

动态 PPP 模糊度固定方法及实验分析

畅 鑫¹ 左 翔¹ 张 伟¹

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘 要:采用 CNES 发布的整数卫星钟差产品,实现了模糊度固定的动态精密单点定位。分析了全球 10 个台站的观测数据,结果表明,模糊度固定后动态精密单点定位水平方向精度可达 1~2 cm,高程精度优于 3 cm。

关键词:动态;精密单点定位;非差;模糊度固定

中图分类号:P228.41

文献标志码:A

精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 技术不受参考站距离的限制,尤其适用于大范围远距离的动态精密定位领域^[1]。然而,传统 PPP 中模糊度参数无法固定为整数,导致 PPP 定位的精度难以达到双差定位的精度水平。近年来,国内外学者对精密单点定位中非差模糊度固定这一难题展开了深入研究。Ge^[2]、Laurichesse^[3] 和 Collins^[4] 等提出了非差模糊度固定的有效算法,并进行了大量的实验分析,表明固定非差模糊度可显著提高 PPP 定位精度。Geng 等率先将其应用到了长基线海洋测绘中,模糊度固定后精密单点定位精度可以达到 cm 级^[5]。Laurichesse 等也进行了动态 PPP 测试,表明模糊度固定可以显著提高 PPP 定位精度,高程方向精度改善尤为明显,可以达到 3 cm^[3]。在国内,聂建亮等率先研究了固定模糊度的动态精密单点定位,其结果也初步显示模糊度固定可以提高定位精度,高程方向精度达 7 cm,水平方向为 8 cm^[6]。本文将采用 CNES 发布的整数卫星钟差产品,实现模糊度固定的动态精密单点定位,并对全球分布的 10 个观测站数据,分析模糊度固定的时间以及模糊度固定后的动态定位精度等。

1 观测方程

GPS 双频伪距和载波相位观测方程为:

$$P_1 = \rho + c(dt^r - dt^s) + (b_{P_1}^r - b_{P_1}^s) + I + \epsilon_{P_1} \quad (1)$$

$$P_2 = \rho + c(dt^r - dt^s) + (b_{P_2}^r - b_{P_2}^s) +$$

$$q^2 I + \epsilon_{P_2} \quad (2)$$

$$\lambda_1 \varphi_1 = \rho + c(dt^r - dt^s) + (b_{L_1}^r - b_{L_1}^s) - \lambda_1 N_1 - I + \delta_{w1} + \epsilon_{L_1} \quad (3)$$

$$\lambda_2 \varphi_2 = \rho + c(dt^r - dt^s) + (b_{L_2}^r - b_{L_2}^s) - \lambda_2 N_2 - q^2 I + \delta_{w2} + \epsilon_{L_2} \quad (4)$$

其中, P_i 、 φ_i 分别为对应频率 i (1, 2) 的伪距和载波相位观测值, λ_i 为载波 L_i 的波长, N_i 为载波 L_i 对应的整周模糊度, ρ 为接收机 r 天线相位中心到卫星 s 之间的几何距离,还包括对流层延迟、相对论效应等与频率无关的误差, δ_{w_i} 为对应频率相位缠绕效应误差, I 为频率 f_1 上的电离层延迟, q 为载波相位频率之比 f_1/f_2 , c 为真空中的光速, dt^r 、 dt^s 分别为接收机和卫星钟差, $b_{L_i}^r$ 、 $b_{L_i}^s$ 分别为不同频率不同类型观测值对应的接收机端硬件延迟和卫星端硬件延迟^[7]。

为消除电离层影响,并考虑到钟差参数和硬件延迟参数的相关性,精密单点定位模型为:

$$P_3 = \rho + c(dt_{P_3}^r - dt_{P_3}^s) + \epsilon_{P_3} \quad (5)$$

$$L_3 = \rho + c(dt_{P_3}^r - dt_{P_3}^s) + B_{P_3} + \delta_w + \epsilon_{L_1} \quad (6)$$

其中, $dt_{P_3}^r = dt^r + b_{P_3}^r$, $dt_{P_3}^s = dt^s + b_{P_3}^s$; $b_{P_3}^r$ 和 $b_{P_3}^s$ 分别为接收机和卫星端组合硬件偏差,其中模糊度组合 $B_{P_3} = (b_{L_3}^r - b_{P_3}^r) - (b_{L_3}^s - b_{P_3}^s) - \lambda_3 B_3$,包含了整周模糊度和伪距与载波相位硬件延迟的组合。因为伪距和载波相位硬件延迟并不相同且变化复杂,因此 B_{P_3} 不再具有整数特性,这也是传统非差模糊度无法固定的原因。

为了恢复非差整数模糊度的整数特性,需要正确处理耦合在 B_{P_3} 中的硬件延迟。这里仅给出 Laurichesse 等的相关算法^[3]。

收稿日期:2013-01-15

项目来源:国家 973 计划资助项目(2013CB733300);国家自然科学基金资助项目(41304027)。

第一作者:畅鑫,硕士生,从事 GNSS 精密数据处理理论与算法研究。E-mail: xchang@whu.edu.cn

2 基于参考站网的卫星小数偏差及钟差确定

2.1 宽巷卫星小数偏差的确定

Laurichesse 等通过重新估计新的卫星钟差,利用卫星钟差吸收模糊度中的小数部分,实现模糊度的整数特性。在估计卫星钟差时,考虑到 L_3 波长较短,为了方便模糊度固定,一般将其分解为宽巷和窄巷组合,并采用 Melbourne-Wubben 组合固定宽巷模糊度,同时估计宽巷小数偏差:

$$MW = b_{MW}^r - b_{MW}^s - \lambda_w N_w + \varepsilon_{MW} \quad (7)$$

其中, $N_w = N_2 - N_1$ 为宽巷模糊度, b_{MW}^r 、 b_{MW}^s 分别为接收机端和卫星端的宽巷延迟。分析表明,接收机和卫星宽巷延迟并没有很强的时间相关性。对于 GPS 卫星而言,其变化非常缓慢,基本上 1 d 不会超过 1 周;对于接收机来说,在周围环境很好的情况下也是相对稳定的。需要注意的是,无论是接收机硬件延迟还是卫星宽巷硬件延迟,其实际数值可能不在 1 周范围以内,但是在实际计算中,我们仅估计其小数部分,而将其整数部分合并到宽巷模糊度中,这样处理并不会影响模糊度的固定^[8]。

2.2 整数卫星钟差的确定

为了估计新的卫星钟差,吸收耦合在模糊度中的硬件延迟参数,首先采用浮点解模糊度 PPP 方程(5)和(6),采用传统 PPP 估计测站坐标,确定测站到卫星端的几何距离 ρ 。然后将 ρ 和已经固定的宽巷模糊度 N_w 代入方程(6),得到:

$$L_3 - \rho + \lambda'_w N_w = cdt_{new}^r - cdt_{new}^s - \lambda'_1 N_1 + \varepsilon \quad (8)$$

于是, $cdt_{new}^r = cdt + b_{L_3}^r$, $cdt_{new}^s = cdt + b_{L_3}^s$ 。可见,新的钟差仅受载波相位硬件偏差影响,同时,模糊度参数也恢复了整数特性。

可以看出,式(7)和式(8)具有相同的结构,其求解方法也类似。以方程(8)为例,首先选择一个参考站,并将其 N_1 和 cdt_{new}^r 设为基准,再根据式(8)计算出该观测站所有可见卫星的钟差值 cdt_{new}^s ;然后加入一个观测站,利用刚得到的卫星钟差计算 $N_1 + cdt_{new}^s / \lambda'_1$ 。显然,这个值可以表示成一个整数和一个小数的和,可以很容易将它们分离出来。再加入一个站,重复之前的步骤,直到所有观测站都包括了。这时,就得到了一组整数 N_1 值,同时也得到了一组 cdt_{new}^s ^[9]。

3 单站 PPP 模糊度固定方法及数据处理流程

基于单台接收机的精密单点定位模糊度固定思路与上述确定卫星整数钟差的步骤类似。首先,将宽巷小数偏差产品代入式(7),固定宽巷模糊度;然后,将固定的宽巷模糊度代入方程(8),固定窄巷模糊度。在固定了窄巷模糊度后,即可得到高精度的接收机位置参数。需要注意的是,在求解单台接收机方程(7)和(8)时,仍然存在着接收机钟差和模糊度参数线性相关的问题,这可以通过选择任意一个模糊度参数作为基准,或者采用星间单差的方式消除这个问题。

可见,为了实现模糊度固定 PPP,首先需要获得宽巷卫星小数偏差和整数卫星钟差,目前国际 CNES 数据中心已经开始发布这 2 类产品。本文采用与 CNES 相同的系统误差改正模型,成功实现了模糊度固定 PPP。此外,为了分析动态 PPP 定位精度,在实际处理时,首先采用静态模式实现模糊度的快速固定,在固定了模糊度后(模糊度固定数量大于等于 4 个),将测站坐标随机模型设置为白噪声,开始动态定位。单站 PPP 模糊度固定方法流程图见图 1。



图 1 单站 PPP 模糊度固定流程

Fig. 1 Flow Chart of Single Station PPP Ambiguity Fixing

4 实验与分析

4.1 实验数据与方法

在全球范围均匀选取 10 个 IGS 跟踪站 2011 年年积日 231~233 三天的观测数据与钟差文件,进行模拟实时精密单点定位处理分析,其分布情况如图 2 所示。宽巷硬件延迟和整数卫星钟差均来自于法国 CNES 提供的产品^[3]。为简化模拟过程,本文只利用 GPS 卫星数据,不考虑 GLONASS 卫星。将解算结果与参考真值(使用周解作为参考真值)作差得到解算结果偏差,统计其均方根差。

4.2 模糊度收敛时间及固定效果

对观测数据先进行静态处理,固定模糊度,数

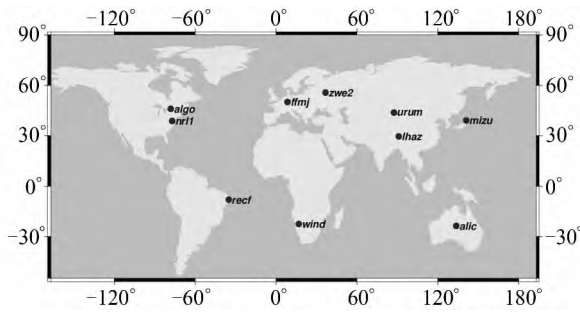


图 2 测站分布

Fig. 2 Distribution of Stations

据采样率为 5 s。表 1 为截取的各测站模糊度的固定时间及对定位的影响情况。

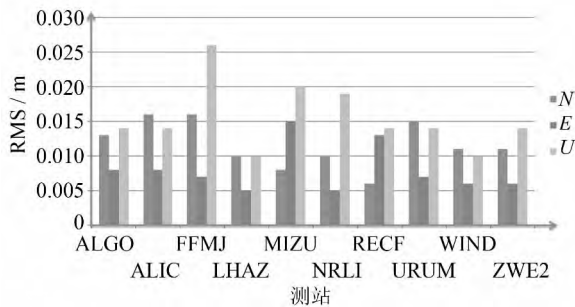


图 3 静态 PPP 固定解 RMS

Fig. 3 RMS of Static PPP Fixing Solution

由表 1 可见,窄巷模糊度在 1 h 左右能够固定(模糊度固定还与接收机类型、测站纬度差异、

PDOP 值等有关,但不是本文研究的重点)。RMS 为均方根差,其静态固定解水平方向为 mm 级,在 5 mm 左右,垂直方向在 1~1.5 cm 内。其模糊度固定结果较为可靠,固定成功率为 93%,可以保证后续模拟动态实验的准确性。

表 1 模糊度固定时间及对静态 PPP 精度影响

Tab. 1 Time of Ambiguity Fixing and Static PPP

站名	模糊度固定时间/min	Precision		
		N/m	E/m	U/m
ALGO	59	0.003	0.001	0.004
ALIC	58	0.002	0.000	0.002
FFMJ	59	0.003	0.000	0.003
LHAZ	58	0.002	0.001	0.001
MIZU	56	0.000	0.001	0.001
NRLI	55	0.001	0.001	0.001
RECF	59	0.002	0.006	0.003
URUM	57	0.003	0.001	0.003
WIND	61	0.002	0.001	0.002
ZWE2	59	0.001	0.000	0.001

4.3 动态 PPP 定位结果

使用所有观测站 3 d 每日 24 h 数据进行分析。限于篇幅,仅给出 FFMJ 站 2011-08-21 处理结果。图 4 中模糊度未固定时的浮点解 N 和 E 方向均方根差为 5 cm,在 U 方向波动剧烈,其最大波谷超过 30 cm,其均方根差在 8~9 cm。将整数卫星钟差引入模糊度固定后,在图 5 中可看到

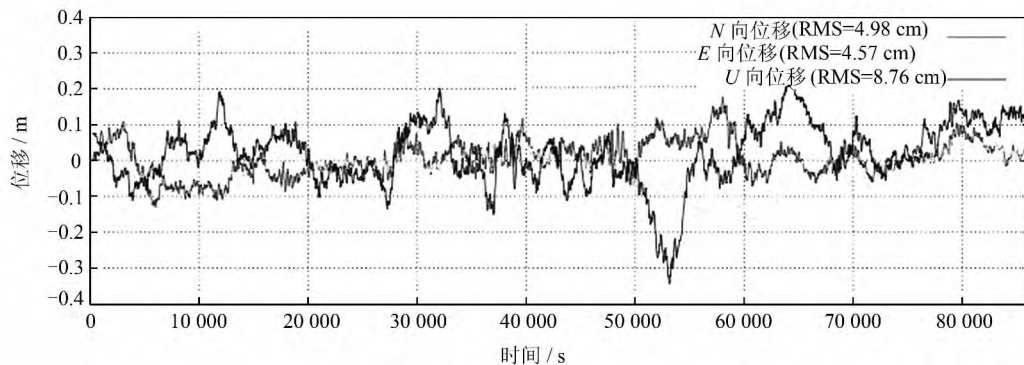


图 4 动态 PPP 浮点解

Fig. 4 Kinematic PPP Floating Solutions

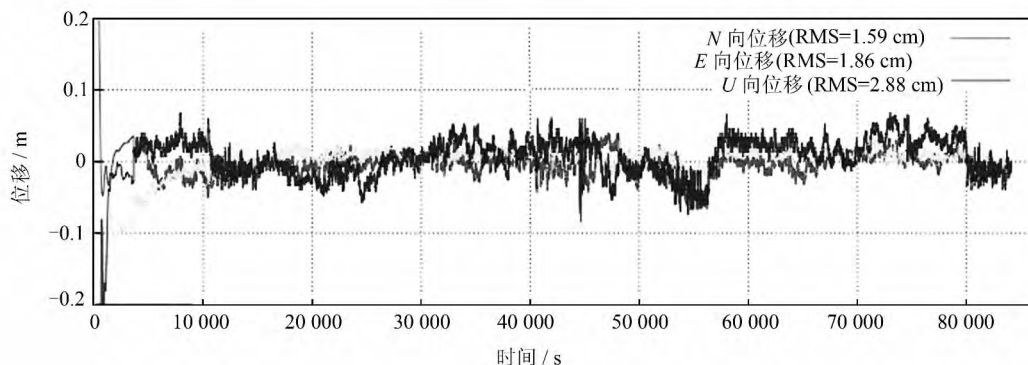


图 5 动态 PPP 固定解

Fig. 5 Kinematic PPP Fixing Solution

窄巷模糊度在 1 h 固定,其后所得的固定解水平方向均方根差在 2 cm 内,垂直方向均方根差在 3 cm 内,较之浮点解在水平方向有 65% 的改善,垂直方向有 60% 的改善。在模糊度收敛后,其实时的定位结果能够达到平面和垂直方向 cm/mm 级精度。

参 考 文 献

- [1] Zhang Xiaohong, Li Xingxing. A New Method for Zero-differenced Interger Ambiguity Resolution and Its Application to PPP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(6): 657-660(张小红,李星星.非差模糊度整数固定解 PPP 新方法及其实验[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2010, 35(6): 657-660)
- [2] Ge M, Gendt G, Rothacher M, et al. Resolution of GPS Carrier-phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations [J]. *J Geod*, 2010, 82(7): 389-399
- [3] Laurichesse D, Mercier F, Berthias J P. Real-time PPP with Undifferenced Integer Ambiguity Resolution, Experimental Results[C]. The 23rd ION Intern Techn Meet (ION-GNSS), Portland, 2010
- [4] Collins P, Bisnath S, Lahaye F, et al. Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing[J]. *J Inst Navigat*, 2010, 57(2): 123-135
- [5] Geng J, Teferle F N, Meng X, et al. Kinematic Precise Point Positioning at Remote Marine Platforms[J]. *GPS Solut*, 2010, 14(4): 343-350
- [6] Nie Jianliang, He Zhengbin. Dynamic Precise Point Positioning Algorithm Based on Fixing Ambiguities [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(9): 1 029-1 033(聂建亮,何正斌.利用固定模糊度的动态精密单点定位算法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2010, 35(9): 1 029-1 033)
- [7] Collins P. Isolating and Estimating Undifferenced GPS Integer Ambiguities[C]. Inst Navigation National Tech Meet, San Diego, 2008
- [8] Laurichesse D, Mercier F, Berthias J P, et al. Real Time Zero-difference Ambiguities Fixing and Absolute RTK [C]. ION National Technical Meeting, Fairfax, USA, 2008
- [9] Laurichesse D, Mercier F, Berthias J P, et al. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination[J]. *Navig J Inst Navig*, 2009, 56(2): 135-149

The Experiment and Analysis of Zero-difference Ambiguity Resolution for Kinematic PPP

CHANG Xin¹ ZUO Xiang¹ ZHANG Wei¹

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: In this paper, we realize the ambiguity-fixing PPP using the integer clock product published by CNES. Ten globally distributed IGS tracking stations are processed. The results show that the accuracy of kinematic PPP with ambiguity fixing can achieve 1-2 cm in the horizontal direction and a 3 cm level for elevation; very attractive for the kinematic positioning applications.

Key words: kinematic; PPP; zero-difference; ambiguity fixing

First author: CHANG Xin, postgraduate, majors in precision GNSS data processing theory and algorithm research. E-mail: xchang@whu.edu.cn

Foundation support: The National Program on Key Basic Research Project (973 Program), No. 2013CB733300; the National Natural Science Foundation of China, No. 41304027.