

精密单点定位的高阶电离层误差改正研究

匡翠林¹ 金 蕾^{1,2}

(1 中南大学测绘与国土信息工程系,长沙市麓山南路 932 号 410083)

(2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘要:描述了高阶电离层误差对精密单点定位(precise point positioning, PPP)的影响公式,并通过实验分析了该误差对 PPP 静态定位的影响。数值结果表明,改正电离层高阶项误差可以 mm 级提高 PPP 静态定位精度和缩短动态定位的收敛时间。

关键词:高阶电离层;精密单点定位;定位精度;收敛时间

中图分类号:P228.41

随着 GNSS 技术在地壳形变监测、地震灾害预报、全球框架坐标建立与维护、板块运动监测等领域的应用发展,cm 级、mm 级的定位精度要求不断被提出。要达到如此高精度,更加精细的 GNSS 误差改正模型应该加以考虑。电离层延迟一直是 GNSS 定位的主要误差源之一。从天顶到地平方向,电离层延迟引起的测距误差可达 5 ~ 150 m。根据电离层的色散特性,通过双频组合观测值 L_3 可消去电离层误差一阶项,剩下的电离层误差即为高阶项误差,其对定位的影响量值最大可达数个 $\text{cm}^{[1]}$ 。在一般情况下,即使在天顶方向,电离层二阶项和三阶项误差对测距影响仍分别可达到 0~2 cm 和 0~2 mm^[2],而在低高度角或者极端的空间条件(如磁暴、电离层异常等)下,甚至可达几十个 $\text{cm}^{[3]}$ 。也正因如此,电离层误差高阶项改正近年来逐渐引起了国内外研究者的重视^[4-5]。但目前的研究大多是分析高阶电离层误差对静态定位和相对定位的影响^[6-8]。本文描述了电离层高阶项对精密单点定位(PPP)的改正公式,分析了该误差项对 PPP 静态定位精度,以及动态定位收敛速度的影响。

1 PPP 的高阶电离层误差改正

顾及电离层高阶项影响的测码伪距和载波相位观测方程可表示为^[9-10]:

$$R_{L_i} = \rho' + I_g^{(1)} + I_g^{(2)} + I_g^{(3)} + v_{R_{L_i}} \quad (1)$$

$$\Phi_{L_i} = \rho' - I_g^{(1)} - \frac{1}{2}I_g^{(2)} - \frac{1}{3}I_g^{(3)} + N_i\lambda_i + v_{\Phi_{L_i}} \quad (2)$$

式中, R_{L_i} 为测码伪距; Φ_{L_i} 为载波相位值; ρ' 表示卫星与接收机间的几何距离,包括了对流层和钟差等非色散介质的误差影响; $I_g^{(1)}$ 、 $I_g^{(2)}$ 、 $I_g^{(3)}$ 分别表示电离层误差一阶、二阶和三阶项的改正量大小; N_i 表示相位整周模糊度; $v_{\Phi_{L_i}}$ 和 $v_{R_{L_i}}$ 分别表示残余的相位和伪距误差。

其中,一阶项改正量为:

$$I_g^{(1)} = \frac{40.3 \int n_e ds}{f_i^2} = \frac{40.3 \times \text{TEC}}{f_i^2} \quad (3)$$

二阶项改正量为:

$$I_g^{(2)} = \frac{7.527 \times C \times \int n_e B \cos\theta ds}{f_i^3} \quad (4)$$

三阶项改正量为:

$$I_g^{(3)} = \frac{2.437 \int n_e^2 ds + 4.74 \times 10^{22} \int n_e B^2 (1 + \cos^2\theta) ds}{f_i^4} \quad (5)$$

式中,下标 $i=1,2$ 表示 GNSS 信号的不同载波; n_e 表示电子密度; B 为地球磁场强度; θ 为信号的传播方向与地球磁场方向的夹角;积分项 $\int n_e ds$ 是沿信号传播路径的总电子含量(slant total

收稿日期:2013-05-27。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41004012);中南大学前沿研究计划资助项目(2009QZZD002)。

electron content, STEC)。其中,一阶项改正量可由 L_3 线性组合完全消除,残余的二阶项和三阶项即为电离层高阶项残差。

PPP 定位一般采用消电离层组合 L_3 作为观测方程,又由于码观测值精度相对较低,故本文仅推导顾及电离层高阶项的载波观测值消电离层 L_3 组合,公式为:

$$\varphi_{L_3} = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 \varphi_1 - f_2^2 \varphi_2) = \rho' + I_2 L_3 + I_3 L_3 + N_3 \lambda_3 \quad (6)$$

式中, $I_2 L_3$ 为 L_3 组合观测值的电离层二阶项改正; $I_3 L_3$ 为三阶项改正。依据上述式(4)、(5),其更为详细的表达式为:

$$I_2 L_3 = \frac{7.527 \times C \times \int n_e B \cos \theta ds}{2 f_1 f_2 (f_1 + f_2)} = a B \cos \theta \times \text{STEC} \quad (7)$$

$$I_3 L_3 = \frac{2.437 \int n_e^2 ds}{3 f_1^2 f_2^2} + \frac{4.74 \times 1.022 \int n_e B^2 (1 + \cos^2 \theta) ds}{3 f_1^2 f_2^2} \quad (8)$$

$$N_3 \lambda_3 = \frac{f_1^2 N_1 \lambda_1 - f_2^2 N_2 \lambda_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (9)$$

由于式(8)右边第二项的量级在亚 mm 级,故可忽略,因此有:

$$I_3 L_3 \approx \frac{2.437 \int n_e^2 ds}{3 f_1^2 f_2^2} \quad (10)$$

由上述推导可知,电离层的高阶项误差求解与信号传播路径上的 STEC 大小、刺穿点处地磁场矢量以及信号与该矢量的夹角有关。本文通过 IGS 组织提供的全球电离层格网计算 STEC^[11],使用国际地磁参考场 IGRF11 模型计算地磁场矢量^[12]。

2 高阶电离层误差数值大小分析

根据上述推导公式(8)、(10),本文分别计算了 L_3 观测值的二阶及三阶电离层误差改正量。数据来源于位于低纬度的 IGS 站 NTUS(经度为东经 103.7°,纬度为北纬 1.3°),数据处理的截止高度角取 10°,考虑太阳活动高峰期(2000-07-01)和低谷期(2009-07-01)两种情况,其结果如图 1 所示。

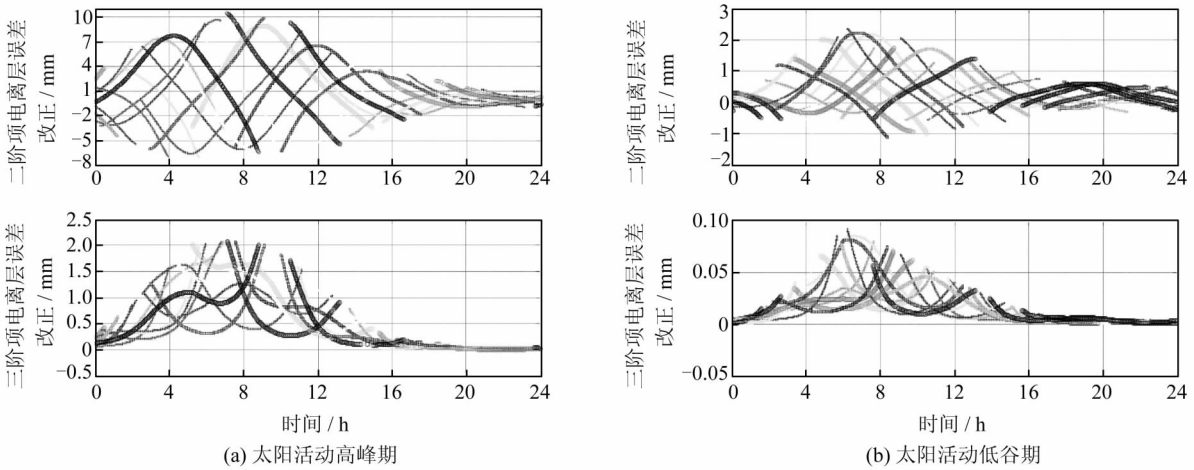


图 1 L_3 观测值的高阶电离层误差改正
Fig. 1 Higher-order Ionospheric Error Correction on L_3 Observation

图 1 中曲线表示每颗卫星在一天中的电离层高阶项改正量。从图 1(a)中可以看出,在太阳活动高峰期,即使使用 L_3 载波组合,其二阶项改正值仍可达 1 cm 左右,而三阶项的改正量相对小得多。图 1(b)则说明,在太阳活动低谷期,二阶项改正最大为 2 mm 左右,三阶项改正量量级在亚 mm。

3 高阶电离层对 PPP 的影响分析

传统的 PPP 采用 L_3 组合观测值以消除电离

一阶项改正量,而通过上述分析可知,其电离层高阶项误差还可带来 mm 至 cm 级的距离误差。

3.1 静态定位精度影响分析

针对太阳活动峰值期(2000 年)和太阳活动低谷期(2009 年),分别选取位于低、中、高纬度的 9 个 IGS 站连续 5 d 的观测数据,通过研制的 PPP 软件分别考虑与不考虑高阶电离层误差进行定位解算,将两种情况下的坐标求差,再取 5 d 差值的平均值以评价高阶电离层改正对 PPP 静态定位的影响,结果见表 1。由表 1 可知,电离层

高阶项对 PPP 静态定位精度的影响在太阳活动波峰阶段的值明显大于波谷阶段,两者定位的差值在低纬度地区为 3 mm 左右,中纬度为 2 mm 左右,高纬度地区为 1 mm 左右。电离层高阶项对定位的影响最大可超过 4 mm。在 Z 方向的高阶项残差一般为负值且较大,Y 方向的改正量总

体较小。随着纬度的升高,坐标差逐渐减小,这与 TEC 值随着纬度的变化规律是一致的。同时,表 1 中数值也直观表明,即使在太阳活动的低谷期,高阶电离层误差仍然对定位产生一定的影响,故在 mm 级定位中此项误差应该加以考虑。

表 1 考虑与不考虑高阶电离层改正的静态定位坐标差/mm

Tab. 1 Static Positioning Coordinate Difference Between with and Without Higher-order Ionospheric Correction/mm

测站位置	站名	高峰期				波谷期			
		X	Y	Z	3D	X	Y	Z	3D
低纬度	dgar	1.40	0.80	-3.00	3.49	0.00	0.60	-1.00	1.25
	guam	-0.60	1.00	-2.60	4.33	0.00	0.60	-0.60	1.25
	riop	-1.00	1.20	-1.20	3.85	0.00	0.00	-0.80	0.80
中纬度	adel	-1.60	0.40	-1.80	2.44	0.00	0.40	-0.40	0.57
	bjfs	-0.20	0.00	-2.40	2.41	0.20	0.00	-0.40	0.45
	brmu	0.40	0.40	-2.20	2.27	0.20	0.00	-0.60	0.63
高纬度	fair	-0.40	0.00	-1.60	1.65	-0.20	0.00	-0.40	0.45
	kely	0.40	0.80	-1.40	1.66	-0.20	0.20	0.00	0.28
	syog	-0.60	1.20	-0.80	1.56	-0.20	0.00	0.00	0.20

3.2 动态定位精度影响分析

PPP 动态定位精度是指在动态解算测站位置坐标时进行双向滤波,取后向滤波的结果与静态定位的结果作比较。同样比较了低、中、高纬度测站电离层高阶项改正前后测站 X、Y、Z 3 个方向的动态定位精度,由于篇幅限制,本文仅给出测站 BRMU 在太阳活动峰值期(2000-07-01)的结果,如图 2 所示。其余测站在同一天的电离层高阶项改正前后的 RMS 结果如表 2 所示。结合图 2 和表 2 可以得出,高阶项改正后的 3 个方向的定位精度均高于未改正的结果。

3.3 动态定位收敛速度影响分析

在 PPP 动态定位中,采用 L_3 组合观测值虽然削弱了电离层的影响,但是该组合也破坏了载波相位的整周特性并且对噪声进行了放大,使得

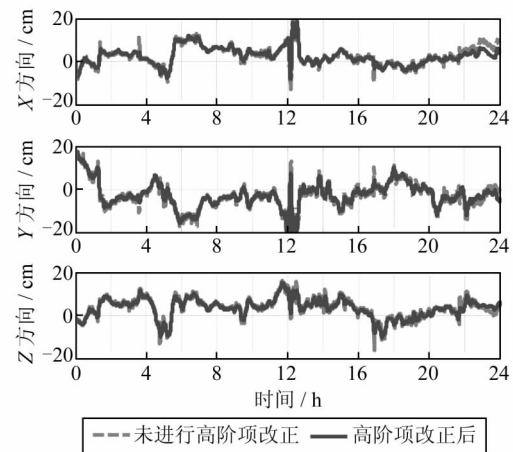


图 2 高阶电离层误差对动态 PPP 定位精度的影响(BRMU 站)

Fig. 2 Higher-order Ionosphere Error Effect on PPP Kinematic Positioning Precise (BRMU Station)

表 2 考虑与不考虑高阶电离层改正的动态定位精度/cm

Tab. 2 RMS of Kinematic Positioning Coordinate with and Without Higher-order Ionosphere Correction/cm

测站位置	站名	仅考虑一阶项(cm)				一阶项+高阶项(cm)			
		X	Y	Z	3D	X	Y	Z	3D
低纬度	guam	9.95	6.33	5.01	12.81	9.73	6.25	5.01	12.60
	dgar	3.15	8.56	2.02	9.34	3.06	8.37	2.06	9.14
中纬度	brmu	4.30	6.07	4.61	8.75	4.01	5.82	4.49	8.37
	bjfs	3.89	2.34	5.46	7.10	3.65	2.19	5.32	6.81
高纬度	kely	2.97	4.76	3.59	6.66	2.85	4.62	3.49	6.45
	syog	3.45	3.76	6.11	7.96	3.27	3.70	5.72	7.56

坐标收敛时间增加。精化 GNSS 定位的误差改正模型,可以提高 PPP 的收敛速度。因此,本节

分析了高阶电离层误差对收敛速度的影响。实验选取了 § 3.1 中相同的低、中、高纬度的 9 个测

站,采样间隔为 30 s,截止高度角定位 10° 。实验结果表明,在太阳活动低谷时期,高阶项改正前后动态定位的收敛时间无明显差别,在太阳活动峰值期的高纬度测站的情况也差别不大。而在太阳活动的高峰年,中、低纬度的测站在进行电离层高阶项改正后,其收敛时间明显缩短。限于篇幅,本文对中纬度测站 NTUS 站在 2001-10-28 电离层活跃时段 4~6 时的数据进行处理,结果见图 3。从图 3 中结果可以看出,进行高阶项改正后定位收敛时间缩短,且在 3 个方向均有一致的表现。

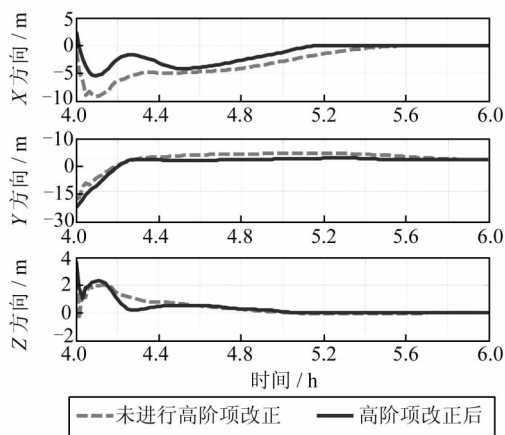


图 3 高阶电离层误差改正对定位收敛时间的影响(NTUS 站)

Fig. 3 Higher-order Ionospheric Effect on Convergence Time of PPP Kinematic Positioning(NTUS Station)

4 结 语

电离层误差一直是 GNSS 定位的主要误差来源之一。在 PPP 定位中,虽然组合观测值 L_3 消去了电离层一阶项误差,但是高阶项误差依然存在。本文描述了 L_3 观测值的电离层高阶项误差改正公式,通过该公式计算了高阶项误差在太阳活跃期和低谷期的改正量,其最大量值在 cm 级。在此基础上,研究了电离层高阶项误差对 PPP 静态定位精度和动态定位收敛时间的影响。数值分析表明,进行电离层高阶项改正后,静态定位精度得到 mm 级的改善,动态定位的收敛时间也明显缩短。上述现象在电离层活跃期或磁暴、地震等极端条件下更为显著。因此,GNSS 高精度定位应考虑电离层高阶项误差改正。

参 考 文 献

- [1] 刘西凤,袁运斌. 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[J]. 中国科学:物理学力学天文学,2010, 40(5): 658-662
- [2] Bassiri S, Hajj G A. Higher-order Ionospheric Effects on the Global Positioning System Observables and Means of Modeling Them[J]. Manuscripta Geodaetica, 1993, 18(6): 280-289
- [3] Klobuchar J A. Ionospheric Effects on GPS[J]. GPS World, 1991, 2(4): 48-51
- [4] Elizabeth J, Petrie M. A Review of Higher Order Ionospheric Refraction Effects on Dual Frequency GPS[J]. Surveys in Geophysics, 2011, 32(3): 197-253
- [5] 伍岳,孟泱,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[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2005,30(7): 601-604
- [6] Kedar S, Hajj G A, Wilson B D, et al. Effect of the Second Order GPS Ionospheric Correction on Receiver Positions[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(16): 18-29
- [7] Hernandez-Pajares M, Juan J M, Sanz J, et al. Second-order Ionospheric Term in GPS: Implementation and Impact on Geodetic Estimates[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: 1-16
- [8] Moreno B, Radicella S, Lacy M C, et al. On the Effects of the Ionospheric Disturbances on Precise Point Positioning at Equatorial Latitudes[J]. GPS Solution, 2011, 15(4): 381-390
- [9] Hoque M, Jakowski N. Higher-order Ionospheric Effects in Precise GNSS Positioning[J]. Journal of Geophysics, 2006, 81(4): 259-268
- [10] 李征航,陈锴,刘万科,等. 顾及 $f\sim 3$ 项的电离层延迟模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(2): 139-143
- [11] Stefan S. How to Use CODE's Global Ionosphere Maps[R]. Astronomical Institute, University of Berne, Berne, Switzerland, 1997
- [12] Finlay C. International Geomagnetic Reference Field: the Eleventh Generation [J]. Geophysical Journal International, 2010, 183(3): 1 216-1 230

第一作者简介:匡翠林,博士,主要从事 GNSS 定轨定位研究。
E-mail:kuangcui@163.com

(下转第 924 页)

Eliminating Constellation Rotation Error of Autonomous Orbit Determination Using Differential Anchor Stations

SHANGG Lin^{1,2} REN Qianyi¹ ZHANG Rui¹ LI Guotong¹

(1 Shanghai Micro-satellite Engineering Center, 99 Haike Road, Shanghai 201203, China)

(2 Shanghai Institute of Micro-system and Information Technology, 865 Changning Road, Shanghai 200050, China)

Abstract: The constellation rotation error of autonomous orbit determination based on the inter-satellite measurement can be effectively eliminated using anchor stations. But, the accuracy of orbit determination using anchor stations is poor because of the system errors caused by ionospheric delay and tropospheric delay etc. An anchor station timing difference measurement method, using the principle that the system error of a navigation satellite to ground ranging link varies very little in a short time, is proposed to eliminate the system error of measurement system and improve the accuracy of autonomous orbit determination. Simulation results show that the rotation of the constellation can be effectively restricted using the anchor station method. In addition, the timing difference measuring algorithm performs better than direct measurement methods.

Key words: autonomous orbit determination; constellation rotation; anchor station; URE

About the first author: SHANG Lin, Ph. D candidate, majors in autonomous navigation of navigation satellites.

E-mail: shangwlin@163.com

.....
(上接第 891 页)

Higher-order Ionospheric Error Correction for Precise Point Positioning

KUANG Cuilin¹ JIN Lei^{1,2}

(1 Department of Survey Engineering and Geomatics, Central South University, 932 South Lushan Road, Changsha 410083, China)

(2 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: Ionospheric delay is one of the main error sources in GNSS positioning. This paper describes a formula derived to correct higher-order ionosphere error of L_3 observation and analyzed the effects on the static and kinematic positioning accuracy. Numerical results show that correcting the higher-order ionospheric error improves the PPP static and kinematic positioning accuracy and shorten the convergence time of PPP kinematic positioning.

Key words: high-order ionosphere; precise point positioning; positioning precise; convergence time

About the first author: KUANG Cuilin, Ph. D, majors in GNSS orbit determination and positioning.

E-mail: kuangcuilin@gmail.com