

GPS 单历元精密单点定位精度分析

胡 艳, 胡 剑

(北京环球信息应用开发中心, 北京 100094)

摘 要:普通精密单点定位主要是针对多历元观测数据,本研究重点关注单历元精密单点定位及其精度分析。在分析 GPS 单历元观测量误差源基础上,讨论了单历元非差精密单点定位误差;给出了单历元非差精密单点定位的解算流程,对 Bjfs、Mizu、Wuhn 和 Lhaz 等 4 个 IGS 站 1 天的实际观测数据分别进行了处理,单历元精密单点定位精度达到了 4.5 cm,与 GPS RTK 结果精度一致。单历元精密单点定位只需一个测站的单一历元观测就可以进行精确定位,而 GPS RTK 至少需要两台仪器。

关键词:GPS 全球定位系统;单历元精密单点定位;无电离层线性组合

中图分类号:P228.4

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2013)01-0074-05

Analysis of Accuracy of GPS Single-epoch Precise Point Positioning

Hu Yan, Hu Jian

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The common precise point positioning (PPP) is mainly aimed at multi-epoch observed data and this paper focuses on the single-epoch PPP and its accuracy. Based on the analysis of single-epoch observed error sources, the positioning errors with the single-epoch PPP were analyzed and then the flowchart to precisely estimate positions with the single-epoch PPP technique was put forward. In addition, one day's practical GPS data of 4 IGS stations (Bjfs, Mizu, Wuhn and Lhaz) were processed with the single-epoch PPP method to estimate precise positions with an accuracy of better than 4.5 cm, in accord with that of the GPS RTK technique. It is concluded that location is precisely estimated with the single-epoch data from one station by using the single-epoch PPP, but with at least two instruments by using the GPS RTK.

Key words: GPS; single-epoch precise point positioning; ionospheric-free linear combination

GPS(global positioning system,全球定位系统)技术具有全球性、全天候及实时的精确三维导航定位能力,在测绘和导航以及与空间位置有关的领域获得了广泛应用^[1]。为消除公共误差对 GPS 测量的影响,多采用差分技术实现厘米级甚至毫米级的精密定位。在实际应用中,由于多种原因(如地震)影响,在测区范围内可能没有稳定不变的站点作为参考站,只能从很远的地方选择参考站。由于基线长度增加,同步观测量误差之间的相关性会严重降低,使得差分定位结果精度降低^[2]。

单点定位^[3-4]采用单站进行作业,定位方式灵活,不受基线长度影响,且可用观测值多,不同测站的观测值不相关,可以直接得到测站点的三维坐标而不是基线向量。单点定位包括:①一般单点定位,采用伪距或者相位平滑伪距解算站点坐标,精度为亚米级或者分米级,应用于精度要求不高的测绘和导航领域;②精密单点定位(PPP, precise point positioning),利用 GPS 相位观测量和精确模型解算高精度的站点坐标,精度可达到亚分米级甚至厘米量级^[4]。普通精密单点定位一般对多历元观测数据进行处理,采用差分或者非差技术,借助如 IGS (International Global Navigation Satellite System Service), JPL (Jet Propulsion

收稿日期:2012-10-13

作者简介:胡 艳(1985—),女,湖北赤壁人,硕士研究生,主要从事卫星导航定位等方面的研究. E-mail:1159693911@qq.com

Laboratory), CODE (Center for Orbit Determination in Europe), GFZ (GeoForschungsZentrum at Potsdam) 等国际机构提供的有关 GPS 卫星精密星历、对流层模型、潮汐模型及初始相位偏差模型等,进行批处理或序贯解算,得到精确的多历元定位结果。随着 GPS 技术的发展,高频 GPS 得以实现,在测绘和导航方面得到了广泛应用,如变形监测、高速运载体精确导航和测速等。高频 GPS 的主要目的就是采集高频观测数据,计算每个采样历元的精确位置,监测高频变化。如在大地震同震形变监测中,地震影响范围可能达上千千米,较大的范围内也没有稳定的站点,这样就无法实施 GPS 差分定位或者 RTK (real time kinematic) 定位。如果 GPS 基线长度过长,基线端点的观测数据之间就缺少相关性,无法通过差分消除公共误差,更无法实施 GPS RTK。在这种情况下,就必须进行精密单点定位。另外,受地震影响,震区内的站点可能发生数据中断现象,一次采样数据长度有限,这就需要逐历元计算精确位置。在单历元情况下, GPS 观测量受到多种误差影响,使得精密单点定位精度有所下降。本文通过 4 个 IGS 站 (Bjfs, Mizu, Wuhn 和 Lhaz) 的实际数据处理,分析 GPS 单历元精密单点定位的精度。

1 单历元精密单点定位观测方程

GPS 采用 L_1 和 L_2 波段的电磁波作为载波,相应的伪距和相位观测方程^[5]分别为

$$L_{1i}^j(t) = \rho_i^j(t) - ct^j(t) + d_{\text{ant}}^j(t) + d_{\text{orb}}^j(t) - I_i^j + T_i^j(t) + ct_i(t) + \frac{c}{f_1} [N_{1i}^j + \varphi_i(t_0)] - \varphi^j(t_0) + \epsilon_{i,L_1}^j, \quad (1)$$

$$L_{2i}^j(t) = \rho_i^j(t) - ct^j(t) + d_{\text{ant}}^j + d_{\text{orb}}^j(t) - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_i^j + T_i^j(t) + ct_i(t) + \frac{c}{f_2} [N_{2i}^j + \varphi_i(t_0) - \varphi^j(t_0)] + \epsilon_{i,L_2}^j; \quad (2)$$

$$P_{1i}^j(t) = \rho_i^j(t) - ct^j(t) + d_{\text{ant}}^j(t) + d_{\text{orb}}^j(t) + I_i^j + T_i^j(t) + ct_i(t) + \epsilon_{i,P_1}^j, \quad (3)$$

$$P_{2i}^j(t) = \rho_i^j(t) - ct^j(t) + d_{\text{ant}}^j(t) + d_{\text{orb}}^j(t) + \frac{f_1^2}{f_2^2} I_i^j + T_i^j(t) + ct_i + \epsilon_{i,P_2}^j. \quad (4)$$

其中: $\rho_i^j(t)$ —接收机 i 与卫星 j 在 $(t-\tau)$ 时刻的空间几何距离; τ —信号从 GPS 卫星 j 至接收机 i 的时间; c —光在真空中传播的速度; $t^j(t)$ —卫星 j 在 t 时刻相对于 GPS 时的钟差; t —GPS 接收机接收信号的时间; $d_{\text{orb}}^j(t)$ —卫星轨道误差; $d_{\text{ant}}^j(t)$ —卫星天线相位中心偏差; I_i^j — L_1 波段的电离层延迟; $T_i^j(t)$ —信号的对流层延迟; $t_i(t)$ —接收机 i 在 t 时刻相对于 GPS 时的钟差; f_1, f_2 表示 L_1 载波和 L_2 载波的频率; N_{1i}^j, N_{2i}^j — L_1 载波和 L_2 载波的整周未知数; $\varphi_i(t_0)$ —接收机 i 的初始相位残差; $\varphi^j(t_0)$ —卫星 j 的初始相位残差; $\epsilon_{i,L_1}^j, \epsilon_{i,L_2}^j, \epsilon_{i,P_1}^j, \epsilon_{i,P_2}^j$ —观测值噪声和其他误差。

电离层延迟与频率平方成反比^[5-6]。因此,在精密单点定位中,为了消除电离层延迟一阶主项的影响,一般采用无电离层影响线性组合观测量^[5]

$$L_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2); \quad (5)$$

$$P_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2). \quad (6)$$

2 单历元精密单点定位误差处理分析

GPS 单历元精密单点定位误差源主要有 3 类:和卫星有关的误差、与信号传播有关的误差以及与接收机有关的误差。为了提高单历元精密单点定位精度,分析在精密单点定位中对这些误差的处理方法。

2.1 和卫星有关的误差处理

和卫星有关的误差主要包括 GPS 卫星星历误差、卫星钟差和卫星质心改正。GPS 卫星星历误差取决于轨道计算的数据模型、软件、所用跟踪网的规模、跟踪站的分布以及跟踪观测时间^[4],这是影响精密单点定位的重要因素之一。GPS 接收机实时接收到的星历是广播星历,其精度只有 2~3 m 量级,精度较差,不能满足单历元精密单点定位要求。IGS 可以提供超快星历、快速星历和精密星历,但是这些星历无法实时获取。超快星历和快速星历精度要低于精密星历,因此事后处理中多采用精密星历。大约延迟 2 周时间,才能获取精密星历,其精度可以达到 2.5 cm^[7]。

卫星钟差大小约为 1 ms,由此导致的等效测距误差为 300 km。在单历元精密单点定位中,要获得厘米量级的定位精度则要求卫星钟差精度达到亚纳秒量级^[4]。在进行精密单点定位中,需要采用 IGS 提供的高频高精度 GPS 卫星钟差数据,来有效削弱卫星钟差造成的测量误差^[8]。

GPS 测量的距离是卫星发射天线的相位中心至接收机相位中心的距离,而卫星星历中所给出的卫星位置是卫星质心的位置,而通常情况下,卫星的质心与卫星天线的相位中心并不重合,因此需要进行卫星天线相位中心改正。

2.2 与信号传播有关的误差处理

与 GPS 信号传播有关的误差主要包括电离层延迟、对流层延迟和多路径效应。对流层影响可分为干大气延迟和湿大气延迟,一般可以采用模型进行改正,如 Hopfield 模型或 Saastamoinen 模型。干大气的影 响可达 2.3 m,其模型改正较好。湿大气延迟虽然只有几厘米至几十厘米,但湿大气延迟改正精度不是很高。在单历元精密单点定位中,将对流层参数作为未知参数,将对流层模型值作为初值,通过严密平差估计精确对流层改正。通过 L_3 观测量可以有效减弱或消除电离层影响,剩余的高阶电离层影响不超过 2 cm^[4]。

多路径效应影响可达厘米级甚至米级,可以通过选择合适的站址(避开较强的反射面)、采用适当的天线和接收机(如扼流圈天线)及延长观测时间等方式进行削弱,也可以采用半参数法和小波分析方法等较弱多路径效应影响^[9]。

2.3 与接收机有关的误差处理

与接收机有关的误差主要包括接收机钟差、天线相位中心偏差及其变化等。GPS 接收机一般采用石英钟作为频率标准,其稳定度只有 10^{-13} ,因此石英钟具有较大的误差。对于同一测站,同一历元所有 GPS 卫星观测值对应的接收机钟差相同,因此在精密单点定位中将接收机钟差作为未知参数,通过严密平差估计该参数,以消除接收机钟差对定位的影响。

采集数据的接收机天线参考点与接收机天线的实际相位中心不重合,需要进行接收机天线相位中心的改正。接收机天线相位中心误差包括天线相位中心偏差和相位中心变化。天线相位中心偏差为固定偏差,而相位中心变化则是信号入射方位角和高度角的函数^[10]。CODE 提供了市场上常见的多种接收机天线相位中心改正模型,在实际单历元精密单点定位中,利用 CODE 模型进行了接收机天线中心误差改正。

3 单历元精密单点定位流程和精度分析

单历元精密单点定位解算方法采用无电离层延迟影响的双频观测组合观测值 L_3 ,以消除电离层一阶主项影响。在解算之前对 GPS 数据进行预处理、探测与修复周跳。在解算过程中引入卫星质心改正、接收机天线相位中心偏差改正模型、对流层延迟改正和估计、固体潮理论位移改正模型以及海洋负荷位移改正模型等,采用精密星历削弱卫星轨道误差造成的影响,采用高频高精度卫星时钟数据减弱卫星钟差的影响。本研究采用 IGS05_1626 模型进行天线相位中偏差改正,采用 Saastamoinen 模型^[11]估计对流层延迟初值, GOT00.2 海潮负载模型^[12]改正海潮负载造成的影响。

3.1 单历元精密单点定位流程

采用两步法进行单历元精密单点定位,图 1 给出了单历元 PPP(precise point positioning,精密单点定位)数据处理流程。第一步,依据已知的模型,对 GPS 观测数据进行初步周跳探测与修复和时钟同步,利用最小二乘法初步估计站点坐标、对流层延迟和接收机钟差等未知参数。第二步,利用第一步解算结果,再次进行周跳探测和时钟同步,探测小于 3 周的周跳,时钟同步精度要优于 1 ms,最后利用最小二乘法解算精确的未知参数,进行精密定位。

3.2 单历元精密单点定位精度分析

为分析单历元 PPP 的实际定位精度,以验证图 1 所示流程的正确性,选择 2011 年 3 月 7 日 1 天的 Bjfs,

Mizu, Wuhn 和 Lhaz 共 4 个 IGS 站的 30 s 采样的 2880 个历元的 GPS 观测数据, 该期间这些台站站点稳定。采用如图 1 所示的流程进行了处理, 图 2 给出了解算的时间序列相对于全天所有历元解算结果的平均值的残差序列, 表 1 给出了解算结果的统计信息。

从图 2 和表 1 可以看出, 4 个站点 3 个坐标分量的精度基本均匀, 均优于 3.5 cm。Bjfs 站、Wuhn 站、Lhaz 站以及 Mizu 站单历元 PPP 定位解算结果精度分别为 2.4, 4.3, 4.2 和 4.1 cm, 解算结果精度均优于 4.5 cm, 达到了 GPS RTK 技术的精度^[13]。GPS RTK 至少需要两台仪器, 分别作为主站和流动站, 作用距离只有 20 km 左右, 流动站点每次观测 5~10 s, 实现定位的精度优于 5 cm。单历元精密单点定位只需要一台仪器, 不进行数据差分, 只要一个历元的观测就可以实现精密定位。

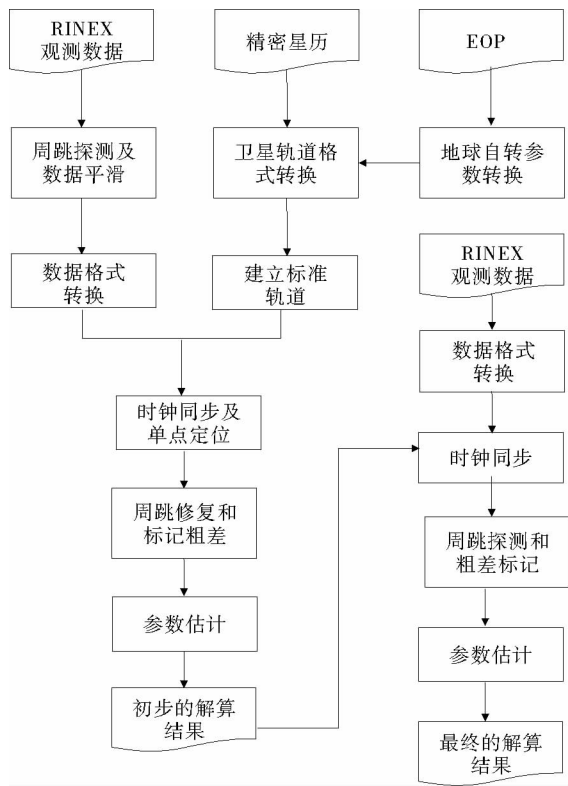


图 1 单历元精密单点定位解算流程图

Fig. 1 Positioning flow of the single-epoch PPP

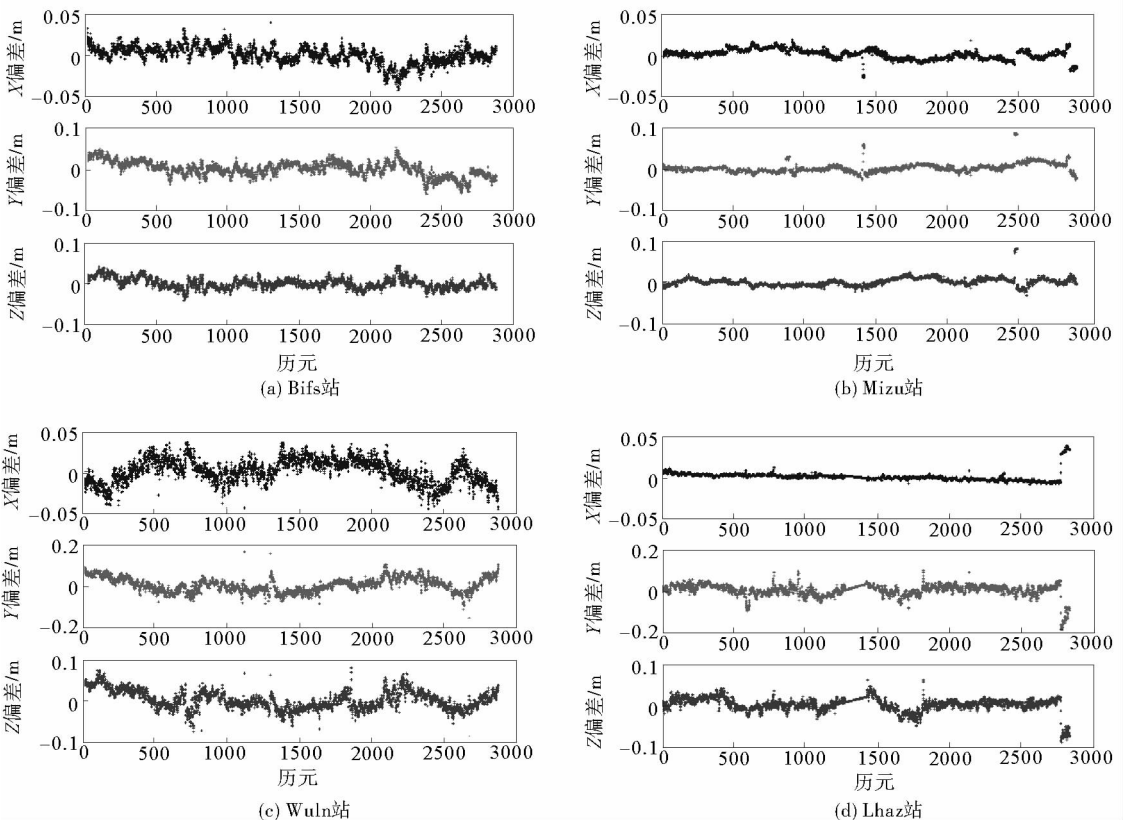


图 2 4 个 IGS 站的单历元精密单点解算序列图

Fig. 2 Time series of 4 IGS stations determined with the single-epoch PPP

表 1 单历元精密单点定位解算结果的统计信息表

Tab. 1 Statistical results with the single-epoch PPP

cm

站点	坐标	最大残差	最小残差	STD	RMS
Bjfs	X	3.92	-4.43	1.06	1.06
	Y	5.24	-0.62	1.77	1.77
	Z	5.29	-4.07	1.26	1.26
Wuhn	X	7.91	-4.76	1.49	1.49
	Y	14.82	-16.28	3.40	3.40
	Z	7.81	-8.95	2.24	2.24
Lhaz	X	15.38	-3.56	2.31	2.31
	Y	9.57	-19.17	3.00	3.00
	Z	5.99	-9.12	1.70	1.70
Mizu	X	7.44	-19.16	2.74	2.74
	Y	17.34	-5.86	2.29	2.29
	Z	16.91	-6.70	2.00	2.00

注:STD—标准差;RMS—均方误差

4 结论

本研究将精密单点定位扩展为单历元精密单点定位,分析了 GPS 单历元观测量的误差,主要包括 GPS 星历误差、卫星钟差、接收机钟差、对流层延迟、多路径效应以及天线相位中心偏差等误差。在给出单历元精密单点定位数据处理流程基础上,对 Bjfs、Mizu、Wuhn 和 Lhaz 等 4 个 IGS 站进行了实际站点解算,单历元精密单点定位精度均达到 4.5 cm,三个坐标分量精度基本均匀,与 GPS RTK 结果精度一致。

参考文献:

- [1]周忠谋,易杰军,周琪. GPS 卫星测量原理与应用[M]. 北京:测绘出版社,1997:11-16.
- [2]方荣新. 高采样率 GPS 数据非差精密处理方法及其在震害中的应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2010:45-50.
- [3]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(B3): 5005-5017.
- [4]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,2002:73-79.
- [5]Leick A. GPS satellite surveying[M]. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004: 116-122.
- [6]Guo J Y, Han Y B, Chang X T. A new method of ionospheric-free hybrid differential positioning based on a double-antenna CAPS receiver[J]. Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy, 2009, 52(3): 368-375.
- [7]Griffiths J, Ray J. On the precision and accuracy of IGS orbits[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83: 277-287.
- [8]郭金运,黄金维,曾子榜,等. 基于 IGS 跟踪站的高频 GPS 卫星时钟改正确定[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2008, 33(7): 706-710.
- Guo Jinyun, Hwang Cheinway, Tseng Zipang, et al. Determination of high-rate clock corrections for GPS satellites from observations of IGS stations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(7): 706-710.
- [9]夏林元. GPS 观测值中的多路径效应理论研究及数值结果[D]. 武汉:武汉大学,2001:24-29.
- [10]郭金运,徐萍林,曲国庆. GPS 接收机天线相位中心偏差的三维检定研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2003, 28(4): 448-451.
- Guo Jinyun, Xu Panlin, Qu Guoqing. A three-dimensional method for checking the antenna phase center bias of GPS receiver[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(4): 448-451.
- [11]Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites[M]. District of Columbia: American Geophysical Union, 1972, 15: 247-251.
- [12]Ray R D. A global ocean tide model from T/P altimetry: GOT99. 2[R]. Columbia: NASA, GSFC, 1999: 66-68.
- [13]李征航,黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 2 版. 武汉:武汉大学出版社,2010:97-103.

(责任编辑:高丽华)