

文章编号:1001-1595(2011)04-0447-07

利用非组合精密单点定位技术确定斜向电离层总电子含量和站星差分码偏差

张宝成^{1,2}, 欧吉坤¹, 袁运斌¹, 李子申^{1,2}

1. 中国科学院 测量与地球物理研究所 动力大地测量学重点试验室, 湖北 武汉 430077; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049

Calibration of Slant Total Electron Content and Satellite-receiver's Differential Code Biases with Uncombined Precise Point Positioning Technique

ZHANG Baocheng^{1,2}, OU Jikun¹, YUAN Yunbin¹, LI Zishen^{1,2}

1. Key Laboratory of Dynamic Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract : The ionospheric observables can be determined by combining dual-frequency observations of GPS through carrier-to-code leveling process, which mainly include the slant total electron content (sTEC), satellite-receiver's differential code bias (DCB) and can be applied for ionosphere related research. However, the "leveled carrier phase ionospheric observable" is prone to be influenced by the arc length for leveling and receiver-dependent errors. In this contribution, an approach of calibrating sTEC and satellite-receiver's DCB with ionospheric observables estimated with uncombined precise point positioning (PPP) is proposed. With a short-baseline experiment, the sTEC determined with both kinds of ionospheric observations from one receiver were used to correct the corresponding observations of another receiver and single frequency PPP was implemented, the positioning results indicated a better reliability of sTEC calibrated with PPP-based ionospheric observables. Furthermore, by choosing a total of 4 days' observations from 8 global-distributed international GNSS service (IGS) tracking stations (i. e. 4 days of Jan. 2009), all the satellites' DCB are solved and compared with the products published by Centre for Orbit Determination in Europe (CODE), a discrepancy of no more than 0.1 ns can be found for PPP-based ionospheric observables in comparison of 0.2~0.3 ns for leveled carrier phase ionospheric observables, thus facilitate the precise study of ionosphere.

Key words : GPS; precise point positioning (PPP); slant total electron content (sTEC); differential code bias (DCB); Centre for Orbit Determination in Europe (CODE)

摘 要: 联合双频 GPS 数据, 利用相位平滑伪距算法, 可得到包含斜向电离层总电子含量 (slant total electron content, sTEC)、测站和卫星差分码偏差 (differential code bias, DCB) 的电离层观测值 (称之为“平滑伪距电离层观测值”), 常应用于与电离层有关的研究。然而, 平滑伪距电离层观测值易受平滑弧段长度和与测站有关的误差影响。提出一种新算法: 利用非组合精密单点定位技术 (precise point positioning, PPP) 计算电离层观测值 (称之为“PPP 电离层观测值”), 进而估计 sTEC 和站星 DCB。基于短基线试验, 先用一台接收机按上述两种方法估计 sTEC, 用于改正另一接收机观测值的电离层延迟以实施单频 PPP, 结果表明, 利用 PPP 电离层观测值得到的 sTEC 精度较高, 定位结果的可靠性较强。随后, 选取全球分布的 8 个 IGS (international GNSS service) 连续跟踪站 2009 年 1 月内某四天的观测数据, 利用上述两种电离层观测值计算所有卫星的 DCB, 并将计算结果与 CODE 发布的月平均值进行比较, 其中, 平滑伪距电离层观测值的卫星 DCB 估值与 CODE (Centre for Orbit Determination in Europe) 发布值的差别较大, 部分卫星甚至可达 0.2~0.3 ns, 而 PPP 电离层观测值而言, 绝大多数卫星对应的差异均在 0.1 ns 以内。

关键词: 全球定位系统; 精密单点定位; 斜向电离层总电子含量; 差分码偏差; 欧洲定轨中心

中图分类号: P228

文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金 (40874009); 国家杰出青年科学基金 (40625013); 国家 863 计划 (2007AA12Z305)

1 引言

近年来,高时空分辨率的 GPS 观测数据为电离层研究提供了便利^[1-10];基于单台 GPS 双频接收机,可用于监测电离层小范围、短时间尺度的规则或异常变化,进而反演局部空间大气,为当地与电离层有关的应用如无线电通讯等提供参考^[1-2];利用连续运行的 GPS 参考站网,可精密模型化局部区域的电离层延迟,以有效满足当地部分单频用户的导航^[3-4](如美国 WASS 系统,欧洲 EGNOS 系统等)以及双频用户的实时高精度定位需求^[5](如网络 RTK, real-time kinematic 技术);此外,IGS 联合若干电离层工作组,采用全球范围测站的双频 GPS 观测数据,计算并定期发布三维(时间、经度、纬度)的全球电离层云图产品^[6](global ionosphere map, GIM),该产品可为全球范围内的电离层演化、建模和预报等研究提供重要参考。

从 GPS 观测数据中,获取高精度的“电离层观测值(ionospheric observables)”,是利用 GPS 研究电离层的先决条件^[7-9]。目前,一般基于双频 GPS 观测数据,联合无几何影响组合的码和相位观测值,通过相位平滑伪距方法计算电离层观测值(称之为“平滑伪距电离层观测值”),其中包含了测站和卫星 DCB、电离层延迟以及部分与测站有关的误差,如观测噪声和多路径效应等^[8-10]。

最近有研究表明,上述平滑伪距电离层观测值较易受平滑弧段长度以及与测站有关的误差影响;基于短基线试验,通过考察各连续弧段间,平滑伪距电离层观测值站间单差结果的离散程度,证实了该误差影响最大可达 ± 8.8 TECu(电离层总电子含量单位),且主要来源于 GPS 码观测值的多路径效应^[9-10]。对于高精度的电离层研究而言,上述误差量级不可忽略;部分时刻,如夜间等电离层活动平稳时期,甚至超过了电离层延迟本身的大小^[2],从而严重影响了该时期内电离层研究结果的可靠性。

针对现有方法的不足,本文提出利用非组合 PPP 算法计算电离层观测值(称之为“PPP 电离层观测值”),随后采用电离层薄层模型以有效分离 s TEC 和站星 DCB 的思路。基于短基线试验和全球分布的 IGS 参考站观测数据进行试验,结果表明,PPP 电离层观测值更利于高精度电离层建模和站星 DCB 性质的研究。

2 电离层观测值

标准 PPP 算法一般采用消电离层组合观测值作为基本观测量^[11-12],以在观测域中事先消除电离层延迟对参数估值的影响;但该观测值组合过程却不便于进行电离层的研究。本文对标准 PPP 算法作如下的改进:①采用 GPS 双频原始的码和相位观测值作为基本观测量;②将站星视线方向电离层延迟连同其余未知参数一起估计。由于该 PPP 算法采用非组合 GPS 观测值,故也称之为“非组合 PPP 算法”。本节首先论述了 PPP 电离层观测值的估计方法和具体形式,随后简要介绍平滑伪距电离层观测值的计算过程,并分别分析了两类电离层观测值的误差影响因素。

2.1 电离层观测值与站星 DCB

IGS 发布的精密卫星钟差可表达成

$$dt^s = dt_{\text{true}}^s + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot B_1^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot B_2^s \quad (1)$$

式中, $f_i, i=1,2$ 为 GPS 观测值频率; dt_{true}^s 和 dt^s 分别表示卫星钟差的“真值”和 IGS 发布值,两者之间存在系统偏差,原因在于 IGS 采用消电离层组合码和相位观测值计算卫星钟差,故产品中亦包含了相应卫星硬件延迟 $B_j^s, j=1,2$ 的影响。

当 IGS 钟差产品用于改正观测值时,将不可避免地引入卫星硬件延迟参数。在非组合 PPP 的参数估计过程中,接收机和卫星的硬件延迟可被电离层延迟、接收机钟差以及模糊度吸收。可将电离层延迟和站星 DCB 组合成

$$t_r^s = \beta - B_r^s \quad (2)$$

式中, $\beta = I_r^s \cdot \alpha, \alpha = (f_2^2 - f_1^2) / f_2^2$ 是乘常数, I_r^s 为测站至卫星方向的电离层延迟; $B^s = B_1^s - B_2^s$ 和 $B_r = B_{r,1} - B_{r,2}$ 分别为卫星和测站 DCB,记 $B_r^s = B^s + B_r$ 。

2.2 非组合 PPP 求解电离层观测值 t_r^s

非组合 PPP 算法中,待估参数包含式(2)中的电离层观测值、测站坐标、双频相位模糊度、接收机钟差以及天顶对流层延迟等。本文采用正反卡尔曼滤波算法进行参数估计,以保证各类参数估值的全局最优性。在接下来的论述中,以正向滤波算法为例,简要介绍了观测方程和状态方程的形式,以及所采用的质量控制策略;重点推导分析了 PPP 电离层估值的形式及误差影响因素。

2.2.1 观测方程

假定在历元 i ,测站 r 同时观测到 m 颗卫星,

可分离性;在本文随后的试验中,选取与观测数据采样间隔一致的 IGS 钟差产品,以避免卫星钟差内插所引起的误差影响。对于可能出现的部分模型误差,如码观测值粗差、相位观测值周跳等,采用基于 DIA (detection, identification, adaptation)的质量控制策略以克服其不利影响^[5]。

2.3 平滑伪距电离层观测值

利用相位平滑伪距算法计算电离层观测值的过程可简要概括为

$$\Phi_I = \Phi_1 - \Phi_2 = \beta + (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) + \epsilon_\Phi \quad (13)$$

$$P_I = P_2 - P_1 = \beta - B_r - B^s + \epsilon_P \quad (14)$$

式中, P_I 和 Φ_I 分别表示伪距和相位无几何影响组合观测值,下标 1 和 2 表示对应频段; N 为模糊度参数; ϵ 表示观测噪声和多路径效应。

联合式(13)和(14),可利用下式计算得到平滑伪距电离层观测值

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_{I,arc} &= \Phi_I - \langle \Phi_I - P_I \rangle_{arc} = \\ & \beta - B_r - B^s - \langle \epsilon_P \rangle_{arc} + \epsilon_\Phi = \\ & \tilde{I}_r - \langle \epsilon_P \rangle_{arc} + \epsilon_\Phi \end{aligned} \quad (15)$$

式中, $\langle \rangle_{arc}$ 表示对某卫星连续弧段内观测值取平均过程。显见,式(2)和式(15)两种电离层观测值中所包含的电离层延迟和差分码偏差形式相同,差别在于不同的误差影响因素。

与采用 PPP 技术估计 \tilde{I}_r 过程中采用高度角加权和最优滤波估计策略以充分消除观测噪声的影响不同, $\tilde{I}_{I,arc}$ 将不可避免地受到 ϵ_P 影响;式(15)中的取平均过程无法有效消除 ϵ_P 中非随机误差项,如多路径效应等;此外,当平滑弧段较短时,部分观测噪声的影响同样无法充分消除。在随后的试验分析中,为避免低高度角观测值中较强误差的影响,计算平滑伪距电离层观测值时,截止高度角选取为 15° 。

3 试验分析

为对比分析测站有关误差对两类电离层观测值的影响,采用相同的观测数据,分别设计如下两类试验:

(1) sTEC 分离试验。考虑到电离层延迟与卫星高度角的相关性,通过模型化式(2)或(15)中的 I_r ,可有效分离 sTEC 和站星 DCB。基于某短基线试验,考察了两种电离层观测值分离得到的 sTEC 对定位结果的影响。值得注意的是,试验中基于如下分步策略分离 PPP 电离层观测值中的 sTEC:首先采用非组合 PPP 技术估计得到形

如式(2)的电离层观测值,随后将该类观测值作为电离层建模的输入量;

(2) 站星 DCB 估计试验。利用(1)中的电离层模型,基于全球均匀分布的若干 IGS 参考站观测数据,将估计得到的卫星 DCB 与 CODE 公布的对应月平均值进行比较,进一步对比验证两类电离层观测值的精度。

3.1 sTEC 分离试验

式(2)和(15)中的 I_r 和 DCB 项 $B_r + B^s$ 可采用电离层薄层模型结合相应的投影函数估计得到^[4,8-9],该模型假定电离层为距离地球表面一定高度(如 350 km)的薄层,同时将 sTEC 投影至穿刺点(站星视线与薄层的交点)处的垂直 TEC (vertical TEC, vTEC),具体公式为^[13]

$$\frac{vTEC}{sTEC} \approx \cos z' = \sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+H}\right)^2 \cos^2(z)} \quad (16)$$

式中, R 为地球半径; H 为薄层高度,本文选取为 350 km; z 和 z' 分别是卫星在接收机和穿刺点处的天顶距。

随后,利用某数学函数模型化 vTEC 的时空变化特性,对于本文的单站电离层建模而言,由于 GPS 信号覆盖范围有限,二次多项式函数即可有效描述单站电离层延迟在单天内变化,具体公式为

$$vTEC = a_{00}(t) + a_{10}(t)x + a_{01}(t)y \quad (17)$$

式中, t 表示观测时刻; x 和 y 可分别表示为 $x = (\lambda_{IPP} - \lambda_R) \cos(\phi)$ 和 $y = \mu_{IPP} - \mu_R$, λ 和 ϕ 表示地理经纬度, μ 表示地磁纬度,下标 IPP 和 R 分别表示穿刺点和测站;本文假定未知参数 a_{00} 、 a_{10} 和 a_{01} 为与时间相关的分段函数,即 $a_{ij}(t) = a_{ij,k}$, $a_{ij,k}$ 在时间间隔 $[t_k, t_k + t]$ 内为常数,其中 t 为间隔长度,本文取为 5 min。

联合式(2)、(16)和(17)可得利用 PPP 电离层观测值估计 sTEC 和站星 DCB 的方程

$$\begin{aligned} \tilde{I}_r &= I_r \alpha - (B_r + B^s) = \\ & \sec z' [a_{00,k}(t) + a_{10,k}(t) \cdot x + \\ & a_{01,k}(t) \cdot y] \alpha - B_r^s \end{aligned} \quad (18)$$

式中, $t_k \leq t \leq t_k + \Delta t$ 表示某时间间隔, $\alpha = (f_2^2 - f_1^2) / f_2^2$ 为乘常系数, $B_r^s = B_r + B^s$ 为可估的站星 DCB 综合影响。类似的,基于式(15)可得到平滑伪距电离层估计 sTEC 和站星 DCB 的观测方程,其具体形式与式(18)相同,这里不再列出。

试验包含 2009 年 DOY(年积日) 201 日—

204 日共 4 天的短基线(长 1.7 m)观测数据,采样间隔为 5 s。以其中某测站的数据为例,基于两种电离层观测值,利用式(18)估计站星视线方向的 sTEC,对应结果如图 1 所示。

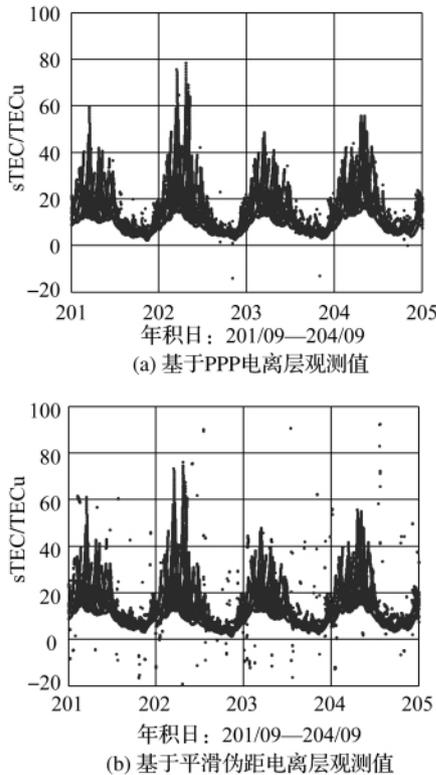


图 1 短基线试验中,某测站视线方向电离层总电子含量估值

Fig. 1 Calibrated slant Total Electron Content for one receiver from the short-baseline experiment

图 1 中显见,利用平滑伪距电离层观测值估计得到的 sTEC 存在较多负值和散点,与实际不符,其原因在于较短的平滑弧段难以有效消除与测站有关的误差影响;比较而言,利用 PPP 电离层观测值估计 sTEC 的结果较为可靠,除极个别异常点外,sTEC 估值的平滑性和变化规律均与已知的电离层特性吻合。

为进一步对比分析图 1 中两类 sTEC 的估计精度,以 DOY 201/09 的试验数据为例,利用其中一台接收机的观测值实施单频 PPP 伪动态定位试验,对应的电离层延迟采用另一接收机分离得到的 sTEC 加以改正,北东天定位误差结果如图 2 所示(纵轴单位为 m),其中测站坐标参考值为单天双频 PPP 静态解。

从图 2 中的结果可知,采用 PPP 电离层改正得到的定位结果具有较快的滤波收敛时间和较强

的收敛稳定性,三坐标分量的收敛时间分别约为 10 min、30 min 和 25 min,滤波收敛后的位置误差 RMS 分别为 3 cm、4 cm 和 7 cm(表 1 所示);而对于采用平滑伪距电离层改正的定位结果而言,定位结果存在较大的偏差,部分时刻(如 17:00 附近)甚至出现跳跃,原因可能在于部分卫星的 sTEC 估值存在较大误差;此时,滤波收敛特性不明确,定位结果可靠性明显不如前者。

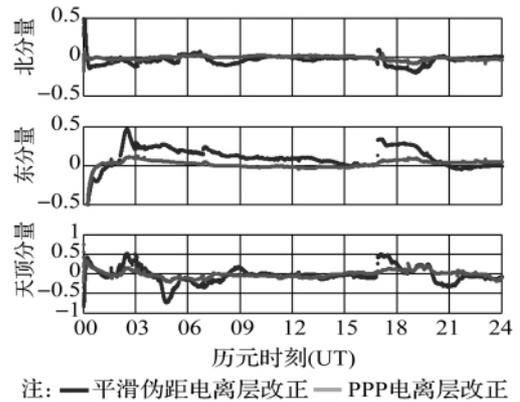


图 2 单频 PPP 伪动态定位试验位置误差结果

Fig. 2 Accuracy of positioning with simulated kinematic single-frequency PPP implementation

3.2 站星 DCB 估计试验

选取全球范围分布的 8 个 IGS 站 2009 年 DOY 1、3、19 和 26 共四天的观测数据,基于式(18)中的电离层模型,分别利用式(2)和式(15)两类电离层观测值求取站星 DCB。图 3 中列出了 2009 年 1 月各天的地磁 Kp 指数(<http://ftp.gwdg.de/pub/geophys/kp-ap/tab/kp0901.tab>),上述 4 天对应于 1 月内地磁活动最强的时期,此时电离层受地磁影响较大,式(18)将不能充分描述 ν TEC 的时空变化特性^[8],DCB 估值精度可被认为是利用 GPS 研究电离层所能达到的精度“下限”,在电离层活动较为平静的条件下,DCB 估值的精度可望进一步提高,试验选取的各 IGS 站所处位置及采样间隔等信息如表 2 所示。

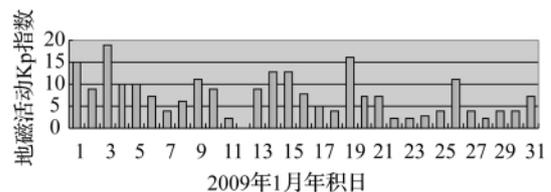


图 3 2009 年 1 月各日地磁活动 Kp 指数

Fig. 3 Kp index of geomagnetic activity for January, 2009

表 1 单频 PPP 试验各坐标分量定位误差的统计性质
Tab. 1 Summary statistics of component errors for both single frequency PPP implementations cm

坐标分量	PPP 电离层改正			平滑伪距电离层改正		
	均值	标准差	RMS	均值	标准差	RMS
北	-0.78	2.78	3.01	-3.45	7.66	9.88
东	0.05	4.22	4.15	-8.29	11.31	10.78
天顶	0.75	6.05	7.29	-7.39	13.53	14.96

表 2 试验选取的各 IGS 站信息描述

Tab. 2 Description of IGS sites chosen for experiment

测站名	经纬度		采样间隔
AMC2	104.5°W,	38.8°N	30 s
AMU2	110.7°W,	89.9°S	
BJFS	115.9°E,	39.6°N	
SHAO	121.2°E,	31.1°N	
TWTF	121.2°E,	24.9°N	
UNB3	66.6°W,	45.9°N	
WUHN	114.3°E,	30.5°N	
ZIMM	7.5°E,	46.9°N	

基于全球分布的 100 多个 IGS 站的双频 GPS 观测数据, CODE 利用球谐函数拟合全球范围内的电离层, 同时估计各测站和卫星 DCB。该参数估计过程中所采用的观测数据较多, 空间结构较强^[14], 相对于本文中提出的基于 8 测站观测值估计站星 DCB 而言, CODE 发布的 DCB 结果将具有更高的可靠性, 考虑到卫星 DCB 多天内的稳定性, 以 CODE 发布的月平均值作为参考, 将本文计算的卫星 4 天内的 DCB 均值与之进行对齐(引入卫星 DCB 均值为零的基准)和比较, 具体结果如图 4 所示。

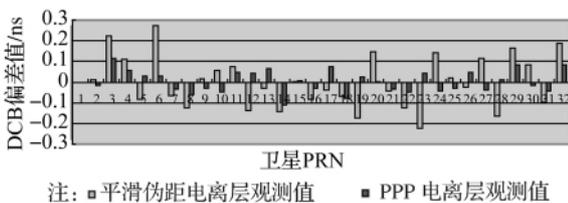


图 4 基于两类电离层观测值的卫星 DCB 估值与 CODE 参考值之差

Fig. 4 The discrepancy between satellites' DCBs estimated with two kinds of ionospheric observables and their reference values published by CODE

图 4 中显见, 除个别卫星 (PRN 3 和 14), 利用 PPP 电离层观测值估计得到的卫星 DCB 与 CODE 参考值之间的差异均不超过 0.1 ns; 相比

较而言, 平滑伪距电离层观测值估计得到的卫星 DCB 与参考值之间偏差较大, 部分卫星, 如 PRN 3、6 和 23 等均在 0.2~0.3 ns 之间, 上述试验结果表明 PPP 电离层观测值更有利于高精度的电离层延迟提取、建模和预报等研究。

4 结论与展望

提出一种利用非组合 PPP 估计电离层观测值, 进而分离得到 sTEC 和站星 DCB 的算法, 并分别采用短基线和全球部分 IGS 站实测数据进行验证。研究表明, PPP 电离层观测值虽然与常用的平滑伪距电离层观测值具有相同的形式, 但它受与测站有关的误差影响较小, 因此更适用于高精度的电离层建模, 推荐采用这种电离层观测值作为研究电离层的基本观测量。

研究将 PPP 应用范围扩展至电离层延迟提取和建模应用, 同时对于站星 DCB 变化性质的研究亦具有一定的借鉴意义。

随着 GPS、GLONASS 的日益现代化以及 GALILEO 和 COMPASS 等导航系统逐渐投入运营, 考虑到各系统播发的测距信号结构类似, 本文提出的算法对于联合多系统、多频率的观测数据研究电离层而言, 具有普适性。

在下一步的工作中, 基于现有的 CORS 系统, 考虑将 PPP 电离层观测值应用于区域电离层延迟建模, 届时, 测站坐标已知、双差整周模糊度可被准确固定等约束信息可使得 PPP 电离层观测值估值具有更高的可靠性, 进而可望显著提高区域电离层模型化的精度和有效性。

致谢: 本文曾受中国科学院研究生科技创新与社会实践资金专项资助。

参考文献:

[1] ZHANG Donghe, XIAO Zuo. A Method of Calculating TEC with GPS Data and Its Application to the Ionospheric Disturbance [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(4): 451-458. (张东和, 萧佐. 利用 GPS 计算 TEC 的方法及其对电离层扰动的观测[J]. 地球物理学报, 2000, 43(4): 451-458.)

[2] XIAO Zuo, ZHANG Donghe. An Approach to Study the Day-to-day Variations of Ionospheric TEC Directly by GPS Time-delay Signal [J]. Chinese Journal of Geophysics Space Science, 2000, 20(2): 97-102. (萧佐, 张东和. 通过 GPS 观测数据研究电离层总电子含量的逐日变化[J]. 空间科学学报, 2000, 20(2): 97-102.)

[3] SARDON E, RIUS A, ZARRAOA N. Estimation of the

- Transmitter and Receiver Differential Biases and the Ionospheric Total Electron Content from Global Positioning System Observations [J]. *Radio Science*, 1994, 29(3): 577-586.
- [4] YUAN Y B, HUO X L, OU J K. Models and Methods for Precise Determination of Ionospheric Delay Using GPS [J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(2):187-196.
- [5] ZHANG B C. Determination of Un-differenced Atmospheric Delays for Network-based RTK [C] // *Proceedings of Institute of Navigation GNSS 2009*. Savannah: [s. n.], 2009: 2727-2738.
- [6] DOW J M, NEILAN R E, GENDT G. The International GPS Service (IGS): Celebrating the 10th Anniversary and Looking to the Next Decade [J]. *Advances in Space Research*, 2005, 36(3): 320-326.
- [7] BRUNNER F K, GU M. An Improved Model for Dual Frequency Ionospheric Correction of GPS Observations [J]. *Manuscripta Geodaetica*, 1991, 16(3): 205-214.
- [8] 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.)
- [9] BRUNNINI C, AZPILICUETA F J. Accuracy Assessment of the GPS-based Slant Total Electron Content [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(8): 773-785.
- [10] CIRAULO L, AZPILICUETA F J, BRUNNINI C, et al. Calibration Errors on Experimental Slant Total Electron Content (TEC) Determined with GPS [J]. *Journal of Geodesy*, 2007, 81(2): 111-120.
- [11] KOUBA J, HÉROUX H. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products [J]. *GPS Solutions*, 2001, 5(2): 12-28.
- [12] ZHANG X H, FORSBERG R. Assessment of Long-range Kinematic GPS Positioning Errors by Comparison with Airborne Laser Altimetry and Satellite Altimetry [J]. *Journal of Geodesy*, 2007, 81(3): 201-211.
- [13] OU J K. Atmosphere and Its Effects on GPS Surveying [M] // *LGR-Series Publication of the Delft Geodetic Computing Centre*: No. 14. Delft: Delft Geodetic Computing Centre, 1996:138.
- [14] OU Jikun. Uniform Expression of Solutions of Ill-posed Problems in Surveying Adjustment and the Fitting Method by Selection of the Parameter Weights[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2004, 33(4): 283-288. (欧吉坤. 测量平差中不适定问题解的统一表达与选权拟合法[J]. *测绘学报*, 2004, 33(4): 283-288.)

(责任编辑:雷秀丽)

收稿日期: 2010-05-07

修回日期: 2010-07-15

第一作者简介: 张宝成(1985—),男,博士生,研究方向为精密单点定位(PPP)与网络 RTK 技术的应用。

First author: ZHANG Baocheng (1985—), male, PhD candidate, majors in applications of precise point positioning and network-based RTK.

E-mail: cham@asch.whigg.ac.cn

(上接第 446 页)

- [17] SASGEN I, MARTINEC Z, FLEMING K. Wiener Optimal Filtering of GRACE Data [J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2006, 50(4): 499-508.
- [18] ZHANG Z H, CHAO B F, LU Y, et al. An Effective Filtering for GRACE Time-variable Gravity: Fan Filter [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: 1-6.
- [19] SWENSON S, WAHR J. Post-processing Removal of Correlated Errors in GRACE Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: 1-6.
- [20] CHAMBERS D P. Evaluation of New GRACE Time-variable Gravity Data over the Ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: 12-16.
- [21] CHEN J L, WILSON C R, TAPLEY B D, et al. GRACE Detects Coseismic and Postseismic Deformation from the Sumatra-Andaman Earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: 33-37.
- [22] DUAN X J, GUO J Y, SHUM C K. et al. On the Post-processing Removal of Correlated Errors in GRACE Temporal Gravity Field Solutions [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(11): 1095-1106.
- [23] RODELL M, HOUSER P R, JAMBOR U. et al. The Global Land Data Assimilation System [J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 2004, 85: 381-394.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2010-04-15

修回日期: 2010-10-27

第一作者简介: 詹金钢(1972—),男,博士,副研究员,研究方向为卫星重力场的长期变化及其解释。

First author: ZHAN Jingang (1972—), male, PhD, associate research fellow, majors in secular variation of satellite gravity field and its interpretation.

E-mail: zjg@asch.whigg.ac.cn