

Jin Yaqi, Zhang Donghe, Liu Yumei, Hao Yongqiang, Xiao Zuo. Influence of ionospheric variability in solar maximum and solar minimum period on the stability of estimated GPS instrumental biases. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(4): 427-435

不同太阳活动条件下电离层形态对估算 GPS 系统硬件延迟的影响^{*}

金亚奇¹ 张东和¹ 刘玉梅² 郝永强¹ 肖佐¹

1(北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

2(中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术国家重点实验室 青岛 266107)

摘要 利用两个中纬度台站 GPS 观测数据提取的 GPS 卫星硬件延迟, 分析了不同太阳活动情况下估算的硬件延迟稳定性和统计特征, 结合同期电离层观测数据, 研究了电离层状态对硬件延迟估算结果的影响. 研究表明, 基于太阳活动高年 (2001 年) GPS 观测数据估算的硬件延迟稳定性要低于太阳活动低年 GPS 观测数据的估算结果, 利用 2001 年 GPS 数据估算的卫星硬件延迟标准偏差 (RMS) 年平均值约为 1 TECU, 而 2009 年 GPS 数据估算的卫星硬件延迟年标准偏差平均值约为 0.8 TECU. 通过对 2001 年和 2009 年北京地区电离层 F_2 层最大电子密度 ($N_m F_2$) 变化性分析, 结合 GPS 硬件延迟估算方法对电离层时空变化条件的要求, 认为硬件延迟稳定性与太阳活动强度的联系是由不同太阳活动条件下电离层变化的强度差异引起的.

关键词 GPS, 硬件延迟, 电离层总电子含量, 太阳活动周

中图分类号 P 353

Influence of Ionospheric Variability in Solar Maximum and Solar Minimum Period on the Stability of Estimated GPS Instrumental Biases

JIN Yaqi¹ ZHANG Donghe¹ LIU Yumei² HAO Yongqiang¹ XIAO Zuo¹

1(School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871)

2(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of
Radiowave Propagation, Qingdao 266107)

Abstract It is an important step to estimate the GPS instrumental biases in the process of calculating the ionospheric Total Electron Content (TEC) from GPS data, and the estimation of GPS instrumental biases is the main source of errors in the GPS observed TEC. Therefore, study of the estimated instrumental biases is helpful for understanding the accuracy of ionospheric TEC derived from GPS observation. In this paper, data from two mid-latitude GPS stations was used to derive

* 国家自然科学基金项目 (41174134, 41274156) 和国家重点基础研究发展计划项目 (2011CB811405) 共同资助

2012-05-08 收到原稿, 2013-02-10 收到修定稿

E-mail: zhangdh@pku.edu.cn

the instrumental biases of GPS satellites in solar maximum and minimum periods. The stability and statistical characteristics of estimated instrumental biases observed at BJFS and URUM stations in 2001, 2007 and 2009 are given. The influence of ionospheric morphology on the estimation of GPS instrumental biases was studied by analyzing the ionospheric data in the same periods. By comparing the estimated GPS instrumental biases under different ionospheric condition, the accuracy and usability of GPS observed ionospheric TEC were analyzed. Results show that the stability of estimated instrumental biases using GPS data from solar maximum period (in 2001) is poorer than that from solar minimum period (in 2007 and 2009). The yearly RMS value of estimated instrumental biases in 2001 is about 1 TECU, and the yearly RMS value is about 0.8 TECU in 2007 and 2009. In view of hypothesis in the process of calculating the ionospheric TEC, combining with the analysis of variability of ionospheric critical frequency observed at Beijing station, it is believed that the connection between stability of estimated instrumental biases and the solar cycle phase is related with the differences of ionospheric variability in solar maximum and minimum. Study on the stability of estimated instrumental biases indicates that the accuracy of ionospheric TEC derived from GPS observation is different in different solar cycle phase, and the error of ionospheric TEC caused by instrumental biases of the satellites is about 1 TECU.

Key words GPS, Instrumental biases, TEC, Solar cycle

0 引言

利用 GPS 观测数据在一定假设条件下对 GPS 系统硬件延迟的估算是目前获得 GPS 系统硬件延迟的主要手段^[1-3]。由于各种假设条件的满足程度不同,硬件延迟的稳定性存在很大差别,研究各种假设条件对估算的硬件延迟数据稳定性的影响有助于认识硬件延迟变化以及提高硬件延迟估算精度。另一方面, GPS 系统硬件延迟估算是利用 GPS 数据提取电离层总电子含量 (TEC) 的重要步骤,也是利用 GPS 数据提取电离层 TEC 的主要误差源^[4]。因此,分析硬件延迟的准确性和稳定性对于认识电离层 TEC 数据精度以及指导利用该类数据进行电离层扰动研究结果的可靠性分析很有意义。

长期以来,相关学者提出了多种估算 GPS 系统硬件延迟的方法,这些方法都隐含着缓变电离层状态假设条件^[5-10]。由于真实的电离层存在各种时间和空间尺度的变化,这种变化在一定程度上影响到估算硬件延迟的稳定性和准确性,从而影响得到的电离层 TEC 精度^[11]。张炜等利用中国地区 GPS 观测数据,分析了暴时估算的硬件延迟和磁平静时期估算的硬件延迟稳定性,发现暴时估算的硬件延迟稳定性会下降,并通过具体个例分析,证明这种硬件延迟估算

结果的稳定性下降与暴时电离层状态剧烈变化具有直接关系^[12]。另外,利用中国地区不同纬度 GPS 观测数据,张东和等分析了基于这些数据估算的卫星硬件延迟稳定性,发现其稳定性与所用 GPS 数据观测台站的纬度有关,纬度越低,估算的硬件延迟稳定性越差,统计研究发现,这种纬度的依赖性来自于不同纬度电离层变化状态的差异性,由于电离层赤道异常峰的影响,低纬度地区电离层表现出的变化性要强于中纬度地区,这种电离层区域变化特点也反映在硬件延迟估算结果的稳定性方面^[13]。

由于受太阳辐射影响,电离层的变化特性明显随太阳活动周的变化而变化。在太阳活动高年,电离层的时空变化都要大于太阳活动低年^[14],这种变化性的差别有可能造成估算 GPS 硬件延迟精度的差别。在本文中,利用一种硬件延迟估算方法处理两个中纬度地区 GPS 台站数据,统计分析不同太阳活动条件下估算的硬件延迟稳定性。

1 数据和方法

这里使用的 GPS 数据来自 IGS (International GNSS Service), 台站编号分别为 BJFS (116.46°E, 39.92°N) 和 URUM (87.60°E, 43.81°N), 数据采样率

为 30 s, 格式为 RINEX. 考虑到数据的连续性问题, BJFS 台站数据包括太阳活动高年 (2001 年) 和太阳活动低年 (2009 年) 的全年观测数据, 而 URUM 台站数据分别是 2001 年和 2007 年的观测数据. 为表征不同太阳活动条件下的电离层状态, 还使用了中国电波传播研究所提供的北京台站测高仪测量的电离层 F_2 层最大电子密度 ($N_m F_2$) 数据, 这里, $N_m F_2$ 是从电离层临界频率 ($f_0 F_2$) 数据转化得到的, 即

$$N_m F_2 = 1.24 \times 10^{10} f_0 F_2^2,$$

式中, $N_m F_2$ 单位为 m^{-3} , $f_0 F_2$ 单位为 MHz^[15].

下面介绍估算硬件延迟所采用的方法. 式 (1) 和式 (2) 分别为不考虑硬件延迟情况下利用 GPS 两个频率的伪距观测量和载波相位观测量得到的斜向电离层总电子含量^[9]:

$$S_{TEC}^P = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 - f_2^2)} (P_2 - P_1), \quad (1)$$

$$S_{TEC}^I = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 - f_2^2)} (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2). \quad (2)$$

其中, $k = 80.62 m^3 \cdot s^{-2}$, f_1, f_2 为 GPS 系统两个载波的频率, $f_1 = 1.57542$ GHz, $f_2 = 1.2276$ GHz; P_1 和 P_2 是两个载波频率的伪距观测量; L_1 和 L_2 是两个频率的载波相位观测量, λ_1 和 λ_2 是两个频率对应的波长. 由式 (1) 可以得到绝对电离层 TEC, 但是伪距测量的精度不高, 而且当仰角较小时, 多径效应增大, TEC 误差变大. 用载波相位可以得到高精度的电离层 TEC, 但由于有整周模糊度的存在 (公式中未给出), 式 (2) 所得到的只是相对 TEC. 一般通过联合两种观测量利用下式可以得到高精度的绝对斜向总电子含量 (STEC)^[16-17]:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^N (S_{TEC_i}^P - S_{TEC_i}^I) \sin^2 E_i}{\sum_{i=1}^N \sin^2 E_i}, \quad (3)$$

$$S_{TEC} = S_{TEC}^I + B. \quad (4)$$

其中, N 为一个连续观测时元内的所有测量数目, E_i 为卫星仰角, $\sin^2 E_i$ 是抑制多径效应的权重因子. 在考虑卫星和接收机总硬件延迟的情况下, 电离层垂直总电子含量 (VTEC) 可以表示为

$$V_{TEC} = (S_{TEC} + B_{rs}) \cos E_{ion}. \quad (5)$$

式 (5) 中, B_{rs} 为卫星加接收机的差分硬件延迟,

$\cos E_{ion}$ 为映射函数, 其中,

$$E_{ion} = \arcsin\left(\frac{R_e}{R_e + H_i} \cos E\right). \quad (6)$$

式 (6) 中, R_e 为地球平均半径, H_i 为电离层薄壳高度 (一般假设为 400 km), E 为 GPS 卫星仰角.

将 GPS 观测数据按照穿刺点 (卫星-接收机连线与电离层薄壳的交叉点) 的纬度和地方时划分为 0.5° 和 0.1 h 的均匀网格, 假设每个网格内垂直 TEC 是相等的, 同时假设卫星和接收机硬件延迟在一天内不变. 如果 i 时刻卫星 α 与接收机确定的穿刺点与 j 时刻卫星 β 与接收机确定的穿刺点在同一个划分的网格内, 则

$$(S_{TEC_{i\alpha}} + B_{r\alpha}) \cos E_{ion,i\alpha} = (S_{TEC_{j\beta}} + B_{r\beta}) \cos E_{ion,j\beta}. \quad (7)$$

由此可以得到一系列以卫星加接收机的硬件延迟为未知数的超定线性方程组, 其未知变量有 32 个. 方程组个数由一天的观测数据量确定, 对于采样率为 30 s 的接收机, 每天约有 200~300 个方程, 这些方程写成矩阵的形式为:

$$\begin{bmatrix} \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & -\cos E_{ion,i\alpha} & \cdots & \cos E_{ion,j\beta} & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_{r1} \\ \vdots \\ B_{r\alpha} \\ \vdots \\ B_{r\beta} \\ \vdots \\ B_{r32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ S_{TEC_{i\alpha}} \cos E_{ion,i\alpha} - S_{TEC_{j\beta}} \cos E_{ion,j\beta} \\ \vdots \end{bmatrix}. \quad (8)$$

对于这种超定线性方程组, 使用最小二乘法或奇异因子分解法求解即可得到硬件延迟值.

2 结果分析

图 1 给出了利用 BJFS 台站数据估算的硬件延迟与欧洲定轨中心 (Center for Orbit Determination

in Europe, CODE) 在网上* 发布的硬件延迟的比较. 图 1(a) 和 (b) 给出了两种方法得到的两颗 GPS 卫星 (PRN03, PRN22) 在 2001 年每日硬件延迟的比较. 图 1(c) 给出了两种方法得到的所有卫星 2001 年硬件延迟的年平均值. CODE 利用全球分布的 GPS 台站网数据, 计算得到全球电离层图并估算出 GPS 硬件延迟 (Differential Code Biases, DCB). 从图 1 中可以看出, 本文估算结果 (图中用 BJFS 代替) 与 CODE 发布的结果非常接近, 验证了本文方法的有效性.

进一步比较 CODE 与本文结果可以发现, 在稳定性方面, 总的来看, CODE 的结果要好一些. 其原因有两方面. 其一, 本文只使用了 BJFS 一个 GPS 台站的数据, 而 CODE 使用了全球分布的约 200 个 GPS 接收机数据, 所以本文结果更容易受到局地电离层影响; 其二, CODE 发布的硬件延迟是采用 30 天滑动平均后的结果, 因此, 从图 1 中看到, CODE 比本文结果更平滑. 由于两种方法结果的一致性, 本文将进行不同太阳活动条件下估算硬件延迟稳定性的研究.

基于 BJFS 台站 2001 年和 2009 年的 GPS 数

据, 这里估算了这两年所有 GPS 卫星的硬件延迟. 为减少其他因素 (例如卫星型号) 对比较不同时间段估算卫星硬件延迟的影响, 只选取 2001 到 2010 年连续工作的卫星当中的几颗进行比较. 图 2 给出了 6 颗卫星 (PRN04, PRN06, PRN09, PRN10, PRN13, PRN26) 在 2001 和 2009 年的日-日变化情况 (为简化分析, 本研究只针对日-日变化进行研究, 图 2 中已通过滤波过程将长时间变化滤除, 下同), 比较图 2(a)~(f) 与 (g)~(l), 容易看出, 对于每一颗卫星, 其硬件延迟的稳定性都是在太阳活动低年 (2009 年) 更好.

表 1 给出了所有卫星硬件延迟在 2001 和 2009 年硬件延迟全年的标准偏差 (RMS) 值. 从表中可以看到, 对于绝大多数卫星, 2001 年估算的硬件延迟 RMS 值大于 2009 年的 RMS 值, 只有 23 和 29 号卫星不是这样. 2001 年所有在轨 GPS 卫星硬件延迟的年 RMS 平均值为 1.04 TECU, 而 2009 年为 0.76 TECU. 从表 1 中还可以看到不同卫星硬件延迟稳定性的差异, 例如, 2009 年有 3 颗卫星的年 RMS 值大于 1 TECU, 其余均小于该值, 这可能是卫星硬

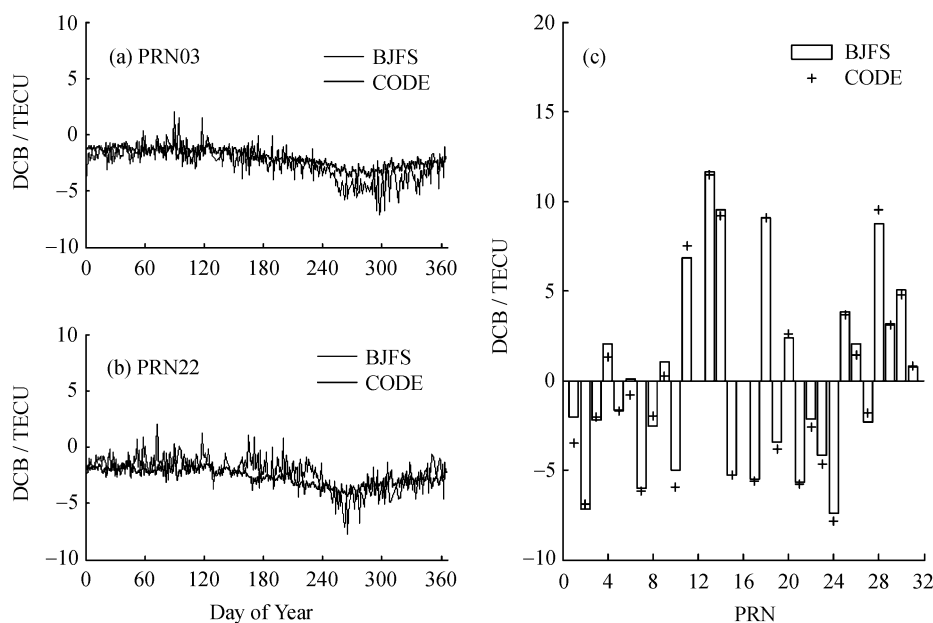


图 1 使用 BJFS 台站数据估算的卫星硬件延迟与 CODE 发布的硬件延迟的比较. (a), (b) 为两颗卫星硬件延迟在 2001 年的比较, 其中黑线为 CODE 结果, 灰线为本文估算结果. (c) 为本文结果与 CODE 发布的 2001 年所有 GPS 卫星硬件延迟年平均值的比较

Fig. 1 Comparison of Differential Code Biases (DCB) between our estimation and the data issued by CODE. Panel (a) and (b) show the comparison of two satellites in 2001. The black line presents the data issued by CODE and the grey line presents our estimation. Panel (c) shows the comparison of annual average value in 2001

*ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/

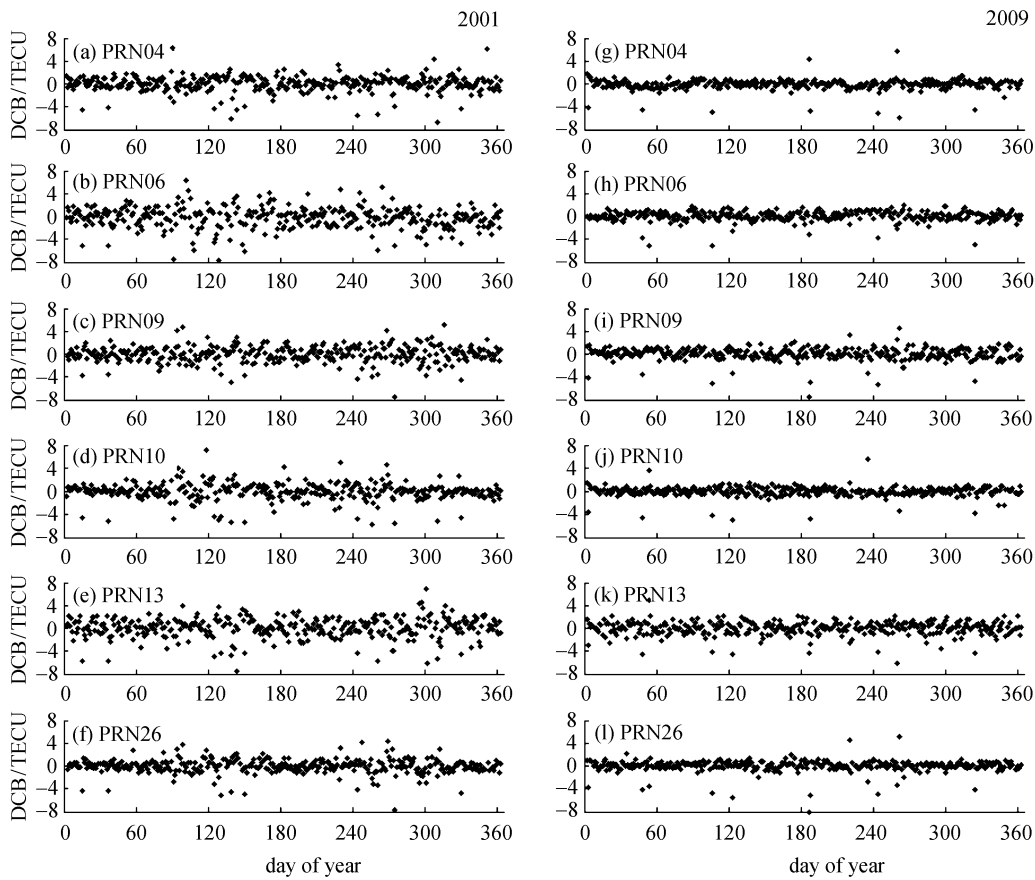


图 2 利用 2001 年和 2009 年 BJFS 台站 GPS 数据估算的 6 颗卫星硬件延迟
 Fig. 2 Estimated Differential Code Biases (DCB) of 6 satellites based on GPS data from BJFS station in 2001 and 2009

表 1 BJFS 台站估算的硬件延迟在 2001 年和 2009 年的 RMS 值 (单位 TECU)
 Table 1 Annual RMS (Unit TECU) of Differential Code Biases (DCB) in 2001 and 2009 estimated from GPS data of BJFS station

PRN	2001 年	2009 年	PRN	2001 年	2009 年	PRN	2001 年	2009 年
1	1.1461	-	12	-	0.8503	23	0.8524	1.0520
2	1.0782	0.5949	13	1.2572	0.9728	24	0.9775	0.6417
3	0.9266	0.6733	14	0.9553	0.5963	25	0.9392	0.7111
4	0.9768	0.5835	15	0.9597	0.6540	26	0.9256	0.5926
5	1.2138	0.8524	16	-	0.5581	27	1.1369	0.8843
6	1.2601	0.7093	17	0.9905	0.5822	28	0.9492	0.7084
7	1.0820	0.8236	18	0.9727	0.6761	29	0.8629	0.9647
8	1.2157	1.0927	19	0.9539	0.6929	30	1.1211	0.8483
9	1.1259	0.7879	20	1.4209	1.1613	31	0.9686	0.5318
10	1.0151	0.5784	21	0.8804	0.8257	32	-	0.9184
11	1.1842	0.8356	22	0.9265	0.5697	mean	1.0439	0.7588

件本身差异性造成的. 查阅 GPS 卫星的星座状态后发现, PRN23 和 PRN29 两个卫星编码分别于 2004 和 2007 年底被分配给新发射的卫星, 也就是说表 1 中两年所比较的不是同一颗卫星, 而是两颗不同型号的卫星, 显然不同卫星硬件延迟稳定性是不相同的.

图 3 是使用 BJFS 数据估算的 23 号卫星硬件延迟原始值和滤除长时间变化趋势后的值, 图 3(a) 和 (c) 是原始的包含有长时间变化的硬件延迟, 图 3(b) 和 (d) 是去掉长时间变化后的硬件延迟; 图 3(a) 和 (b) 为 2001 年的硬件延迟, 图 3(c) 和 (d) 为 2009 年的硬件延迟. 从图 3 可以发现, 23 号卫星的硬件延迟在没有滤除长时间变化之前的稳定性差异与前面得到的规律是一致的, 2001 年的 RMS 值为 1.86 TECU, 而 2009 年的 RMS 值为 1.48 TECU, 2009 年硬件延迟的稳定性更好.

图 4 是基于 URUM 台站 2001 和 2007 年 GPS 数据估算的卫星硬件延迟, 同样选取连续工作卫星中的 6 颗卫星 (PRN03, PRN04, PRN06, PRN10, PRN13, PRN24) 进行比较. 这里选取 2007 年的数

据是因为 URUM 台站在 2009 年有半年时间的数据缺失, 而在 2008 年该台站进行了接收机更换. 比较图 4(a)~(f) 与 (g)~(l) 可以看出, 基于 2001 年观测数据估算的卫星硬件延迟变化性比基于 2007 年观测数据估算的硬件延迟变化性略大.

表 2 给出了所有卫星硬件延迟在 2001 年和 2007 年的 RMS 值, 最后一行是所有在轨 GPS 卫星年 RMS 的平均值. 所有在轨卫星年 RMS 的平均值在 2001 年约为 0.90 TECU, 而在 2007 年约为 0.75 TECU. 对比表 2 中各卫星可以看到, 绝大多数卫星的估算硬件延迟在 2001 年 RMS 值大于 2007 年, 总体来说, 估算的硬件延迟在 2007 年稳定性更好. 有 5 颗卫星在 2007 年的 RMS 值比 2001 年大, 分别是 PRN17, PRN19, PRN20, PRN23, PRN29, 但是这其中除卫星 PRN29 外, 其余未去掉长时间变化之前, 卫星硬件延迟的年 RMS 在 2001 年更大. 查阅卫星星座状态发现, 旧的 PRN29 卫星于 2007 年 10 月停止服务, 在年末换成了新发射的卫星, 所以存在硬件延迟的不连续或者跳变, 导致年 RMS 增大.

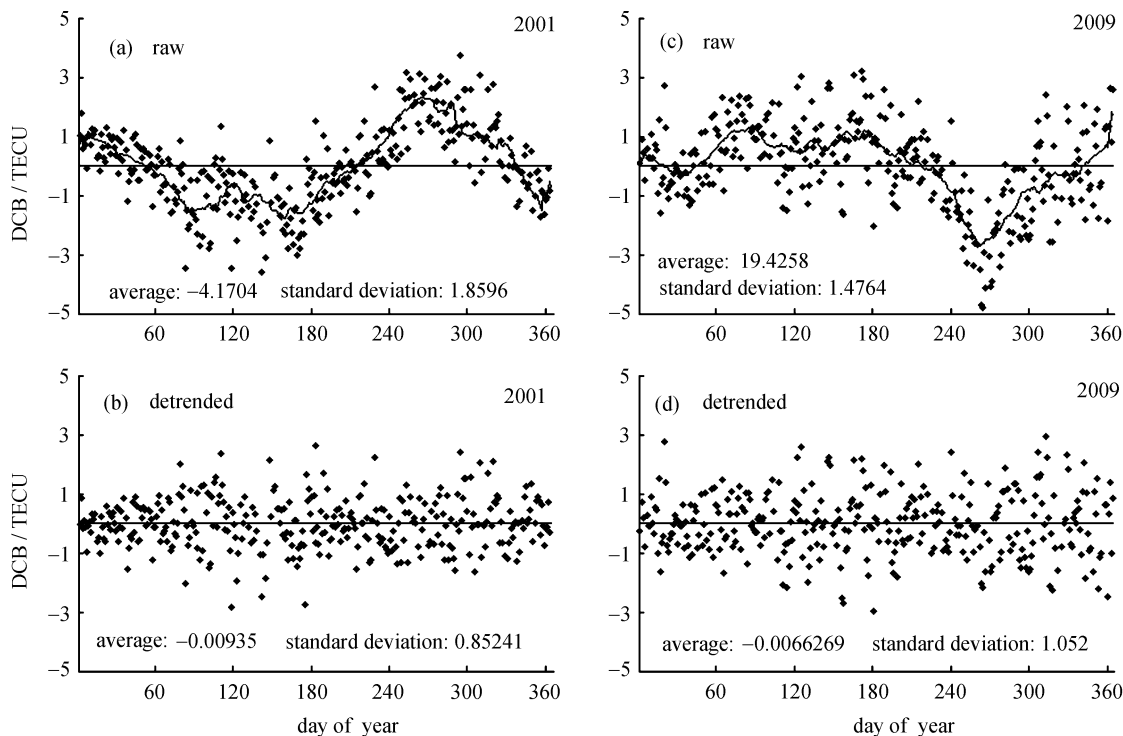


图 3 使用 BJFS 数据估算的 23 号卫星硬件延迟原始值和去掉长时间变化后的值
Fig. 3 Raw Differential Code Biases (DCB) and detrended DCB of satellite PRN23
estimated from GPS data of BJFS station

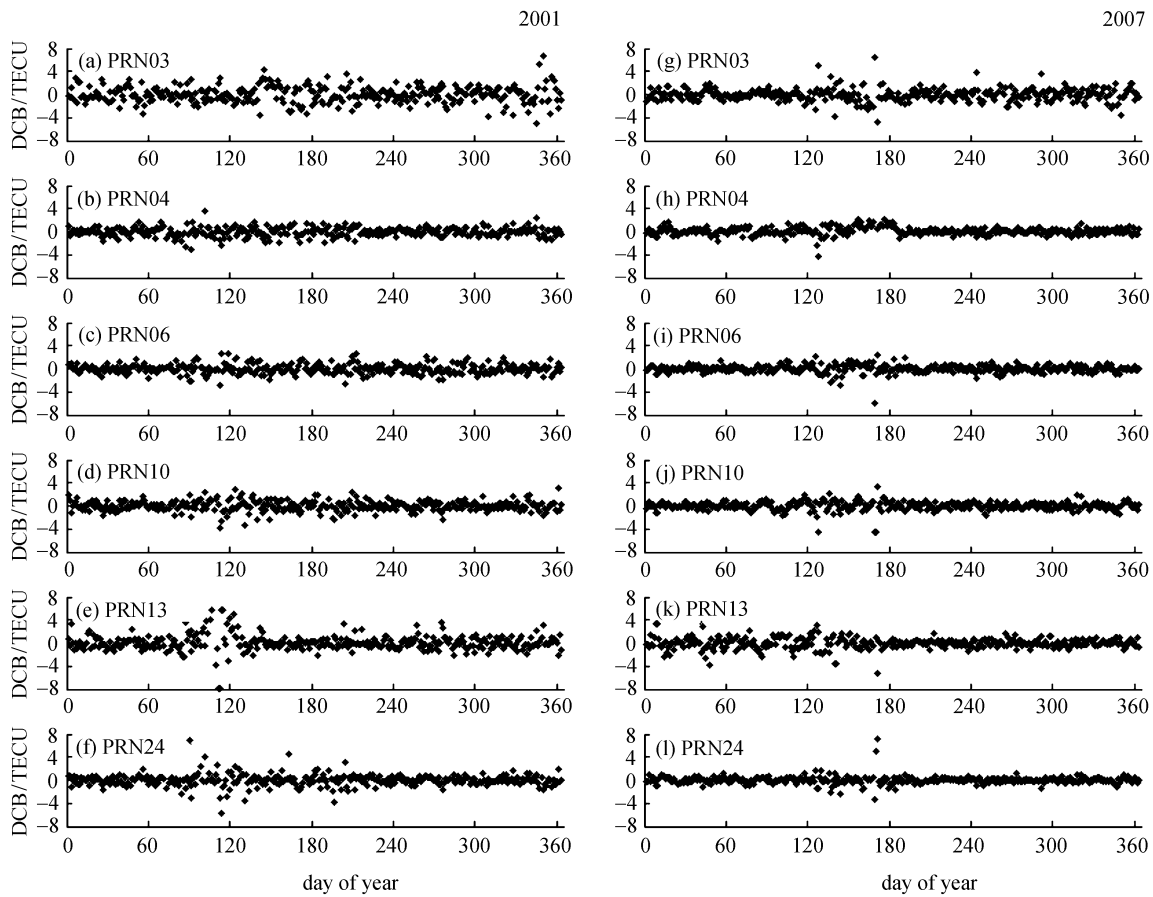


图 4 利用 2001 年和 2007 年 URUM 台站 GPS 数据估算的 6 颗卫星硬件延迟
 Fig. 4 Estimated Differential Code Biases (DCB) of 6 satellites based on GPS data from URUM station in 2001 and 2007

表 2 URUM 台站估算的硬件延迟在 2001 和 2007 年的 RMS 值 (单位 TECU)

Table 2 Annual RMS (Unit TECU) of Differential Code Biases (DCB) in 2001 and 2007 estimated from GPS data of URUM station

PRN	2001 年	2007 年	PRN	2001 年	2007 年	PRN	2001 年	2007 年
1	0.9558	0.8103	12	-	0.7083	23	0.6810	0.8236
2	0.9154	0.6855	13	0.9433	0.8052	24	0.7753	0.5153
3	1.2168	0.9256	14	0.9163	0.6526	25	0.8372	0.6992
4	0.7502	0.6338	15	0.6079	-	26	1.1907	0.9133
5	0.9753	0.7762	16	-	0.5855	27	0.7782	0.6294
6	0.8444	0.6363	17	0.7122	0.7305	28	1.0193	0.7745
7	0.8895	0.6789	18	0.5811	0.5389	29	0.8536	0.9189
8	0.8114	0.6860	19	0.8275	1.0011	30	1.0087	0.7560
9	1.0796	0.9080	20	1.1731	1.1962	31	0.9239	0.7584
10	0.8597	0.6276	21	0.7902	0.5500	32	-	0.5721
11	1.3155	1.2282	22	0.9093	0.5816	mean	0.9015	0.7518

从上面给出的基于两个台站太阳活动高年和低年数据估算的 GPS 卫星硬件延迟统计规律看, 太阳活动高年估算的绝大多数卫星硬件延迟变化性要高于低年估算的结果. 卫星硬件延迟表征两个 GPS 载波信号在卫星内部的时延差, 该时延差与载波信号在卫星内部信号路径的硬件系统有关, 因此, 不应该有如上显示的与太阳活动强度相关联的系统性变化. 考虑估算 GPS 硬件延迟过程中的一些基本假设条件, 不难确定这种卫星硬件延迟变化性的差异与估算硬件延迟过程中采用的电离层缓变模型假设条件有关. 众所周知, 电离层具有一些从偶发性到周日以及太阳自转周和一个太阳活动周周期的变化, 这些变化都会在一定程度上影响估算硬件延迟所需要的电离层缓变条件的满足程度. 2001 年处于太阳活动高年, 这一年电离层的变化性要比处于太阳活动低年的 2007 年和 2009 年大, 电离层稳定性假设满足程度低, 从而导致所估算的硬件延迟稳定性差.

图 5 给出了 2001 年和 2009 年 3 月及 9 月 $N_m F_2$ 的周日变化. 可以看出, 图 5(a)~(d) 中, $N_m F_2$ 都约在地方时中午附近达到最大, 但是 2001 年中午

的 $N_m F_2$ 比 2009 年大很多, $N_m F_2$ 在 2001 年中午可达到约 $2 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$, 而在 2009 年的中午可达到约 $0.5 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$. 同时, 受太阳辐射变化性差异的影响, 2001 年 $N_m F_2$ 日-日变化的差别比 2009 年大, 即图 5 中代表周日变化的曲线离散性更大. 从图中不难看出, 2009 年电离层状态对于电离层缓变模型满足得更好.

结合前期针对暴时电离层状态以及中低纬度电离层状态差异对估算 GPS 硬件延迟稳定性影响的分析, 可知本文给出的硬件延迟稳定性差异与不同太阳活动条件下电离层变化性差异有关, 电离层变化性越强, 估算的硬件延迟稳定性越差. 另外, 从硬件延迟稳定性的具体数值来看, 中低纬度硬件延迟稳定性的差异比不同太阳活动条件下硬件延迟稳定性的差异大, 基于 2004 年中低纬度 GPS 数据估算的硬件延迟 RMS 值的差别在 1 TECU 左右^[13], 本文给出的 2001 年与 2009 年硬件延迟 RMS 之间的差别只有 0.2 TECU 左右. 由于本文在进行全年硬件延迟稳定性分析时已对硬件延迟进行滤波, 去除长周期变化, 因此, 所得硬件延迟的变化情况只反映不同太阳

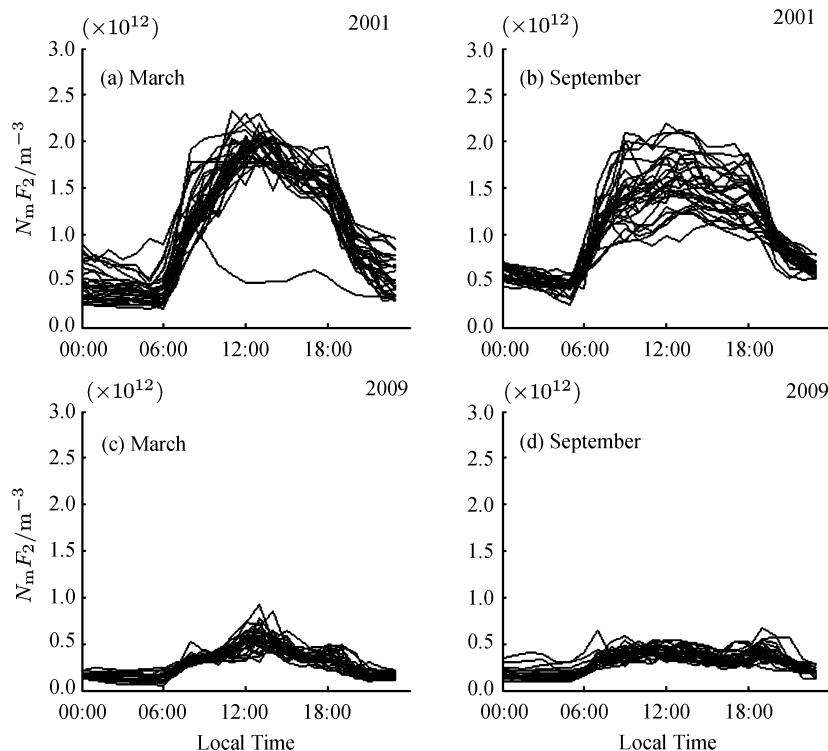


图 5 2001 年及 2009 年 3 月和 9 月北京地区电离层 F_2 层最大电子密度周日变化, 每条线代表一天中 $N_m F_2$ 的周日变化

Fig. 5 Diurnal variation of ionospheric F_2 layer peak electron density observed at Beijing station in March and September of both 2001 and 2009, and each line presents the diurnal variation of $N_m F_2$

活动情况下由于电离层日-日变化造成的硬件延迟稳定性差异, 实际还需考虑电离层季节变化等的影响, 考虑硬件延迟年变化的情形后, 硬件延迟年 RMS 值的差别大于 0.2 TECU.

3 结语

利用不同太阳活动周内两个中纬度台站 GPS 观测数据提取的 GPS 卫星硬件延迟, 分析了不同太阳活动条件下估算的硬件延迟稳定性统计特征, 结合同期电离层观测数据, 研究电离层状态对硬件延迟估算结果的影响. 研究表明, 基于太阳活动高年 (2001 年) GPS 观测数据估算的硬件延迟稳定性要低于基于太阳活动低年 (2007 年和 2009 年) GPS 观测数据的估算结果. 对于使用 BJFS 数据的估算结果, 2001 年估算的卫星硬件延迟年 RMS 平均值约为 1.04 TECU, 而 2009 年的平均值约为 0.76 TECU. 通过对 2001 年和 2009 年北京地区电离层 F₂ 层临界频率变化性分析, 结合 GPS 硬件延迟估算方法对电离层时空变化条件的要求, 认为本文表现出的硬件延迟稳定性与太阳活动强度的联系是由于不同太阳活动条件下电离层变化性的强度差异引起的. 同时, 对硬件延迟稳定性的分析表明, 基于 GPS 方法提取的电离层总电子含量精度在不同太阳活动条件下是有差异的.

致谢 所用 GPS 数据来自 IGS 网站, 电离层数据由电波环境与模化技术国家重点实验室提供.

参考文献

- [1] Coco D S, Coker C, Dahlke S R, Clynch J R. Variability of GPS satellite differential group delay biases [J]. *IEEE T. Aero. Elec. Sys.*, 1991, **27**: 931-938
- [2] Lanyi G E, Roth T. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using Global Positioning System and beacon satellites observations [J]. *Radio Sci.*, 1988, **23**: 483-492
- [3] Vladimer J A, Lee M C, Doherty P H, et al. Comparisons of TOPEX and Global Positioning System total electron content measurements at equatorial anomaly latitudes [J]. *Radio Sci.*, 1997, **32**: 2209-2220
- [4] Ho C M, Wilson B D, Mannucci A J, Lindqwister U J, Yuan D N. A comparative study of ionospheric total electron content measurements using global ionospheric maps of GPS, TOPEX radar, and the Bent model [J]. *Radio Sci.*, 1997, **32**: 1499-1521
- [5] Arikan F, Nayir H, Sezen U, Arikan O. Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC [J]. *Radio Sci.*, 2008, **43**, RS4004, doi: 10.1029/2007RS003785
- [6] Brunini C, Meza A, Bosch W. Temporal and spatial variability of the bias between TOPEX- and GPS-derived total electron content [J]. *J. Geodesy*, 2005, **79**: 175-188
- [7] Jee G, Lee H B, Kim Y H, Chung J K, Cho J. Assessment of GPS global ionosphere maps (GIM) by comparison between CODE GIM and TOPEX/Jason TEC data: Ionospheric perspective [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**, A10319, doi: 10.1029/2010JA015432
- [8] Liu Z Z, Gao Y. Ionospheric TEC predictions over a local area GPS reference network [J]. *GPS Solut.*, 2004, **8**: 23-29
- [9] Ma G, Maruyama T. Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan [J]. *Ann. Geophys.*, 2003, **21**: 2083-2003
- [10] Sardon E, Zarraoa N. Estimation of total electron content using GPS data: How stable are the differential satellite and receiver instrumental biases [J]. *Radio Sci.*, 1997, **32**: 1899-1910
- [11] Rishbeth H, Mendillo M. Patterns of F₂-layer variability [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2001, **63**: 1661-1680
- [12] Zhang W, Zhang D H, Xiao Z. The influence of geomagnetic storms on the estimation of GPS instrumental biases [J]. *Ann. Geophys.*, 2009, **27**: 1613-1623
- [13] Zhang D H, Zhang W, Li Q, Shi L Q, Hao Y Q, Xiao Z. Accuracy analysis of the GPS instrumental bias estimated from observations in middle and low latitudes [J]. *Ann. Geophys.*, 2010, **28**: 1571-1580
- [14] Liu L, Wan W, Le H. Solar activity effects of the ionosphere: A brief review [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2011, **56**: 1202-1211
- [15] Liu L, Wan W, Ning B, Pirog O M, Kurkin V I. Solar activity variations of the ionospheric peak electron density [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**, A08304, doi:10.1029/2006JA011598
- [16] Hovath I, Essex E. Using observations from the GPS and TOPEX satellites to investigate night-time TEC enhancements at mid-latitudes in the southern hemisphere during a low sunspot number period [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2000, **62**:371-391
- [17] Mannucci A, Wilson B, Yuan D, Ho C, Lindqwister U, Runge T. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements [J]. *Radio Sci.*, 1998, **33**(3):565-582