



我国中低纬地区GPS定位中的电离层二阶项延迟影响分析与研究

刘西凤^{①②*}, 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

* E-mail: liuxfshd@126.com; yybgps@asch.whigg.ac.cn

收稿日期: 2010-04-07; 接受日期: 2010-04-09

国家杰出青年科学基金(批准号: 40625013)、国家自然科学基金(批准号: 40890160)和国家高技术研究发展计划(编号: 2007AA12Z311)资助项目

摘要 基于消除电离层一阶项延迟的双频载波相位 Lc 线性组合观测量, 利用中国地壳运动观测网络以及国际 IGS(International GNSS Service)提供的 6 个跟踪站连续 15 天的观测数据, 初步分析和研究了电离层二阶项延迟对我国中低纬地区全球定位系统(Global Positioning System, GPS)定位结果的影响. 研究表明, 在电离层二阶项延迟影响下, 我国中低纬地区 GPS 定位结果呈普遍规律性南移的现象, 且各地区南偏趋势差异甚微.

关键词 GPS, 电离层二阶项延迟, 总电子含量(TEC)

PACS: 91.10.Fc, 94.20.Cf, 91.10.By, 94.20.dm

电离层是地球高层大气的一部分, 从距离地面大约 60 km 开始至大约 2000 km 范围内的地球大气, 含有大量的自由电子, 严重影响无线电波的传播, 是 GNSS(Global Navigation Satellite System)测量中的主要误差源之一, 特别是精密定位时必须尽可能削弱其不利影响. 目前, 高精度 GNSS 用户大多采用双频技术来削弱电离层延迟的影响, 但该技术也仅能消除电离层一阶项延迟的影响. 随着多频技术的出现, 虽然理论上利用三频观测的线性组合可以进一步消除电离层二阶项延迟, 但由于组合后的观测噪声影响被过分放大, 实际中不予直接应用^[1-4]. 由于 GNSS 观测中的电离层高阶项延迟对点位的影响最

大可达厘米级, 因此将 GNSS 技术应用于地壳形变监测、地震灾害预报、板块运动测定等高精度研究和应用领域时, 需要顾及并有效处理电离层高阶项延迟(主要是二阶项)的影响^[5-10]. 迄今为止, 国际上已有不少学者通过对高精度 GPS 观测站实测数据的处理, 深入研究了电离层二阶项延迟对全球区域 GPS 定位结果的影响规律及差异. 大量数据处理结果表明, 电离层二阶项延迟对 GNSS 定位结果的影响最大可达厘米级, 许多高精度 GNSS 测量中必须顾及及其影响^[7-10]. 目前, 我国区域电离层高阶项延迟对 GPS 定位结果影响规律的深入研究尚处于起步阶段^[1].

本文以 GPS 为例, 基于单层假设的电离层二阶

1) 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. 科学通报, 2010, 待发表

项延迟模型, 利用国际 IGS 组织以及中国地壳运动观测网络提供的 6 个跟踪站连续 15 天的双频 GPS 观测数据, 研究了我国中低纬地区电离层二阶项延迟对 GPS 定位结果呈偏南规律性偏移的影响特性.

1 电离层二阶项延迟

1.1 GPS 观测方程

受电离层延迟影响的 GPS 载波相位伪距观测和码伪距观测方程表达式如下^[5-7]:

$$L_j = \rho - \frac{q}{f_j^2} - \frac{s}{2f_j^3} + N_{L_j} \quad (j=1,2), \quad (1)$$

$$P_j = \rho + \frac{q}{f_j^2} + \frac{s}{f_j^3}, \quad (2)$$

其中 f_1 与 f_2 分别是 GPS 卫星信号的两个频率, $f_1 = 1575.42$ MHz, $f_2 = 1227.60$ MHz; L_j ($j=1,2$) 和 P_j 分别是对应 GPS 信号两个频率上的相位观测值和码观测值; ρ 是测站与 GPS 卫星之间的站星距及其他的非色散介质引起的误差项的组合; N_{L_j} 表示 L_j 相位模糊度; q 和 s 分别表示与电离层的一阶项、二阶项延迟有关的系数项, 定义如下:

$$q = 40.3 \times \text{STEC}, \quad (3)$$

$$s = 7527c \int_{\text{sat}}^{\text{rec}} N_e B_0 \cos \theta_B dL, \quad (4)$$

其中 c 表示真空中传播的光速; N_e 表示电子密度; STEC 是 GPS 信号传播方向上的电离层电子总含量 (TECU): $\text{STEC} = \int_{\text{sat}}^{\text{rec}} N_e dL$; B_0 是沿信号传播方向的地磁感应强度 (特斯拉); θ_B 是卫星信号传播方向矢量与地磁感应强度矢量的夹角 ($^\circ$).

利用电离层延迟影响与信号频率相关的色散特性, 通常利用双频组合消除电离层一阶项延迟影响, 例如, 双频载波相位观测组合表达式如下:

$$L_c = \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + I_{L_c}^{(2)} + N_c, \quad (5)$$

其中

$$I_{L_c}^{(2)} = 2.0833 \times 10^{-16} \int N_e B_0 \cos \theta_B dL,$$

$$N_c = (f_1^2 N_{L_1} - f_2^2 N_{L_2}) / (f_1^2 - f_2^2).$$

1.2 电离层单层假设

采用双频技术来只能消除电离层一阶项延迟. 理论上, 虽可以直接利用三频的线性组合进一步消除电离层二阶项延迟, 但组合后的观测噪声会明显放大几十倍, 实际中难以应用. 在双频观测消电离层一阶项的基础上, 可利用 (4) 式计算电离层二阶项延迟的改正量, 但计算工作冗繁复杂. Brunner 和 Gu^[6] 于 1991 年通过提出电离层单层模型假设, 大大简化了电离层二阶项延迟计算过程. 通常, 假设电离层单层模型高度为 300~450 km, 本文中研究中电离层单层高度取为 450 km.

基于电离层单层假设, (5) 式中的电离层二阶项延迟积分项简化如下:

$$I_{L_c}^{(2)} = 2.0833 \times 10^{-16} \cdot B \cos \theta \cdot \text{STEC}, \quad (6)$$

其中 B 是站星连线与电离层薄层的交叉点处的地磁感应强度 (特斯拉), 参考国际地磁场模型 IGRF10 (International Geomagnetic Reference Field 10th generation) (<http://www.ngdc.noaa.gov/AGA/vmod/igrf.html>); 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 ($^\circ$).

2 实验

2.1 实验数据

基于 IGS 以及中国地壳运动观测网络提供的数据服务, 实验选取我国中低纬地区 6 个跟踪站武汉、泸州、拉萨、昆明、广州以及永兴岛于 2003 年 4 月 9~23 日连续 15 天的 GPS 双频实测数据, 利用消掉电离层一阶项延迟影响的 L_c 分析我国中低纬地区电离层二阶项延迟对 GPS 定位结果的影响, 其中 GPS 观测数据的采样间隔 30 s; 卫星高度截止角设为 20° , 以避免多路径效应等与卫星观测高度角有关的误差源影响.

2.2 实验方法

利用 GPS 载波相位与码观测量提取信号传播路径上电离层总电子含量 STEC , 相关方法详见参考文献 [11~14]; 确定 STEC 后, 利用国际地磁场模型 IGRF10 计算电离层交叉点处的地磁感强度 \bar{B} 及其与卫星信号间的夹角 θ ; 基于 (6) 式即可计算出 GPS 双频载波相位组合 L_c 中的电离层二阶项延迟大小, 然

后逐历元计算电离层二阶项延迟对测站坐标与接收机钟差估值的影响, 详细的计算模型与方法可参考 658 页脚注 1)。

2.3 实验分析

按照第 2.2 节给出的数据处理方法, 计算和分析双频消电离层载波相位组合观测 Lc 中残余电离层二阶项延迟对我国中低纬地区 GPS 定位结果的影响。

图 1 反映了电离层二阶项延迟改正后引起的我国中低纬地区测站坐标点位估值偏移在北(dN)、东(dE)与垂直(dH)三个方向及接收机钟差估值变化(dC)的时序分布, 其中横轴均表示 2003 年 4 月 9 日~23 日连续 15 d 的时间, 纵轴表示点位估值变化矢量在测站坐标系下各方向上的分量以及接收机钟差估值变化的大小, 单位为毫米。从图 1 可以看出: 绿色虚线 dC 表示电离层二阶项延迟引起的接收机钟差估值偏移大小的时间序列, 量级达厘米级, 数值基本为正, 即 $I_{Lc}^{(2)}$ 改正后使得接收机钟差估值偏大; 红色实线 dH 表示由 $I_{Lc}^{(2)}$ 引起的测站点位估值在垂直方向上的时序变化, 量级达厘米级, 数值有正有负, 除测站永兴岛外, 总体为负, 反映了点位估值垂向变化向下偏移; 黑色点线 dN 表示对 $I_{Lc}^{(2)}$ 改正后引起的测站点位

估值在水平面南方向分量上的时序变化, 量级达厘米级, 但其数值恒为负数, 即呈明显地向南偏移趋势; 蓝色实线 dE 表示对 $I_{Lc}^{(2)}$ 改正后引起的测站点位估值在水平面东方向分量上的时序变化, 相对于其他分量的变化而言, 量级很小, 日变化较为平稳, 表明电离层二阶项延迟对测站点位估值变化在该方向上影响较小, 且其数值正负不定。可见, 对 Lc 观测量中残余的电离层二阶项延迟改正后, 各测站点位估值变化在水平面上存在明显的向南偏移, 在东西方向上变化则较小。上述结果显示, GNSS 精密定位中, 特别是实现优于厘米级绝对定位/毫米级相对定位高精度要求时, 应充分顾及并有效处理电离层二阶项延迟的影响。

表 1 进一步对上述探讨的连续 15 d 各个测站点位估值偏差时间序列的日均变化进行统计, 其中 Az 表示在测站坐标系下, 对 Lc 进行电离层二阶项延迟模型改正后得到的点位估值相对于电离层二阶项延迟改正前得到的点位估值的方位角。

表 1 中的 dE 量反映出各测站由电离层二阶项延迟引起的点位估值变化在东西方向上的偏移量最大不超过 0.5 mm, 而 dN 量反映出的测站点位估值在南北方向上的最大偏移量甚至达到近 6 mm, 且均反映

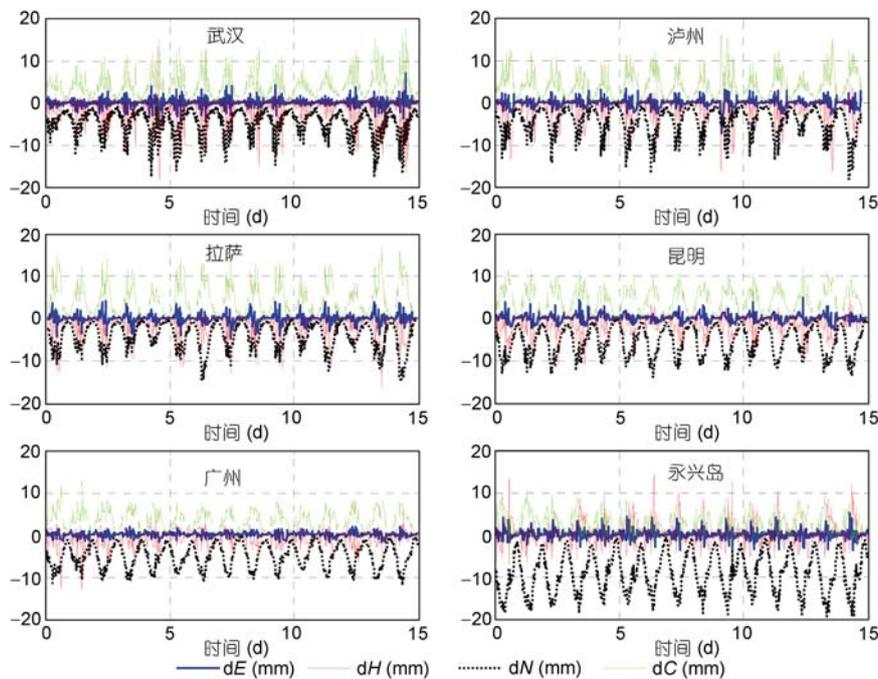


图 1 我国中低纬地区 6 个测站上空电离层二阶项延迟对 GPS 定位结果的影响

表1 电离层二阶项延迟引起的测站定位结果日均变化矢量统计^{a)}

测站	dN (mm)	dE (mm)	dH (mm)	dC (mm)	Az (°)
武汉	-4.43	0.12	-1.73	4.28	178.34
泸州	-4.07	0.09	-2.25	4.39	178.72
拉萨	-3.87	-0.20	-2.21	4.36	182.91
昆明	-5.12	0.16	-2.04	4.54	178.15
广州	-5.16	0.34	-1.31	3.81	176.20
永兴岛	-4.81	0.26	-0.01	1.74	176.92

a) dN, dE, dH 和 dC 分别表示由电离层二阶项延迟引起的测站点位估值变化矢量的北分量、东分量、垂直分量及接收机钟差估值变化日均偏差; Az 表示在测站坐标系下测站点位估值变化的方位角

出坐标向南偏移(dN 为负值). 这表明电离层二阶项延迟引起测站坐标在水平面上存在较大的向南偏移. dC 量与 dH 量则反映出电离层二阶项延迟也可导致接收机钟差估值及点位坐标在垂向方向上的变化. 表中数据反映了除测站永兴岛外各测站电离层二阶项延迟改正使得接收机钟差估值明显偏大, 点位估值垂向变化呈较为明显向下的趋势. 上述结果显示, 我国中低纬地区 GPS 精密(点)定位时, 有效修正电离层二阶项延迟影响可望进一步提高 5 mm 左右的坐标解算精度. 特别需要指出的是, Az 量反映出各测站电离层二阶项延迟引起的点位估值变化在方位角上存在一定的规律, 即测站点位估值偏南变化的方位角

站间变化差异不大, 相对稳定在正南方向附近.

3 结论

本文基于电离层单层假设, 以消电离层一阶项影响的双频载波相位组合为基础, 研究了我国中低纬地区电离层二阶项延迟对 GPS 定位结果的影响规律: 实验中选取的 6 个测站的数据处理结果显示, 电离层二阶项延迟对我国中低纬地区 GPS 点位估值日均变化的影响反映在水平面上呈一致性南偏的特性, 且差异甚微. 实验结果表明我国中低纬地区电离层二阶项延迟的有效修正, 可望进一步提高 5 mm 左右的(点)定位精度.

参考文献

- 1 李征航, 陈锴, 刘万科, 等. 顾及 f^2 项的电离层延迟模型. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(2): 139—143
- 2 刘琪, 张学军, 朱衍波. GPS 三频信息改正电离层折射误差高阶项的方法. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 9(3): 41—46
- 3 伍岳, 孟洪, 王泽民, 等. GPS 现代化后电离层折射误差高阶项的三频改正方法. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(7): 601—608
- 4 Wang Z M, Wu Y, Zhang K F, et al. Triple-frequency method for high-order ionospheric refractive error modeling in GPS modernization. J Glob Position Syst, 2005, 4(1-2): 291—295
- 5 Bassiri S, Hajj G A. Higher-order ionospheric effects on the global positioning system observables and means of modeling them. Manusc Geod, 1993, 18(6): 280—289
- 6 Brunner F K, Gu M. An improved model for the dual frequency ionospheric correction of GPS observations. Manusc Geod, 1991, 16(3): 205—214
- 7 Kedar S, Hajj A, Wilson B D, et al. The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions. Geophys Res Lett, 2003, 30(16): 1829—1832
- 8 Hoque M M, Jakowski N. Mitigation of higher order ionospheric effects on GNSS users in Europe. GPS Solut, 2008, 12(2): 87—97
- 9 Munekane H. A semi-analytical estimation of the effect of second-order ionospheric correction on the GPS positioning. Geophys J Int, 2005, 163: 10—17
- 10 Morton Y T. Assessment of the higher order ionosphere error on position solutions. ION GNSS2008, Sep 16-19, Savannah, Georgia, USA. 2008. 2361—2369
- 11 袁运斌, 霍星亮, 欧吉坤. 精确求定 GPS 信号的电离层延迟的模型与方法研究. 自然科学进展, 2006, 16(1): 40—48
- 12 Yuan Y B, Ou J K. An improvement to ionospheric delay correction for single frequency GPS user-the APR-I Scheme. J Geodesy, 2001, 75(5-6): 331—336

- 13 Yuan Y B, Ou J K. Auto-covariance estimation of variable samples (ACEVS) and its application for monitoring random ionosphere using GPS. *J Geodesy*, 2001, 75(7-8): 438—447
- 14 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. 博士学位论文. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2002. 45—49

Preliminary analysis on the effect of second-order ionospheric delay on GPS positioning solution over the mid-low latitude regions in China

LIU XiFeng^{1,2*} & YUAN YunBin^{1*}

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*

Based on the ionosphere-free carrier phase combination, dual-frequency GPS data from 6 tracking stations during April 9—23, 2003 provided by IGS organization and the Crustal Movement Observation Network of China is processed to study the impact of second-order ionospheric delay on GPS positioning over the mid-low latitude regions in China. Results indicate that the second-order ionospheric delay would result in the regular southward shift of GPS positioning solution, and the difference is little among the various regions.

GPS, second-order ionospheric delay (I_2), total electron content (TEC)

PACS: 91.10.Fc, 94.20.Cf, 91.10.By, 94.20.dm