

非差模糊度整数固定解 PPP 新方法及实验

张小红¹ 李星星¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:分析了标准模型中非差模糊度无法固定的原因,提出了非差模糊度整数解的小数偏差分离(fractional bias isolating,FBI)模型与方法。实验结果表明,使用 30 min 的静态观测数据,即可达到水平方向 mm 级、高程 cm 级的定位精度,相比浮点解水平方向精度提高了一个数量级,高程方向也改善了 50%~60%,同时,对流层天顶延迟 ZPD 的精度也有 20%~30%的改善。

关键词:精密单点定位;非差模糊度固定;未检验小数偏差;FBI 模型;LAMBDA

中图法分类号:P228.41

精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术无需高密度的基站支持即可实现大范围甚至全球范围内的高精度定位,已成为国际上的研究热点。基于实数解的 PPP 要达到 mm~cm 级的定位精度,通常需要数小时以上观测时间,其精度与可靠性也要比双差固定解低,这在一定程度上限制了其在工程领域更广泛的应用^[1,2]。因此,非差模糊度整数固定解已成为 PPP 技术亟需突破的关键性难题。国际上对 PPP 的研究重点也已从过去的非差模糊度的实数解转向非差模糊度的整数固定解^[3-6]。

本文在分析 GNSS 非差观测基本模型的基础上提出了非差模糊度整数解的 FBI 模型与方法。将整数模糊度与未检验小数偏差(uncalibrated fractional offsets,UFO)分离,恢复出非差载波相位模糊度的整数特性,进而使用 LAMBDA^[7]方法将其固定为整数。

1 PPP 整数解的模型与方法

非差 GPS 距离观测值主要有载波相位 L 和测码伪距 P 两类,其基本数学模型分别可以表示为^[8]:

$$P_i^k = \| (r^k(t - \tau_i^k) + dr^k(t - \tau_i^k)) - (r_i(t) + dr_i(t)) \| + I_i^k + T_i^k + c[dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)] +$$

$$c[d_i(t) + d^k(t - \tau_i^k)] + dm_i^k + e_i^k \quad (1)$$

$$L_i^k = \| (r^k(t - \tau_i^k) + \delta r^k(t - \tau_i^k)) - (r_i(t) + \delta r_i(t)) \| - I_i^k + T_i^k + c[dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)] + c[\delta d_i(t) + \delta^k(t - \tau_i^k)] + \lambda[\phi_i(t_0) - \phi^k(t_0)] + \lambda N_i^k + \delta m_i^k + \epsilon_i^k \quad (2)$$

式中各参数意义请参见文献[8]。

由式(2)可知,非差相位模糊度本身是具有整数特性的,但由于卫星端和接收机端初始相位和载波相位硬件延迟的大小未知,在实际处理过程中,它们就跑到了非差相位模糊中,使得实际的非差模糊不具有整数特性。双差模型中,初始相位和载波相位硬件延迟在求双差的过程中被消除,所以双差模糊度具有整数特性。为了恢复非差模糊度的整数特性,必须采用一定的方法处理初始相位和载波相位硬件延迟。为了简化,分别将接收机端与卫星端的初始相位和硬件延迟合并为各自的相位偏差 b_i 和 b^k ,并假定在一个连续弧段内比较稳定,可以作为常数处理^[9]。分离出来的卫星端和接收机端的相位偏差 b^k 和 b_i 是未知的,且对于不同的卫星和接收机来说都不相同。因此,将式(1)、(2)中站星几何距离、卫星钟差、接收机钟差、对流层延迟、卫星端和接收机端的天线相位中心等与频率无关的项综合为 ρ_g 表示,式(1)、(2)可简写为:

$$L_i^k = \rho_{ig}^k - I_i^k + \lambda(b_i - b^k) + \lambda N_i^k + \delta m_i^k + \epsilon_i^k \quad (3)$$

$$P_i^k = \rho_{i_g}^k + I_i^k + dm_i^k + c(d_i + d^k) + e_i^k \quad (4)$$
其中,

$$b_i = \phi_i(t_0) + \frac{c}{\lambda} \delta_i(t) \quad (5)$$

$$b^k = \phi^k(t_0) + \frac{c}{\lambda} \delta^k(t - \tau_i^k) \quad (6)$$

令

$$B_i^k = N_i^k + b_i - b^k \quad (7)$$

如果 b_i 和 b^k 被假定为常数,则 B 仍然是常数, B 即为通常所说的非差模糊模糊度。通常假定码观测值群延迟 d 的变化足够缓慢,在一个连续弧段之内认为是常数。

从式(7)可看出, b_i 与 b^k 使得非差模糊度失去了整数特性。事实上, b 中的整数部分与整数模糊度 N 本身难以分离且不会破坏整数特性,因此,实质上破坏非差模糊度整数特性的是 b 中的小数部分,即 UFO。只要能够准确估计出卫星端和接收机端的 UFO,将整模糊度与 UFO 分离,就恢复了非差载波相位模糊度的整数特性:

$$B_i^k = \bar{N}_i^k + f_i - f^k \quad (8)$$

式中, B 为按照传统模型解得的非差实数模糊度; \bar{N} 为非差整数模糊度; f_i 为接收机端的常数偏差小数部分 UFO; f^k 为卫星端的常数偏差小数部分 UFO。只要求出了 f_i 和 f^k ,就能够使用经典的 LAMBDA 方法将 \bar{N} 固定为整数。这就是 FBI 模型。

首先,按照传统模型对服务器端跟踪网的观测数据进行解算(由于基准站的坐标往往已知,可以强约束测站坐标)得到实数模糊度参数 B ,然后对其建立如式(8)的方程联立求解即可得到 \bar{N} 、 f_i 、 f^k 。显然,按此建立的法方程是秩亏的,需在法方程中引入整数模糊度基准,并选取某颗卫星或某个接收机作为基准 UFO,以解决法方程的秩亏问题,即可实现模糊度整数与小数部分的分离,恢复非差模糊度的整数特性。然后,将利用服务器端跟踪网观测数据解算得到的卫星端小数部分 f^k 与 IGS 轨道和钟差产品一起提供给 PPP 用户,用户端就能实现 PPP 模糊度的整数固定解。用户端采用的模型与方法与服务端类似,只是需要固定卫星轨道、卫星钟差以及卫星端的 UFO。

用户端除了使用精密卫星轨道和钟差外还需卫星端 UFO 产品,该产品的质量与特性对终端用户成功实现 PPP 整数解至关重要。根据本文提出的方法,使用 2008 年年积日 121~130 的图 3 中服务端跟踪网观测数据每天解算一组宽巷 UFO 和窄巷 UFO(见图 1、图 2)。可以发现宽巷

UFO 非常稳定,可以进行长期的预报;而窄巷则是每 10 min 解算一组(图 3 中为第 122 d 的共 144 组),可以发现窄巷 UFO 在短期内的变化也是比较稳定的,可进行短期预报。

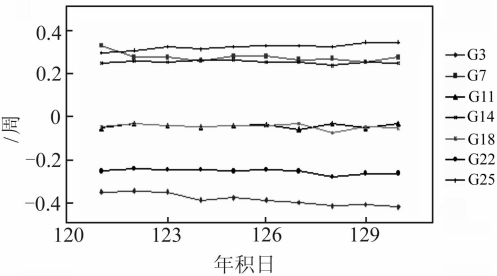


图 1 卫星端宽巷 UFO 时间变化序列
Fig. 1 WL UFO of Satellites

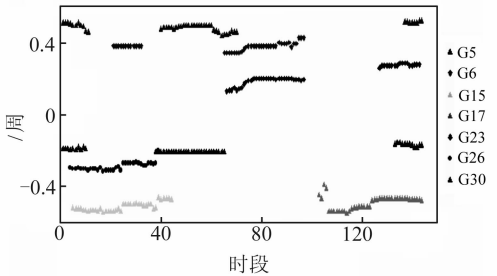


图 2 卫星端窄巷 UFO 时间变化序列
Fig. 2 NL UFO of Satellites

由于大气层残余误差、多路径效应、PPP 中误差改正模型不够精确等原因,求解得到的 UFO 不是一个常数,而是随着时间而缓慢变化,特别是窄巷波长较短,受到的影响更加明显。尽管在求解宽巷时会受到伪距噪声影响,但是由于宽巷的波长相对要长得多,在经过一定时间的平滑后比较稳定。一般来说,宽巷可以每天估计一组 UFO 并且在实时应用中进行长期预报。窄巷需要分段估计,譬如每半个小时估计一组 UFO(本文算例均使用 10 min),在实时应用中窄巷 UFO 可以进行短期预报。目前的 PPP 用户仍然主要使用 IGS 或其分析中心提供的精密轨道和钟差产品,大多数用户往往不具备自己解算精密轨道和钟差的能力。本文提出的 FBI 模型与方法充分考虑到 IGS 用户的需要,只需在使用 IGS 产品的基础上对其进行修正即同时提供相应的 UFO 产品便可。

2 实验与分析

在中国范围内选取 10 个 GPS 观测站组成服务端观测网,为网内的中国区域及网外的中国周边地区提供 PPP 固定解定位服务(文中用户站到

观测网的距离是指用户站与服务网中离该站最近的服务站的距离,为了表述方便,文中均简称为到观测网的距离)。测站的分布如图 3 所示,其中 dxin、shao 等·标记的测站为服务站,这些测站较均匀地分布在中国境内,测站间距大约为 1 200 km 左右。artu、whif 等▲标记的测站则作为用户站,这些测站有 3 个位于网内,9 个在网外,其中中国境内和境外各有 6 个测站,这些测站离观测网的距离从 800~3 000 km 不等。

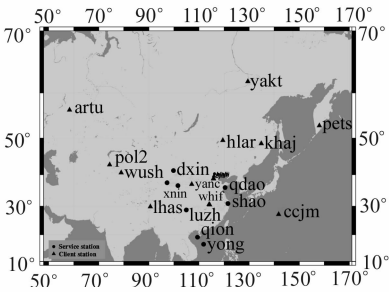


图 3 服务站与用户站分布图

Fig. 3 Distribution Map of Service Stations and User Stations

实验方案中均使用 2008 年 GPS 周第 1 477

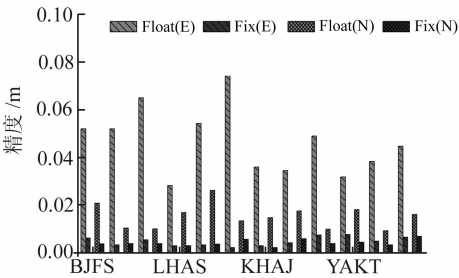


图 4 用户站水平方向定位精度
Fig. 4 Positioning Accuracy of User Stations in Horizontal Direction

从图中可以看出,对于 30 min 的静态观测数据,浮点解定位精度为 N 方向 1~3 cm,E 方向 3~8 cm,U 方向 3~10 cm。固定解定位精度水平方向为 mm 级,大多在 5 mm 以内,高程方向为 1~4 cm;固定解水平方向定位精度相对浮点解提高了一个量级,高程方向也有明显改善,约 50%~60%,且固定解在 E 方向改善最为明显。从图 5 中可以看出,固定解与浮点解估计 ZPD 的精度一般都在 1 cm 以内,且固定解 ZPD 与浮点解相比也有 20%~30%的改善,有的测站(如 LHAS、HLAR 站)可以达到约 50%的改善效果。

根据解算的统计结果,对于距离观测网大约 2 000 km 以内的测站,固定成功率接近 100%;而对于超过 2 000 km 的用户站成功率略低,但仍然

周的观测数据进行处理分析,其中精密星历和精密钟差从 IGS 网站下载获取。服务端估计 UFO 时,宽巷为每天一组,而窄巷则每 10 min 一组。用户端的 PPP 处理则将观测数据分割为 30 min、1 h、2 h 时段长度的数据,分别进行 PPP 固定解和浮点解,对 30 min、1 h、2 h 不同长度的数据均进行了处理与分析。一般来说,观测时间越长,精度与固定成功率也越高,可靠性也更好。限于篇幅,本文仅给出 30 min 的结果。为了在 PPP 用户端实现快速模糊度确定,本文中均使用双差快速精密定位(如网络 RTK)中常用的 LAMBDA 方法搜索整数模糊度。

将每个时段的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,然后将每个测站所有时段(固定解取所有固定成功的时段)的结果的偏差绝对值取平均即为该测站的统计结果偏差。对解算结果进行统计分析,包括浮点解与固定解的定位与 ZPD 精度、固定解成功率。各用户站使用 30 min 的数据进行静态 PPP 固定解(Fix)和浮点解(Float)的水平方向定位精度与高程方向、ZPD 精度分别如图 4、图 5 所示。

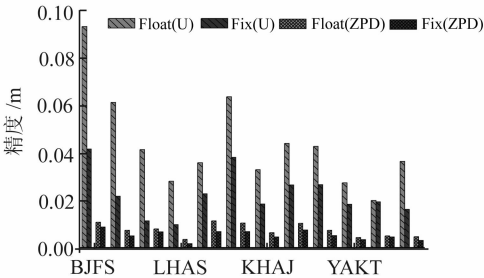


图 5 用户站高程方向和 ZPD 解算精度
Fig. 5 Accuracy of User Stations in Vertical Direction and ZPD Estimation

在 90%以上。这说明使用中国区域的 10 个服务站提供的 UFO 信息可为网内及网外达 3 000 km 左右的区域提供高精度快速定位等服务。

3 结 语

1) 使用测站间距达数千 km 的稀疏观测网作为服务端,使用本文提出的方法可为网内用户站及在服务端观测网之外远达数千 km 的用户站提供可靠的非差 PPP 固定解服务。

2) 宽巷 UFO 十分稳定,可以每天估计一组并在实时应用中长期预报。窄巷 UFO 一般需要分段估计,譬如每半个小时估计一组 UFO,在实时应用中窄巷 UFO 可以进行短期预报。

3) 使用 30 min 的静态观测数据,PPP 固定解定位精度水平方向大多在 5 mm 以内,高程方向为 1~4 cm;固定解水平方向定位精度比实数解定位精度提高了一个量级,高程方向也改善了 50%~60%,且固定解在 E 方向改善最为明显。同时,ZPD 的精度一般也有 20%~30%的改善。

4) 对于距离观测网大约 2 000 km 以内的测站,固定成功率几乎接近 100%,超过 2 000 km 的用户站成功率仍然在 90%以上。说明使用中国区域的 10 个服务站提供的 UFO 信息即可为网内及网外达 3 000 km 左右的区域提供高精度的 PPP 固定解定位服务。

参 考 文 献

[1] Bisnath S, Gao Y. Current State of Precise Point Positioning and Future Prospects and Limitations [C]. International Association of Geodesy Symposia 133, Perugia, Italy, 2007

[2] Zhang Xiaohong, Li Xingling. The Prototype System Realization of Real-Time Precise Point Positioning and Its Precision Analysis[C]. CPGPS, Beijing, 2009

[3] Gabor M J, Nerem R S. GPS Carrier Phase Ambiguity Resolution Using Satellite-Satellite Single Difference[C]. The 12th Int. Tech. Meet. Satellite Div. Inst. Navigation GPS, Nashville, TN, 1999

[4] Ge Maorong, Gendt G, Rothacher M, et al. Resolution of GPS Carrier-Phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations [J]. J Geod, 2007, 82(7):389-399

[5] Laurichesse D, Mercier F. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP [C]. The 20th Int. Tech. Meet. Satellite Div. Inst. Navigation GNSS, Fort Worth, TX, 2007

[6] Collins P, Lahaye F, Hous P, et al. Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model[C]. ION GNSS 2008, GA, USA, 2008

[7] Teunissen P J G. A New Method for Fast Carrier Phase Ambiguity Estimation[C]. IEEE Position, Location and Navigation Symposium, Las Vegas, NV, 1994

[8] Teunissen P J G, Kleusberg A. GPS for Geodesy [J]. Lecture Notes in Earth Sciences, 1996, 60: 175-217

[9] Blewitt G. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2 000 km[J]. J Geophys Res, 1989, 94(B8):10 187-10 203

第一作者简介:张小红,教授,博士生导师,主要从事 GNSS 精度定位和机载 LiDAR 方面的研究工作。
E-mail: xhzhang@sgg.whu.edu.cn

A New Method for Zero-Differenced Interger Ambiguity Resolution and Its Application to PPP

ZHANG Xiaohong¹ LI Xingxing¹

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

Abstract: We analyze the reason that zero-differenced ambiguity cann't be fixed in a standard mode. We proposed the FBI(fractional bias isolation) mode and method for zero-differenced interger ambiguity resolution. We found that with 30 min observations, the accuracy of mm-level in horizontal and cm-level in elevation direction can be achieved, which has respectively enhanced one order of magnitude and has improved approximately 50%-60% in horizontal and elevation direction compared to float solution. In the meantime, the accuracy of ZPD (zenith path delay) estimation has been also ameliorated about 20%-30%.

Key words: precise point positioning; zero-differenced ambiguity resolution; uncalibrated fractional offsets; fractional bias isolating model; LAMBDA