

基于单站相位数据的接收机硬件延迟估算方法

伍吉仓^{1,3} 张泽峰^{1,2} 陈俊平²

1 同济大学测绘与地理信息学院, 上海市四平路 1239 号, 200092

2 中国科学院上海天文台, 上海市南丹路 80 号, 200030

3 现代工程测量国家测绘地理信息局重点实验室, 上海市四平路 1239 号, 200092

摘要: 利用 2013-01 地磁扰日及静日期间全球不同纬度的 18 个 IGS 站的 GPS 双频数据, 联合伪距与相位观测数据, 探讨估算单站接收机硬件延迟的有效方法, 估算的结果与 IGS 公布的结果差值基本在 1.5 ns 以内, 月平均值基本在 1.0 ns 以内。

关键词: GPS; 单站; 相位; 电子总含量; 硬件延迟

中图分类号: P228

文献标识码: A

GPS 卫星和接收机对信号产生的硬件延迟是高精度 TEC 测量的最大误差源^[1]。估算 GPS 接收机硬件延迟的方法包括 4 类^[2-7]: 第 1 类, 基于全球/区域电离层模型, 同步估计接收机和卫星的硬件延迟; 第 2 类, 利用经验电离层物理模型或全球/区域电离层实测模型扣除电离层延迟的影响, 利用 IGS 发布的卫星硬件延迟估值扣除卫星硬件延迟, 进而估计得到接收机硬件延迟; 第 3 类, 利用单站/局部电离层模型, 在扣除卫星硬件延迟的基础上, 同步估计电离层模型参数和接收机硬件延迟; 第 4 类, 将电离层延迟基于“短时间小范围内的 TEC 相近”的假设, 通过计算所有视线上 TEC 的标准差最小来求解硬件延迟。严格来讲, 第 4 类方法是第 3 类方法的特例。本文基于第 3 类、第 4 类方法, 利用单站 GPS 伪距与相位观测数据估算接收机硬件延迟, 选取全球不同纬度的 18 个 IGS 站 2013-01 的数据解算各自的接收机硬件延迟, 并与 IGS 公布结果进行对比。

1 硬件延迟估算方法

1.1 基于多项式模型的硬件延迟估算方法

利用伪距和相位观测的组合可求得高精度的电离层 TEC^[8]:

$$\text{TEC}_N = \alpha(L_1 - L_2) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha[(P_2 - P_1) - (L_1 - L_2)_i] + \alpha c(D_i + D^k) \quad (1)$$

式中, $\alpha = \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)}$; D_i 、 D^k 分别为接收机和卫星伪距的硬件延迟; N 为观测历元。

区域性 VTEC 模型一般采用多项式函数模型、低阶球谐函数模型、三角级数模型以及利用距离加权法建立的格网模型, 建模精度大体相同^[9]。对单站或小型 GPS 网而言, 其所相应的电离层区域垂直 TEC 具有明显的周日变化, 所以要在较长(如 1 d)的测段内模拟电离层延迟并保证其精度, 必须在地固系内建立能够有效体现垂直电离层延迟随地方时进行(准)周日变化的数学模型。多项式模型比较适合于描述短时间尺度内局部地区的电离层 TEC 变化, 适合单站电离层建模。

多项式模型将垂直总电子含量 VTEC 看作是纬差 $\varphi - \varphi_0$ 和太阳时角差 $S - S_0$ 的函数^[9]:

$$\text{VTEC} = \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^m E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (S - S_0)^k \quad (2)$$

式中, $S - S_0 = (\lambda - \lambda_0) + (t - t_0)$; S_0 为测区中心点 (φ_0, λ_0) 在该时段中央时刻 t_0 的太阳时角; (φ_0, λ_0) 为测区中心点的地理经纬度; (φ, λ) 为穿刺点 IPP 的地理经纬度; t 为观测时刻; n 、 m 为泰勒级数展开的最大阶数; E_{ik} 为多项式模型系数。

对于给定的单层模型的高度, 穿刺点分布在有限的范围内, 一般来说, 经度方向在 23° 以内, 纬度方向在 32° 以内^[7]。考虑多项式函数模型的特点, n 取 1 阶, m 取 2 阶, 建立观测方程:

收稿日期: 2015-06-15

项目来源: 国家自然科学基金(41174024); 测绘地理信息公益性行业科研专项(201412017); 上海市空间导航与定位技术重点实验室开放课题(14DZ2276100)。

第一作者简介: 伍吉仓, 教授, 博士生导师, 主要从事现代大地测量数据处理及地球动力学反演理论和方法研究, E-mail: jcwu@tongji.edu.cn。

$$E_0 + E_1(\varphi - \varphi_0) + E_2(\varphi - \varphi_0)(S - S_0) + E_3(S - S_0) + E_4(\varphi - \varphi_0)(S - S_0)^2 + E_5(S - S_0) = \frac{1}{F(z)} \left\{ \alpha (L_1 - L_2)_N + \frac{1}{N} \sum_1^N \alpha \cdot [(P_2 - P_1)_t - (L_1 - L_2)_t] + \alpha c (D_i + D^k) \right\} \quad (3)$$

式中, $F(z)$ 为 MSLM 投影函数, 要求解的未知数包括多项式模型系数 $E_0, E_1, E_2, E_3, E_4, E_5$ 及接收机硬件延迟 D_i 。数据处理时, 每 2 h 设为一个时段, 卫星高度截止角设置为 30° , 每个时段解出一组电离层模型参数, 每天解算出一组测站接收机 DCB 值, 而卫星 DCB 以 IGS 公布的结果作为已知值。为了充分利用单站的全天数据, 第一个 2 h 时段从 00:00~02:00, 第二个 2 h 时段从第一个时段的后 1 h 开始, 即 01:00~03:00, 依此类推。组成误差方程后, 按法方程叠加的方式, 并采用最小二乘参数估计的方法, 统一解算各个时段多项式模型参数和接收机硬件延迟。此方法记为方法一。

1.2 基于“VTEC 标准差之和最小”条件的硬件延迟估算方法

“VTEC 标准差之和最小”假设^[7]: 在一定的空间范围内, 接收机到所有卫星视线上 TEC 对应的 VTEC 值基本一致。当然, 由于卫星和接收机硬件延迟的存在和时空的变化, 各点处的 VTEC 值不可能完全相等, 但其相对于 VTEC 平均值的标准差应该为最小的。该方法可表示为:

$$\sigma = \sum_{n=1}^N \sigma_n \quad (4)$$

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (\text{VTEC}_n^m - \overline{\text{VTEC}}_n)^2} \quad (5)$$

式中, σ 为所有历元的 VTEC 标准差之和; N 表示时段数; M 表示一定范围一段时间内的穿刺点数目。VTEC 可由式(1)获得。

为了减少多路径效应, 确保 GPS 观测的对称性, 高度截止角设置为 40° ^[7]。将每一历元作为一个时段, 数据采样率为 30 s, 则 1 d 共有 2 880 个时段。将 IGS 公布的卫星硬件延迟作为已知值, 对于每一个给定的接收机硬件延迟, 可以得到一个所有历元的 VTEC 标准差之和, 而最小标准差之和所对应的接收机硬件延迟即为所要寻找的值。考虑到太阳活动对电离层的影响, 本文以前 1 d 的硬件延迟作为先验值, 将搜索范围设置在 ± 5 ns, 搜索步长设置为 0.001 ns, 来估算接收机 DCB。此方法记为方法二。

2 计算结果及分析

2.1 数据使用

依据不同纬度选择全球 18 个 IGS 站, 见表 1。选取的时间段是 2013-01 共 31 d, 数据采样率为 30 s。图 1 给出了该段时间内地磁及太阳活动情况, 地磁指数 Dst 来自 data analysis center for geomagnetism, Kyoto。从图 1 可以看出, 01-17~01-20 和 01-26~01-27 期间发生了磁暴。

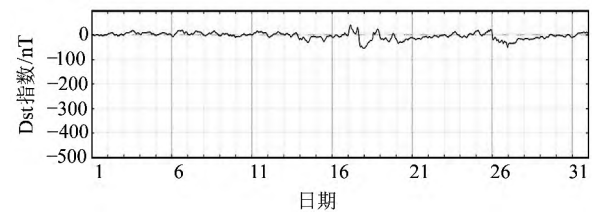


图 1 2013-01 Dst 指数变化曲线
Fig. 1 Curve of Dst index during January 2013

表 1 所选站点列表
Tab. 1 Stations list

IGS 站	经度/(°)	纬度/(°)	接收机类型	天线类型
GUAM	144.868 3	13.589 3	ASHTECH UZ-12	ASH701945B_M
PIMO	121.077 7	14.635 7	ASHTECH UZ-12	ASH701945C_M
TNML	120.987 3	24.798 0	AOA BENCHMARK ACT	AOAD/M_T
TWTF	121.164 5	24.953 6	ASHTECH Z-XII3T	ASH701945C_M
USUD	138.362 0	36.133 1	ASHTECH UZ-12	AOAD/M_T
MIZU	141.132 8	39.135 2	SEPT POLARX2	TPSCR3_GGD
NRC1	284.376 2	45.454 2	JAVAD TRE_G3T	AOAD/M_T
ALGO	281.928 6	45.958 8	TPS NET-G3A	AOAD/M_T
YSSK	142.716 7	47.029 7	ASHTECH Z-XII3	ASH701933B_M
GOPE	14.785 6	49.913 7	TPS NETG3	TPSCR_G3
DUBO	264.133 8	50.258 8	TPS NETG3	AOAD/M_T
PTBB	10.459 7	52.296 2	ASHTECH Z-XII3T	ASH700936E
ONSA	11.925 5	57.395 3	JPS E_GGD	AOAD/M_B
CHUR	265.911 3	58.759 1	TPS NET-G3A	ASH701945E_M
YELL	245.519 3	62.480 9	AOA SNR-12 ACT	AOAD/M_T
HOFN	344.813 2	64.267 3	TPS E_GGD	TPSCR3_GGD
MCM4	166.669 3	-77.838 3	ASHTECH UZ-12	AOAD/M_T
NYAL	11.865 3	78.929 6	TRIMBLE NETRS	AOAD/M_B

2.2 结果分析

图 2、图 3 依次给出低纬度与中、高纬度各 IGS 站在 2003-01 使用方法一及方法二估算的接收机硬件延迟变化,其中横坐标表示 2013 年年积日,纵坐标为估算结果。可以看出,对于低纬度测站,估算得到的接收机硬件延迟波动范围大;对于中、高纬度的测站,其接收机延迟估值变化比较稳定,且变化趋势与地磁指数基本一致。

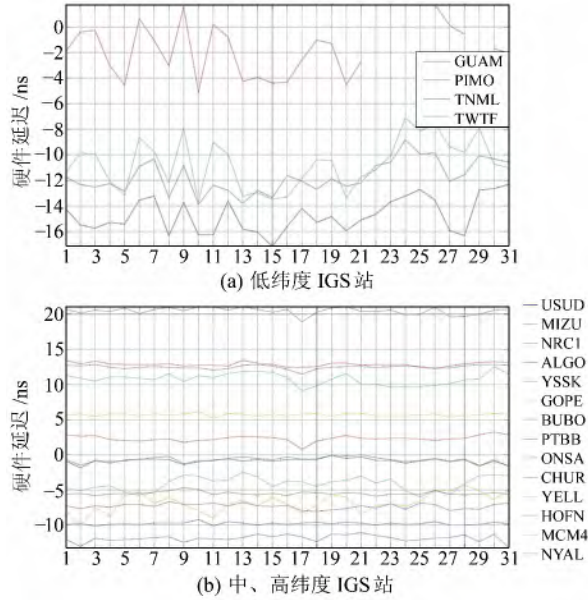


图 2 2013-01 各 IGS 站接收机硬件延迟估值变化(方法一)
Fig.2 Variations of IGS stations DCBs during January 2013(Method 1)

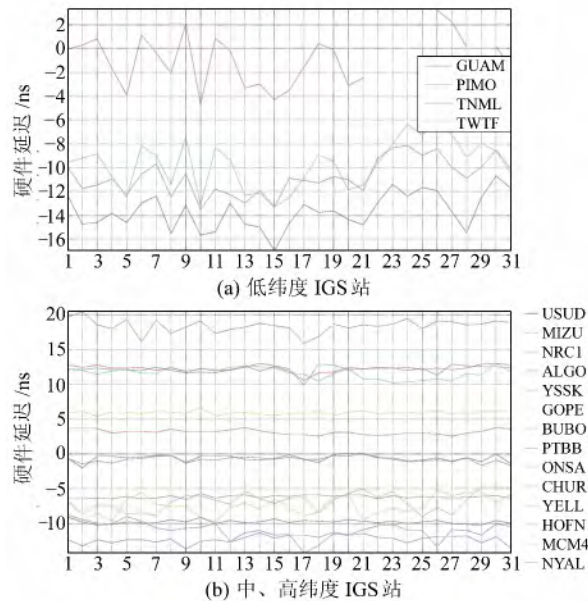


图 3 2013-01 各 IGS 站接收机硬件延迟估值变化(方法二)
Fig.3 Variations of IGS stations DCBs during January 2013(method 2)

为比较两种方法估算接收机硬件延迟的效果,图 4、图 5 依次给出了中、高纬度测站使用两

种方法估算的结果与 IGS 公布的结果的差值变化。可以看出,方法一得到的结果差值基本在 1.5 ns 以内,只有在地磁扰日将近 2 ns;方法二得到的结果之差在中纬度地区基本在 2 ns 以内,而在高纬度的 YELL 站、HOFN 站、NYAL 站和 MCM4 站,其结果之差波动剧烈,在地磁扰日差值均偏大。

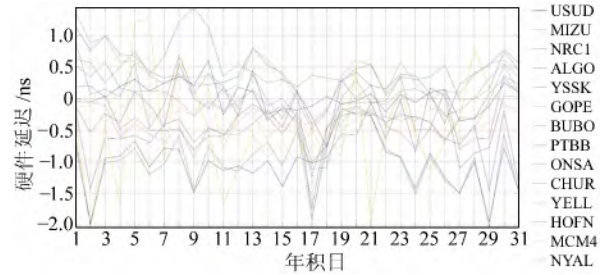


图 4 方法一估算的结果与 IGS 公布的结果之差
Fig.4 Comparison of method 1 with those from IGS

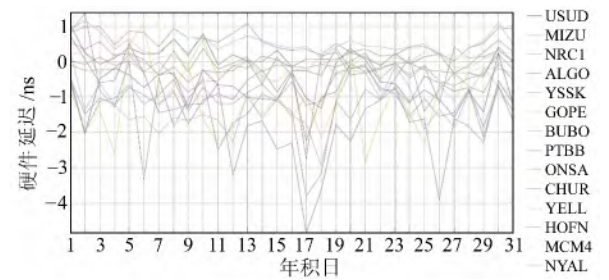


图 5 方法二估算结果与 IGS 公布的结果之差
Fig.5 Comparison of method 2 with those from IGS

两种方法是按天估算接收机硬件延迟,将一个月中每 1 d 的结果与 IGS 的差值进行平均。鉴于方法二在地磁扰日对高纬度测站造成的差值偏大,统计时在 YELL 站、HOFN 站、NYAL 站和 MCM4 站去掉地磁扰日 01-17 与 01-26 的结果,表 2 进一步给出估算结果与 IGS 公布结果的差值的部分统计特征。

表 2 估算的硬件延迟与 IGS 差值的月平均值与标准差

Tab.2 Standard deviations and mean values of the difference of DCB between the computed and IGS results

IGS 站	方法一		方法二	
	平均值/ns	标准差/ns	平均值/ns	标准差/ns
USUD	-1.01	0.41	-0.72	0.54
MIZU	-0.98	0.44	-1.00	0.45
NRC1	-0.33	0.34	0.55	0.28
ALGO	-0.37	0.40	0.51	0.24
YSSK	-0.50	0.40	-0.80	0.49
GOPE	-0.29	0.18	-0.01	0.26
DUBO	0.01	0.33	-0.22	0.56
PTBB	0.04	0.21	0.13	0.30
ONSA	0.46	0.32	-0.15	0.24
CHUR	0.37	0.33	-0.17	0.53
YELL	0.38	0.35	-1.14	0.66
HOFN	-0.29	0.41	-1.21	0.88
MCM4	-0.47	0.81	-1.16	0.88
NYAL	-0.06	0.52	-0.84	0.93

从图2~图5可以看出,在中纬度地区,两种方法都可以有效地估算接收机的硬件延迟,且方法一比方法二更加稳定;在地磁扰日,各站估算的硬件延迟都会出现一定波动,而除去地磁扰日,各站估算结果变化稳定;估算的结果与IGS公布结果的差值的平均值,方法一基本在1.0 ns以内,方法二基本在1.2 ns以内,其标准差基本在0.6 ns以内。

3 结 语

本文探讨两种估算单站接收机硬件延迟的方法,利用全球不同纬度的18个IGS站观测数据进行实验,将求得的结果与IGS公布的结果进行比较。结果表明,本文方法受纬度影响较大,低纬度测站估算结果精度低且波动大,但中、高纬度测站,即使在地磁扰日也具有很好的精度,估算结果与IGS公布结果的差值的平均值,方法一基本在1.0 ns以内,方法二基本在1.2 ns以内,其标准差基本在0.6 ns以内。在测站稀少或分布不均匀的情况下,可利用本文方法计算接收机硬件延迟,进而求得高精度电离层延迟。

参考文献

- [1] Sardon E, Rius A, Zarraoa N. Estimation of the Transmitter and Receiver Differential Biases and the Ionospheric Total Electron Content from Global Positioning System Observations[J]. *Radio Science*, 1994, 29(3): 577-586
- [2] Jakovskii N, Sardon E, Engler E, et al. Relationships between GPS-Signal Propagation Errors and EISCAT Observations[J]. *Annales Geophysicae*, 1997, 14(12):1 429-1 436
- [3] Kee C, Yun D. Extending Coverage of DGPS by Considering Atmospheric Models and Corrections[J]. *Journal of Navigation*, 2002, 55(2): 305-322
- [4] Chen W, Hu C W, Gao S, et al. Absolute Ionospheric Delay Estimation Based on GPS PPP and GPS Active Network[C]. 2004 International Symposium on GNSS/GPS, Sydney, 2004
- [5] Li Z S, Yuan Y B, Li H, et al. Two-Step Method for the Determination of the Differential Code Biases of COMPASS Satellites[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(11):1 059-1 076
- [6] Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P. Differential Code Bias Estimation Using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps[J]. *Navigation*, 2014, 61(3): 191-201
- [7] Ma G, Maruyama T. Derivation of TEC and Estimation of Instrumental Biases from GEONET in Japan[J]. *Annales Geophysicae*, 2003, 21(10):2 083-2 093
- [8] Skone S H. Wide Area Ionosphere Grid Modelling in the Auroral Region[D]. Calgary: University of Calgary, 1998
- [9] 李征航,黄劲松. GPS测量与数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2005(Li Zhenghang, Huang Jingsong. GPS Surveying and Data Processing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005)

Methods for Estimation of Single Station Differential Code Biases by GPS Phase Observations

WU Jicang^{1,3} ZHANG Zefeng^{1,2} CHEN Junping²

1 College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China

2 Shanghai Astronomical Observatory, CAS, 80 Nandan Road, Shanghai 200030

3 Key Laboratory of Modern Engineering Surveying, NASMG, 1239 Siping Road, Shanghai 20092, China

Abstract: Differential code biases (DCB) are major source of errors in computing the total electron content (TEC) of the ionosphere from GPS measurements. Although instrumental satellite bias values are available from various International GPS Service (IGS) analysis centers, receiver biases are provided only for very few GPS stations. Some other methods are needed to solve receiver DCB values for plenty of other GPS stations. In this study, on the basis of the GPS code and phase observations in Jan. 2013 at IGS stations distributed in different latitudes, some effective methods are developed to estimate receiver DCB values for a single GPS station. It is shown that the differences between receiver DCB values estimated and those released by IGS are almost less than 1.5 ns, and monthly averages of the differences are below 1.0 ns for most receiver stations.

Key words: GPS; single station; phase data; total electron content(TEC); differential code biases(DCB)

Foundation support: National Natural Science Foundation of China, No. 41174024; Commonwealth Research Project on Surveying and Geo-Informatics, No. 201412017; Opening Project of Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Position Techniques, No. 14DZ2276100.

About the first author: WU Jicang, professor, PhD supervisor, majors in data processing of contemporary geodetic survey and inverse theory and methods of geodynamics, E-mail: jewu@tongji.edu.cn.