

GPS 单频机电离层延迟改正新算法

涂 锐¹ 黄观文¹ 张 勤¹ 王 利¹

(1 长安大学地质工程与测绘学院, 西安市雁塔路 126 号, 710054)

摘 要: 探讨了几种新的电离层延迟改正算法, 通过算例检验了新方案的效率和可行性, 对不同精度用户选取电离层延迟改正方案给出了建议。

关键词: GPS; 单频机; 电离层延迟; 改正算法

中图法分类号: P228.41

对于 GPS 双频用户, 通常可以利用电离层延迟效应与信号频率的平方反比关系, 采用双频无电离层组合方式有效地消除电离层延迟影响^[1]。但对于单频导航定位用户, 电离层延迟的高效改正是最关键的技术之一。高精度改正电离层延迟误差不仅是单频用户提高精度的迫切需求, 也是双频用户进一步提高测量精度的基本要求。本文探讨了几种新的电离层延迟改正算法, 分别进行了特性分析及改正结果分析评价, 为单频用户高效率改正电离层延迟误差提供了新的思路和方法。

1 电离层延迟改正新算法

在 GPS 导航定位研究和应用中, 可以根据具体条件和应用性能需求, 设计巧妙合理的算法和方案, 高效地解决单频接收机电离层延迟问题。

1) 基准站改正算法。当单频用户的测区内拥有双频基准站时, 可以利用基准站的改正信息来削弱单频用户的电离层延迟影响。具体方法见文献[2]。

2) 单频反演双频进行无电离层组合消除算法。当测区有 3 个或以上的基准站时, 可以通过双频数据建立历元差分电离层模型(SEID 模型), 将单频数据反演得到双频数据, 进而采用无电离层组合观测方程消除电离层延迟误差, 具体方法见文献[3]。

3) 电离层延迟精细改正算法。在已知电离

层总电子含量的基础上, 根据国际地磁场参考模型 IGRF 给出的地磁场大小和方向, GPS 伪距观测值 P_1 天顶方向电离层延迟一阶项、二阶项可以表示为^[4,5]:

$$I_{P_1}^{(1)} = \frac{C_x}{2f_1^2} \cdot \text{VTEC} = \alpha_1 \cdot \text{VTEC} \quad (1)$$

$$I_{P_1}^{(2)} = \frac{C_x \cdot C_y}{2f_1^3} \cdot B \cdot \cos\theta \cdot \text{VTEC} = \beta_1 \cdot B \cdot \cos\theta \cdot \text{VTEC} \quad (2)$$

式中各参数意义请参见文献[4,5]。

利用式(1)和式(2)可以定量计算电离层一、二阶项延迟的数值大小, 进而对单频观测值电离层延迟进行精细改正。因二阶项量级较小, 可以只考虑一阶项。

4) 参数估计改正算法。由于影响电离层的因素很多, 不同因素又带有较大的随机性, 常规模型对各因素的相互关系、变化规律及其内部机制的描述并不全面, 因此, 利用这些模型得到的电离层延迟并不能达到十分理想的精度^[6]。本文分析了常规的不同电离层映射函数和延迟函数的特点, 同时提出利用不同投影函数构造电离层参数对延迟误差进行实时估计, 即将电离层参数作为待定参数代入观测方程, 同位置参数、模糊度参数等一同求解, 从而达到提高改正电离层误差影响的目的。对电离层延迟误差, 引入参数进行估计:

$$L_{1\text{流}} = A_1 X_1 + B_1 dt_1 + C_1 N_1 + D_1 I_1 + \varphi_{\text{others}1} + \varepsilon_1 \quad (3)$$

式中, D_1 为参数系数; I_1 为电离层参数, 可以根

据不同的电离层投影方式选择电离层参数个数,详情见文献[7]。

5) 扩展的组合改正算法。电离层延迟的改正是一项复杂的过程,在上述电离层延迟改正技术中,可以采用多种技术进行组合改正。在常规模型改正绝大部分电离层延迟的基础上,剩余的电离层残差可以当做未知参数进行参数估计;也可先利用基准站的准确坐标,提取包含有电离层延迟信息的改正信息,对单频用户进行电离层延迟改正后,再用参数估计剩余的电离层残差;或者先借助于用户区域内的多站双频观测数据建立历元差分电离层模型,将单频数据反演成双频进行无电离层组合后,再进行基准站改正等。组合改正技术通过组合两种或多种电离层改正技术,逐步削弱电离层延迟误差,能得到较好的改正效果。

2 不同电离层延迟改正算法特性分析

以上5种电离层延迟改正算法在改正精度、实时性、可操作性等方面各有自己的优缺点。首先,基准站改正算法利用双频基准站和单频流动站电离层延迟误差近似共性的特点来消除单频流动站用户的电离层延迟误差,其改正精度取决于基准站坐标的精度和两地电离层延迟误差的共性程度,并且随着基准站和流动站距离的增加,电离层误差共性程度降低,改正精度会降低。在现代数据通信和网络发达的条件下,该算法基本可以实现实时或准实时改正,但是单频用户需要有双频基准站的支持,在某些区域不可实施。单频数据反演双频数据进行无电离层组合算法是借助双频基准站数据建立区域历元差分电离层模型,进而将单频数据反算得到双频数据。这种算法的精度主要取决于双频基准站的数据质量和几何密度分布,在基准站分布密集均匀区域,改正精度较高。它的实时性也需要通信技术的支持,其优点是单频数据反演的双频数据可以采用双频定位方式结算,缺点是算法复杂,且需要单频用户的区域有较多的双频基准站。电离层精细改正技术是在知道电离层总电子含量的基础上,计算地磁场的大小和方向,进而计算电离层延迟改正量,计算复杂,其精度由电离层总电子含量的精度决定,因电离层电子总量实时播发困难,因而实时性较差,但该算法有较强的理论研究意义。参数估计方法将电离层延迟作为未知参数进行估计,可以忽略电离层各因素相互关系及内部机制,函数模型设计

简单,精度较好,实时性、适用性强,随机模型的正确确定是提高其精度的前提。扩展的组合改正算法综合利用两种算法的优点,实现优势互补,精度和实时性都较好,只是算法复杂,计算操作较难。总之,本文所提的几种电离层延迟改正算法的改正精度、实时性都是建立在数据通信和基准站的基础之上。随着通信网络技术和大量GPS连续跟踪站的密集建设,它们的改正性能将优于传统的电离层改正技术。

3 实验与分析

3.1 实验内容与方法

为了比较和分析本文探讨的算法的电离层改正效果,用单频PPP定位结果进行评价。实验数据取自江苏省GPS地面沉降监测网络2009年10月2日的的数据,数据采样间隔30s,数据观测值采用 C_1 码和 L_1 相位值进行计算。从IGS分析中心下载了相应的精密星历和5min采样率的钟差文件,数据处理软件采用自编的精密单点定位程序P3Solution。实验内容和方法可以概括为:

1) 电离层常规技术改正。利用同一测站的数据进行单频PPP定位,电离层分别采用Klobuchar模型(AR-1)、格网电离层模型(AR-2)和区域电离层模型(AR-3)改正。需要说明的是,算例中格网电离层模型采用CODE全球电离层模型,区域电离层模型是利用实验区的CORS站数据,基于载波平滑伪距和最小二乘曲面拟合模型建立的^[8]。

2) 电离层新算法改正。电离层延迟分别采用精细改正技术(AR-4)、参数估计(AR-5)、SEID模型单频反演双频进行无电离层组合(AR-6)以及基准站改正技术(AR-7)消除。需要说明的是,精细改正算法中的国际地磁场模型采用IGRF11,参数估计算法采用电离层延迟3参数估计^[7],基准站与实验站的距离最近的为37km,最远的121km。

3) 电离层组合算法改正。先进行基准站改正,再进行参数估计(AR-8)和基准站改正,最后再利用SEID模型单频反演双频进行无电离层组合(AR-9)。

3.2 实验结果与分析

将实验结果与双频差分解(精度优于5mm)相比较,其互差可认为是单频PPP的定位精度。从单频PPP收敛速度和定位精度等方面分析和评价本文算法的有效性,实验结果见图1~4和表1。为方便画图,将定位残差统一取绝对值并画

在零刻度下面,图中的()表示该值是绝对值,表 1 给出了收敛速度统计信息。

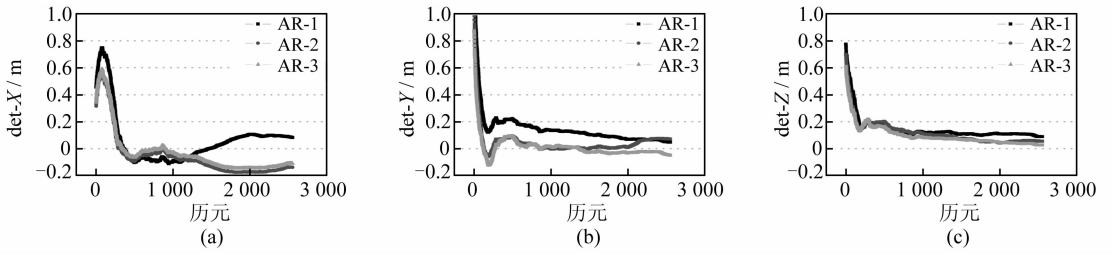


图 1 电离层常规技术改正后的单频 PPP 收敛图

Fig. 1 Convergence Map of Single PPP While Use Regular Ionosphere Correction Technology

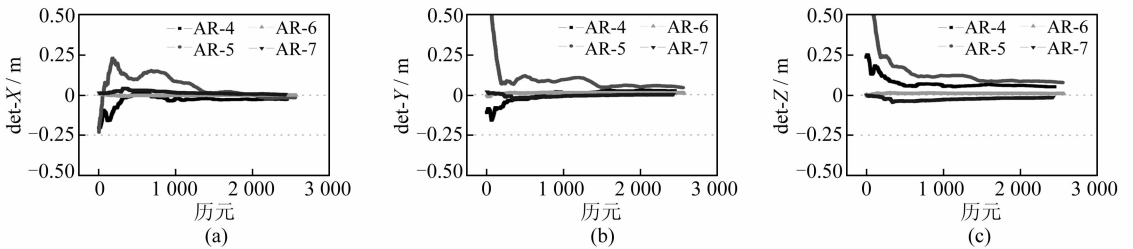


图 2 电离层新技术改正后的单频 PPP 收敛图

Fig. 2 Convergence Map of Single PPP While Use New Ionosphere Correction Technology

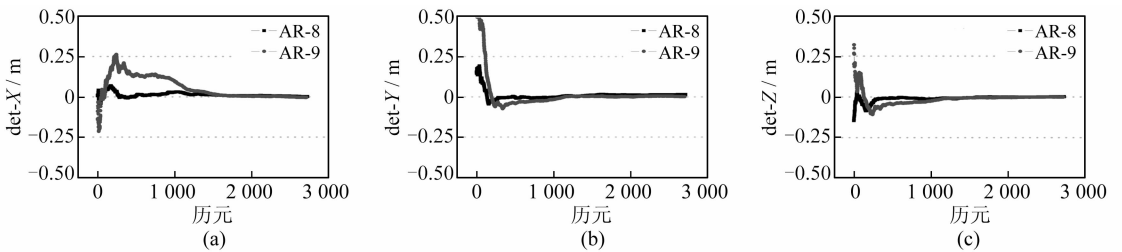


图 3 电离层组合技术改正后的单频 PPP 收敛图

Fig. 3 Convergence Map of Single PPP While Use Combination Ionosphere Correction Technology

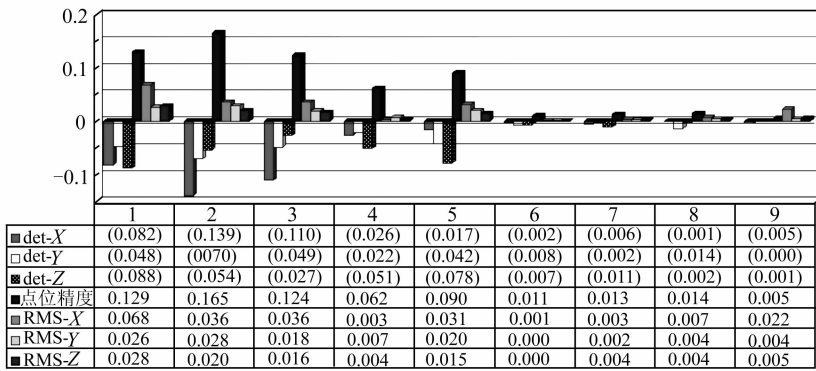


图 4 不同电离层改正技术的单频 PPP 定位精度统计图

Fig. 4 Statistical of Positioning Accuracy of Single PPP While Use Different Ionosphere Correction Technology

表 1 不同方案收敛速度点位精度统计表/m

Tab. 1 Accuracy Statistics of Convergence Rate of Different Programs/m

方案	0.5 h	1 h	2 h	5 h
AR-1	1.033	0.802	0.409	0.227
AR-2	0.734	0.542	0.244	0.165
AR-3	0.697	0.564	0.286	0.125
AR-4	0.231	0.252	0.145	0.061
AR-5	0.622	0.461	0.331	0.222
AR-6	0.003	0.007	0.009	0.011
AR-7	0.019	0.018	0.038	0.050
AR-8	0.100	0.079	0.053	0.008
AR-9	0.271	0.242	0.183	0.007

从图 1 和图 4 中可以看出,常规的模型改正技术效果都较差,单频 PPP 收敛速度较慢,定位精度较差,相比较而言,区域电离层模型和网格模型改正精度略高于广播星历模型。从图 2~4 和表 1 中可以看出,采用电离层延迟改正新算法,单频 PPP 的收敛速度和定位精度明显优于常规方法,尤其是基于 SEID 模型的单频反演双频进行无电离层组合技术和基准站改正技术,高效率解决了电离层延迟问题,使得单频 PPP 收敛速度大

大提高,明显优于常规模型改正,0.5 h内就收敛到 cm 级精度,单天解定位精度从 dm 提高到 cm;在精细改正算法中,由于电离层电子总量的精度不高,改正的效果也相对较差。从图 3、4 中可以看出,组合改正技术中,基准站改正和参数估计组合技术使得收敛速度最快,基准站改正和 SEID 模型单频反演双频无电离层组合技术定位精度最高,单频 PPP 达到 cm 级水平。从图 1~4 整体可以看出,常规的电离层模型改正技术精度较低,改正效果较差;新的改正算法和组合改正算法改正效果较好,有效地克服了单频用户电离层延迟难以高精度改正的问题,提高了导航定位的速度和精度。

4 结 语

卫星导航定位技术中,电离层延迟误差是一个很重要的误差,尤其是对单频用户而言。为了有效消除或削弱电离层延迟误差的影响,提高导航定位的精度,需要选择一个合适的电离层延迟改正方案。对于不同的用户需求,电离层延迟改正的精度要求不一样,实时性和可操作性要求也不尽相同,用户应根据自己的精度、实时性、可操作性、成本等方面综合权衡,选取简单有效又满足需求的电离层延迟改正方案。本文研究探讨的几种新的电离层改正算法在精度、实时性和可操作性上各有优缺点,并且改正精度较高,稳定性较好。随着各城市连续跟踪站的建设和加密以及通信技术的发展,它们将逐步替代常规的电离层改

正手段。

参 考 文 献

- [1] 章红平,平劲松,朱文耀,等. 电离层延迟改正模型综述[J]. 天文学进展,2006,24(1):16-26
- [2] 黄观文,涂锐. 基于单基准站改正信息的实时精密单点定位算法[J]. 大地测量与地球动力学,2010,30(6):135-139
- [3] 涂锐,黄观文,张勤,等. 基于 SEID 模型的单频 PPP 双频解算方法研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版,2011,36(10):1 187-1 191
- [4] 刘西风,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
- [5] 刘西风,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[C]. 第一届中国卫星导航学术年会,北京,2010
- [6] 张小红,李征航,蔡昌盛. 利用双频 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(4):140-143
- [7] 涂锐,张勤,黄观文. 单频精密单点定位电离层延迟处理方法研究[J]. 大地测量与地球动力学,2010,30(2):99-103
- [8] 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

第一作者简介:涂锐,博士,研究方向为 GNSS 精密定位。

E-mail:turui-2004@126.com

A New Algorithm on Ionospheric Delay Correction for Single Frequency GPS Receivers

TU Rui¹ HUANG Guanwen¹ ZHANG Qin¹ WANG Li¹

(1 College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, 126 Yanta Road, Xi'an 710054, China)

Abstract: For GPS single frequency users, the ionospheric delay error is the most serious and intractable problem. High efficiency and high precision correction of ionospheric delay error is the most critical factor to determine the positioning accuracy of single frequency users. Several new correction programs are discussed. The efficiency and feasibility of new algorithm are tested by examples. And some reasonable proposals for different precision users to select ionospheric delay correction programs are given.

Key words: GPS; single frequency GPS receivers; ionospheric delay; correction algorithm