

顾及电离层延迟高阶项改正的精密单点定位

张小红¹ 任晓东¹ 郭 斐¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:给出了顾及电离层二阶项和三阶项延迟改正的非差精密单点定位(precise point positioning, PPP)模型。利用全球均匀分布的 38 个 IGS 跟踪站,对比分析了不同纬度、不同电离层环境下电离层高阶项延迟对 GNSS 观测值以及静态 PPP 解算的影响。实验结果表明,电离层高阶项延迟对低纬度地区的静态 PPP 的定位结果影响最为显著,可达 3~5 mm;而对高、中纬度的影响则较小,分别为亚 mm 和 mm 级水平;且其影响主要体现在南北(N)方向,呈向南偏移的趋势,尤其是在低纬度地区,该分量可达 3 mm 以上,是 E 方向和 U 方向的 2~3 倍。此外,电离层活跃程度对定位结果也有一定影响,其活跃期影响值相对于平静期影响值高 20%~30%。

关键词:电离层高阶项延迟;精密单点定位;精度;纬度

中图分类号:P228.41

精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术具有无需地面基准站、无需同步观测、作业机动灵活、节约用户成本、定位精度高且不受作业距离限制等优点,已成为当前卫星导航定位技术领域的热点研究方向之一,在低轨卫星精密定轨、航空测量、海洋测绘等诸多领域得到广泛应用^[1-5]。目前,随着 IGS 发布的事后产品精度的不断提高以及各种误差改正模型的不精化,PPP 双频静态单天解的定位精度可达到 mm 级^[6-9],在地球动力学和地震学等需要 mm 级定位精度的地学研究中的应用中得到了越来越广泛的关注。当前双频 PPP 定位主要采用双频消电离层组合定位模型,该模型能消除电离层延迟低阶项的影响,而忽略了电离层高阶项的影响。因此,在 PPP 定位模型越来越精化的情况下,对于利用 GPS 观测数据研究固体地球物理信号(如冰后回弹、板块运动、地球潮汐等)的地学应用来说,为了准确提取 mm 量级的地球物理信号,电离层高阶项误差对 GPS 定位的影响不能被忽略。目前,已有学者对电离层二阶项与三阶项延迟进行了相关研究^[10-12],但是研究主要针对电离层高阶项对 GPS 观测值的影响,对定位结果的影响主要集中在相对定位中,而对精密单点定位和不同电离层

环境下电离层高阶项的影响还有待进一步研究。

因此,本文首先给出了顾及电离层延迟高阶项的非差 PPP 定位模型,并用大量的实测数据分析了不同地理纬度地区以及不同电离层环境下电离层延迟高阶项对组合观测值 L_3 和 PPP 静态定位精度的影响。

1 顾及电离层高阶项(二阶项、三阶项)的 PPP 定位模型

在 GNSS 定位中,顾及电离层高阶项影响的相位和伪距观测方程可表示为^[13-15]:

$$P_i = \rho + \frac{p}{f_i^2} + \frac{q}{f_i^3} + \frac{t}{f_i^4} + \xi_P \quad (1)$$

$$L_i = \rho - \frac{p}{f_i^2} - \frac{q}{2f_i^3} - \frac{t}{3f_i^4} + \lambda_i N_i + \xi_L \quad (2)$$

其中,

$$p = 40.3 \int n_e ds = 40.3 \times \text{TEC} \quad (3)$$

$$q = 2.2566 \times 10^{12} \int n_e B \cos \theta ds \approx 2.2566 \times 10^{12} B \cos \theta \times \text{TEC} \quad (4)$$

$$t = 2437 \int n_e^2 ds + 4.74 \times 10^{22} \int n_e B^2 (1 +$$

收稿日期:2013-05-10。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41074024);国家创新研究群体科学基金资助项目(41021061)。

$$\cos^2 \theta ds \approx 1\,602.749\,1 \times N_m \times \text{TEC} \quad (5)$$

式中, i 表示 GPS 的频率编号; f 表示频率值(即 $f_1 = 1\,575.42$ MHz, $f_2 = 1\,227.6$ MHz); λ 表示波长; N_i 代表频率 L_i 上的整周模糊度; ρ 表示卫星与接收机之间的几何距离; B 是站星连线与电离层薄层的交叉点处的地磁感应强度; θ 是卫星信号矢量与地磁感应强度矢量在电离层交叉点处的夹角; n_e 表示电离层密度; ξ_i 表示未被模型化的残余误差; ds 表示积分路径; N_m 表示在电离层高度 h 时的最大电子量; TEC 表示电子总含量。

对于双频 PPP, 通常采用式(6)、(7)所示的双频消电离层组合的方式消除电离层一阶项($1/f^2$)延迟的影响。由式(6)、(7)可知, 组合后的观测值(P_3 或 L_3)并没有消除电离层高阶项的影响。

$$P_3 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_2 = \quad (6)$$

$$\rho - 2\Delta I_2 - 3\Delta I_3 - \xi_p$$

$$L_3 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_2 = \quad (7)$$

$$\rho + \Delta I_2 + \Delta I_3 + \lambda_1 \cdot N_c - \xi_L$$

其中,

$$\Delta I_2 = \frac{q}{2f_1 f_2 (f_1 + f_2)}$$

$$\Delta I_3 = \frac{t}{3f_1^2 f_2^2}$$

$$N_c = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} N_1 - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} N_2$$

式中, ΔI_2 、 ΔI_3 分别为电离层二阶项和三阶项延迟; N_c 表示组合模糊度。由此, 联合式(6)、(7)可进行顾及电离层高阶项改正的高精度 PPP 定位。

在计算电离层高阶项延迟时, 需要得到 TEC 值和地磁感应强度 B 及其与卫星信号间的夹角 θ 。目前, 计算 TEC 值的常用方法有伪距法、相位平滑伪距法和全球电离层格网(GIM)模型法^[16-17]。地磁感应强度 B 的计算可参考国际地磁标准参考场 IGRF 模型(包括 IGRF11 和 IGRF11)和同心倾斜磁偶极子模型^[18]。

2 实验与分析

2.1 实验数据及处理策略

实验数据选取全球均匀分布的 38 个 IGS 连续跟踪站 2012-03-01(电离层平静期)和 2012-03-09(电离层活跃期)2 d 的静态观测数据, 数据采样率为 30 s, 其测站分布如图 1 所示。在计算电离层高阶项延迟时, 所需要的电离层 TEC 值采用

欧洲定轨中心(CODE)提供的全球电离层格网模型内插得到, 并利用最新的国际地磁场模型 IGRF11 计算电离层交叉点处的地磁感应强度 B 及其与卫星信号间的夹角 θ 。PPP 解算过程中所需的精密星历、精密钟差、天线相位中心改正以及 DCB 等产品均从欧洲定轨中心(CODE)下载得到, 表 1 列出了顾及电离层延迟高阶项的 PPP 数据处理策略。其中, PPP 定位解算采用自主研制的 Trip2.0 软件。

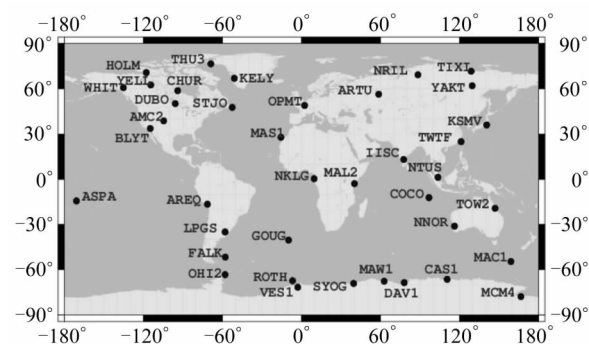


图 1 实验采用的 IGS 测站位置分布图

Fig. 1 Distribution Map of IGS Stations in Experiment

表 1 顾及电离层高阶项延迟的 PPP 数据处理策略

Tab. 1 Processing Strategy of Static PPP with the Ionosphere High Order Delay

类别	参数	模型
观测值	观测量	L_3 、 P_3 组合观测量
	先验约束	P_1 : 1.0 m; L_1 : 0.01 周
	截止角	7°
	观测值加权	$p = 1, e > 30^\circ$; $p = 2 \sin e, e \leq 30^\circ$; $p_{\text{pseudo}}: p_{\text{phase}} = 1: 10\,000$
误差改正	相位缠绕	模型改正
	相位中心偏差	IGS_Q5 模型(考虑 PCO、PCV 改正)
	相对论效应	模型改正
	卫星轨道	精密轨道(采样间隔 15 min)
参数估计	卫星钟差	精密钟差(采样间隔 30 s)
	对流层延迟干分量	模型改正
	电离层一阶项	无电离层组合法消除
	电离层高阶项	模型改正
模糊度	接收机坐标	估计
	接收机钟差	白噪声(每个历元估计一次)
	对流层延迟湿分量	分段常数估计(每 2 h 估计一次)
	模糊度	估计

2.2 电离层高阶项对观测值的影响

在分析电离层高阶项延迟对 PPP 的影响之前, 本文首先分析了电离层二阶项和三阶项对 PPP 定位中用到的无电离层组合观测值 L_3 的影响量级, 并对比分析了 38 个测站在不同电离层活跃度下, 其 L_3 值的影响量。图 2、3 给出了 NTUS 测站(1.34°N, 103.68°E)的结果。

由图 2、3 可以看出,电离层二阶项和三阶项延迟对 NTUS 测站的 L_3 观测值具有较明显的影

响,其二阶项延迟的影响最大可达为 2 cm 左右,而三阶项延迟的影响也达到 4~8 mm。此外,从

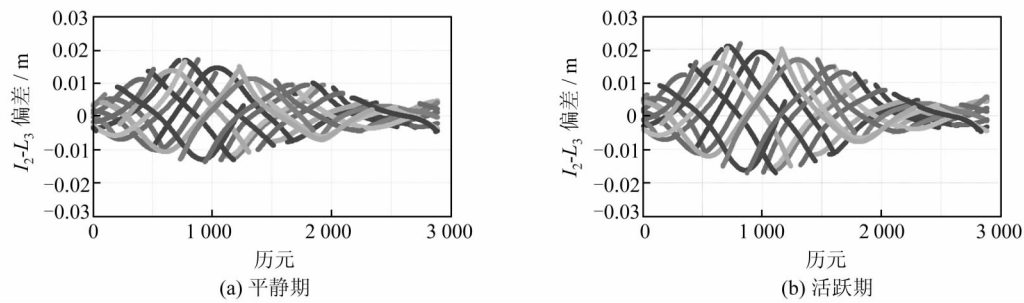


图 2 电离层平静期和活跃期对应的电离层二阶项延迟(ΔI_2)

Fig. 2 Second-order Ionospheric Term Delay During Quiet Period and Active Period(ΔI_2)

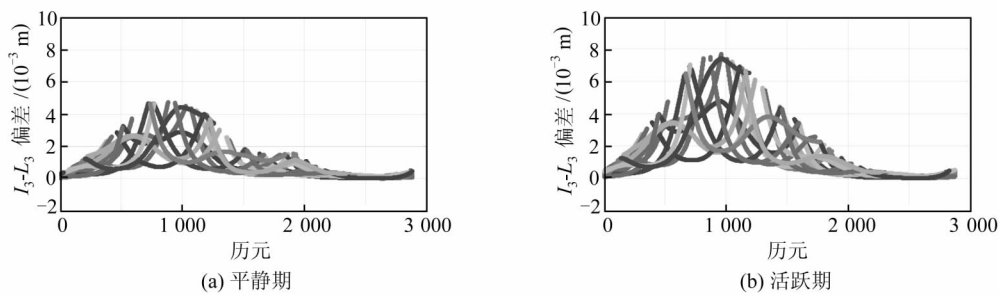


图 3 电离层平静期和活跃期对应的电离层三阶项延迟(ΔI_3)

Fig. 3 Second-order Ionospheric Term Delay During Quiet Period and Active Period (ΔI_3)

图 2、3 中可以明显看出,电离层活跃程度对电离层高阶项延迟具有一定影响,电离层活跃期电离层高阶项对观测值的影响较平静期高 20%~40%。

由于 NTUS 处于低纬度地区,其 TEC 值和地磁感应强度 B 的数值都相对较大,所以其影响量值也较大。其他 37 个 IGS 测站也具有与 NTUS 测站类似的规律,只是各站随纬度增加其量值有所变化,且表现为低纬度地区的影响明显高于中高纬度地区,限于篇幅,本文不再单独列出。

2.3 静态 PPP 实验

为了分析电离层延迟高阶项对静态 PPP 的影响,利用 § 2.1 中所选取数据分别采用顾及和忽略电离层延迟高阶项改正的处理策略进行静态 PPP 解算,得到各站定位结果在 N、E、U 3 个方向上的互差,其结果如图 4 所示。图 4 中,横轴表示依纬度排列的 38 个 IGS 测站;纵轴表示顾及和电离层高阶项改正与未顾及电离层高阶项 PPP 定位结果在 N、E、U 方向的互差。

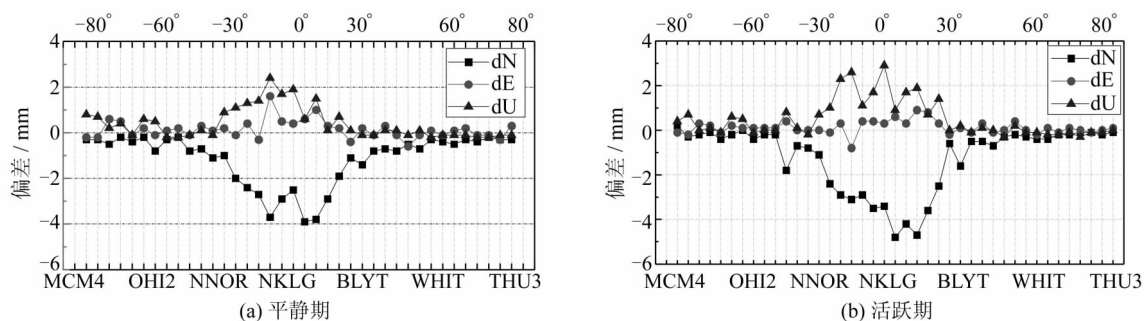


图 4 电离层平静期和电离层活跃期电离层高阶项对不同纬度 PPP 定位的影响

Fig. 4 Impact on PPP in Different Latitudes from High-order Ionospheric Item Delay in Ionospheric Quiet and Active Period

由图 4 可知,电离层高阶项对 PPP 定位结果

的影响具有明显的纬度差异。随着纬度的增加,

其影响量值逐渐减小。从地理位置角度分析,电离层高阶项对低纬度地区($-30^{\circ}\sim 30^{\circ}$)的影响最大,其偏差在 N、E、U 方向分别可达 3~5 mm、1 mm 左右、1~3 mm;而对中高纬度地区影响很小,其 N、E、U 3 个方向仅有亚 mm 级的差异。从对 3 个方向定位影响的角度分析,电离层高阶项影响在 N 方向最为显著,且呈向南偏移的现象;而 E、U 方向虽然在赤道低纬附近也存在一定偏移,但其规律并不明显。此外,对比图 4(a)、4(b)可以发现,在不同的电离层环境下,电离层延迟高阶项对静态 PPP 的影响也有差异,尤其是在低纬度地区,电离层活跃期较平静期的影响更为显著,两者的差异可达到 1~2 mm。因此,为了满足 mm 级的高精度定位需求,在静态 PPP 解算中顾及电离层延迟高阶项改正显得十分必要。此外,本文也分析了电离层高阶项对动态 PPP 解算的影响,但由于目前动态 PPP 解算的精度本身在 cm 到 dm 级,因而电离层高阶项延迟已被噪声淹没,可以不予考虑。

3 结 语

本文在现有电离层组合模型的基础上扩展了顾及电离层延迟高阶项改正的非差 PPP 模型,对比分析了不同地理纬度、不同电离层环境下,电离层高阶项对组合观测值 L_3 以及静态 PPP 定位结果的影响,并得出如下结论。

1) 电离层二阶项和三阶项对组合观测值 L_3 的影响分别达到 cm 级和 mm 级,并且受电离层活跃程度影响,电离层活跃期较平静期的影响在低纬度地区高 20~40%。

2) 电离层高阶项对 PPP 定位结果的影响具有明显的纬度差异。在低纬度地区电离层高阶项会使 PPP 静态定位出现 3~5 mm 的偏差,且主要反映在 N 方向。而随着纬度的增加,其影响减弱,N、E、U 3 个方向仅有亚 mm 级的差异。类似地,电离层活跃期较平静期对定位结果的影响更大。

因此,为了实现 mm 的精密定位,促进 PPP 技术在地壳形变监测、地震灾害预报、板块运动测定等科学研究领域中的应用,必须有效顾及电离层延迟高阶项的影响,尤其是在低纬度地区和电离层活跃期。

参 考 文 献

- [1] Kouba J, Heroux P. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products[J]. GPS Solutions, 2001,5(2):12-28
- [2] Gao Y, Shen X. Improving Ambiguity Convergence in Carrier Phase-based Precise Point Positioning [C]. ION GPS 2001, Salt Lake City, USA, 2001
- [3] Zhang Xiaohong, Andersen O B. Surface Ice Flow Velocity and Tide Retrieval of the Amery Ice Shelf Using Precise Point Positioning[J]. Journal of Geodesy, 2006, 80 (4):171-176
- [4] 张小红,刘经南, Rene Forsberg. 基于精密单点定位技术的航空测量应用实践[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31 (1):19-22
- [5] 刘经南,叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位技术探讨[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27 (3):234-239
- [6] 韩保民,欧吉坤. 基于 GPS 非差观测值进行精密单点定位研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003,28(4):409-412
- [7] Hu Congwei, Chen Wu, Gao Shan, et al. Data Processing for GPS Precise Point Positioning [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 22 (2): 124-131
- [8] Zumberge J, Heflin M, Jefferson D, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks[J]. J Geophys Res, 1997, 102:5 005-5 017
- [9] Ge M, Gendt G, Rothacher M, et al. Resolution of GPS Carrier-phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations [J]. J Geod, 2008, 82:389-399
- [10] 刘西凤,袁运斌,霍星亮,等. 电离层二阶项延迟对 GPS 定位影响的分析模型与方法[J]. 科学通报, 2010,55(12): 1 162-1 167
- [11] Kedar S, Hajj G A, Wilson B D, et al. The Effect of the Second Order GPS Ionospheric Correction on Receiver Positions[J]. GRL, 2003, 30(16): 1 829-1 832
- [12] Mu Nekane H. A Semi-analytical Estimation of the Effect of Second-order Ionospheric Correction on GPS Positioning [J]. Geophysical Journal International, 2005, 163(1):10-17
- [13] Morton Y T. Assessment of the Higher Order Ionosphere Error on Position Solutions[C]. ION GNSS 2008, Savannah, 2008
- [14] Bassiri S, Hajj G A. Higher-order Ionospheric Effects on the Global Positioning System Observables and Means of Modeling Them[J]. Manuscr Geod, 1993, 18(6): 280-289
- [15] Hoque M M, Jakowski N. Higher-order Ionospheric Effects in Precise GNSS Positioning[J]. J Geod, 2006, 81(4):259-268

[1] Kouba J, Heroux P. Precise Point Positioning U-

- [16] 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
- [17] 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]. 北京:中国科学院研究生院,2006
- [18] 黄晓颖,边少锋. 国际高精度地磁模型研究进展[J].

海洋测绘,2010,30(3):79-82

第一作者简介:张小红,教授,博士生导师,主要从事 GNSS 精密定位及 GNSS 地学应用等方面的教学与研究工作。

E-mail: xhzhang@sgg.whu.edu.cn

Influence of Higher-order Ionospheric Delay Correction on Static Precise Point Positioning

ZHANG Xiaohong¹ REN Xiaodong¹ GUO Fei¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: We modified the un-differenced precise point positioning (PPP) mathematical model considering the second- and third-order ionospheric correction. The influence of the higher-order ionospheric corrections on both GNSS observations and static PPP are analyzed with respect to aspects of site location and ionospheric environment by using a globally distributed network which is composed of 38 IGS tracking stations. Numerical experimental results show that, higher-order ionospheric influences on the observation as well as static PPP at low-latitude regions are more significant than that of mid- and high-latitude regions. For static PPP, the influence in low-latitude regions ($<30^\circ$) reaches about 3-5mm, and is only a sub-millimeter in other regions ($>30^\circ$). Furthermore, the impact is mainly visible in the direction of North and South direction, showing a southward migration trend, especially at the lower latitudes where the influence value is likely to be more than 3 mm, 2 to 3 times that of the East and Up components. The level of ionospheric activity may also have impact on positioning results, and the influence during active periods is about 20-30% higher than that of quiet period.

Key words: higher-order ionosphere error; PPP; accuracy

About the first author: ZHANG Xiaohong, professor, Ph. D supervisor, involves in the research and education of GNSS precise point positioning and its geoscience application.

E-mail: xhzhang@sgg.whu.edu.cn