

张宝成, 欧吉坤, 李子申等. 利用精密单点定位求解电离层延迟. 地球物理学报, 2011, 54(4): 950~957, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.009

Zhang B C, Ou J K, Li Z S, et al. Determination of ionospheric observables with precise point positioning. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(4): 950~957, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.009

利用精密单点定位求解电离层延迟

张宝成^{1,2}, 欧吉坤¹, 李子申^{1,2}, 袁运斌¹

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实验室, 武汉 430077

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 近年来, 高时空分辨率的全球导航卫星系统(GNSS)观测信号已成为电离层研究的重要资源. 利用 GNSS 研究电离层, 需首先将观测资料转换成包含电离层信息的可观测量(Ionospheric Observables, 称之为“电离层观测值”). 目前, 最常用的电离层观测值一般采用联合无几何影响组合的码和相位观测, 利用相位平滑伪距方法计算得到(称之为“平滑电离层观测值”), 但该过程易受平滑弧段长度和与测站有关的误差(如多路径效应和观测噪声)的影响. 本文提出利用精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)提取电离层观测值(称之为“PPP 电离层观测值”, 形式与平滑电离层观测值相同). 与相位平滑伪距相比, IGS 发布的卫星轨道、钟差产品可被 PPP 合理利用, 从而有效减少了待估参数, 使得电离层观测值的估计精度得到改善. 基于短基线和零基线实验, 通过考察两类电离层观测值的站间单差结果在各卫星弧段间的离散程度, 验证了 PPP 电离层观测值的可靠性: 以某两天的短基线实验结果为例, 与测站有关的误差对 PPP 电离层观测值的影响分别为对平滑电离层观测值影响的 44.4% 和 35.7%, 表明 PPP 电离层观测值更利于高精度电离层建模、预报等研究.

关键词 全球导航卫星系统, 相位平滑伪距, 精密单点定位, 站间单差, 电离层观测值

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.009

中图分类号 P228, P352

收稿日期 2010-01-26, 2011-03-14 收修定稿

Determination of ionospheric observables with precise point positioning

ZHANG Bao-Cheng^{1,2}, OU Ji-Kun¹, LI Zi-Shen^{1,2}, YUAN Yun-Bin¹

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 In recent years, the Global Navigation Satellite System (GNSS) signals with extensive spatial coverage and temporal continuity have become an important source for ionosphere study. Determination of the ionospheric observables is the first step for GNSS-based ionosphere study, which is commonly done by combining the geometry-free linear combinations of carrier phase and code observations with leveling process to generate the so-called Leveled Ionospheric Observables (LIOs). However, the leveling process is vulnerable to the length of continuous satellite arc and receiver dependent model errors (e. g. multipath effects and measurement noise). In this paper, a strategy for determining the ionospheric observable with Precise Point Positioning (PPP) is proposed, and the resulted PPP Ionospheric Observables (PIOs) have coincidentally identical forms with the LIOs. Different from the leveling process, the available IGS satellite orbits/clocks can be utilized by the PPP to effectively reduce the unknowns that have to be estimated, thus

improving the accuracy of generation of ionospheric observables. Based on the short- and zero-baseline experiments, the improving reliability of PIOs with respect to LIOs is verified from comparing the spread of the between-receiver single difference of both ionospheric observables corresponding to different satellite arcs; in the cases of two representative days, the effect of receiver dependent model errors on the LIOs is respectively reduced to 44.4% and 35.7% of that on PIOs, which reveals that the PIOs would be more beneficial for ionosphere modeling and prediction.

Keywords Global Navigation Satellite System (GNSS), Leveling process, Precise point positioning (PPP), Single difference between receivers, Ionospheric observable

1 引言

在过去的数十年间,利用 GNSS 研究电离层的工作广泛开展^[1~14],以 IGS (International GNSS Service) 为例,该组织联合若干电离层工作组,采用全球范围测站的双频 GNSS 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(Global Ionosphere Map, GIM)^[8,9],该产品可为与电离层有关的空间大气研究提供重要参考;此外,部分 GNSS 增强系统如美国的 WAAS、欧盟的 EGNOS 等亦需要实时或近实时模型化局部区域的电离层,以辅助部分单频导航定位用户实现快速、可靠的定位应用^[10~13];在高精度网络 RTK(实时动态定位)应用中,部分学者利用固定整周模糊度的双差相位观测值计算电离层延迟^[14],进而实时模型化,以有效辅助参考站间或用户站的快速模糊度固定和高精度导航定位。

有效分离观测数据中所包含的电离层延迟信息,即从 GNSS 观测数据中获取高精度的“电离层观测值 (Ionospheric Observables)”^[11,12],是利用 GNSS 研究电离层的先决条件。目前,基于双(多)频 GNSS 观测数据计算电离层观测值的方法主要包括:

(1) 利用无几何影响组合的码观测值计算电离层观测值(称之为“伪距电离层观测值”):其中包含了测站、卫星的仪器偏差和电离层延迟^[6];

(2) 利用无几何影响组合的相位观测值计算电离层观测值(称之为“相位电离层观测值”):其中包含了模糊度参数和电离层延迟^[11,12];

(3) 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“平滑电离层观测值”),其形式与伪距电离层观测值相同^[1~7];

(4) 利用双差模糊度固定的相位观测值计算电

离层观测值(称之为“双差电离层观测值”),其中仅包含了双差形式的电离层延迟^[10]。

上述 4 类电离层观测值的特点可分别概括如下:(1) 伪距电离层观测值易受较强的与测站有关的误差(如观测噪声、多路径效应等)影响,精度与可靠性较差;(2) 相位电离层观测值中模糊度参数较多,使得模型化过程中容易出现观测方程空间结构不强、病态问题等不利条件,尤其是当观测数据较少时,模型估值的可靠性将受到严重影响^[15];(3) 双差电离层观测值一般仅适用于局部较小范围内的电离层建模等研究,然而对于较大乃至全球范围内的电离层研究而言,各测站之间基线长度较长,双差模糊度固定较为困难,影响了双差电离层观测值的求解精度和可靠性;(4) 平滑电离层观测值可有效克服上述不利影响,利于电离层和站星仪器偏差的研究^[6,11,13];在目前绝大多数利用 GNSS 研究电离层的工作中,一般均基于平滑电离层观测值。

然而,文献[11]和[12]的研究结果表明,平滑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:基于零基线和短基线实验,通过考察各连续弧段间、平滑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,且主要来源于 GNSS 码观测值的多路径效应。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。

为消除上述误差的不利影响,本文提出利用 PPP 计算电离层观测值(称之为“PPP 电离层观测值”,形式与平滑电离层观测值一致)的思路,与相位平滑伪距方法相比,PPP 可合理利用 IGS 发布的高精度卫星轨道、钟差产品,以有效减少待估未知参数,从而提高电离层观测值的估计精度。基于全球范围内若干对零基线和短基线实验,对比分析了两类

电离层观测值的站间单差结果在不同弧段间的离散性,结果表明,PPP 电离层观测值受测站有关的误差影响较小,精度和可靠性较高,有利于高精度电离层建模和站星仪器偏差性质的研究。

2 电离层观测值

本节首先介绍了 PPP 算法,包括观测方程、参数估计和质量控制策略等,重点推导了 PPP 电离层观测值的具体形式。随后,简要介绍了联合无几何影响组合的码和相位观测值计算平滑电离层观测值的步骤,分别分析了两类电离层观测值估计策略的本质差异和可能的误差影响因素。

2.1 PPP 电离层观测值

标准 PPP 算法一般利用消电离层组合的码和相位观测值作为基本观测量,电离层延迟量事先在观测域中消除^[16];为便于利用 PPP 算法计算电离层观测值,本文对标准 PPP 算法进行了部分改进,主要包括:(1)采用 GNSS 双频原始的码和相位观测值作为基本观测量;(2)将 L1 频率上的站星视线方向电离层延迟连同测站位置、接收机钟差、天顶对流层延迟等参数一起估计。由于该 PPP 算法中采用非组合观测值,故文献[17]中亦称之为“非组合 PPP 算法”。

GNSS 原始观测值的线性化方程可表示为:

$$\begin{aligned} p_{r,j}^s(i) &= -\boldsymbol{\mu}_r^s(i) \cdot \Delta \mathbf{r} + m f_r^s(i) \cdot Z(i) + dt_r(i) \\ &\quad - dt^s(i) + \mu_j \cdot I_{r,1}^s(i) - B_{r,j}^s + B_{r,j} + \varepsilon_p(i), \\ \phi_{r,j}^s(i) &= -\boldsymbol{\mu}_r^s(i) \cdot \Delta \mathbf{r} + m f_r^s(i) \cdot Z(i) + dt_r(i) \\ &\quad - dt^s(i) - \mu_j \cdot I_{r,1}^s(i) + \lambda_j \cdot M_{r,j}^s + \varepsilon_\phi(i), \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $p_{r,j}^s(i)$ 和 $\phi_{r,j}^s(i)$ 分别表示历元 i 测站 r 至卫星 s 第 j 个频率“观测减计算”的码、相位观测值,其中站星距近似值、相位缠绕、潮汐效应、卫星与接收机天线相位中心偏差及变化等均已改正; $\boldsymbol{\mu}_r^s(i)$ 为测站到卫星的单位方向矢量; $\Delta \mathbf{r}$ 为测站近似位置的改正数; $m f_r^s(i)$ 表示天顶对流层延迟 $Z(i)$ 的投影函数; $dt_r(i)$ 和 $dt^s(i)$ 分别表示接收机和卫星钟差; $M_{r,j}^s = N_{r,j}^s + \delta_{r,j} - \delta_{r,j}^s$ 为站星初始相位偏差 $\delta_{r,j}$ 、 $\delta_{r,j}^s$ 以及非差整周模糊度 $N_{r,j}^s$ 的合并项; $B_{r,j}^s$ 、 $B_{r,j}$ 分别为与卫星和接收机频率有关的硬件延迟; $I_{r,1}^s(i)$ 表示第 1 个频率站星视线方向的电离层延迟,鉴于电离层的弥散效应,该延迟对不同频率观测值的影响具有如下的关系:

$$I_{r,j}^s(i) = \mu_j \cdot I_{r,1}^s(i); \mu_j = \lambda_j^2 / \lambda_1^2, \quad (2)$$

其中 λ_j 表示频率 j 相位观测值的波长。

PPP 的实施过程中,一般采用 IGS 发布的精密星历和钟差产品,卫星钟差的具体形式为:

$$dt_r^s(i) = dt^s(i) + \frac{\mu_2}{\mu_2 - 1} \cdot B_{r,1}^s - \frac{1}{\mu_2 - 1} \cdot B_{r,2}^s, \quad (3)$$

其中, $dt_r^s(i)$ 表示卫星钟差的 IGS 发布值,其与 $dt^s(i)$ 之间存在一个系统偏差,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的卫星硬件延迟影响。

显然,当利用 IGS 钟差产品改正式(1)中的观测值时,将不可避免地引入卫星硬件延迟参数,将部分线性相关的参数,如 $B_{r,j}^s$ 、 $B_{r,j}$ 、 $I_{r,1}^s(i)$ 、 $dt_r(i)$ 和 $M_{r,j}^s$ 进行合并,所有的硬件延迟参数将被 $I_{r,1}^s(i)$ 、 $dt_r(i)$ 和 $M_{r,j}^s$ 吸收,可估的电离层延迟可表示为:

$$i_r^s = \beta + (B_r - B^s), \quad (4)$$

其中 $\beta = I_r \cdot (1 - \mu_2)$, $B^s = B_{r,2}^s - B_{r,1}^s$ 和 $B_r = B_{r,2} - B_{r,1}$ 分别为卫星和测站的仪器偏差,限于篇幅,包含站星硬件延迟影响的接收机钟差和模糊度参数的具体形式此处不再列出。

假定在历元 i ,测站 r 同时观测到 m 颗卫星,所有卫星的观测方程可联合表示为:

$$\mathbf{y}(i) = \mathbf{A}(i) \cdot \mathbf{X}(i) + \boldsymbol{\varepsilon}_y, \boldsymbol{\varepsilon}_y \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{Q}_y), \quad (5)$$

其中:

$$\mathbf{y}(i) = \begin{bmatrix} [\mathbf{P}_1(i)^T, \mathbf{P}_2(i)^T]^T \\ [\boldsymbol{\Phi}_1(i)^T, \boldsymbol{\Phi}_2(i)^T]^T \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_j(i) = [\Delta p_{r,j}^1(i), \dots, \Delta p_{r,j}^m(i)]^T, \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\Phi}_j(i) = [\Delta \phi_{r,j}^1(i), \dots, \Delta \phi_{r,j}^m(i)]^T, \quad (8)$$

对于双频观测而言, $\mathbf{y}(i)$ 中包含了 $4m$ 个观测值;观测误差 $\boldsymbol{\varepsilon}_y$ 服从正态分布,其均值和协方差矩阵分别为 $\mathbf{0}$ 和 \mathbf{Q}_y ,设计矩阵 $\mathbf{A}(i)$ 和待估参数 $\mathbf{X}(i)$ 的具体形式分别为:

$$\mathbf{A}(i) = \begin{bmatrix} [\mathbf{e}_2] \otimes \mathbf{B}(i), & [\mathbf{e}_2] \otimes \mathbf{e}_m, & \begin{pmatrix} \boldsymbol{\mu} \\ -\boldsymbol{\mu} \end{pmatrix} \otimes \mathbf{I}_m, & \begin{pmatrix} \mathbf{0}_2 \\ \boldsymbol{\Gamma} \end{pmatrix} \otimes \mathbf{I}_m \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{B}(i) = \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\mu}_r^1(i) & m f_r^1(i) \\ \vdots & \vdots \\ -\boldsymbol{\mu}_r^m(i) & m f_r^m(i) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\mathbf{X}(i) = [\Delta r^T(i), Z(i), d_r^T(i), \mathbf{u}_r^{s,T}(i), \overline{M}_{r,j}^{s,T}]^T \quad (s = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2), \quad (11)$$

其中, \otimes , \mathbf{I}_m 和 \mathbf{e}_2 分别表示克罗内克积, m 维单位矩

阵以及各元素均为 1 的 2 维列向量; \mathbf{F} 为 2 维对角阵, 其对角元为不同频率 GPS 观测值的波长因子:

$$\mathbf{F} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2), \quad (12)$$

式(11)中各参数的含义分别为:接收机近似位置改正数、测站天顶对流层延迟、参数合并后的接收机钟差、PPP 电离层观测值以及双频模糊度参数。

\mathbf{Q}_y 可用于衡量各类观测值的精度及其相关性, 若仅考虑观测值标准差的高度角相关性并忽略各类观测值之间可能的交互相关及时间相关性, 此时 \mathbf{Q}_y 为一个对角矩阵, 其对角元可以表示为:

$$Q_{ii} = \frac{\sigma_0^2}{\sin^2(E_r^s)}, \quad (13)$$

其中 E_r^s 为每颗卫星的高度角, σ_0 是天顶方向观测值的标准差, 对于码和相位观测值而言, 其值可分别选取为 3 dm 和 3 mm。

为确保 PPP 实施中部分近似线性相关参数, 如电离层、接收机钟差和模糊度, 以及天顶对流层延迟与坐标天顶分量之间的可分离性, 接下来的实验分析均基于单天的观测数据, 卫星截止高度角选取为 5° , 并采用正反滤波相结合的参数估计方法。对于可能存在的模型误差, 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^[18] 以克服其对参数估值的不利影响。此外, 通过选取与观测数据采样间隔一致的 CODE (Centre for Orbit Determination in Europe) 钟差产品, 避免卫星钟差内插所引起的误差影响。

2.2 平滑电离层观测值

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如下:

$$L_{I,\text{arc}} = L_1 - L_2 = \beta + (\lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2) + \epsilon_L, \quad (14)$$

$$P_{I,\text{arc}} = P_2 - P_1 = \beta - B_r - B^s + \epsilon_P, \quad (15)$$

其中 $P_{I,\text{arc}}$ 和 $L_{I,\text{arc}}$ 分别表示某连续弧段的伪距和相位电离层观测值, 下标 1 和 2 表示对应频段, ϵ 表示观测噪声和多路径效应。

联合式(14)和(15), 可利用下式计算得到平滑电离层观测值:

$$\begin{aligned} \tilde{L}_{I,\text{arc}} &= L_{I,\text{arc}} - \langle L_{I,\text{arc}} - P_{I,\text{arc}} \rangle_{\text{arc}} \\ &= \beta - B_r - B^s - \langle \epsilon_P \rangle_{\text{arc}} + \epsilon_L, \end{aligned} \quad (16)$$

其中 $\langle \rangle_{\text{arc}}$ 表示对连续弧段内观测值取平均过程。

经由上述的推导可知, PPP 和相位平滑伪距算法估计得到的电离层观测值形式相同, 但其本质差异在于如何处理式(1)观测方程中所含的与频率无

关项, 如站星距、对流层延迟、钟差等; PPP 实施过程中, 利用 IGS 发布的卫星轨道和钟差产品改正 GNSS 观测值, 则可估的与频率无关项仅剩余测站位置、天顶对流层延迟以及接收机钟差; 而对于相位平滑伪距算法而言, 通过采用观测值作差的方式消除与频率无关项, 等价于将所有的频率无关项合并成一个时变参数加以估计, 由此显著增加了未知参数, 且造成了可用信息的浪费。

$\tilde{L}_{I,\text{arc}}$ 将不可避免地受到 ϵ_P 的直接影响; 式(16)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。相比较而言, 利用 PPP 估计电离层观测值中, 通过采用合理的观测值加权(如根据高度角)和滤波数据处理策略, 可得到各历元估值的全局最优解, 这对于削弱甚至消除上述与测站有关的观测误差而言, 具有积极的作用。在随后的实验分析中, 为避免低高度角观测值中较强误差的影响, 计算平滑电离层观测值时, 截止高度角将选取为 15° 。

3 实验分析

若两台同步观测的 GNSS 接收机之间距离较短, 如不超过 10 m, 即可称之为短基线观测, 在此条件下, 两接收机至同一卫星观测值中所包含的大气延迟、卫星相关的误差影响等均相同, 故站间单差结果中将仅包含与测站有关的部分误差, 如多路径效应, 观测噪声等。而对于零基线实验而言, 两台接收机接收来自同一个天线的 GNSS 观测信号, 故上述单差过程亦可以消除多路径效应, 而仅余观测噪声的影响。两类实验在 GNSS 数据质量分析中, 有着较为广泛的应用, 如基于短基线实验分析多路径效应、基于零基线实验分析各种观测值的噪声性质等^[19]。

以全球范围内若干对零基线和短基线实验为例, 通过对式(4)或(16)中的电离层观测值实施站间单差, 可完全消除其所含的 β 和 B^s , 而仅余基线两端接收机的仪器偏差差值。若上述电离层观测值不受任何误差的影响, 则其对应于不同卫星的站间单差结果将“完美”地重合在一起; 反之, 即表明对应的电离层观测值中存在误差。因此, 不同卫星单差结果的离散程度, 即可用于量化电离层观测值中的误差影响。

在接下来的分析中, 首先利用短基线实验, 考察了两种与测站有关的误差(多路径效应和观测噪声)

对两类电离层观测值的综合影响;同时,通过比较平滑电离层观测值和伪距电离层观测值单差结果的相关性,证明了平滑电离层观测值中的误差源主要为伪距电离层观测值所包含的强多路径效应;随后,基于零基线实验,单独考察了观测噪声对两类电离层

观测值的影响;最后,综合比较了两类基线实验结果.

各基线实验要素描述如表 1 所示,其中 SHA1-SHA2 为短基线实验,两测站间的距离为 1.7 m,其余均为零基线实验.

表 1 本文中所采用的短基线和零基线实验要素描述
Table 1 Description of short- and zero-baselines used in this paper

测站名	接收机类型	天线类型	经纬度	观测时段	采样间隔
SHA1	MT301332137	(93251)	112.5°E, 30.7°N	2009, days 200~205	5 s
	TPS LEGACY	TRM29659.00			
SHA2	MT311031202	(82078)			
	TPS LEGACY	TRM41249.00			
ADE1	1	(85402)	138.6°E, 34.7°S	2008, days 315~320	30 s
	ASHTECH Z-XII3	ASH700936B_M			
ADE2	2	(85402)			
	ASHTECH Z-XII3	ASH700936B_M			
OHI1	AECFDJ1KK5C	(414U)	57.9°W, 63.3°S		
	JPS E_GGD	AOAD/M_T			
OHI2	AG8ZL5K4FLS	(CRL)			
	TPS E_GGD	2199911002 ASH701941. B			
PRE1	1	(85402)	28.2°E, 25.7°S,		
	ASHTECH Z-XII3	ASH700936B_M			
PRE2	2	(85402)			
	ASHTECH Z-XII3	ASH700936B_M			

3.1 短基线实验

该实验共包含了连续 6 天的观测数据,图 1 分别给出了年积日 203 & 204/09 两类电离层观测值的站间单差计算结果(为便于比较,纵轴取值范围选取一致,后文同).上述两天的结果具有代表性:较之其余 4 天,平滑电离层观测值单差结果分别具有最大和最小的弧段间差异;对于年积日 203/09 而言,上述差异最大可达 4 TECu(未考虑部分异常值,原因在于较短的平滑弧段),由此引起的各测站平滑电离层观测值误差约为 $(4/\sqrt{2})/2 \approx 1.4$ TECu(假定两测站电离层观测值不存在统计相关性,误差显著性水平取为 95%,此时极限误差等于 2 倍中误差);而 PPP 电离层观测值单差结果弧段间最大差异仅为 1.5 TECu,且不存在较短弧段异常值的影响,相应的各测站电离层观测值误差约为 $(1.5/\sqrt{2})/2 \approx 0.5$ TECu;而年积日 204/09 的计算结果中,两种电离层观测值单差结果弧段间最大差异分别为 2.5 和 1 TECu,相应的各测站两类电离层延迟观测值误差则分别为 0.9 和 0.4 TECu.上述两天的实验表明,较之平滑电离层观测值,测站有关的误差对 PPP 电离层观测值的影响可分别降低 55.6% 和 64.3%.

文献[12]指出,平滑电离层观测值单差结果各

卫星弧段间差异较大,其原因可能在于伪距电离层观测值的影响,本文对此进行了分析.图 2 列出了与图 1 结果相对应的伪距电离层观测值的站间单差值,其中,为避免部分较强码随机误差的影响,且有效保留功率谱密度峰值约为 0.003 Hz(经由谱分析发现)的信号,图 2 中的结果已事先采用窗宽为 2.5 min 的低通滤波器消噪.

对比图 2 中的伪距电离层观测值与图 1 中平滑电离层观测值可发现,尽管图 2 中的结果依然残存部分较强随机噪声影响,但两者之间仍具有较一致的趋势和某种程度上的类似性:图 2 中存在显著整体“跳变”的时段恰对应于图 1 中平滑电离层观测值结果的异常变化时段(UT 6:00~10:00),进而表明平滑电离层观测值中较大的弧段差异主要源于伪距电离层观测值的主要趋势项部分,即多路径效应.相比较而言,PPP 电离层观测值受该伪距电离层观测值的影响并不明显,原因在于两者变化特征之间的相关性不显著.

3.2 零基线实验

零基线实验条件下,两种电离层观测值的单差结果中均不再包含多路径效应的影响,各弧段之间的差异主要源于观测噪声的影响.

图 3 中分别给出了 ADE1-ADE2 年积日 315/08

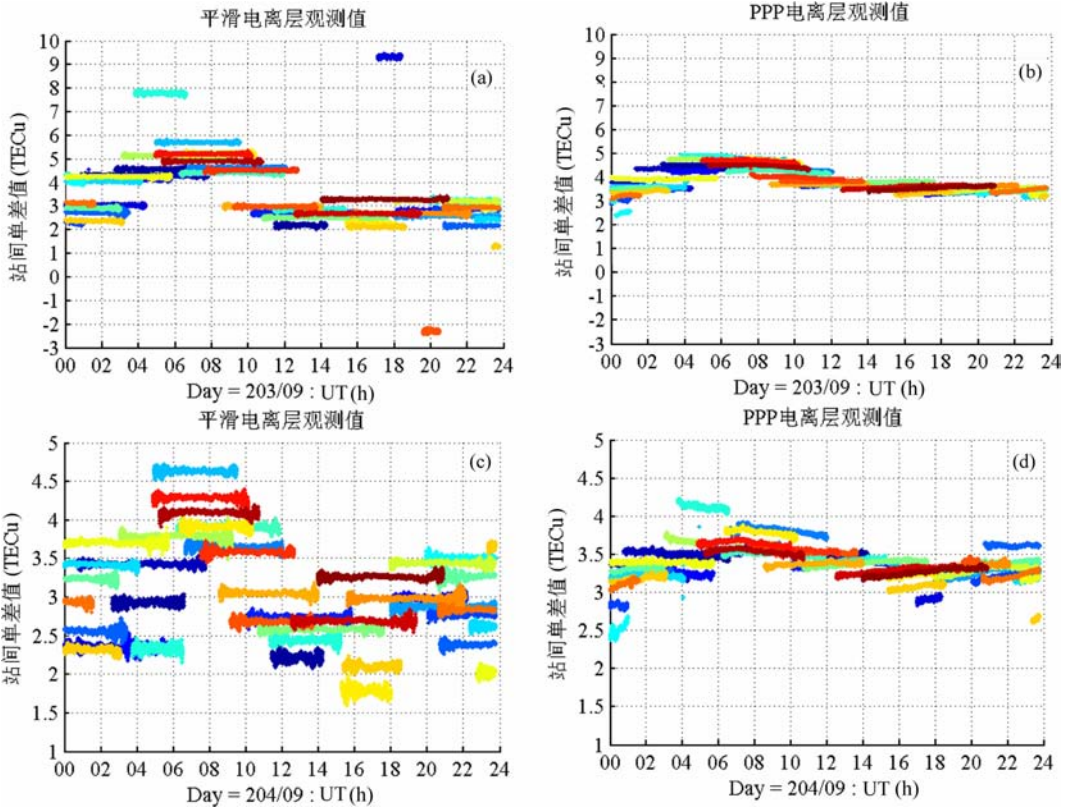


图 1 平滑电离层观测值(左图)和 PPP 电离层观测值(右图)站间单差结果
(不同颜色代表不同卫星),年积日 203/09(上图)和 204/09(下图)

Fig. 1 Between-receiver single difference of leveled (left panels) and PPP-based (right panels) ionospheric observables (different colors correspond to different satellites) for day 203/09 (upper panels) and 204/09 (bottom panels)

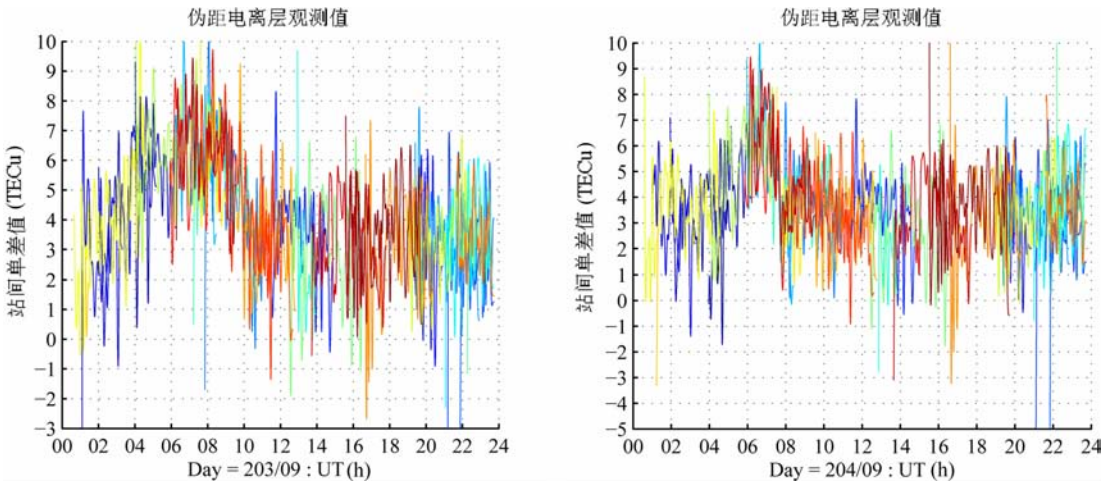


图 2 低通滤波后的伪距电离层观测值站间单差结果(不同颜色代表不同卫星),
分别对应于图 1 中年积日 203/09(左图)和 204/09(右图)的结果

Fig. 2 Low-pass filtered single differences of code-delay ionospheric observables (different colors correspond to different satellites) analogous to left panels of Fig. 1 for day 203/09 (left panel) and 204/09 (right panel)

和 PRE1-PRE2 年积日 320/08 两种电离层观测值的单差计算结果,对应的弧段间差异在 1.25 和 0.75 TECu 之间,PPP 电离层观测值弧段间差异小于平滑电离层观测值,但两者之间的差别不如短基

线实验结果显著.值得一提的是,部分时刻存在较为离散的 PPP 电离层观测值,其原因在于低高度角 GNSS 观测值(如 5°左右)中较强噪声的影响.

综合比较零基线和短基线的实验结果可知,利

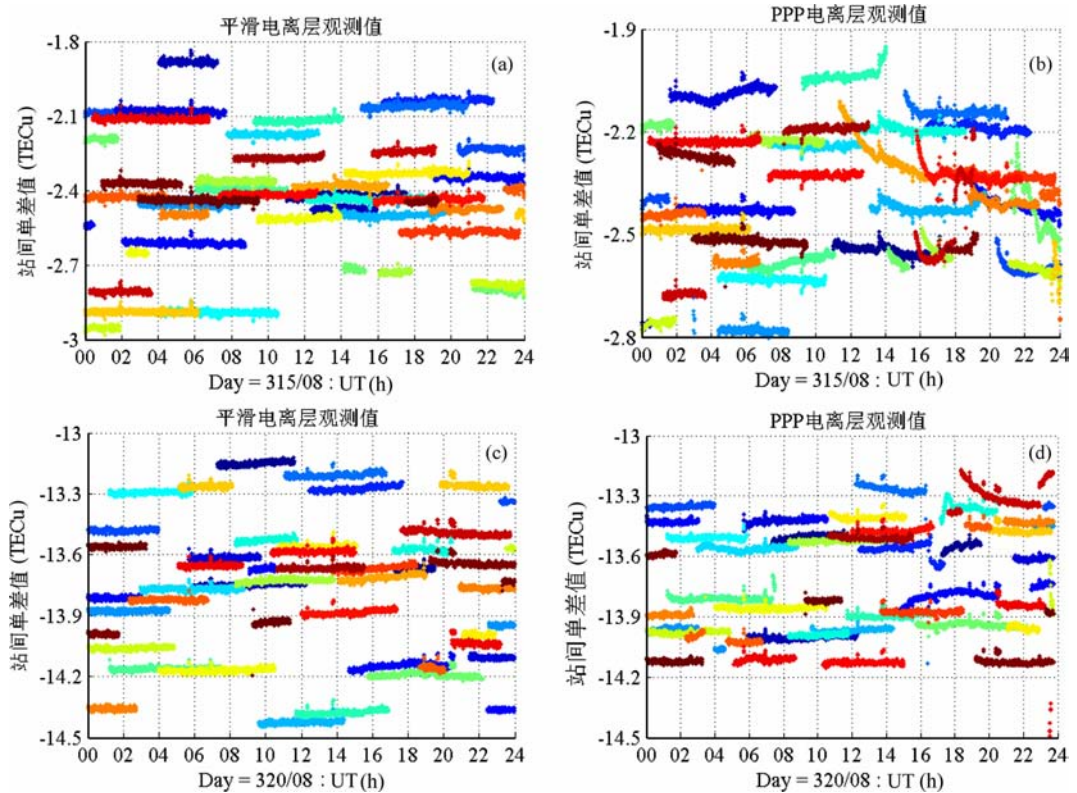


图3 平滑电离层观测值(左图)和PPP电离层观测值(右图)站间单差结果(不同颜色代表不同卫星), (上图)年积日 315/08, ADE1-ADE2; (下图)年积日 320/08, PRE1-PRE2.

Fig. 3 Between-receiver single difference of leveled (left panels) and PPP-based (right panels) ionospheric observables (different colors correspond to different satellites). Upper panels: Day 315/08, ADE1-ADE2; Bottom panels: Day 320/08, PRE1-PRE2.

用PPP技术计算电离层观测值的方法可同时削弱多路径效应和观测噪声所引起的误差影响,使得提取得到的电离层观测值具有较之平滑伪距技术更高的可靠性,具体表现为:平滑电离层观测值的站间单差结果中,由于上述两种误差所引起的各卫星弧段间较为明显的离散性,在PPP电离层观测值单差结果中被显著削弱,进而得到了更为符合实际的结果。

由于测站有关的误差与GNSS接收机的观测环境以及天线类型有关,上述试验中两种电离层观测值的误差量级及比较结果仅为具有代表性的例子;对不同的测站而言,电离层观测值误差量级的大小须采用实际观测数据进行实验分析和验证,还无法对其绝对大小给出一般性的定量描述,但本文对两种电离层观测值的比较结论,具有普适性。

4 结论与展望

本文提出并推导了基于PPP算法计算电离层观测值的方法,并分别设计零基线和短基线实验,验证了计算结果的可靠性。对比分析的结果表明,平滑

电离层观测值较易受多路径效应和观测噪声的影响,而利用PPP算法则可大大削弱上述两种误差的影响,具有更高的精度和可靠性,推荐采用这种形式的电离层观测值作为研究电离层的基础。

在未来的工作中,针对部分较易发生电离层异常的区域,如赤道或极区等,考虑利用PPP电离层观测值对该区域的电离层作进一步的精化研究,可望得到更为符合实际的结果,进而为该地区空间大气分析等,提供有意义的参考。

受IGS发布的星历和钟差产品时效性影响,本文介绍的计算电离层观测值的方法目前仅适用于事后的电离层精密研究;若卫星钟差可利用区域参考站网的观测数据计算并实时播发^[20],则可将本文方法计算得到的电离层观测值应用于区域电离层的实时模型化,进而有效满足单频用户的导航和定位应用。

参考文献 (References)

- [1] 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. 地球物理学报, 2000, 43(4): 451~458
Zhang D H, Xiao Z. A method of calculating TEC with GPS

- data and its application to the ionospheric disturbance. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, **43**(4): 451~458
- [2] 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. *空间科学学报*, 2000, **20**(2): 97~102
Xiao Z, Zhang D H. An approach to study the day-to-day variations of ionospheric TEC directly by GPS time-delay signal. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 2000, **20**(2): 97~102
- [3] 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. *地球物理学报*, 2001, **44**(5): 596~601
Chang Q, Zhang D H, Xiao Z, et al. A method for estimating GPS instrumental biases and its application in TEC calculation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, **44**(5): 596~601
- [4] 余 涛, 万卫星, 刘立波等. 利用 IGS 数据分析全球 TEC 的周年和半年变化特征. *地球物理学报*, 2006, **49**(4): 943~949
Yu T, Wan W X, Liu L B, et al. Using IGS data to analysis the global TEC annual and semiannual variation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(4): 943~949
- [5] 余 优, 万卫星, 刘立波等. 全球电离层 TEC 起伏特性分析. *地球物理学报*, 2009, **52**(9): 2189~2194
Yu Y, Wan W X, Liu L B, et al. A global ionospheric TEC perturbation index. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(9): 2189~2194
- [6] Yuan Y B, Huo X L, Ou J K. Models and methods for precise determination of ionospheric delay using GPS. *Progress in Natural Science*, 2007, **17**(2): 187~196
- [7] Brunner F K, Gu M. An improved model for dual frequency ionospheric correction of GPS observations. *Manuscripta Geodaetica*, 1991, **16**(3): 205~214
- [8] 李志刚, 程宗颐, 冯初刚等. 电离层预报模型研究. *地球物理学报*, 2007, **50**(2): 327~337
Li Z G, Cheng Z Y, Feng C G, et al. A study of prediction models for ionosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(2): 327~337
- [9] Dow J M, Neilan R E, Gendt G. The international GPS service (IGS): celebrating the 10th anniversary and looking to the next decade. *Advances in Space Research*, 2005, **36**(3): 320~326
- [10] Schaer S, Beutler G, Mervart L, et al. Regional ionosphere models using the GPS double difference phase observable. In: Proceedings of the IGS Workshop on Special Topics on New Directions. Potsdam, Germany, 1995. 77~92
- [11] Brunini C, Azpilicueta F J. Accuracy assessment of the GPS-based slant total electron content. *Journal of Geodesy*, 2009, **83**(8): 773~785
- [12] Ciruolo L, Azpilicueta F J, Brunini C, et al. Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS. *Journal of Geodesy*, 2007, **81**(2): 111~120
- [13] 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. *Radio Science*, 1994, **29**(3): 577~586
- [14] Zhang B C. Determination of un-differenced atmospheric delays for network-based RTK. In: Proceedings of Institute of Navigation GNSS 2009. Savannah, USA, 2009. 2727 ~ 2740
- [15] 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. *测绘学报*, 2004, **33**(4): 283~288
Ou J K. Uniform expression of solutions of ill-posed problems in surveying adjustment and the fitting method by selection of the parameter weights. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 2004, **33**(4): 283~288
- [16] Zhang X H, Forsberg R. Assessment of long-range kinematic GPS positioning errors by comparison with airborne laser altimetry and satellite altimetry. *Journal of Geodesy*, 2007, **81**(3): 201~211
- [17] 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. *测绘学报*, 2010, **39**(5): 478~483
Zhang B C, Ou J K, Yuan Y B, et al. Precise Point Positioning (PPP) algorithm based on original dual-frequency GPS code and carrier-phase observations and its application. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, **39**(5): 478~483
- [18] Teunissen P J G, Salzmann M A. A recursive slippage test for use in state-space filtering. *Manuscripta Geodaetica*, 1989, **14**: 383~390
- [19] Amiri-Simkooei A R, Tiberius C C J M. Assessing receiver noise using GPS short baseline time series. *GPS Solution*, 2007, **11**(1): 21~35
- [20] 张小红, 李星星, 郭 斐等. 基于服务系统的实时精密单点定位技术及应用研究. *地球物理学报*, 2010, **53**(6): 1308~1314
Zhang X H, Li X X, Guo F, et al. Sever-based real-time precise point positioning and its application. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(6): 1308~1314

(本文编辑 胡素芳)