

GPS 非差非组合精密单点定位算法研究

章红平¹ 高周正^{1,2} 牛小骥¹ 伍 岳³

(1 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)

(2 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(3 三峡大学土木与建筑学院,宜昌市大学路 8 号,443002)

摘要:首先介绍了非差非组合精密单点定位(precise point positioning, PPP)算法,分析了它与传统 PPP 的差异;处理了 300 个 IGS 跟踪站连续 7 d 的数据,分析了接收机伪距硬件延迟偏差(difference code bias, DCB)和先验电离层精度对非差非组合 PPP 收敛速度的影响。统计结果表明,对于非差非组合 PPP,利用 IGS 提供的全球电离层延迟模型 GIM,静态定位精度 N/E 方向均收敛到 10 cm 以内,估计接收机 DCB 的 PPP 平均收敛速度为 13.12 min,比不估计接收机 DCB 的 PPP 快 5.36 min,与传统的 LC PPP 相当。在获得高精度电离层先验数据的条件下,估计接收机 DCB 的非差非组合 PPP 平面精度收敛 10 cm 的速度约为 8.67 min,比传统 PPP 收敛速度平均快约 3.26 min。

关键词:非差非组合精密单点定位;接收机硬件延迟偏差;收敛时间;全球电离层延迟模型 GIM

中图分类号:P228.41

随着 IGS 提供的精密轨道、钟差精度越来越高^[1-2],精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术在地壳形变监测、GPS 气象学、低轨卫星定轨、高精度动态定位^[3]、高精度组合导航^[4]等领域得到了广泛的应用。实际应用中,PPP 定位精度和收敛速度是最重要的两个问题。受 GPS 卫星几何构型变化、伪距观测质量^[2]等因素影响,获取 cm 级定位精度,传统 PPP 需要较长的收敛时间。文献[4]研究了非差非组合 PPP 算法的收敛问题,本文进一步研究接收机伪距硬件延迟偏差(difference code bias, DCB)以及先验电离层延迟模型精度对 PPP 定位精度和收敛速度的影响。

1 非差非组合 PPP 算法

1.1 观测方程与参数设置

传统 PPP 算法采用 GPS 双频伪距和载波的无电离层组合来消除电离层延迟一阶项,但不能消除高阶电离层延迟的影响^[2],残余的高阶电离

层延迟误差小于电离层总延迟的 1%^[2],可在实时 PPP 应用中忽略,但该组合使得伪距和载波观测值噪声扩大近 3 倍^[5]。基于双频的非差非组合 PPP 算法不进行观测值间的组合,而是将各卫星斜路径上的电离层延迟作为参数估计,这样,在不改变观测值噪声的同时消除了电离层误差。其伪距和载波观测方程为^[4]:

$$P_i = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) - \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_1}\right)^2 \rho_{\text{ion},1} - \gamma_i (\rho_{\text{DCB},i}^s + \rho_{r,\text{DCB},i}) + \Delta + \epsilon_{P,i} \quad (1)$$

$$L_i = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + \lambda_i N_i + \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_1}\right)^2 \rho_{\text{ion},1} + \Delta + \epsilon_{L,i} \quad (2)$$

式中, P 、 L 分别表示伪距和载波观测值; ρ 表示接收机至卫星间的几何距离; c 表示真空中光速; s 、 r 分别代表卫星和接收机; δt_r 、 δt^s 分别表示接收机和卫星钟差; $\gamma_1 = \frac{f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)}$ 、 $\gamma_2 = \frac{f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)}$ 表示伪距 DCB 系数; $\rho_{\text{DCB},i}^s$ 、 $\rho_{r,\text{DCB},i}$ 分别表示伪距观测值上的卫星和接收机硬件延迟误差; λ 、 N 分别表示载波波长和载波模糊度; Δ 表示其他误差改正,包

收稿日期:2013-10-08。

项目来源:国家 973 计划资助项目(2009CB72400205);国家 863 计划资助项目(2012AA12A206);国家自然科学基金资助项目(41004010)。

括对流层、相对论、地球自转、天线相位中心偏差等; ε_P 、 ε_L 分别表示伪距和载波相位观测值的观测噪声。对于式(1)、(2)中的对流层延迟、卫星天线相位中心修正等其他系统误差量,采用了国际 IGS 组织公布的标准误差模型进行了消除。本文按照插页 I 表 1 中的三种 PPP 方案对数据进行解算。

1.2 先验信息设置

在 PPP 算法中,伪距和载波可根据不同高度

$$\sigma_{\text{ion}}^2 = \frac{1}{\sin^2(E)} \cdot \begin{cases} \sigma_{\text{ion},0}^2 + \sigma_{\text{ion},1}^2 \cdot \cos B \cdot \cos(\frac{t-14}{12}\pi), 8 < t < 20 \text{ 或 } B < 60^\circ \\ \sigma_{\text{ion},0}^2, \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

在设置参数动态噪声时,对于静态数据,接收机位置静止不变,其动态噪声值为零。接收机钟差作为随机噪声进行估计,设定其动态噪声为 $10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在同一弧段里,载波模糊度理论上是常值,其动态噪声为零。对流层天顶湿延迟具有较强时间、空间相关性,且相对变化较弱,对于 30 s 采样率数据,一般设其动态噪声为 $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$;对于 30 s 采样率的数据,电离层延迟动态变化可设为 $5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,接收机 DCB 动态噪声可设为 $3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2 实验与分析

2.1 实验数据

本文采用了 2012 年年积日 034~040 期间 300 个 IGS 跟踪站(见插页 I 表 4)的双频 GPS 观测数据,数据时间采样率为 30 s。数据处理时,采用静态定位模式,修正了 GPS 卫星和接收机天线平均相位中心偏差和天线相位中心变化、天线相位缠绕误差、相对论误差、地球自转误差、固体潮海潮误差等,按每 2 h 重新初始化(每天 12 个弧段)进行 PPP 收敛统计分析。

2.2 结果分析

插页 I 表 5 给出了 300 个 IGS 跟踪站三种 PPP 定位结果与 IGS 公布坐标之间差异的均方根(RMS)。该结果表明,本文的三种 PPP 算法均可获得平面 mm 级定位精度,高程精度优于 1.4 cm。

插页 II 图 1(a)给出了所有测站卫星视线方向(LOS)上 GIM 内插电离层延迟与非差非组合 PPP 解算的电离层延迟的统计结果,其 RMS 为 0.611 m(约 3.7 TECU)。目前,GIM 的精度为 2~8 TECU^[8],表明 PPP 计算出的电离层延迟结果合理。插页 II 图 1(b)给出了利用本文非差非组合 PPP 算法计算的跟踪站接收机

角定权^[6],伪距、载波、对流层天顶湿延迟、接收机 DCB 先验方差可根据插页 I 表 2 给定,状态参数动态噪声按照插页 I 表 3 给定。先验电离层延迟作为虚拟观测值噪声,需要根据不同的电离层延迟模型的精度情况确定,对于 GIM 模型,可根据式(3)给定。PPP 解算时,本文参数估计采用了序贯最小二乘的方法^[7],逐历元进行 PPP 解算。

DCB 与 CODE 提供的 DCB 之间差值的统计结果,其 RMS 为 0.332 ns,该结果与 IGS 提供的接收机 DCB 精度相符。非差非组合 PPP 算法中,电离层延迟与 DCB 存在强耦合关系,但各自随时间的动态变化特性不一样。因此,上述 PPP 解算得到的电离层延迟、DCB 与 IGS 产品一致,表明非差非组合 PPP 算法各参数的先验信息设置基本合理。然而,非差非组合 PPP 是直接反演 LOS 方向上的电离层斜延迟(STEC),且不受电离层单层假设和投影函数影响,因而获取的 STEC 精度比 GIM 模型更高。

2.2.1 接收机 DCB 对 PPP 收敛速度的影响

本文处理了 300 个 IGS 跟踪站 7 d 的观测数据,共 25 200 个重新收敛弧段,按平面收敛到不同精度水平(A:10 cm;B:15 cm;C:20 cm)统计三种 PPP 算法的收敛速度,其中剔除了部分异常数据(约占 7.2%),并将 PPP 收敛速度按 10~60 min 共 6 个时间区间进行统计(见插页 I 表 5)。插页 II 图 2 统计结果表明,DCB ION PPP 算法 91.79%弧段在 30 min 内平面精度收敛到 10 cm 以内,52.21%弧段 10 min 内收敛到 10 cm 以内。ION PPP 收敛速度明显变慢,收敛时间小于 30 min 的弧段只有 80.54%,31.16%弧段收敛速度快于 10 min。对于 LC PPP 算法,收敛时间小于 30 min 的弧段占 93.04%,其中小于 10 min 的占 53.33%。该结果表明,接收机 DCB 对非差非组合 PPP 的收敛速度有明显影响,在使用 GIM 作为电离层延迟先验模型时,DCB ION PPP 算法与 LC PPP 算法的收敛速度基本相当。

为研究 GIM 作为电离层先验信息条件下不同纬度上 PPP 的收敛速度,将 300 个 IGS 站按插页 I 表 4 分成 7 组,PPP 在各纬度区域上的平面收敛速度如插页 II 图 2 所示。插页 II 图 2 表明,三种 PPP 的收敛速度随着纬度升高而变快。对于全球尺度上水平定位精度收敛至 10 cm,DCB

ION PPP 平均 13.12 min、ION PPP 平均 18.48 min、LC PPP 平均 12.31 min;平面精度收敛至 15 cm,则三种 PPP 分别平均需要 9.23 min、14.15 min 和 8.81 min;平面精度收敛至 20 cm,则分别平均需要 6.86 min、11.19 min 和 6.73 min。

上述结果表明,在非差非组合 PPP 算法中,估计接收机 DCB 可大大加快 PPP 算法的收敛速度。以平面精度收敛至 10 cm 为例,利用 GIM 提供的电离层延迟作为先验信息时,DCB ION PPP 比 ION PPP 平面收敛速度平均快 5.36 min。因为在 ION PPP 算法中,没有顾及接收机 DCB 误差对伪距观测值的影响,而该项误差在伪距观测值中存在,体现为系统误差,相当于降低了伪距观测值精度。因此,这种不考虑接收机 DCB 误差影响的 PPP 算法必定需要较长的收敛时间。

利用 GIM 提供的电离层延迟作为先验信息时,DCB ION PPP 与 LC PPP 的收敛速度相当。其中,在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 纬度区域和纬度 60° 以上区域,以收敛至 10 cm 为例,LC PPP 水平收敛速度均比 DCB ION PPP 的收敛速度稍快约 1~2 min;而在 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 纬度区域,DCB ION PPP 的水平收敛速度则比 LC PPP 稍快 0.5 min。这是因为低纬度和两极区域电离层比较活跃,而中纬度区域电离层变化平稳,且中纬度地区观测站更多,GIM 精度相对较高。另外,目前 IGS 提供的 GIM 精度不高^[8],使得电离层延迟先验精度与伪距观测噪声耦合后大于 LC 的观测噪声(一般约 0.8 m)和高阶电离层残余项^[2]。

2.2.2 电离层延迟先验精度对 PPP 收敛速度的影响

§ 3.1 节的分析表明,若电离层先验精度足够高,DCB ION PPP 算法的收敛速度应该比 LC PPP 的收敛速度快。为进一步验证,本文另外设计了一组实验。首先,采用非差非组合 PPP 算法估计了接收机 DCB,解算出各卫星斜路经上的电离层延迟值,以此作为电离层延迟的先验观测。由于没有了投影误差,PPP 反演出的 STEC 精度肯定优于 IGS 提供的 GIM 精度,但其精度仍然受限于 DCB 与电离层延迟的分离程度,与接收机 DCB 的精度相当,一般优于 0.3 m。

实验采用插页 I 表 4 的分组方法,每个纬度带各选两个测站,每站 7 天数据,按 2 h 作为一个弧段,剔除部分收敛时间大于 60 min 的数据,平均剔除率为 4.9%。统计结果如插页 I 表 7 所示,采用高精度先验电离层延迟信息时,估计接收机 DCB 的非差非组合 PPP 的收敛速度明显比无

电离层组合 PPP 快。以 PPP 平面收敛至 10 cm 为例,96.71% 弧段收敛速度小于 30 min,91.68% 小于 20 min,72.61% 小于 10 min;且平均收敛速度为 8.67 min,比传统 PPP 快 3.33 min。

插页 II 图 3 表明,在低纬区域($0\sim 10^{\circ}$),两种 PPP 方案平面收敛至 10 cm 的速度趋于一致;在高纬度区域(大于 60°),DCB ION PPP 的水平收敛速度比 LC PPP 快约 2.5 min;在 $10\sim 60^{\circ}$ 纬度区域,DCB ION PPP 收敛速度比 LC PPP 平均快 4.0 min。此外,DCB ION PPP 和 LC PPP 的收敛速度明显比 ION PPP 的收敛速度要快。此次实验结果表明,若能获取高精度电离层数据进行 DCB ION PPP 解算,其收敛速度明显快于 LC PPP 和 ION PPP。

3 结 语

1) 以 IGS 提供的参考坐标为基准,三种 PPP 算法单天静态解精度一致。

2) 通过 IGS 跟踪站数据分析三种 PPP 方案收敛速度,结果表明:① 非差非组合 PPP 算法中,估计接收机 DCB 可有效加快 PPP 收敛速度(平面精度到 10 cm 以内,平均可加快 5.36 min)。② 在当前 GIM 精度条件下,估计接收机 DCB 的非差非组合 PPP 平面平均收敛速度(13.12 min)与传统 PPP 收敛速度(12.31 min)基本相当。③ 随着纬度的升高,ION PPP 和 DCB ION PPP 算法的收敛速度逐渐加快,但 LC PPP 算法不明显。

3) 采用高精度的电离层延迟先验信息,DCB ION PPP 平面精度收敛至 10 cm 的平均速度为 8.67 min,比 LC PPP 平面收敛至 10 cm 的平均速度快 3.26 min。

因此,在实时 PPP 应用中,DCB ION PPP 算法具有快速获取高精度位置信息的前景。

参 考 文 献

- [1] Kouba J, Heroux P. GPS Precise Point Positioning Using IGS Orbit Products[J]. GPS Solution, 2001, 5(2):12-28
- [2] Geng J. Rapid Integer Ambiguity Resolution in GPS Precise Point Positioning [D]. Nottingham: University of Nottingham, 2011
- [3] Roesler G, Martell H. Tightly Coupled Processing of Precise Point Position (PPP) and INS Data[J]. The 22nd International Meeting of the Satellite Divi-

- sion of the Institute of Navigation, Savannah, GA, 2009
- [4] Li X, Ge M, Zhang X, et al. A Method for Improving Uncalibrated Phase Delay Estimation and Ambiguity Fixing in Real Time Precise Point Positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2013(1):1-12
- [5] 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现[D]. 武汉:武汉大学, 2002
- [6] Ge M, Gendt G, Rothacher M et al. Resolution of GPS Carrier-Phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(7):389-399
- [7] 杨元喜. 自适应动态导航定位[M]. 北京:测绘出版社, 2006
- [8] Le A Q, Tiberius C, van der Marel H, et al. Use of Global and Regional Ionosphere Maps for Single Frequency Precise Point Positioning[C]. *International Association of Geodesy Symposia*, Perugia, Italy, 2008

第一作者简介:章红平,副教授。主要从事空间电离层理论与算法研究。

E-mail:hpzhang@whu.edu.cn

Research on GPS Precise Point Positioning with Un-differential and Un-combined Observations

ZGANG Hongping¹ GAO Zhouzheng^{1,2} NIU Xiaoji¹ WU Yue³

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

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

(3 School of Civil and Architecture Engineering, China Three Gorges University, 8 Daxue Road, Yichang 443002, China)

Abstract: We first introduce GNSS precise point positioning (PPP) based on un-differential uncombined raw pseudo-ranges and carrier phase observations (RAW-OBS-PPP). Then the difference between the traditional PPP based on ionosphere-free dual-frequency combination (LC-PPP) and RAW-OBS-PPP is discussed and evaluated by analyzing mass data of 300 IGS GPS sites during day of year 034~040, 2012. The effects of receiver's DCB and the precision of priori-ionospheric delay on the convergence of RAW-OBS-PPP are focused and discussed in details. For RAW-OBS-PPP, while global ionosphere mapping (GIM) provided by International GNSS Service (IGS) are used as priori-information for ionosphere delays, and the receiver's DCB is estimated, then the mean time is about 13.12 min to take convergence into 10 cm in both north and east components. If no receiver DCB estimated, it needs about 18.48 min. LC PPP and RAW-OBS-PPP have almost the same performance under the condition that GIM is used for RAW-OBS-PPP. If ionosphere delays with higher precision are used as priori-information, RAW-OBS-PPP needs about 8.67 min(mean value) in horizontal components, which is much faster than traditional LC PPP.

Key words: un-differential and un-combined PPP; receiver differential code bias; convergence time; global ionosphere mapping

About the first author: ZHANG Hongping, associate professor, researches on Ionosphere theory and algorithms.

E-mail: hpzhang@whu.edu.cn