

# 单频精密单点定位电离层改正方法和定位精度研究

宋伟伟<sup>1,2</sup> 施 闯<sup>2</sup> 姚宜斌<sup>1</sup> 叶世榕<sup>2</sup>

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)  
(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:**分析了单频精密单点定位的难点——电离层延迟改正和周跳探测,讨论了单频观测模式下电离层延迟的模型改正和半合改正两种解决方法。在此基础上,利用自主研发的单频精密单点定位软件同时处理多组数据,比较使用不同的电离层改正方法的影响。结果表明,半合改正计算结果优于格网模型改正法。利用全球不同地区多天的数据进行单频精密单点定位,单频精密单点定位可以达到 dm 级的精度。  
**关键词:**单频;精密单点定位;电离层;周跳  
**中图法分类号:**P228.41

早在 1997 年,Zumbeger 就提出了精密单点定位方法,采用非差模型进行精密单点定位(precise-point-positioning, PPP),其单天解的定位精度在水平方向达到 1 cm,高程方向达到 2 cm<sup>[1]</sup>。目前,国内外已有不少 PPP 研究成果<sup>[2-10]</sup>。武汉大学自主研发的 PANDA 软件作为卫星导航系统数据的综合分析平台,可以满足多种相关领域科学研究的需求,利用双频 P 码接收机在全球范围内可以实现 10~20 cm 精度的实时精密单点定位<sup>[8]</sup>。

目前,继双频 PPP 研究后,已有不少学者开始开展单频 PPP 的研究工作<sup>[7]</sup>。国内关于单频 PPP 的研究还没有比较成熟的成果。考虑到单频接收机的价格要远远低于双频接收机的价格,因此单频 GPS PPP 必将有广泛的应用前景。本文分析研究了单频 PPP 的关键技术,并开发了单频 PPP 软件,最后通过全球不同地区多天观测数据的计算结果验证了该软件进行单频 PPP 计算的精度。

## 1 单频 PPP 关键技术

目前,PPP 大多采用非差模式计算,其观测方程为:

$$L = \rho - C(d_i - d_T) - \lambda N + d_{\text{trop}} +$$

$$d_{\text{ion}} + d_{\text{else}} + \epsilon_{\varphi} \quad (1)$$

式中, $L$  为相位观测值; $\rho$  为几何距离; $d_i$  为卫星钟差; $d_T$  为接收机钟差; $C$  为光速; $\lambda$  为波长; $N$  为整周模糊度; $d_{\text{trop}}$  为对流层延迟误差; $d_{\text{ion}}$  为电离层延迟误差; $d_{\text{else}}$  为其他未列举的误差,包括相对论效应、固体潮、大洋负荷、相位中心改正等。

相对于差分定位而言,PPP 未知数更多,误差消除不彻底,需考虑更多的误差改正,如卫星轨道误差、卫星钟差、对流层误差、潮汐改正等。这些 PPP 所共有的问题本文不作讨论,本文仅讨论相对于双频 PPP 而言,单频 PPP 的难点以及需要解决的关键技术。

单频 PPP 由于只能使用一个频率上的伪距观测值和相位观测值,无法通过组成各种双频组合探测周跳,因此,周跳探测是单频 PPP 的一个难点。其次,单频 PPP 无法通过无电离层组合观测值来减少电离层误差的影响,因此,电离层影响是单频 PPP 的另一个难点。

### 1.1 单频周跳探测

周跳的探测和修复是 GPS 载波相位数据处理中不可缺少的重要组成部分。只有消除了周跳的“干净”相位数据,才能用于精密定位。对于单频接收机用户,目前已有的周跳探测方法有三次差的最小二乘残差法、高阶差分法、低阶多项式拟合法、小波变换法、拟准检定法、外推法、卡尔曼滤

波法等。

为了可靠、有效地修复探测,本文综合利用了多项式拟合法和载波相位变化率法来探测周跳<sup>[10]</sup>。多项式拟合以星间单差为处理对象,探测周跳发生的历元并估计周跳的大概范围;再根据载波相位变化率法在此范围之内搜索正确的周跳估值;最后,可以通过定位结果残差检验修复的正确性。当残差较大时继续搜索,直到残差小于一个限定值后停止搜索,此限定值可为经验值,也可根据观测值的精度来确定。

1.2 电离层延迟改正

单频 PPP 中无法通过双频改正电离层延迟,也不可能用类似于对流层延迟的参数估计的形式来改正。目前,一般可以通过两种方法来削弱电离层延迟影响。

1.2.1 模型改正

目前,IGS 提供全球的电离层格网模型(i 文件),可以通过内插的方法获得全球任意地方任意时刻的电离层延迟改正。该文件以一定经纬度间隔进行格网化,以一定时间间隔给出这些格网点上天顶方向的电离层延迟。用户可以根据自身的近似经纬度和观测时间来进行内插,从而获得天顶方向电离层延迟。

计算时,首先需要对格网点进行选取,然后选取适当的函数表达式来进行内插。函数选取时既要考虑到数据处理的简单有效,又要考虑到函数要有足够的精度去逼近实际的电离层曲面。可以采用四点内插函数,内插精度可以达到 cm 级。

采用模型改正的方式分别改正伪距和相位的电离层延迟,再利用改正后的  $L_1$ 、 $C_1$  组成观测方程解算。由于  $L_1$  的频率相对  $L_2$  更高,具有更高的测距精度,因此,如果能够用模型精确地改正相位和伪距的电离层延迟,单频 PPP 的精度可以达到甚至超过使用无电离层组合观测值的双频 PPP 的精度。但事实上,由于电离层受太阳影响具有很多不确定性,目前电离层模型的精度都相对较低,格网模型的精度为 2~8 TECU。

1.2.2 相位/伪距半合改正

在不考虑电离层高阶项影响的前提下,伪距测量和载波相位测量所受到的电离层延迟大小相等,符号相反。把  $L_1$  和 C/A 码进行组合得到一个新的观测值: $L_a = (L_1 + \rho_{CA})/2$ ,其模糊度为  $N_a = N_1/2$ ,则以  $L_a$  为观测值的观测方程为:

$$L_a = \rho - \lambda_1 N_a - C(dt - dT) + d_{trop} + d_{else} + \epsilon_{L_a} \tag{2}$$

这样就消除了电离层一阶项,但是由于在精确的

相位观测值中引入了观测质量比较差的 C/A 码伪距观测值,因此,其定位精度也比使用双频组合观测值的双频 PPP 的精度要低。

2 单频 PPP 软件实现

本文数据计算所用的软件系笔者在自编的双频 PPP 软件的基础上增加单频解算模块,解算流程、数学模型与双频大体相同,以 Kalman 滤波的方式逐历元解算并输出结果。其中,半合改正解算模式以伪距相位半合观测值代替相位观测值,格网模型改正解算模式以模型改正电离层后的  $C_1$  和  $L_1$  为观测值;综合利用了多项式拟合法和载波相位变化率法来探测周跳<sup>[10]</sup>;误差改正模型与双频 PPP 大体相同,考虑到的误差模型主要有接收机相位中心偏差、卫星相位中心偏差、固体潮改正、相位缠绕、相对论效应、引力延迟、地球自转改正和对流层延迟等。其中,对流层延迟先模型改正,再以 Niell 湿分量投影函数为系数,将对流层延迟残余影响作为未知数,以随机游走形式进行参数估计。图 1 为程序流程图。

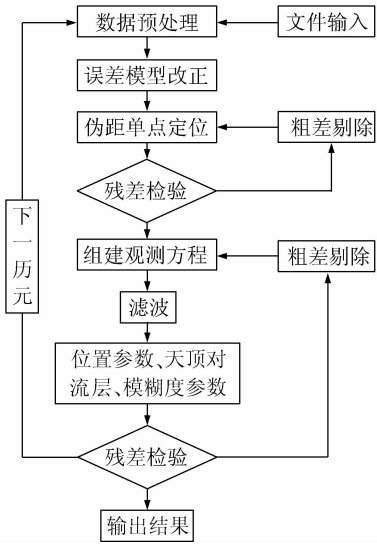


图 1 单频 PPP 程序实现流程图

Fig. 1 Flowchart of Single-Frequency PPP

3 单频格网模型法与半合改正法精度比较

为了比较两种方法的定位精度,分别用两种方法对同一组数据进行处理。2007 年 4 月 7 日在武汉大学测绘学院采集了 24 h 的单频数据,采样间隔为 30 s,接收机为 Hemisphere 单频接收机。观测文件中含有  $L_1$  相位观测值、C/A 码伪

距观测值、 $D_1$  多普勒观测值。下载 IGS 跟踪站 WUHN 当天观测数据,采用 TGO 解算得该点坐标。由于该点距离 WUHN 跟踪站只有几百 m,基线解精度非常高,由此精确的基线解与精确的跟踪站已知坐标所得到的绝对坐标可近似作为真值。使用 IGS 最终产品精密星历(15 min 间隔)和精密钟差(30 s 间隔)进行解算。从 GAMIT 官方网中下载的太阳表、月亮表、卫星类型列表,以及各种类型接收机天线的相位中心偏差文件,用于接收机天线相位中心偏差、卫星天线相位中心偏差、相位缠绕、潮汐影响等误差的改正。图 2 为分别使用两种方法的定位结果与参考值在 N、E、U 方向上的差值。

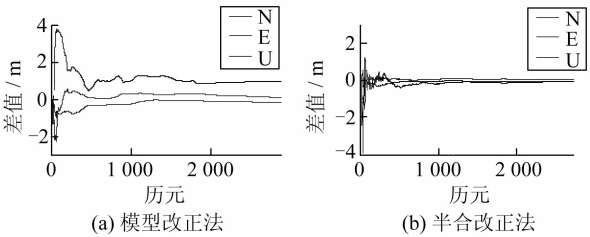


图 2 使用不同电离层改正方法的定位结果  
Fig. 2 Results of Single-Frequency PPP with Different Ionosphere Correction Methods

表 1 分别统计了两种方式计算结果在 1 h 后与 3 h 后的 RMS 值,BIAS 为最终结果与参考值的比较。

表 1 两种方法计算结果统计表/m

Tab. 1 Precision of Single-Frequency PPP with Different Ionosphere Correction Methods				
改正方法	方向	RMS(1 h)	RMS(3 h)	BIAS
半合改正	N	0.058	0.021	-0.048
	E	0.030	0.022	0.055
	U	0.105	0.068	-0.113
格网模型	N	0.181	0.105	-0.175
	E	0.103	0.084	0.207
	U	0.346	0.154	1.009

从图 2 和表 1 中可以看出:

- 1) 使用格网模型改正电离层延迟,在水平方向能达到几个 dm 的精度,但是高程方向的误差达到了 1 m 左右;
- 2) 使用半合改正,在 N、E、U 方向能达到 dm 级的精度,在收敛较长时间后精度甚至可以达到亚 dm 级。

很明显,半合改正比格网模型改正达到的精度要高,其主要原因是半合改正中不需要考虑电离层的影响,而滤波方式对 C/A 码引入的噪声具有一

定的克制作用;而格网模型所改正的电离层延迟精度不高,特别是高程方向的残余影响还很大。

### 4 单频 PPP 在全球不同地区的应用及精度分析

为了更充分地分析评定单频 PPP 的精度,下载 IGS 跟踪站的数据,以单频方式(半合模型)进行计算,将计算结果与真值进行比较。选取 2008 年年积日为 1~30 共 30 d 的数据,分别在高中低纬各选一个测站进行计算。测站列表见表 2。图 3 为计算结果与 IGS 给出的测站坐标差值统计图。

表 2 测站信息列表

Tab. 2 List of Observe Stations			
测站名	纬度/(°)	地区	备注
MCM4	-77.84	高纬度	南极圈内
BJFS	39.61	中纬度	北京房山
NTUS	1.35	低纬度	赤道附近

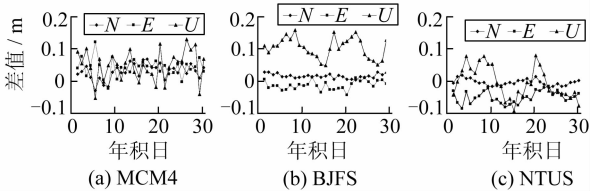


图 3 MCM4、BJFS、NTUS 单天计算结果与真值比较图

Fig. 3 Precision of Single-Frequency PPP of MCM4, BJFS, NTUS

由图 3 可以看出:

- 1) 在全球高、中、低纬地区,利用单频 PPP 都可以达到 dm 级的精度。其中,N 方向的计算结果优于 1 dm。
- 2) 在高纬度地区,卫星的高度角相对减少,这在一定程度上也造成了其计算结果相对较差,但区别不很明显。
- 3) 限于篇幅限制,本文没有将收敛 1 h 以后的 RMS 值统计结果给出。根据其 RMS 统计结果可以发现,随着纬度的降低,由于卫星速度矢量在 E 方向的分量减小,在赤道附近 E 方向收敛最慢,收敛 1 h 以后的 E 方向的内符合精度跟其他地区相比精度最差。

### 5 结 语

通过本文的分析可知,利用 IGS 服务中心提供的精密星历和精密钟差,采用单频相位加伪距

观测值可以达到 dm 级的定位精度,其中 N 方向的计算结果优于 1 dm。半合改正比格网模型改正所达到的精度要高。使用格网模型改正电离层延迟,在水平方向能达到几个 dm 的精度,高程方向的误差达到了 1 m 左右;而使用半合改正则能达到 dm 级的精度,在收敛较长时间后精度甚至可以达到 cm 级。在高纬度地区,卫星的高度角相对减少,这在一定程度上也造成了其计算结果相对较差,但区别不很明显。随着纬度的降低,卫星速度矢量在 E 方向的分量减小,E 方向收敛减慢,内符合精度降低。

参 考 文 献

[1] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large networks [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 5 005-5 017

[2] 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(3): 234-239

[3] 韩保明,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

[4] 张小红,刘经南,Forsberg R. 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,2006,1(31):19-22

[5] Kouba J, Heroux P. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products[J]. GPS Solutions, 2001,5(2):12-28

[6] Beran T S, Bisnath B, Langley R B. Evaluation of High-Precision Single-Frequency GPS Point Positioning Models [C]. ION GNSS 17th International Technical Meeting of the Satellite Division, Long Beach,CA, 2004

[7] Gao Yang, Zhang Yufeng, Chen Kongzhe. Development of a Real-Time Single-Frequency Precise Point Positioning System and Test Results [C]. ION GNSS 19th International Technical Meeting of the Satellite Division, Fort Worth, TX, 2006

[8] 耿涛,赵齐乐,刘经南,等. 基于 PANDA 软件的实时精密单点定位研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007(4): 312-315

[9] 宋伟伟,姚宜斌,罗峰. 精密单点定位中周跳探测与修复方法研究[J]. 测绘信息与工程,2007(03):34-35

[10] 罗峰,姚宜斌,宋伟伟. 综合利用多项式拟合和载波相位变化率探测单频 GPS 周跳[J]. 全球定位系统, 2007(5):9-13

第一作者简介:宋伟伟,博士生。研究方向为 GNSS 精密定位。  
E-mail:songweiwei\_w hu@sina. com

Ionosphere Delay Processing Methods and Positioning Precision  
of Single Frequency Precise Point Positioning

SONG Weiwei<sup>1,2</sup> SHI Chuang<sup>2</sup> YAO Yibin<sup>1</sup> YE Shirong<sup>2</sup>

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

**Abstract:** We analyze the difficulties of single-frequency precise-point-positioning, including ionosphere delay and cycle slip detection. Two solutions of ionosphere delay in single-frequency mode are discussed. Based on these studies, we developed a precise point positioning software for single-frequency observation and use it to deal with the same data with two different methods. The results show that the second solution is better than the first one. Finally, 30 d data of different parts of the world were analyzed using this software, and the results prove that the single-frequency PPP accuracy can reach a dm level.

**Key words:** single-frequency; precise-point-positioning; ionospheres delay; cycle slip