天分别在 3 个阶段观测到该卫星。图 1(b)表示的是对应历元  $C_1 - P_2$  码差值。从第二阶段可以看出,卫星在从升起到降落过程中,伪距差也从波动到稳定再到不稳定,而且卫星在升起阶段会出现反复失锁的现象。具体如图 2 所示。

因此,本文对卫星升起后及降落前的 10 个历元同样设置相应的标志使其不参与解算。

### 2.2 非发散 Hatch 滤波相位平滑伪距

由于伪距观测值精度较低,而利用载波观测值提取 TEC 信息又存在模糊度解算问题,因此,目前主要通过相位平滑伪距的方式提高伪距值的精度。相位平滑伪距的方式详见文献[1,9-10],它们都是基于模糊度不变的原理。本文采取非发散 Hatch 滤波<sup>[10]</sup>的方法对伪距进行平滑,分别采用 2010-11-20 国际全球卫星定位导航服务(International GNSS Service, IGS)跟踪站中 BJFS、USNO 两站以及 JSCORS 网中 NJPK、NJHZ 两站数据进行平滑伪距效果验证,平滑前后结果见图 3,统计精度结果见 1。

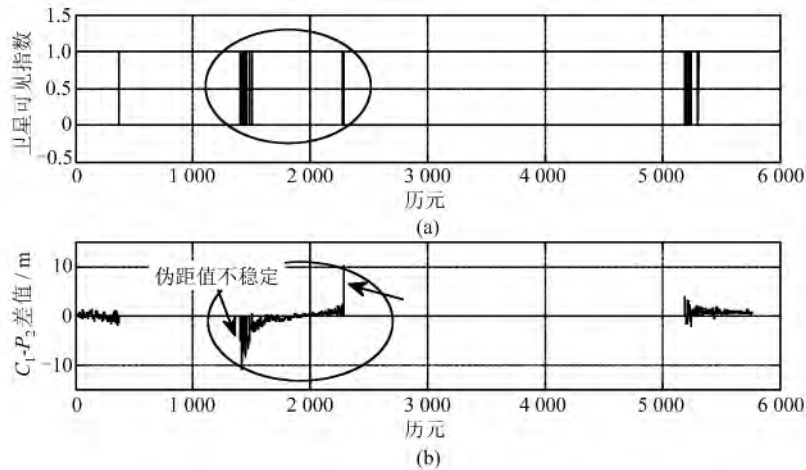


图 1 卫星全天升降与伪距差质量关系

Fig. 1 Relationship Between the Rise-Down of the Satellite and the Quality Value of  $C_1 - P_2$

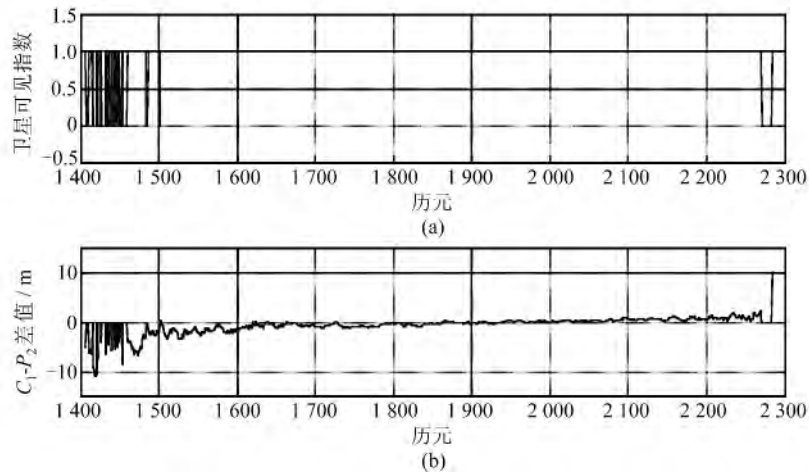


图2 第二阶段卫星升降与伪距差质量关系  
Fig. 2 Relationship During the Second Period

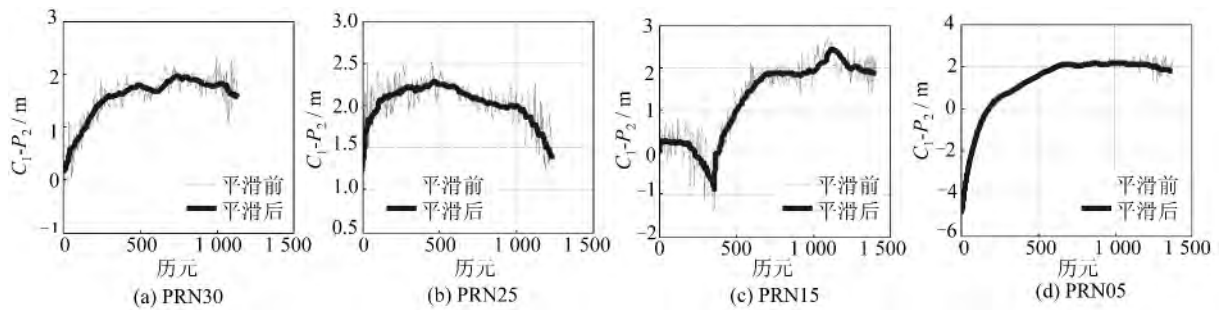


图3 卫星伪距差平滑前与平滑后比较

Fig. 3 Comparison of the Differential Pseudo-Range Before and After Smooth

图3列举了NJPK站观测G30、G25、G15、G05号卫星原始伪距差 $C_1 - P_2$ 值与平滑后的伪距差值。可以看出,平滑后的伪距差值波动较小,而且比较稳定,平滑效果明显。为了进一步验证平滑后的伪距值的精度,本文利用平滑后的伪距值进行消电离层组合的伪距单点定位,并与原始伪距单点定位进行精度对比,如表1所示。

表1 消电离层组合伪距单点定位结果/m  
Tab. 1 Results of Ionosphere-Free Pseudo-Range

RMS	Point Positioning/m							
	非平滑				平滑			
	X	Y	Z	点位	X	Y	Z	点位
NJPK	2.36	3.36	2.84	4.99	2.31	3.28	2.77	4.88
NJHZ	2.48	3.58	2.98	5.36	2.31	3.32	2.77	4.97
BJFS	2.39	3.70	3.45	5.68	2.28	3.54	3.29	5.43
USNO	1.94	3.85	3.52	5.66	1.51	3.05	2.78	4.47

从表1中可以看出,平滑后的伪距单点定位在X、Y、Z方向都有提高,最终点位误差精度最高的为USNO站,能提高20%左右,最低的是NJPK站,提高2%左右。这可能是由于接收机质量、观测环境等因素的不同影响造成的,因此,相位平滑伪距能够不同程度上改善伪距观测值的精度。

### 3 全天分段常数解DCB值

根据文献[8],分段常数的方法能够获得一致性、稳定性更好的DCB值。因此,本文采用分段常数的方法,通过构建整天模型来分别获取卫星和接收机的DCB。采用单层电离层多项式展开模型来模拟区域垂直总电子含量(VTEC)的变化,具体表达式为<sup>[9]</sup>:

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

式中, $E_{ik}$ 为模型系数; $\varphi_0$ 为测区中心地理纬度; $S_0$ 为测区中心点( $\varphi_0, \lambda_0$ )在该时段中央时刻 $t_0$ 的太阳时角; $S - S_0 = (\lambda - \lambda_0) + (t - t_0)$ , $\lambda_0$ 为测区中心点的地理经度, $\lambda$ 为信号路径与单层交点(穿刺点)的地理经度, $t$ 为观测时刻; $n, m$ 为多项式展开的阶数。

将测站至卫星路径上的TEC投影到VTEC,采用SLM投影函数(CODE分析中心采用等效高度450 km):

$$mf(z) = 1/\cos z' \quad (7)$$

式中, $z'$ 为穿刺点天顶距。

通过式(5)~(7),最终可得到 VTEC 电离层延迟模型的观测方程:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^m E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (S - S_0)^k + 9.524\ 37 \times \cos z' (dq_j + dq^i) = 9.524\ 37 \cos z' (P_{2j}^i - P_{1j}^i) \tag{8}$$

由于将接收机和卫星 DCB 分别设置成独立参数进行最小二乘估计时法方程系数矩阵秩亏,不能直接解算,因此,采用 CODE 中心约束条件<sup>[11]</sup>:

$$\sum_{i=0}^m q^i = 0 \tag{9}$$

式中,  $m$  为卫星个数;  $q^i$  为  $i$  卫星的 DCB。

本文对电离层多项式模型按  $3 \times 2$  阶进行展开。若观测时段观测  $m$  颗卫星,有  $n$  站进行观测,则上述待估参数个数为  $6 + m + n$ ,而单站在  $2h$  的观测时段内采样数一般大于 400 个,所以本方程组是可以求解的。

实验中,采用 IGS 跟踪站 USNO 2010-11-21~2010-11-31 共 10 d 数据,采样率 30 s,高度截止角  $15^\circ$ ,利用上述全天分段常数的方法解算卫星和接收机 DCB,并将计算得到的卫星 DCB 与 CODE 分析中心发布的 DCB 进行比较,结果如图 4 所示(前 5 d 结果)。

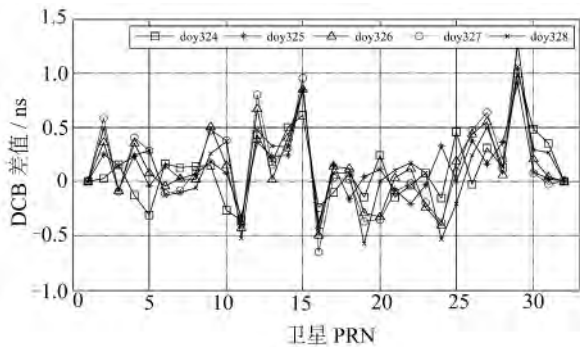


图 4 模型计算 DCB 与 CODE 发布 DCB 差值  
Fig. 4 Difference Between DCB Calculated and CODE Issued

从图 4 中可以看出,除了 PRN28 号卫星 DCB 相差 1 ns 以上外,大部分卫星 DCB 与 CODE 中心发布 DCB 相差在 0.5 ns 左右。这种差异之所以存在,一方面是由于在该时段始终未观测 PRN01 号卫星,采用重心基准约束时,PRN01 号卫星 DCB 分配到其他卫星 DCB<sup>[12]</sup>;另一方面可能是 CODE 中心采用的全球球谐模型与区域多项式模型有差别,且球谐模型采用的全球数据各卫星观测时间长,多余观测更加充分。10 d 的计算结果表明,本文计算的卫星 DCB 10 d 内的标准差为 0.2 ns 左右,接收机 DCB 标准差

为 0.5 ns 左右,表明卫星和接收机 DCB 在一定时间内比较稳定,且卫星 DCB 稳定性优于接收机 DCB,这与文献[4,8,11]的研究结果一致。

### 4 精度对比分析

为了验证所提取的电离层 TEC 信息的准确程度,本文将 TEC 提取值与 GIM 模型内插值代入单频精密单点定位(PPP)模型中进行验证,其中,单频 PPP 是在已有的精密单点定位软件 SEU\_PPP<sup>[13]</sup>的基础上,综合考虑了地球自转、潮汐、天线相位缠绕等各项误差改正,采用 Kalman 滤波算法实现的。GIM 模型是欧洲定轨中心 CODE 按每 2 h 一组全天 24 h 提供的全球纬差  $2.5^\circ$ 、经差  $5^\circ$  格网数据。因此,通过内插可以得到相应位置的 TEC 信息,内插方法见文献[6]。

同样,本文采用 2010 年 11 月 20 日,IGS 跟踪站中 BJFS、USNO 两站以及 JSCORS 网中 NJPK、NJHZ 两站共 4 站数据,采样率 30 s,高度截止角  $15^\circ$ ,按照上述方法统计各测站提取 TEC 值与 GIM 内插值对单频精密单点定位精度的改进,结果如表 2 所示(3 h 以后的统计结果)。图 5 表示 USNO 站单天静态单频 PPP、经典无电离层组合 PPP、加入 GIM 内插值电离层改正 PPP 以及 TEC 提取值电离层改正 PPP 结果。

从图 5 中可以看出,单频 PPP 的平面精度要优于高程方向精度,加入电离层延迟改正后的 E、N、U 方向偏差都有提高,而且利用本文提取的 TEC 值进行电离层延迟改正后的偏差要明显小于利用全球 GIM 模型内插的偏差。

表 2 GIM 模型内插值与提取 TEC 对单频 PPP 点位精度的改进(RMS)/m

Tab. 2 Improvement on Single-Frequency PPP by Interpolated GIM and Extracted TEC (RMS)/m

	S_PPP	S_PPP + GIM 值	S_PPP + 提取值
NJPK	1.411	0.671	0.273
NJHZ	1.345	0.664	0.277
BJFS	1.693	0.838	0.394
USNO	1.739	0.611	0.340

从表 2 中可得出,不顾及电离层延迟影响的单频精密单点定位点位精度在  $1 \sim 2$  m 之间,加入 GIM 内插电离层延迟时精度能达到 0.5~1 m 左右,而利用本文提取的 TEC 值能提高到 0.2~0.4 m,明显优于利用全球 GIM 内插值的改正精度。因此,本文利用 GPS 双频数据提取的区域电离层 TEC 值精度要优于利用 CODE 全球模型内插得到的 TEC 值。

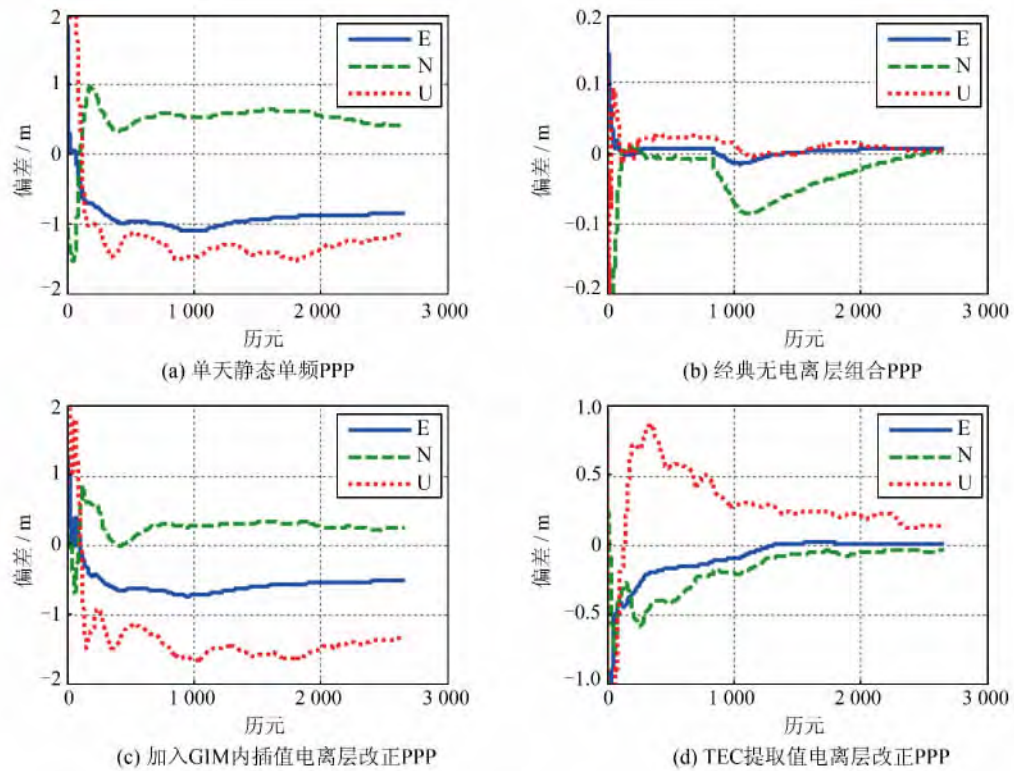


图5 电离层对单频精密单点定位的影响

Fig. 5 Ionosphere Influence on Single Frequency PPP

从图5中还可以看出,虽然加入本文提取的TEC值较未加入电离层延迟改正的单频PPP精度结果能够提高约80%,但是相比经典无电离层组合PPP单天静态的定位精度,仍然存在一定的差距。

## 5 结语

本文研究了利用GPS双频数据进行区域电离层TEC信息提取的算法过程,解决了影响TEC信息提取精度的两个关键问题,即伪距观测值的优化与硬件延迟的处理,并对解决方案进行了对比验证。在此基础上,为了进一步说明提取的TEC信息的精度情况,本文将所提取的TEC值和GIM模型内插值应用在单频精密PPP模型中进行对比分析。结果表明,在利用本文提取的TEC值进行单频PPP电离层延迟改正时,点位精度能达到0.2~0.4m,明显优于利用CODE全球模型内插值的改正精度。

但是,由于伪距噪声的影响,单频PPP加上提取的电离层TEC值改正的定位精度仍然较无电离层组合PPP精度低。因此,如何突破伪距观测值的精度实现电离层TEC的高精度提取,从而达到与无电离层组合PPP相当甚至更优的定位精度,是电离

层TEC精确提取的长远目标。在此基础上,再结合高精度的电离层延迟模型,电离层TEC研究才能在导航定位、灾害预报监测中取得突破性进展。

## 参考文献

- [1] Yuan Yunbin. Study on Theories and Methods of Correcting Ionospheric Delay and Monitoring Ionosphere Based on GPS[D]. Wuhan: Institute of Geodesy 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]. 中国科学院测量与地球物理研究所, 2002)
- [2] Mao Tian, Wan Weixing, Liu Libo. An EOF Based Empirical Model of TEC over Wuhan[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(4): 827-834(毛田, 万卫星, 刘立波. 用经验正交函数构造武汉地区电子浓度总含量的经验模式[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(4): 751-758)
- [3] Brunner F K, Gu M. An Improved Model for Dual Frequency Ionospheric Correction of GPS Observations[J]. *Manuscripta Geodaetica*, 1991, 16(3): 205-214
- [4] Chang Qing, Zhang Donghe, Xiao Zuo, et al. A Method for Estimating GPS Instrumental Biases and Its Application in TEC Calculation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(5): 596-601(常

- 青, 张东和, 萧佐, 等. GPS 系统硬件延迟估计方法及其在 TEC 计算中的应用[J]. 地球物理学报, 2001, 44(5): 596-601
- [5] Li Zhigang, Cheng Zongyi, Feng Chugang, et al. A Study of Prediction Models for Ionosphere[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(2): 307-319(李志刚, 程宗颐, 冯初刚, 等. 电离层预报模型研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 327-337)
- [6] Komjathy A, Langley R B. An Assessment of Predicted and Measured Ionospheric Total Electron Content Using a Regional GPS Network[C]. The National Technical Meeting of the Institute of Navigation, Santa Monica, 1996
- [7] Schaer S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System[D]. Switzerland: Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidg. Technische Hochschule Zürich, 1999
- [8] Zhang Hongping, Shi Chuan, Tang Weiming. United Solution to Polynomial VTEC Modeling and DCB Analysis Using Ground-Based GPS Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(8): 805-809(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): 805-809)
- [9] Liu Jingnan, Chen Junyong, Ge Maorong, et al. Principle and Method of Wide Area Differential GPS [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1999 (刘经南, 陈俊勇, 葛茂荣, 等. 广域差分 GPS 原理和方法[M]. 北京:测绘出版社, 1999)
- [10] Liu Changjian. Study on Modeling Method and Model Quality Control of Ionosphere Based on GNSS[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2011(刘长建. GNSS 电离层建模方法与质量控制研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2011)
- [11] Zhang Hongping, Han Wenhui, Huang Ling, et al. Modeling Global Ionospheric Delay with IGS Ground-Based GNSS Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(10): 186-189(章红平, 韩文慧, 黄玲, 等. 地基 GNSS 全球电离层延迟建模[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(10): 186-189)
- [12] Xue Junchen, Song Shuli, Zhu Wenyao, et al. A Research on the Reliability of Ionospheric VTEC and Satellite DCB from Regional GPS Network[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2011, 52(4): 310-321(薛军琛, 宋淑丽, 朱文耀, 等. 区域 GPS 网实测电离层变化和卫星硬件延迟的可靠性研究[J]. 天文学报, 2011, 52(4): 310-321)
- [13] Gao Chengfa, Hu Wusheng. Principle and Application of Satellite Navigation and Positioning[M]. Beijing: China Communication Press, 2011(高成发, 胡伍生. 卫星导航定位原理与应用[M]. 北京:人民交通出版社, 2011)

## Extraction of Regional Ionospheric TEC from GPS Dual Observation

NIE Wenfeng<sup>1,2</sup> HU Wusheng<sup>2</sup> PAN Shuguo<sup>3</sup> SONG Yubing<sup>4</sup>

1 Engineering Experiment Training Center, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China

2 School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China

3 School of Instrument and Science, Southeast University, Nanjing 210096, China

4 Mapping Geographic Information Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210013, China

**Abstract:** We introduce a measurement for extracting the regional ionosphere TEC (total electron content) from GPS dual observations in detail. From the basic principles for extracting TEC using GPS, we focus on solving two key problems. One was to improve the accuracy of pseudo-range observations, and the other was to detach the DCB (differential code bias) of the satellites and receivers. Furthermore, the extracted TEC and TEC calculated by the CODE (Center for Orbit Determination in Europe) were used as an ionospheric delay correction in a single-frequency point positioning model. The results show that the point accuracy can reach to 0.2-0.4 m using the extracted TEC correction, a significantly improvement over the use of an interpolated GIM correction.

**Key words:** TEC; extract; GPS; regional ionospheric

**First author:** NIE Wenfeng, postgraduate, specializes in ionosphere based on GNSS and GNSS Precise positioning. E-mail: wenfengnie@126.com

**Corresponding author:** HU Wusheng, PhD, professor. E-mail: wusheng.hu@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41274028, 41074021.