

# 区域卫星导航系统硬件延迟解算

吴晓莉<sup>1,2</sup> 平劲松<sup>1</sup> 刘 利<sup>2</sup> 邢 楠<sup>1</sup>

(1 中国科学院上海天文台,上海市南丹路 80 号,200030)  
(2 北京环球信息应用开发中心,北京市海淀区北清路 22 号,100094)

**摘 要:**从区域卫星导航系统的实际情况出发,针对我国星座和地面站分布的特点,提出了区别于 GPS 的硬件延迟解算策略。首次利用实测数据分析论证了该解算策略,根据解算结果对卫星的 TGD 参数出厂标定值和接收机 IFB 参数进行修正。修正之前电离层 14 参模型解算内符合精度只有 50%,修正之后达到 70%。  
**关键词:**硬件延迟;电离层;约束条件;Klobuchar 模型  
**中图法分类号:**P228.42

系统区域地面监测网的有限地理分布对如何高精度地获取电离层模型具有很大的难度和挑战<sup>[1]</sup>。长期的研究表明,利用观测数据解算电离层总电子含量的最大误差源是卫星和接收机的硬件延迟<sup>[1]</sup>。此外,硬件延迟是影响到用户导航定位和授时定位精度的重要因素。从 1999 年 4 月开始,GPS 卫星开始播发由 JPL 近实时计算的 Tgd 参数,替代原有出厂标定的参数,显著提高了单频用户定位和授时精度<sup>[2-5]</sup>。其求解策略是在一定约束条件下同时获取硬件延迟和全球电离层模型参数<sup>[3]</sup>。对区域系统而言,在 3GEO+1IGSO 星座分布和 20 个测站的条件下,北纬 0°~55°、东经 70°~140°区域内电离层穿刺点较少而且分布不均,根据实测数据很难求解高精度的电离层模型。此外,GPS 求解硬件延迟的约束条件是所有卫星的 TGD 参数和为零。区域卫星导航系统正在建设中,在轨卫星数量逐渐增加。实测数据分析表明,如果采用和 GPS 一样的约束条件,卫星数发生变化时求解得到的同一卫星的 TGD 参数将有较大不同,这显然是不合理的。因此,必须针对区域导航系统的特点,研究新的解算策略。

## 1 硬件延迟解算策略

为了向用户提供电离层延迟修正服务,需要

同时对卫星和接收机的频率间偏差参数(cifferential code biases,DCB)进行解算。通常卫星的 DCB 又称为(total group delay,TGD),而接收机的 DCB 参数又称为(inter-frequency bias,IFB)。

各频点的伪距观测方程可表示为:

$$P_k = \rho + \delta t_r \cdot c - \delta t_s \cdot c + \frac{40.28}{f_k^2} \cdot \text{TEC} + d_{\text{trop}} + d_{\text{ant}} + d_{\text{rel}} + d_{\text{tides}} + (\tau_k^{\text{sat}} + \tau_k^{\text{rcv}}) \cdot c + M_k + \epsilon_k \quad (1)$$

系统发播的卫星 TGD 参数定义为:

$$\begin{aligned} \tan_1 &= \tau_1^{\text{sat}} - \tau_3^{\text{sat}} \\ \tan_2 &= \tau_2^{\text{sat}} - \tau_3^{\text{sat}} \end{aligned} \quad (2)$$

同理可得,接收机两个 IFB 参数定义为:

$$\begin{aligned} \text{IFB}_1 &= \tau_1^{\text{rcv}} - \tau_3^{\text{rcv}} \\ \text{IFB}_2 &= \tau_2^{\text{rcv}} - \tau_3^{\text{rcv}} \end{aligned} \quad (3)$$

根据伪距观测方程,可以得到  $B_1$ 、 $B_3$  之间的双频伪距差为:

$$P_3 - P_1 = \text{IONOdelay} - \tan d_1 \cdot c - \text{IFB}_1 \cdot c \quad (4)$$

可以得到硬件延迟组合观测量:

$$\text{Bias}_1 = \text{IONOdelay}_{13} - (P_3 - P_1)/c \quad (5)$$

式中, $\text{IONOdelay}_{13} = \frac{f_1^2 - f_3^2}{f_1^2 f_3^2} \cdot 40.28 \cdot \text{TEC}$   
因为  $B_2$ 、 $B_3$  频点频率比较接近,所以选择  $B_1 B_2$  双频伪距差来计算另一个组合观测量:

$$\text{Bias}_1 - \text{Bias}_2 = \frac{\text{IONOdelay}_{12} - (P_2 - P_1)}{c} \quad (6)$$

式中,  $\text{IONOdelay}_{12} = \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \cdot 40.28 \cdot \text{TEC}$ 。

因此,已知 3 个频点的伪距观测量以及电离层延迟,就可以求解出卫星和接收机的组合硬件延迟。固定某颗卫星的出厂标定值,可分离求解其余卫星和所有接收机的硬件延迟。

以  $B_1B_2$  频率间的组合硬件延迟为例,记  $j$  号接收机对  $i$  号星的组合观测量  $\text{Bias}_{1j}^i$ ,则有:

$$\text{Bias}_{1j}^i = \text{TGD}_{1i} + \text{IFB}_{1j}, i = 1, \cdots, m, j = 1, \cdots, N \quad (7)$$

对同一颗星,共有  $N$  个接收机可观测,则有:

$$\sum_{j=1}^N \text{Bias}_{1j}^i = N \cdot \text{tand}_{1i} + \sum_{j=1}^N \text{IFB}_{1j}, i = 1, \cdots, m$$

$$\text{tand}_{1i} = \frac{\sum_{j=1}^N \text{Bias}_{1j}^i - \sum_{j=1}^N \text{IFB}_{1j}}{N}, i = 1, \cdots, m \quad (8)$$

因为 GEO 卫星全弧段可视,选取所有测站接收机对 IGSO 卫星共同可视弧段内的夜间观测量参与解算,即所有接收机观测到的卫星都是一样的,因此有:

$$\text{tand}_{1^2} - \text{tand}_{1^1} = \frac{\sum_{j=1}^N \text{Bias}_{1j}^2 - \sum_{j=1}^N \text{Bias}_{1j}^1}{N}$$

$$\vdots$$

$$\text{tand}_{1^m} - \text{tand}_{1^1} = \frac{\sum_{j=1}^N \text{Bias}_{1j}^m - \sum_{j=1}^N \text{Bias}_{1j}^1}{N} \quad (9)$$

根据 1 号卫星出厂标定值  $\text{tand}_{1^1}$ ,就可求出其

他卫星 TGD 参数,进而求解接收机 IFB 参数:

$$\text{IFB}_{1j} = \frac{\sum_{i=1}^m \text{Bias}_{1j}^i - \sum_{i=1}^m \text{tand}_{1i}}{m} \quad (10)$$

固定不同的卫星出场标定值,求解得到每颗卫星 TGD 参数数值不同,相应的接收机 IFB 数值也不同,但卫星和接收机硬件延迟的组合相同,对于计算电离层观测量进而求解电离层模型没有影响。虽然固定不同卫星出场标定值求解得到的每颗卫星 TGD 参数数值不同,但不同星之间的偏差相同,对用户定位来说没有影响。

2 硬件延迟解算结果

根据上述解算策略,计算硬件延迟组合观测量需要扣除电离层延迟影响。以 IGS 提供的全球电离层图 GIM 为基准可以插值得到任意穿刺点的 VTEC。实测数据分析表明,分别采用区域导航系统全天观测数据和夜间观测数据扣除 GIM 插值得到的电离层延迟后求解硬件延迟结果相当,卫星 TGD 参数偏差约为 1~2 ns,URE 评估夜间计算结果精度略好。本文给出根据夜间观测数据解算的硬件延迟具体结果。

选取 2010-12-20 的 20 个有效入站共计 38 台接收机在北京时间 19:00~24:00 共 5 h 的实际观测数据,根据当天 IGS 发播的全球电离层图,扣除电离层延迟,固定 GEO 1 号星 TGD 参数为出厂标定值,分离解算卫星硬件延迟和接收机硬件参数,其结果分别如表 1、表 2 所示。考虑到伪距观测量噪声较大,以及伪距波动现象,采用相位平滑伪距数据计算组合观测量。

表 1 标定  $G_1$  星 TGD 参数解算卫星 TGD 参数/ns

Tab. 1 TGD Parameters of Satellites by Fixing  $G_1$  TGD Parameter

参数	SAT <sub>1</sub>		SAT <sub>3</sub>		SAT <sub>6</sub>		SAT <sub>4</sub>	
	出厂值	标定值	出厂值	解算值	出厂值	解算值	出厂值	解算值
TGD <sub>1</sub>	14.19	14.19	1.72	4.55	-47.76	12.83	5.81	6.18
TGD <sub>2</sub>	-10.40	-10.40	-13.38	-13.18	-30.48	-2.28	-10.75	-13.58

从表 1 可以看出,解算结果与出厂标定值相比,SAT<sub>6</sub>(IGSO)卫星 TGD<sub>1</sub> 参数偏差超过 60 ns,TGD<sub>2</sub> 参数偏差超过 28 ns;各站接收机 IFB 解算结果从数 ns 到数 10 ns 不等。因为没有真实结果作为参考,很难定量分析解算精度,考虑从双频伪距差扣除解算得到的组合硬件延迟获取电离层周日变化来评估解算精度。

在所有入站接收机 IFB 保持不变的情况下,图 1 是根据 TGD 出厂标定值得到的 SAT<sub>6</sub> 电离

层观测量,图中横轴为以 h 为单位的系统时间,纵轴为根据双频伪距观测量得到的天顶方向总电子含量 VTEC(以 TECU 为单位),从图 1 中可以看出数据很少。因 SAT<sub>6</sub> 为 IGSO 卫星,随着卫星位置的不同,各测站对应的穿刺点位置也随之变化,在 1 d 的观测弧度内应有较多的电离层观测量,图 1 显然不符合电离层真实情况。图 2 是根据解算结果设置 TGD 参数得到的 6 号星电离层观测量,数据明显增多,VTEC 数值介

表 2 标定  $G_1$  星 TGD 参数解算接收机 IFB 参数/ns

Tab. 2 IFB Parameters of Receivers by Fixing  $G_1$

TGD Parameter					
接收机号	IFB <sub>1</sub>	IFB <sub>2</sub>	接收机号	IFB <sub>1</sub>	IFB <sub>2</sub>
01	-17.24	0.92	20	-7.65	2.55
02	-7.61	5.69	21	-9.95	7.53
03	3.41	-2.56	22	-6.02	4.82
04	-16.44	4.18	23	-16.17	-0.51
05	-15.64	3.41	24	-7.97	0.46
06	-18.10	0.27	25	1.95	1.14
07	-18.71	0.57	26	-13.21	-12.77
08	-47.51	5.27	27	-4.63	-0.56
09	-13.86	3.28	28	4.65	0.81
10	-23.98	2.32	29	-9.28	-1.25
11	-18.31	3.68	30	-11.99	2.17
12	1.26	-6.16	31	-10.95	4.03
13	2.54	-6.62	32	-20.05	5.29
14	-13.75	2.04	33	-4.22	0.03
15	-15.65	-0.04	34	-7.13	-2.04
16	-15.67	2.26	35	-8.65	6.29
17	-10.38	-1.47	36	-7.97	6.67
18	-11.43	-4.23	37	-8.18	11.29
19	-5.44	2.98	38	-10.73	3.29

于 0~70 TECU 之间,符合电离层真实情况。

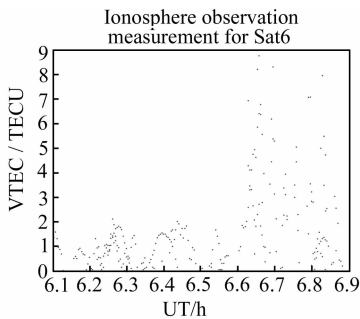


图 1 TGD 采用出厂标定值的 IGSO1 电离层观测量  
Fig.1 Ionosphere Observations of IGSO1 Satellite by  
Using the TGD's Factory Calibration Value

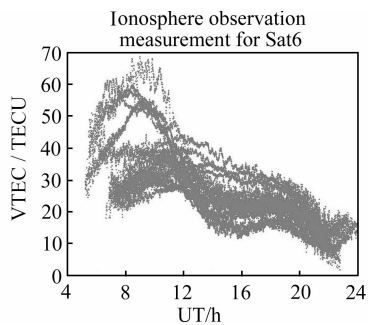


图 2 TGD 采用解算值的 IGSO1 电离层观测量  
Fig.2 Ionosphere Observations of IGSO1 Satellite by  
Using the TGD's Solution Value

因为电离层 VTEC 是物理量,组合硬件延迟扣除准确时, $B_1B_2$  和  $B_1B_3$  双频组合得到的电离层周日变化是一致的。图 3~图 5 分别给出了 2010-12-20 全天 3 个站 3 颗星

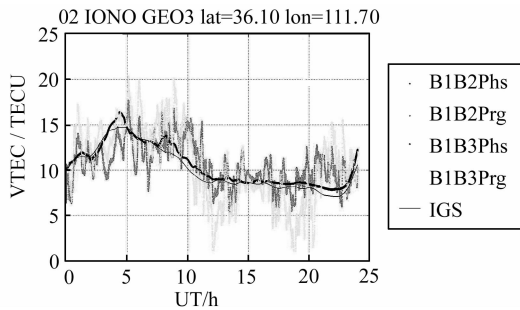


图 3 2010-12-20 北京接收机 GEO 星电离层周日变化  
Fig.3 Ionosphere Change of GEO Satellite from the  
Receiver in Beijing on December 20, 2010

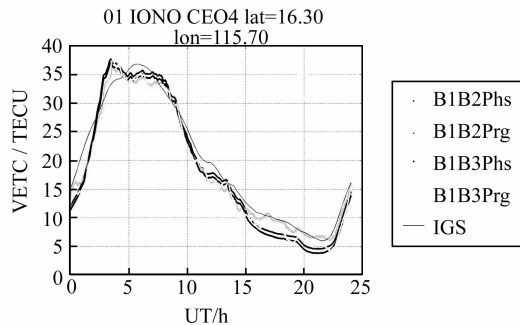


图 4 2010-12-20 海南接收机 GEO 星电离层周日变化  
Fig.4 Ionosphere Change of GEO Satellite from the  
Receiver in Hainan on December 20, 2010

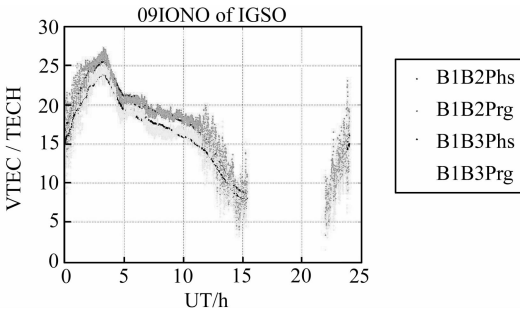


图 5 2010-12-20 黑龙江接收机 IGSO 星电离层周日变化  
Fig.5 Ionosphere Change of IGSO Satellite from the  
Receiver in Heilongjiang on December 20, 2010

果,全天的双频伪距(相位差)差扣除采用相位平滑伪距观测量计算出的 TGD 和 IFB 参数。横轴代表 h 为单位的系统时间,纵轴代表 TECU 为单位的的天顶方向总电子含量。图中结果显示,不同频率组合得到的电离层周日变化吻合较好(伪距观测量中的起伏是伪距波动的影响),这说明硬件延迟解算结果基本可靠。

区域卫星导航系统根据实测数据 2 h 解算一组基于地理坐标系下的电离层模型 14 参数和 8 参数发播给用户使用,详细情况可参考文献[7]。

根据解算结果对卫星的 TGD 参数出厂标定值和接收机 IFB 参数进行修正,修正之前由于 IGSO 卫星 TGD 参数错误(偏低约 60 ns),导致

电离层模型解算的有效观测量较少,而且引入无法剔除的错误观测量,计算得到的电离层 14 参模型解算内符合精度只有 50%。修正之后,有效电离层观测量明显增多,电离层 14 参模型解算内符合精度达到 70%。根据简化的伪距和相位观测方程,可以得到  $B_1B_2$  频点和  $B_1B_3$  频点的相位平滑伪距后的无电离层组合为:

$$\overline{PC_{12}} = \rho + \Delta t \cdot c + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (\tau_1^{\text{sat}} + \tau_1^{\text{rcv}}) - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (\tau_2^{\text{sat}} + \tau_2^{\text{rcv}}) \quad (11)$$

$$\overline{PC_{13}} = \rho + \Delta t \cdot c + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_3^2} (\tau_1^{\text{sat}} + \tau_1^{\text{rcv}}) - \frac{f_3^2}{f_1^2 - f_3^2} (\tau_3^{\text{sat}} + \tau_3^{\text{rcv}}) \quad (12)$$

双频相位平滑伪距无电离层组合虽然可以准确消除电离层延迟影响,但除了伪距观测量中通道时延的组合值外,还包含了星地距离、钟差和其他误差项,通过三频相位平滑伪距无电离层组合只能得到三频的卫星硬件延迟组合偏差,难以分离求解。因为无法获知卫星和接收机 DCB 参数的真实值,如何定量评估解算精度是需要进一步研究的问题。

参 考 文 献

[1] 戴伟,焦文海,贾小林. Compass 导航卫星频间偏差参数使用方法[J]. 测绘科学技术学报,2009,26(5):367-369

[2] 李强,冯曼,张东和,等. 基于单站 GPS 数据的 GPS 系统硬件延迟估算方法及结果比较[J]. 北京大学学报(自然科学版),2008,44(1):149-155

[3] 耿长江,章红平,翟传润,等. 应用 Kalman 滤波实时求解硬件延迟[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2009,34(11):1 309-1 322

[4] Demetrios M. The Timing Group Delay (TGD) Correction and GPS Timing Biases[C]. The 63rd Annual Meeting of the Institute of Navigation, Chicago, 2007

[5] 章红平. 基于地基 GPS 的中国区域电离层监测与延迟改正研究[D]. 上海:中国科学院上海天文台,2006

[6] Hernandez M J M. The IGS VTEC Maps: a Reliable Source of Ionospheric Information Since 1998[J]. Geod, 2009, 83: 263-275

[7] 吴晓莉,戴春丽,刘利,等. 地理与地磁坐标系下的 K 氏电离层延迟模型分析比较[C]. CSNC2010,北京,2010

[8] 陈鹏,姚宜斌,吴寒. 利用时间序列分析预报电离层 TEC[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2011,36(1):267-270

[9] 刘经南,赵莹,张小红. GNSS 无线电掩星电离层反演技术现状与展望[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2010,35(6):632-635

第一作者简介:吴晓莉,工程师,博士,研究方向为电离层建模与卫星精密定轨。  
E-mail:jasminework@163.com

Hardware Delay Solution of Regional Satellite Navigation System

WU Xiaoli<sup>1,2</sup> PING Jinsong<sup>1</sup> LIU Li<sup>2</sup> XING Nan<sup>1</sup>

(1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 80 Nandan Road, Shanghai 200302, China)

(2 Beijing Global Information Center of Application and Exploration, 22 Beiqing Road, Haidian District, Beijing 100094, China)

**Abstract:** There is a new challenge for getting parameters of ionosphere model with high accuracy under the limited distribution of regional monitoring network. The VTEC of puncture points can be obtained by re-process the data after fixing the hardware delay, then the regional ionosphere model would be estimated. This strategy differs significantly from GPS global ionosphere solution strategy. In this paper the strategy of getting parameters of ionosphere model under the limited distribution of regional monitoring network is discussed in detail, the possible accuracy of this method is analyzed, and the improvement is proposed.

**Key words:** hardware delay; ionosphere; constraints; Klobuchar model