

利用 GPS 精密单点定位进行时间传递精度分析

张小红¹ 蔡诗响¹ 李星星¹ 郭 斐¹

(¹ 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:利用静态精密单点定位技术(PPP),分别采用 IGS 5 min 和 30 s 间隔的精密卫星钟差产品进行单站时间传递实验。实验结果表明,无论是利用 5 min 间隔的卫星钟差产品,还是利用 30 s 间隔的卫星钟差产品,静态 PPP 都可以实现 0.1~0.2 ns 的时间传递以及半天内稳定度达到 $1\times 10^{-15}\sim 2\times 10^{-15}$ 的频率传递。在短期内,相比于 5 min 间隔的卫星钟差产品,利用 30 s 间隔的卫星钟差产品能较明显地提高静态 PPP 钟差解所体现的频率稳定度,PPP 钟差解的精度略有提高;在长期内,使用这两种钟差产品获得的 PPP 钟差解的精度及其所体现的频率稳定度相当。

关键词:GPS;精密单点定位;时间传递;精密卫星钟差产品;精度

中图法分类号:P228.42

利用 GPS 测码伪距和载波相位观测值进行时间传递和比对是近年来发展较快的一种技术。为了在全球范围内改进利用 GPS 测量和其他大地测量方法进行时间比对的精度,IGS 和 BIPM 联合开展了一项实验计划。该实验计划分析了不同 IGS 分析中心的精密钟差解的性质并提出了精密钟差组合方案和 IGS 时间尺度标准^[1],使 GPS 用户获得更高精度的 IGS 精密钟差产品和更稳定的 IGS 时间尺度^[2-4],进一步促进了 PPP 在时间传递领域的应用。已有学者开展了利用 PPP 进行时间传递的研究工作^[5,6]。另外,随着 IGS05 取代 IGS00 成为 IGS 新的坐标参考框架,GPS 卫星和 GPS 接收机的天线相位中心偏差改正由相对相位中心模式变为绝对相位中心模式,改善了 IGS 产品与 ITRF 2005 之间的一致性^[7],对 PPP 时间传递的精度产生了一定的影响^[8]。在此背景下,本文研究了利用 PPP 进行时间传递的方法,并分析了 PPP 进行时间传递的精度。

1 PPP 时间传递方法

1.1 数学模型

利用 IGS 发布的精密卫星轨道和精密卫星

钟差数据,并采用无电离层双频组合观测值消除电离层影响后,PPP 观测值方程可表示为:

$$l_P = \rho + c \cdot dt + d_{\text{trop}} + \epsilon_P \tag{1}$$

$$l_\phi = \rho + c \cdot dt + a + d_{\text{trop}} + \epsilon_\phi \tag{2}$$

式中, l_P 为 P_1 和 P_2 的无电离层伪距组合观测值; l_ϕ 为 L_1 和 L_2 的无电离层相位组合观测值(距离); dt 为地面 GPS 接收机钟差; c 为真空中的光速; a 为无电离层组合相位观测值(距离)的模糊度(不再具有整数特性); ϵ_P 、 ϵ_ϕ 分别为两种组合观测值的观测噪声、多路径等未模型化的误差影响; ρ 为信号发射时刻的卫星位置到信号接收时刻的接收机位置之间的几何距离; d_{trop} 为对流层延迟改正,可表示为:

$$d_{\text{trop}} = d_{\text{dry}} \cdot M_{\text{dry}}(E) + d_{\text{wet}} \cdot M_{\text{wet}}(E) \tag{3}$$

式中, d_{dry} 、 d_{wet} 为对流层延迟干、湿分量; $M(E)$ 为与卫星高度角 E 有关的投影函数。本文采用 Saastamonien 模型修正对流层延迟干分量,采用分段线性参数估计的方法来估计天顶对流层湿延迟,再利用全球投影函数模型 GMF^[9] 将其投影至卫星信号传播路径方向。

1.2 数据预处理

对于双频非差相位数据的周跳探测,笔者综合采用 M-W 方法、电离层残差法和多项式拟合 3

种方法协同探测周跳。首先,利用宽巷载波减窄巷伪距组合,消除电离层延迟、对流层延迟、钟误差等误差和几何距离影响,并将宽巷载波相位模糊度的均方根阈值参数进行比较以判断周跳和粗差发生与否。然后,利用几何距离无关组合的电离层残差值的历元间变化对周跳作补充判断。最后,对可能发生周跳的历元进一步采用多项式拟合作法检核。由于非差相位数据中周跳的修复比探测更为困难,因此,在程序的预处理模块中,只探测周跳,不进行修复。如果探测出周跳,则在对应卫星的相应历元处新增一个模糊度参数。

1.3 误差改正

1.3.1 天线相位中心偏差改正

GPS 距离观测值是参考到卫星天线相位中心和接收机天线相位中心的,而 IGS 精密星历中卫星坐标及卫星钟差都是以卫星质心为参考的。一般来说,卫星天线相位中心与卫星质心并不重合,在精密单点定位中,不能利用差分方法消除或减弱其影响,因此必须考虑其精确的改正模型。从 2006 年 11 月 5 日起,IGS05 取代 IGS00 成为 IGS 新的坐标参考框架,GPS 卫星和 GPS 接收机的天线相位中心偏差改正由相对相位中心模式变为绝对相位中心模式,从而导致 GPS 卫星天线相位中心在星固系中的偏差改正值发生较大变化(表 1 中给出了部分卫星在 2006 年 11 月 5 日前后的相位中心偏差改正量)。值得指出的是,在绝对相位中心模式下,同类型卫星的天线相位中心偏差沿 Z 轴(指向地心)的分量大小不尽相同。另外,由于接收机天线相位中心偏差本身并不影响 PPP 钟差解(但影响坐标解),所以,相对相位中心模式到绝对相位中心模式的转变所引起的接收机天线相位中心偏差的变化并不影响 PPP 时间传递精度。

表 1 星固系中卫星天线相位偏差/m

Tab. 1 Satellite Antenna Phase Center Offset in Satellite Fixed Reference Frame/m

卫星类型 及 PRN	相对相位中心模式下			绝对相位中心模式下		
	δ_X	δ_Y	δ_Z	δ_X	δ_Y	δ_Z
Block IIA(G_1)	0.279 0	0.000 0	1.023 0	0.279 0	0.000 0	2.201 0
Block IIA(G_8)	0.279 0	0.000 0	1.023 0	0.279 0	0.000 0	2.405 0
Block IIR(G_2)	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.614 0
Block IIR(G_7)	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.700 0

1.3.2 固体潮汐改正和海洋潮汐改正

固体潮汐与海洋潮汐产生的原因相同。固体潮汐使地球在地心与摄动天体的连线方向拉长,与连线垂线方向上趋于扁平。固体潮对测站的影

响包含与纬度有关的长期偏移项和由日周期和半日周期组成的周期项。本文利用了文献[6,10]中的相关模型对固体潮汐的影响进行改正。海洋潮汐主要由日周期与半日周期部分组成,但与固体潮不同的是它没有长期偏移项,对测站的影响比固体潮要小一个量级。尽管如此,在 GPS 时间传递中必须对其加以考虑,除非测站远离海岸线($>1\,000\text{ km}$)^[11]。

1.3.3 其他误差改正

卫星轨道误差及卫星钟误差由于使用 IGS 的精密星历和精密钟差,其影响不予考虑;天顶对流层时延参数改正采用分段线性参数估计,用 GMF 投影函数^[9]改正到信号传播路径方向上。此外,还必须考虑如地球自转、相对论效应、引力延迟、天线相位缠绕和硬件延迟偏差改正等一系列误差的影响。

1.4 参数估计

在静态 PPP 中,待估参数主要包括 3 个位置参数、 k 个钟差参数(k 为历元数)、 N_a 个模糊度参数($N_a\geq 4$)、对流层延迟参数 N_{zpd} (每 2 h 估计一个)。目前,对于 PPP 的参数估计,主要有卡尔曼滤波法和最小二乘法^[12,13]。

2 数据准备及时间传递精度评估方法

2.1 数据准备

为了评估 PPP 技术进行时间传递所能达到的精度,实验选取了 ALGO、CRO1 两个配有外接频率基准(由氢原子钟提供)的 IGS 跟踪站的观测数据,采样间隔为 30 s。下载了 2008 年 DOY286~DOY292 共 7 d 的观测数据。从 IGS 分析中心下载了对应时间的事后精密星历文件(SP3 格式)和采样间隔分别为 5 min 和 30 s 的卫星钟差文件,数据处理软件采用 TriP 软件。

2.2 精度评估方法

严格来讲,PPP 时间传递的精度本质上是由卫星钟的稳定度和 PPP 钟差解的精度及其所体现的频率稳定度共同决定。在卫星钟稳定度既定的情况下(采用了某采样间隔的 IGS 钟差产品),PPP 钟差解的情况就决定了 PPP 时间传递的精度。为了评价 PPP 钟差解的精度及其所体现的频率稳定度,本文分别引入了外符合 RMS 和 Allan 方差来作为其精度评定准则。

外符合 RMS 由实际求解的钟差与 IGS 精密钟差文件中相应的钟差较差获得。

$$\text{RMS} = \sqrt{\mathbf{\Delta}^T \mathbf{P} \mathbf{\Delta} / n} \tag{4}$$

式中, $\mathbf{\Delta}$ 为钟差较差序列; n 为钟差序列样本总数; \mathbf{P} 为权阵(本文中 \mathbf{P} 为单位阵)。

Allan 方差是常用的频率稳定度表征方法, 在实际测量中, Allan 方差是描述随机噪声时域统计特性的通用标准^[14,15]:

$$\delta(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2\tau^2(N-3n+1)} \sum_{i=1}^{N-2n} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i)^2} \tag{5}$$

式中, x_i 是历元 i 的观测值; N 是观测序列的长度; τ 为采样间隔, $\tau = n\tau_0$, τ_0 为原始观测序列采样间隔, n 为正整数($1 \leq n \leq N$)。本文中, x_i 是历元 i 的钟差解, N 为钟差解序列样本总数(即历元数), τ_0 为观测值采样间隔 30 s。为了便于和 IGS 钟差文件中 5 min 间隔的跟踪站钟差信息作比较, n 为 10 的整倍数。

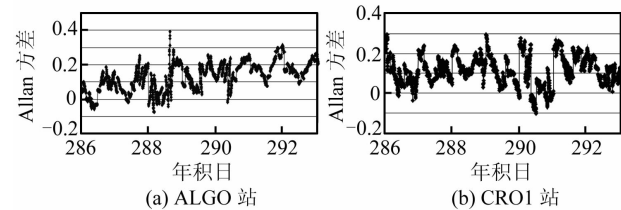


图 1 利用 5 min 间隔卫星钟差求得的 ALGO 与 CRO1 站的静态 PPP 钟差解与 IGS 钟差的较差值时间序列

Fig. 1 Differences Between IGS Clock Combinations and Static PPP Clock Solutions Using a 5 min-Interval Precise Satellite Clock Products at Station ALGO and CRO1

3 数据处理结果与分析

3.1 与 IGS 发布钟差的比较

在四维模式下(三维位置和一维时间), 首先利用 5 min 采样间隔的 IGS 钟差文件, 分别处理了 ALGO、CRO1 两个站 2008 年 DOY286 ~ DOY292 这 7 d 的观测数据, 并将求解的钟差序列与 IGS 钟差文件中相应的钟差求差, 得到的序列偏差如图 1 所示。然后再利用 30 s 采样间隔的 IGS 钟差文件, 进行相同的处理, 得到的序列偏差如图 2 所示。表 2 中给出了在四维模式下, 分别利用 5 min 间隔和 30 s 间隔的卫星钟差信息进行处理得到的 ALGO 和 CRO1 两个跟踪站连续 7 d 的静态 PPP 钟差解的误差统计结果, 包括平均偏差(Mean Bias)、均方差(RMS)以及标准差

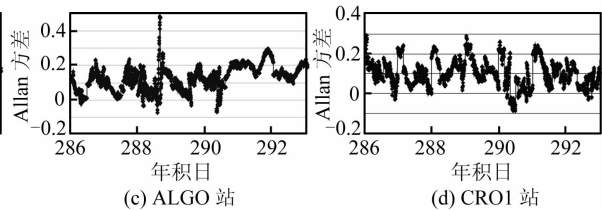


图 2 利用 30 s 间隔卫星钟差求得的 ALGO 与 CRO1 站的静态 PPP 钟差解与 IGS 钟差的较差值时间序列

Fig. 2 Differences Between IGS Clock Combinations and Static PPP Clock Solutions Using a 30 s-Interval Precise Satellite Clock Products at Station ALGO and CRO1

表 2 四维模式下 ALGO 和 CRO1 两站接收机钟差解的精度统计信息/ns

Tab. 2 Statistics of Receiver Clock Solutions Accuracy at ALGO and CRO1 Stations Under Four-Dimension Mode/ns

卫星钟差产品	ALGO 站			CRO1 站		
	Mean Bias	RMS	STD	Mean Bias	RMS	STD
IGS Final(5 min)	0.132	0.176	0.080	0.117	0.160	0.073
IGS Final(30 s)	0.119	0.161	0.071	0.107	0.146	0.068

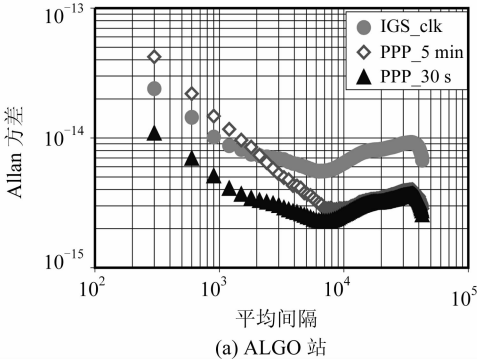
(STD)。需要说明的是, 分别利用 5 min 间隔和 30 s 间隔的卫星钟差信息所处理得到的 ALGO 和 CRO1 两个跟踪站连续 7 d 的静态 PPP 坐标解的精度相当, 其在 N 、 E 、 U 3 个方向上的精度分别为 mm 级、mm 级和 1~2 cm 级。

从图 1、图 2 可以看出, 无论是利用 5 min 间隔的卫星钟差产品, 还是利用 30 s 间隔的卫星钟差产品, ALGO 和 CRO1 两站的静态 PPP 钟差解结果都与 IGS 发布的钟差符合得很好, 除了 ALGO 站第 288 d 有一短时段内的钟差解出现点异常之外(该异常情况可能是由接收机的信号失锁

引起的), 其余偏差都在 0.3 ns 以内。结合表 2 可以看出, 在四维模式下 PPP 时间传递的精度可以达到亚 ns 级。值得注意的是, 图 1、图 2 以及表 2 中都表现出了一个约为 0.1 ns 的系统偏差, 其原因可能是 TriP 软件所采用的算法和模型与 IGS 数据分析中心所采用的策略上的差异不同所引起的。

结合表 2 中的精度统计信息, 对比图 1 和图 2 可以看出, 相比于 5 min 间隔的卫星钟差产品, 利用 30 s 间隔的卫星钟差产品对提高静态 PPP 时间传递的精度有一定效果, 但效果不明显。另

外,体现在图 1 中钟差解的日界(相邻两天的交界点)不连续性并没有因为使用了 30 s 间隔的卫星钟差产品而有所改善(见图 2)。关于如何削弱或者消除这种日界不连续性,国外已有学者对此进行了研究^[16]。



3.2 Allan 方差分析

为了从频率稳定度的角度进一步分析 PPP 时间传递所能达到的精度,按照式(4)处理分析了 ALGO 和 CRO1 两站 2008 年 292 天积日的静态 PPP 钟差解时间序列,分析其 Allan 方差,其结果如图 3 所示。

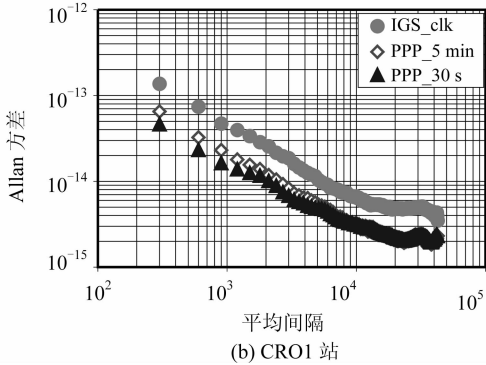


图 3 分别利用 5 min 间隔和 30 s 间隔的卫星钟差产品解得的 PPP 钟差解与 IGS 钟差产品之间的频率稳定度比较
Fig. 3 Frequency Stability Comparison (in Term of Allan Deviation) Between PPP Solutions Using a 5 min-Interval and a 30 s-Interval Satellite Clock Products Respectively and IGS Final Clock Products for ALGO and CRO1 Stations

结合图 3,从频率稳定度的角度可以看出,无论是利用 5 min 间隔的卫星钟差产品,还是利用 30 s 间隔的卫星钟差产品,所得的静态 PPP 钟差解在趋势上都和 IGS 最终的钟差产品符合得很好,半天的频率稳定度可达到 $1 \times 10^{-15} \sim 2 \times 10^{-15}$,这进一步说明了 PPP 时间传递的可靠性。另外,从图 3 中还可以看出,时间间隔比较短时(即式(4)中的 n 值比较小),利用 30 s 间隔的卫星钟差产品可以提高利用 5 min 间隔的卫星钟差产品求解的 PPP 钟差解所体现的频率稳定度,这在 ALGO 站表现得尤为突出。但随着时间间隔的增长,这种效果越来越不明显,当时间间隔增长到一定时,使用这两种钟差产品求解的 PPP 钟差解所体现的频率稳定度趋于一致。因此,在用 PPP 进行时间传递时,若考虑接收端钟的短期稳定性,则应使用 30 s 间隔的卫星钟差产品;若只顾及其长期稳定性,使用 5 min 间隔的卫星钟差产品即可。

4 结 语

1) 无论是利用 5 min 间隔的卫星钟差产品,还是利用 30 s 间隔的卫星钟差产品,静态 PPP 都可以完成 0.1~0.2 ns 级精度的时间传递,且其半天的频率稳定度可达 $1 \times 10^{-15} \sim 2 \times 10^{-15}$ 。这与 TWSTFT^[5]具有相当的传递精度,但二者相比较,TWSTFT 需要租用专门的卫星作为信号转

发的媒介,参与双方需要专门的发射接收设备,其价格比较高,因此只能在一些大的实验室应用;而 PPP 时间传递只需要 GPS 接收机,不需要其他附属设备,价格相对较低,特别是在地区或国家间综合时间尺度的建设中具有重要应用价值。

2) 在短期内,相比于 5 min 间隔的卫星钟差产品,利用 30 s 间隔的卫星钟差产品能较明显地提高静态 PPP 钟差解所体现的频率稳定度,PPP 钟差解的精度也略有提高;在长期内,使用这两种钟差产品获得的 PPP 钟差解的精度及其所体现的频率稳定度相当。

3) 文中图 1 和图 2 中呈现出的日界不连续性至今仍未根本解决。如何削弱或者消除这种日界不连续性将是笔者在后续工作中研究的主要问题。

参 考 文 献

[1] Ray J, Senior K. IGS/BIPM Pilot Project: GPS Carrier Phase for Time/Frequency Transfer and Timescale Formation[J]. Metrologia, 2003,40: 270-288
[2] Senior K, Koppang P, Ray J. Developing an IGS Time Scale[J]. IEEE Transactions on Ultrasonic Ferroelectric Frequency Control, 2003,50:585-593
[3] Kouba J, Springer T. New IGS Station and Satellite Clock Combination[J]. GPS Solutions, 2001(4): 31-36
[4] Senior K. New IGS Timescale & New UT1/LOD Series[C]. Analysis Center Workshop, Florida,

2008

[5] Orgiazzi D, Tavella P, Lahaye F. Experimental Assessment of the Time Transfer Capability of Precise Point Positioning (PPP)[C]. The 2005 Joint IEEE International Frequency Control Symposium and Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Vancouver, BC, Canada, 2005

[6] Ray J, K S. Geodetic Techniques for Time and Frequency Comparisons Using GPS Phase and Code Measurements[J]. Metrologia, 2005, 42: 215-232

[7] Heering T. Impact of Absolute Phase Center Models on GPS Reference Frames [C]. European Geosciences Union General Assembly, Massachusetts, 2007

[8] Gendt G, Nischan Th. First Validation of New IGS Products Generated with Absolute Antenna Models [C]. IGS Workshop, German, 2006

[9] Boehm J, Niell A, Tregoning P, et al. The Global Mapping Function (GMF): a New Empirical Mapping Function Based on Numerical Weather Model Data[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33 (7): 1-4

[10] Defraigne P, Petit G. Time Transfer to TAI Using Geodetic Receivers[J]. Metrologia, 2003, 40: 184-188

[11] Kouba J. A Guide to Using International GPS Service (IGS) Products [EB/OL]. [http://igs-cb.jpl.nasa.gov/igs-cb/resource/pubs/Guide to Using IGS Products.pdf](http://igs-cb.jpl.nasa.gov/igs-cb/resource/pubs/Guide%20to%20Using%20IGS%20Products.pdf), 2003

[12] 陈宪冬. 基于大地型时传传递接收机的精密时间传递算法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(3): 245-247

[13] 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, 31(1): 19-22

[14] 李金海. 误差理论与测量不确定度评定[M]. 北京: 中国计量出版社, 2003

[15] Petovello M G, Lachapelle G. Estimation of Clock Stability Using GPS[J]. GPS Solutions, 2000, 4 (1): 21-33

[16] Dach R, Schildknecht T, Hugentobler U, et al. Continuous Geodetic Time Transfer Analysis Method [C]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2006, 53 (7): 1 250-1 259

第一作者简介: 张小红, 教授, 博士, 博士生导师。现主要从事 GNSS 精密定位和机载 LiDAR 方面的科研和教学工作。
E-mail: xhzhang@sgg.whu.edu.cn

Accuracy Analysis of Time and Frequency Transfer Based on Precise Point Positioning

ZHANG Xiaohong¹ CAI Shixiang¹ LI Xingxing¹ GUO Fei¹

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

Abstract: A time and frequency transfer experiment based on the precise point positioning (PPP) technique was carried out using IGS 5 min and 30 s interval precise satellite clock products. The results demonstrate that the precision of time transfer based on PPP technique is up to 0.1~0.2 nanosecond and a frequency stability of $1\times 10^{-15}\sim 2\times 10^{-15}$ is derived for averaging times of half-day, whether using IGS 5 min or 30 s interval precise satellite clock products. The results also indicate that whereas by using 30 s interval precise satellite clock products we could get a clearly improved frequency stability over that derived by using a 5 min interval precise satellite clock products in the short term. There is no significant improvement in the long term.

Key words: global positioning system; precise point positioning; time transfer; precise satellite clock product; precision

About the first author: ZHANG Xiaohong, professor, Ph.D., Ph.D supervisor. He is concentrated on research and education in GNSS precise point positioning and airborne laser scanning technology.
E-mail: xhzhang@sgg.whu.edu.cn