

DOI:10.13203/j.whugis20150546



文章编号:1671-8860(2018)03-0471-07

电离层延迟对单频 GPS 点的影响及改正方法研究

张 超^{1,2} 戴吾蛟^{1,2} 石 强^{1,2} 曾凡河^{1,2} 匡翠林^{1,2}

1 中南大学测绘与遥感科学系, 湖南 长沙, 410083

2 湖南省精密工程测量与变形灾害监测重点实验室, 湖南 长沙, 410083

摘 要:电离层延迟是单频 GPS 地面沉降监测点的最主要误差源,如何削弱该误差的影响是提高单双频混合地面沉降监测系统精度的关键。采用中国广州南沙单双频混合 GPS 地面沉降监测网数据进行处理分析,结果表明,在低纬度地区即使基线较短,电离层延迟对单频 GPS 监测精度影响仍然较大,影响程度随基线长度增加而增大,而且在时间域上有明显的季节性变化规律:2、3 月份与 8、9 月份电离层影响较为显著。利用双频点数据从观测值域对单频点电离层延迟误差进行改正,监测精度提高了 57%,改善效果明显。

关键词:单频 GPS;地面沉降监测;电离层延迟;单双频混合

中图分类号:P228

文献标志码:A

在 GPS 地面沉降监测中,为降低监测成本,可采用单双频混合模式,即大部分监测点使用单频接收机,利用少部分双频接收机数据建立区域电离层改正模型,从而提高单频机的精度^[1-2]。欲建立电离层改正模型,须对电离层的影响规律有清楚的认识。电离层活动虽然瞬息万变,但具有明显的年、季、日周期变化规律及一定的空间分布特征^[3-4]。目前对电离层变化规律的研究集中于全球或区域电离层总电子含量(total electric content, TEC)的变化^[4-5],对高精度相对定位,特别是较短基线应用测量精度影响的相关研究还较少。电离层延迟改正方法主要有 3 类:(1)经验模型,如 KlobHchar 模型、Bent 模型;(2)区域拟合模型^[6-8];(3)参数估计改正方法^[9-10]。在单双频混合 GPS 地面沉降监测中宜采用第 2 类方法,即利用双频基线提取双差电离层延迟,通过一定的内插模型内插得到单频基线的电离层延迟^[11]。

本文采用广州南沙地面沉降监测网 2013 年的单天静态解数据,首先分析了电离层对 GPS 相对定位的影响,以及该影响与基线长度的关系和在时间域的变化规律;然后从观测值域建立电离层延迟改正模型,对单频地面沉降监测点电离层延迟的改正效果进行了分析。

1 电离层延迟对单频 GPS 地面沉降监测点的影响

1.1 电离层延迟对单频点定位结果影响概述

单频和双频消电离层组合定位解算方程为^[12]:

$$L_i = \rho - I_i + N_i \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

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

其中, f_1 和 f_2 分别是 GPS 信号的 2 个频率; L_i ($i = 1, 2$)为对应频率的相位观测值(m); L_c 为 L_1 和 L_2 消电离层一阶项的线性组合观测值(m); ρ 是站星距(m); N_i 表示 L_i 的相位模糊度(m); N_c 为 N_i 线性组合项,其值为 $(f_1^2 N_1 - f_2^2 N_2) / (f_1^2 - f_2^2)$; I_i 为对应频率的电离层延迟误差项(m)。

电离层延迟对 GPS 定位结果影响如图 1 所示, $S(i)$ 表示接收机可观测到的卫星($i = 1, 2 \dots n$, n 为卫星数), R 和 R' 分别表示单频和双频消电离层组合解算得到的流动站位置,记电离层延迟引起的流动站的点位估值变化为 RR' 。

1.2 单双频基线解算结果对比

采用中国广州南沙地面沉降监测网的数据,测区如图 2 所示,点位分布如图 3 所示。图 3 中

收稿日期:2016-02-29

项目资助:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB733303);中南大学研究生自主探索创新基金(2014zzts258)。

第一作者:张超,硕士,主要研究方向为 GNSS 数据处理及软件研制。zhangchaocsu@163.com

通讯作者:戴吾蛟,博士,教授。wj dai@csu.edu.cn

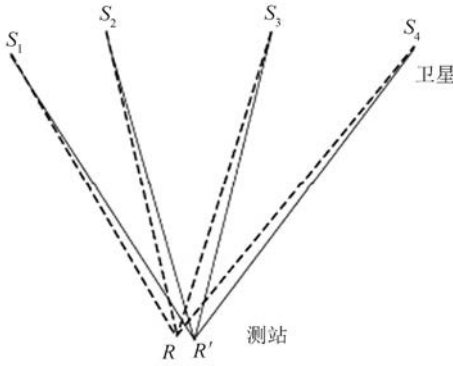


图1 电离层延迟对GPS定位结果影响的示意图
Fig.1 Diagram of Ionosphere Delay's Influence on GPS Positioning Result

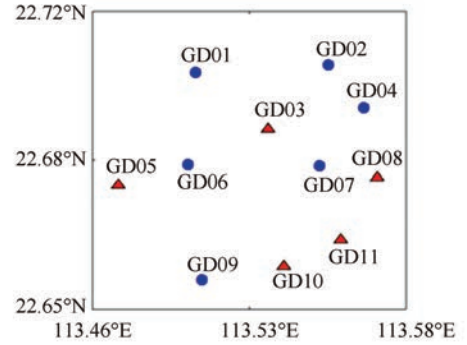


图3 南沙GPS地面沉降监测网点位分布图
Fig.3 Point Distribution Plot of Nansha GPS Ground Deformation Monitoring Network

三角形表示双频监测点,圆点表示单频监测点。数据时间跨度为1 a(其中GD11点2013-01-01—2013-07-12期间的数据缺失),采样间隔20 s。采用事后处理软件HGO进行数据解算。

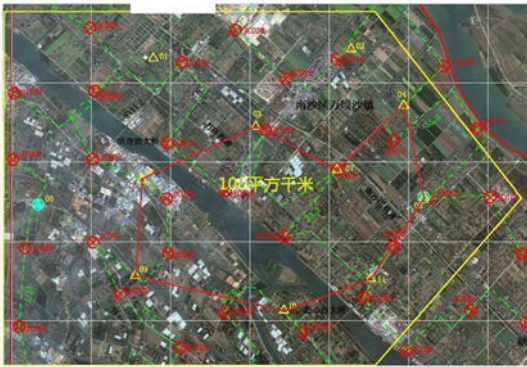


图2 南沙GPS地面沉降监测网区域概况图
Fig.2 Regional Overview Diagram of Nansha GPS Ground Deformation Monitoring Network

为了对比单双频数据解算质量,选用图3中所有的双频点构成独立基线,分别进行单频基线定位解算和双频消电离层定位解算,其中单频解算时只采用L₁频率。单、双频解算结果减去各自平均值绘于图4,图4中蓝色表示单频结果,红色表示双频结果,横轴表示时间,纵轴表示偏差量,单位为m。

从图4中可以看出,不论是东(east, E)方向还是北(north, N)和高(height, H)方向,双频结果都要优于单频结果,随着基线长度的增加,单频结果残差逐渐增大,而双频结果基本不变。1 a的静态解算结果中单频数据存在部分天数解算不合格的现象,而且随着基线长度的增加,不合格率有上升的趋势,但双频数据全部解算合格,所以可以认定基线解算不合格是由电离层延迟影响造成的。根据表1中的统计数据,E方向单频结果浮动的幅度较小,基线08-11长度最短,整体残差

表1 基线坐标分量标准差、解算不合格率统计信息

Tab.1 Statistics of Each Baseline's Coordinate Component STD and Solving Reject Ratio

基线	E/mm		N/mm		H/mm		三维/mm		解算不合格率(%)	
	L ₁	L _c	L ₁	L _c	L ₁	L _c	L ₁	L _c	L ₁	L _c
08-11(2.5 km)	2.1	1.2	6.1	2.9	4.8	2.9	8.0	4.3	0.5	0.0
08-03(4.4 km)	3.8	2.8	4.2	2.4	5.7	3.7	8.0	5.2	0.7	0.0
05-03(5.9 km)	4.2	2.2	5.9	2.1	8.3	5.1	11.8	5.9	13.3	0.0
05-10(6.8 km)	4.7	2.7	6.4	1.5	9.2	5.9	12.2	6.6	8.4	0.0
05-11(8.6 km)	5.3	1.5	4.2	2.5	9.7	6.1	11.8	6.7	14.1	0.0
05-08(9.7 km)	6.5	1.8	5.0	1.4	11.3	5.2	14.0	5.6	26.0	0.0

(用标准偏差(standard deviation, std)表示)最小(std=2.1 mm);而基线05-08长度最长,整体残差也最大(std=6.5 mm)。6条基线随着长度的增加残差也逐渐增大,存在较为显著的线性关系。所有基线双频结果E分量都较为平稳,整体残差很小(std<3 mm),精度较之单频结果平均提高50%。N方向单频结果浮动的幅度比E方向大,

但与基线长度的线性相关性较差,双频解算结果整体平稳(std<3 mm),精度较之单频平均提高了58%。H方向不论单频还是双频的解算结果,浮动的幅度都比E、N方向大,且与基线长度有一定的线性相关性,双频结果精度比单频结果平均提高了40%。

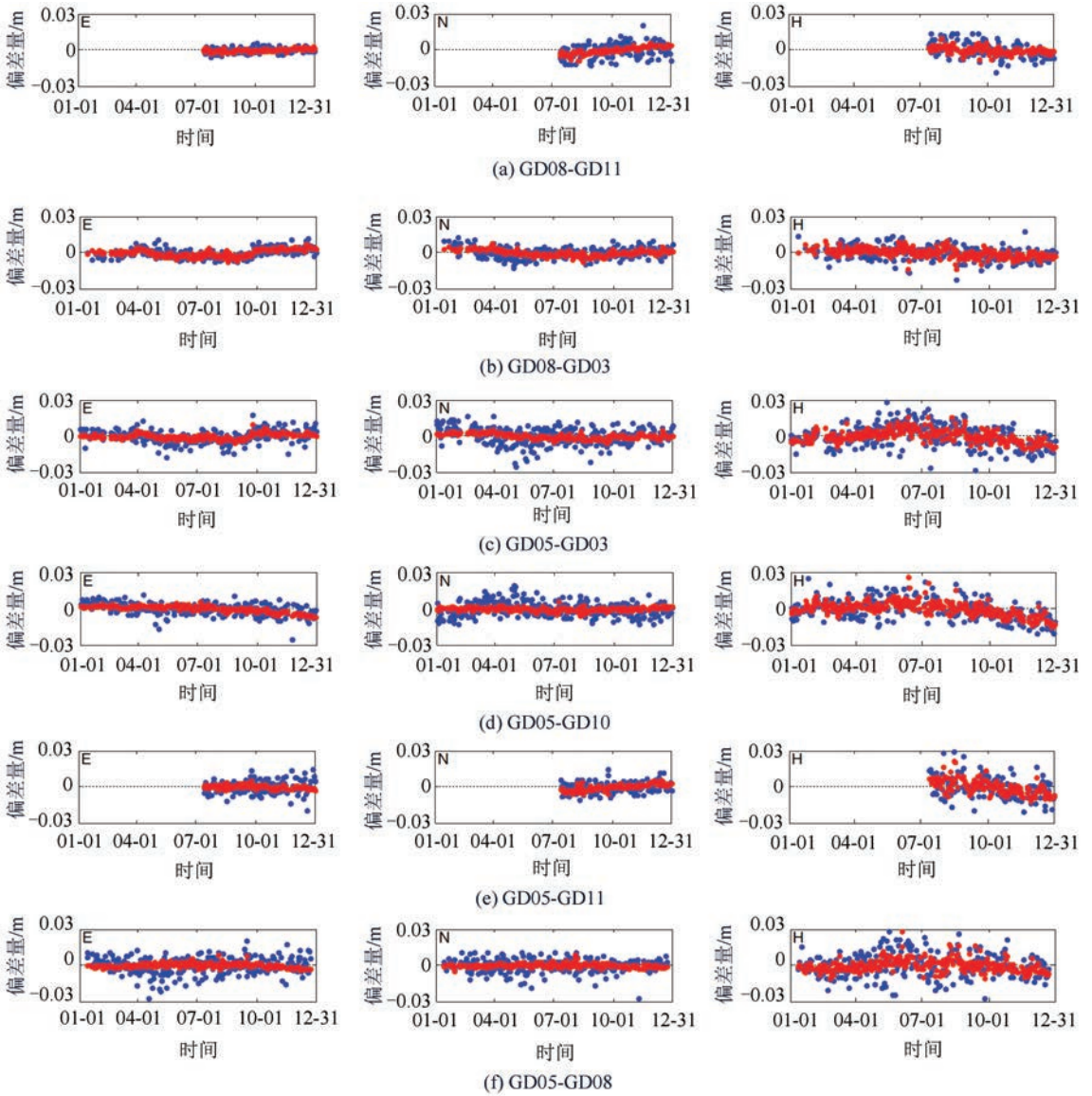


图 4 2013 年各基线解算结果
 Fig.4 Results of Each Baseline in 2013

1.3 电离层延迟对定位结果影响的分析

为进一步研究电离层延迟对单频点定位结果的影响,用双频结果减去单频结果得到电离层延迟引起定位结果的偏差。将 6 条基线电离层导致 E、N、H 3 个方向上定位结果的偏差制作统计图,如图 5。为将 3 个方向的偏移量绘于同一幅图中,将 dN 加上 0.02 m, dH 减去 0.03 m。从图 5 中可以看出,3 个方向中 E 方向受电离层延迟影响最小,在基线较短(小于 5 km)时,上下浮动整体上不超过 8 mm,标准差小于 3 mm(见表 2);基线长度增加,偏移量的浮动程度也随之增加(相关系数为 0.96),标准差最大值达到了 6.7 mm。表 2 中最后一行为各方向偏差量与基线长度的相关系数。电离层延迟对 N、H 方向上的影响明显大于 E 方向,其中 N 方向的上下浮动的幅度为

0~3 cm,标准差为 3.9~6.0 mm,但与基线长度相关性很差(相关系数为 0.01);H 方向上下浮动的幅度为 0~5 cm,标准差 4.8~9.2 mm,整体随着基线长度增加而增大(相关系数为 0.85)。

表 2 定位结果偏差的标准差统计

Tab.2 STD Statistics of Positioning Result Bias Caused by Ionosphere

基线	E	N	H	三维
08-11(2.5 km)	2.2 mm	5.5 mm	4.9 mm	7.7 mm
08-03(4.4 km)	2.8 mm	3.9 mm	4.8 mm	6.8 mm
05-03(5.9 km)	4.1 mm	5.6 mm	6.1 mm	9.2 mm
05-10(6.8 km)	4.1 mm	6.0 mm	6.5 mm	9.7 mm
05-11(8.6 km)	5.0 mm	4.3 mm	6.8 mm	9.4 mm
05-08(9.7 km)	6.7 mm	5.1 mm	9.2 mm	12.4 mm
相关系数	0.96	0.01	0.91	0.85

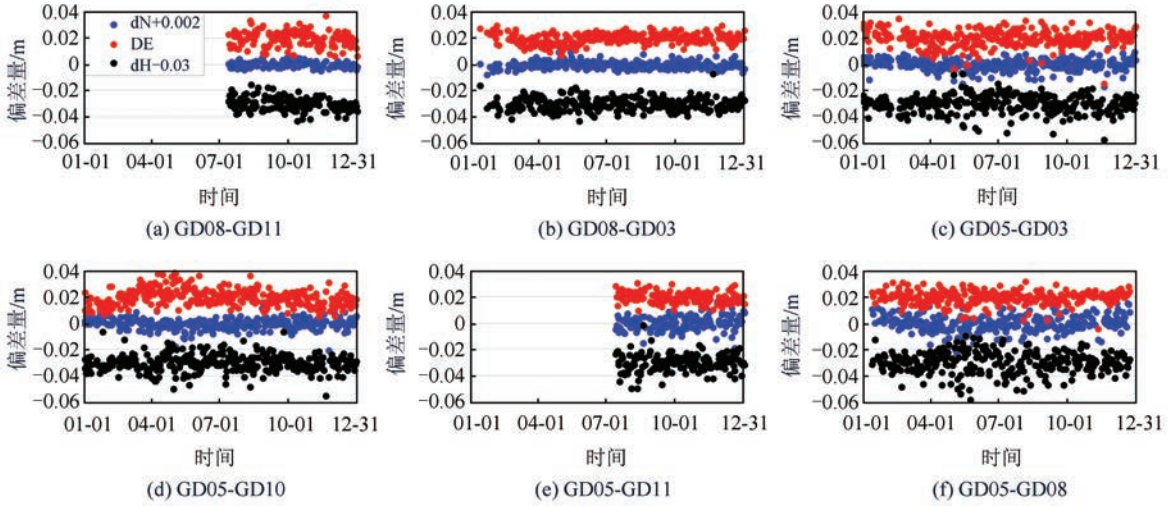


图5 电离层导致定位结果的偏差

Fig.5 Positioning Result Bias Caused by Ionosphere

2 电离层延迟影响的季节性变化

电离层对定位结果的影响除了在空间域有一定的规律外,在时间域也呈现一定的规律。为探究电离层在时间域的变化规律,以基线 GD05-GD08 N方向的偏差量为例,取每个月的最大值和平均值分别绘于图6和图7,图6、7中的曲线为6次多项式拟合曲线。可以得出以下结论。

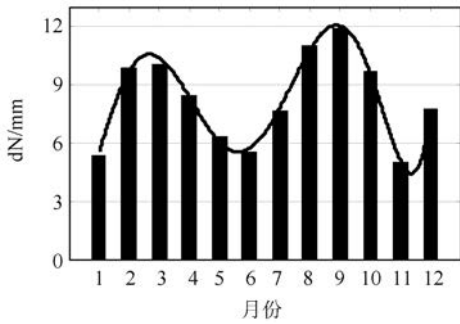


图6 N方向偏差量每月的最大值

Fig.6 Max Value of North Direction Bias

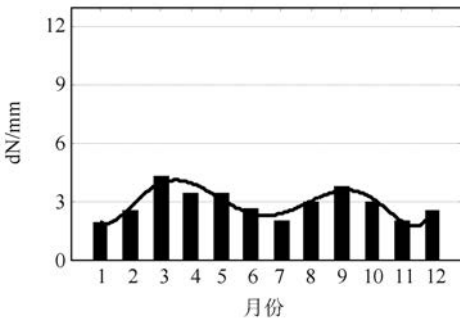


图7 N方向偏差量每月的平均值

Fig.7 Mean Value of North Direction Bias

1) 电离层延迟对定位结果影响的最大值的月变化幅度较大,从11月的5 mm到9月的12 mm,增加了一倍多。而月平均值的变化幅度较小,增幅最大为2.4 mm。

2) 电离层延迟对定位结果影响的最大值和平均值的峰值均分布在3月和9月,极值分别达到12.2 mm和4.6 mm。

3) 从6阶多项式拟合的结果来看,电离层延迟的季节性变化趋势比较明显,夏冬季节的影响小于春秋季节。

3 单频 GPS 点电离层改正

3.1 观测值域改正方法

观测值域改正方法是从削弱单频观测值电离层误差的角度出发,首先提取双频测站间的双差电离层延迟信息,然后通过一定的内插模型,如线性组合模型(linear combination model, LCM)逐历元逐卫星内插得到单频点的电离层延迟,从而降低单频观测值的误差,提高解算精度。本文内插模型采用 LCM 模型,模型原理如下^[13-14]。

LCM 模型通过构建虚拟单差线性观测值,能够消除流动站的空间相关误差,如内插系数满足式(3)的3个条件^[14],则轨道偏差可以完全消除,电离层、对流层误差也可以大幅削弱。

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1; \sum_{i=1}^n \alpha_i (X_u - X_i) = 0; \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 = \min \quad (3)$$

其中, α_i 为内插系数; X_u 和 X_i 分别为参考站和流动站的坐标分量。当参考站间的双差模糊度固

定以后,可以构建以下公式:

$$\nabla\Delta\varphi_{u,n} - \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i \cdot V_{i,n} = \nabla\Delta\rho_{u,n} + \lambda \nabla\Delta N_{u,n} \quad (4)$$

其中, $\nabla\Delta\varphi_{u,n}$ 为双差相位观测值; $\nabla\Delta\rho_{u,n}$ 为双差伪距观测值; $\nabla\Delta N_{u,n}$ 为双差模糊度; $V_{i,n}$ 为基准站生成的双差改正数:

$$V_{i,n} = \nabla\Delta\varphi_{i,n} - \nabla\Delta\rho_{i,n} - \lambda \nabla\Delta N_{i,n} \quad (i = 1 \cdots n - 1) \quad (5)$$

上述模型中,获得精确的双差改正数的关键是正确固定模糊度,本文模糊度固定方法采用三步法^[15],周跳探测与修复采用三差法^[16]。由于该方法需要直接改正电离层延迟误差,所以对现有的软件进行二次开发或自编软件进行处理,本文采用自编 GPS 数据处理软件 GPSDMS 进行解算,数据解算流程见图 8。

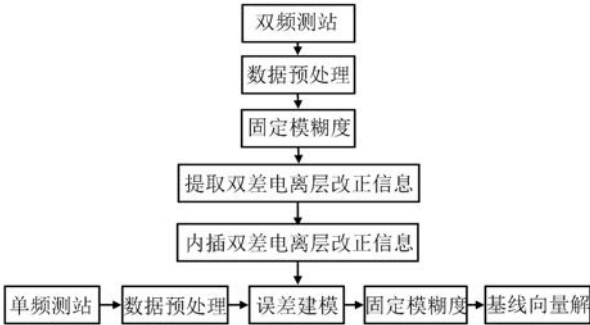


图 8 GPSDMS 软件解算流程图

Fig.8 Flowchart of GPSDMS Software Resolution

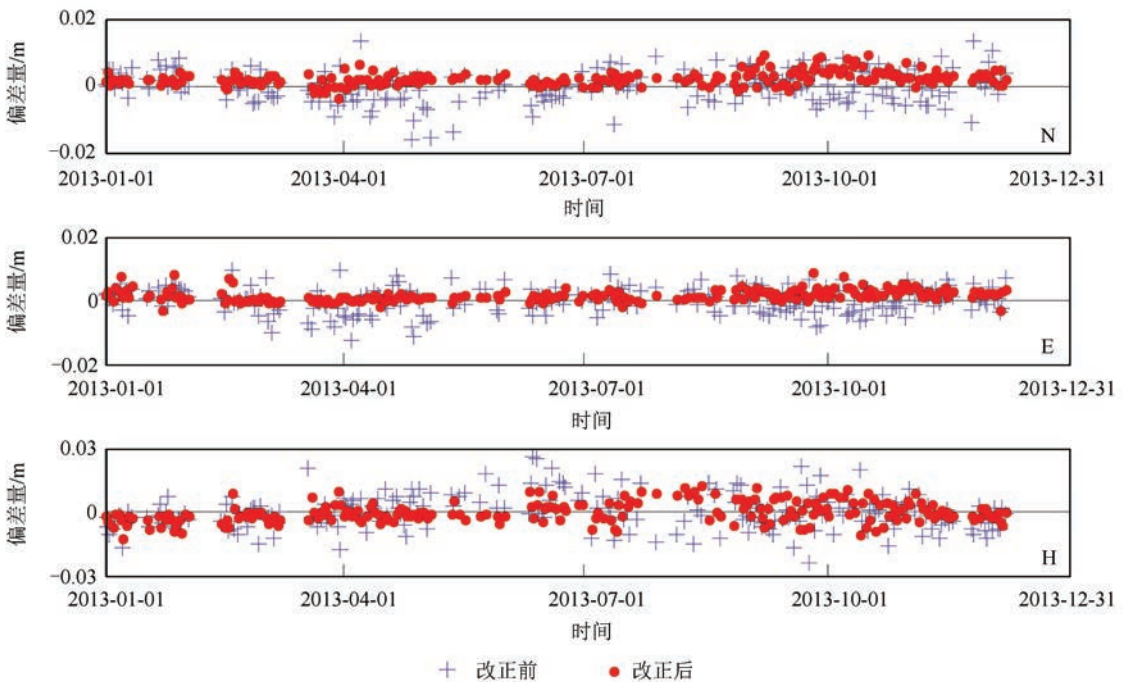


图 9 原始结果与观测值域改正结果对比

Fig.9 Comparison of Raw Results and Observation Domain Corrected Results

3.2 单频点电离层改正效果分析

为分析电离层改正效果,单频点选取 GD07 点,双频点选用 GD03、GD08、GD10,分别以 GD05 为基准点进行基线解算。从图 9 及表 3 可以看出,经过双频点提供的改正信息改正之后,单频点的定位结果有较大改善,改善比例为 57%。由于 GD07 点安装的是单频接收机,无法接收双频信息,所有无法对比改正后的结果与双频结果,但参考表 1 可以看出,改正后的效果已经基本接近双频定位结果。

表 3 两种改正方案残差统计

Tab.3 Statistics of Two Correction Scenarios Residual

残差	E /mm	N /mm	H /mm	三维 /mm	改善 比例(%)
单频未改正	5.2	3.9	8.4	10.6	
观测值域改正	2.4	1.8	3.4	4.5	57

4 结 语

单频点的电离层改正单双频 GPS 混合地面沉降监测的关键,本文从坐标域探讨了电离层对单频 GPS 点定位结果的影响,以及该影响与基线长度和季节的关系,发现电离层延迟对高程方向的影响最大,南北方向次之,东西方向最小。随着基线长度的增加,电离层延迟影响增强,其中东西方向和南北方向的点位偏差量与基线长度呈较强的线性相关性;电离层延迟对定位结果的影响

呈明显的季节性变化规律,夏冬季节强于春秋季节。采用观测值域改正方案对单频点的电离层延迟进行改正,能改善定位单频点的定位结果。

参 考 文 献

- [1] Janssen V, Roberts C, Rizos C, et al. Experiences with A Mixed-Mode GPS-Based Volcano Monitoring System at Mt. Papandayan, Indonesia[J]. *Geomatics Research Australasia*, 2001,74:43-58
- [2] Xie Rong'an, Chen Yulin. Scheme Design of Ground Subsidence Monitoring Using Mixed Single- and Dual-Frequency GPS Receivers[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2013(12): 48-52 (谢荣安, 陈玉林, 戴吾蛟, 等. 单双频 GPS 混合地面沉降自动化监测方案设计[J]. 工程勘察, 2013(12): 48-52)
- [3] Cai Changsheng, Gao Jingxiang, Li Zhenghang. Monitoring Seasonal Variations of Ionospheric TEC Using GPS Measurements[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006,31(5): 451-453(蔡昌盛, 高井祥, 李征航. 利用 GPS 监测电离层总电子含量的季节性变化 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006,31(5): 451-453)
- [4] Yao Yibin, Chen Jiajun, Chen Peng, et al. Analysis of Europe Ionospheric Responses During Magnetic Storms in 2003-2006 Using Ionospheric Tomographic Technology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(2): 132-136(姚宜斌, 陈家君, 陈鹏, 等. 2003~2006 年磁暴期间欧洲区域电离层三维层析及演变分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014,39(2): 132-136)
- [5] Liu Jingbin, Wang Zemin, Wang Haijun, et al. Modeling Regional Ionosphere Using GPS Measurements over China by Spherical Cap Harmonic Analysis Methodology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(8): 792-795(柳景斌, 王泽民, 王海军, 等. 利用球冠谐分析方法和 GPS 数据建立中国区域电离层 TEC 模型 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008,33(8): 792-795)
- [6] Tu Rui, Zhang Qin, Huang Guanwen, et al. Establishment of Regional Ionospheric Delay Model in Xi'an Based on Phase Smoothing Pseudo-Range and LS Surface Function [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(2): 218-221(涂锐, 张勤, 黄观文, 等. 利用相位平滑伪距和最小二乘曲面函数建立西安市区域电离层延迟模型 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(2): 218-221)
- [7] Zhang Xiaohong, Li Zhenghang, Cai Changsheng. Study on Regional Ionospheric Model Using Dual-Frequency GPS Measurements [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(2): 140-143(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, 2011, 36(2): 140-143)
- [8] Xi Chao, Cai Chenglin, Li Simin, et al. A New Wide Area Ionospheric Correction Method Based on Triangular Partition [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(3): 390-394 (席超, 蔡成林, 李思敏, 等. 一种基于三角分区的广域电离层改正新方法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(3): 390-394)
- [9] Tu Rui, Huang Guanwen, Zhang Qin, et al. A New Algorithm on Ionospheric Delay Correction for Single Frequency GPS Receivers [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(6): 667-670(涂锐, 黄观文, 张勤, 等. GPS 单频机电离层延迟改正新算法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(6): 667-670)
- [10] Shi Chuang, Gu Shengfeng, Geng Changjiang, et al. High-Precision Single-Frequency Point Positioning with Randomness of Ionosphere Delay Correction in Consideration [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(7): 807-810(施闯, 辜声峰, 耿长江, 等. 顾及电离层改正精度信息的高精度单频单点定位方法研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(7): 807-810)
- [11] Tang Weiming, Liu Jingnan, Liu Hui, et al. A Modified Combined Bias Interpolation Method for GNSS Network RTK [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(12): 1 156-1 159(唐卫明, 刘经南, 刘晖, 等. 一种 GNSS 网络 RTK 改进的综合误差内插方法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(12): 1 156-1 159)
- [12] Liu Xifeng, Yuan Yunbin, Huo Xingliang, et al. Model Analysis Method(MAM) on the Effect of the Second-Order Ionospheric Delay on GPS Positioning Solution [J]. *Chinese Sci Bull*, 2010, 55(12): 1 162-1 167(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)
- [13] Han S, C Rizos. GPS Network Design and Error Mitigation for Real-Time Continuous Array Monitoring Systems [C]. The 9th Int. Tech. Meeting of the Satellite Div. of the U.S. ION, Kansas City, Missouri, 1996
- [14] Dai L, Han S. Comparison of Interpolation Algorithms in Network-Based GPS Techniques [J]. *Navigation*, 2003, 50(4): 277-293
- [15] Tang Weiming, Liu Jingnan, Shi Chuang, et al. Three Steps Method to Determine Double Difference

Ambiguities Resolution of Network RTK Reference Station[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(4): 305-308 (唐卫明, 刘经南, 施闯, 等. 三步法确定网络 RTK 基准站双差模糊度 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(4): 305-308)

[16] Wang Guiwen, Wang Zemin, Yin Haitao. An Cycle-

Slip Correction Method for Real-Time Kinematic GPS Data Based on Triple Differences Observation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(8): 711-714 (王贵文, 王泽民, 殷海涛. 基于三差观测量的实时动态 GPS 周跳修复方法研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(8): 711-714)

Influence of Ionosphere Delay on Single Frequency GPS Point and its Correction Method

ZHANG Chao^{1,2} DAI Wujiao^{1,2} SHI Qiang^{1,2} ZENG Fanhe^{1,2} KUANG Cuilin^{1,2}

¹ School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

² Key Laboratory of Precise Engineering of Surveying & Deformation Disaster Monitoring of Hunan Province, Changsha 410083, China

Abstract: Ionosphere delay is the dominant error source of single frequency GPS ground deformation monitoring point coordinate precision, how to reduce the error source influence is the key point to enhance the precision of single and dual frequency mixed ground deformation monitoring system. Based on the data of Guangzhou Nansha single and dual frequency mixed GPS ground deformation monitoring network, analysis indicates that ionosphere delay influence is still large, even though the baseline length is short in low latitude region. The impact of ionosphere delay aggravates as baseline length increases, and the rule of seasonal change is quite obvious: significant in February, March, August and September. Dual frequency data is used to correct the ionosphere delay error in observation value domain, as a result, the precision is improved by 57%, indicating that the effect of observation domain correction is obvious.

Key words: single frequency GPS; ground deformation monitoring; ionosphere delay; single and dual frequency mixed

First author: ZHANG Chao, master, specializes in GNSS data processing and software development. E-mail: zhangchaocsu@163.com

Corresponding author: DAI Wujiao, PhD, professor. E-mail: wjdai@csu.edu.cn

Foundation support: The National Program on Key Basic Research of China (973 Program), No. 2013CB733303; the Postgraduate Independent Exploration Innovation Foundation Program of Central South University, No. 2014zzts258.