

文章编号:1671-8860(2008)08-0805-05

文献标志码:A

# 地基 GPS 区域电离层多项式模型与硬件延迟统一解算分析

章红平<sup>1,2</sup> 施 阖<sup>2</sup> 唐卫明<sup>2</sup>

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路129号,430079)

(2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路129号,430079)

**摘要:**探讨了利用区域地基 GPS 双频精码数据建立单层电离层多项式模型中,多项式系数、组合硬件延迟统一平差的数据处理方法。数据分析表明, GPS 卫星短弧段的天空视图对电离层多项式建模的影响较大,由此估计的组合硬件延迟解不稳定,电离层模型也存在系统误差,边际效应明显;分段常数的全天电离层延迟多项式建模的数据处理方法可以有效地削弱短时弧段建模的影响,获取一致性、稳定性更好的组合硬件延迟。

**关键词:**GPS; VTEC; 电离层; 多项式模型; 硬件延迟

中图法分类号:P228.41

目前,基于电离层单层假设的二维电离层模型的研究已经趋于成熟,国外最具代表的是美国喷气动力实验室(JPL)、欧洲定轨中心(CODE)、加拿大能源、矿山与资源中心(EMR)、欧洲空间局(ESA)及西班牙卡塔卢尼亚理工大学(UPC)等机构分别完成的全球电离层地图 GIM (global ionospheric map) 算法,并事后提供给国际 GPS 服务组织(IGS) 全球 GPS 观测站数据的 GIM 产品。基于上述工作,他们还建立了全球电离层 TEC 准实时现报系统,并在因特网上发布全球电离层 TEC 地图<sup>[1-3]</sup>。此外,美国、澳大利亚、日本、欧洲等国家和地区也都建立了实时性更好、精度更高的区域性 TEC 现报系统。在国内,许多学者都进行了 GPS 电离层二维模型的研究<sup>[4-7]</sup>。尽管如此,基于 GPS 的二维单层区域电离层延迟建模的工程化实践中仍面临着模型参数估计的畸变、可靠性等实际问题。电离层单层多项式展开模型是一个广泛用于模拟区域电离层总电子含量时空变化的模型,在 Bernese 软件中也有相应的模块,刘经南等于 1999 年进行的中国区域分布式广域差分试验中也采用了该模型<sup>[8]</sup>。本文采用上海市内几个稠密 GPS 跟踪站的数据,探讨分析了工程化实践中利用 GPS 双频数据建立该模型的一些问题,特别是参数解算与卫星的空间几何分布、硬

件延迟的关系。

## 1 利用 GPS 数据构建 VTEC 多项式模型

单层电离层多项式展开模型是将 VTEC 看作是纬度差  $\varphi - \varphi_0$  和太阳时角差  $S - S_0$  的函数。其具体表达式为:

$$VTEC = \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^m E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (S - S_0)^k \quad (1)$$

式中,  $\varphi_0$  为测区中心点的地理纬度;  $S_0$  为测区中心点  $(\varphi_0, \lambda_0)$  在该时段中央时刻  $t_0$  时的太阳时角;  $S - S_0 = (\lambda - \lambda_0) + (t - t_0)$ ,  $\lambda$  为信号路径与单层的交点  $P'$  的地理经度;  $t$  为观测时刻。

对于双频 GPS 观测数据,测站至卫星路径上的总电子含量的观测方程如下:

$$TEC = 9.52437 \cdot (P_2^i - P_1^i + q_2^i - q_1^i) \quad (2)$$

令  $B = q_2^i - q_1^i$ , 即是通常所说的硬件延迟,又称为频率间的偏差,将  $VTEC = TEC \cdot \cos Z$  (Z 为测站到 GPS 卫星视线方向在穿刺点处的天顶距) 和式 (1) 代入式 (2) 后, 可得到利用伪距观测值之差  $P_2^i - P_1^i$  来确定 VTEC 电离层延迟模型的观测方程的最终形式:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^m E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (S - S_0)^k - \\ 9.52437 \cdot \cos Z' \cdot B = \\ 9.52437 \cdot (P_2^i - P_1^i) \cdot \cos Z \quad (3)$$

对于  $m \times n = 3 \times 4$  阶次的 12 参数单层单站电离层延迟模型,如果观测时段内某测站跟踪了  $n$  颗卫星,则利用该站的 GPS 数据建立电离层模型时,上述观测方程中待估参数的个数为  $12+n$ ,而单测站在 4 h 观测时段内的采样个数一般大于 1 000 个,采用最小二乘方法,可同时解算该时段内的电离层模型参数和接收机、卫星的组合硬件延迟。

## 2 VTEC 多项式模型 GPS 数据建模分析

本文采用了 2005 年 9 月 18 日上海市内几个 GPS 跟踪站 (SHPD、SHBS、SHFX、SHSS、SHDD、SHCM、SHBH、SHWG, 如图 1 所示) 北京时间 10:00 至 14:00 观测时段内的双频观测数据, 分别建立上海区域上空的电离层单层多项式展开模型, 其中, 空间展开点  $(\varphi_0, \lambda_0)$  相同。计算方案如下: ① 用 SHPD 站该时段的数据同时解算单站电离层模型和接收机、卫星的组合硬件延迟; ② 分别用 SHBS、SHCH、SHFX、SHDD、SHCM、SHBH、SHWG 在该时段的数据解算单站电离层模型和各接收机及其对应观测卫星的组合硬件延迟; ③ 用方案②计算的 7 个电离层模型计算该时段内 SHPD 站观测的 PRN25 号卫星路径上的总电子含量; ④ 从 SHPD 观测得到的 PRN25 路径上含有硬件延迟的总电子含量, 扣除方案①计算的 SHPD-PRN25 组合硬件延迟, 并将该结果与方案③的结果求差。

在计算过程中, 为了控制质量较差的观测数据对参数解算结果的影响, 剔除了那些残差大于 0.25 m 的数据。计算结果表明, 各次求解后的 RMS 都在 0.8 TECU 以下。图 2 给出了 7 个模型计算校正 SHPD 站 PRN25 观测结果的差异曲线。图中, 除 SHFX 站计算校正 SHPD-PRN25 的结果在高度角低于 20° 时有异常外, 各曲线的形状基本相似, 且曲线之间存在着明显的间距。而且, 高度角较低时, 这种间距较大; 高度角较大时, 间距较小。这表明利用各测站的数据分别建立和综合建立的多项式电离层模型之间存在着系统差, 随着高度角的减小, 这种系统性的差异最大会达到 10 TECU 以上。

$$\sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^m E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (S - S_0)^k - \\ 9.52437 \cdot \cos Z' \cdot B = \\ 9.52437 \cdot (P_2^i - P_1^i) \cdot \cos Z \quad (3)$$

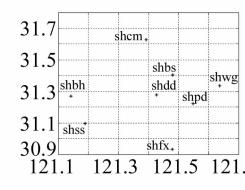


图 1 上海区域  
内部分测站  
分布图  
Fig. 1 Distribution  
of Part GPS  
Stations in  
Shanghai Area

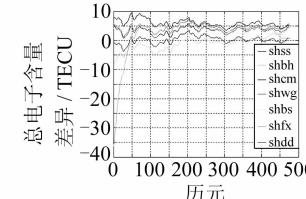


图 2 7 个模型计算校正  
SHPD 站 PRN25 观测  
结果的差异曲线  
Fig. 2 Difference Curves  
Calculated by Seven VTEC  
Models for Correcting  
SHPD PRN25

另外, 在图 2 中, 离 SHPD 较远的 SHSS、SHBH、SHCM 站建立的电离层模型校正 SHPD-PRN25 的效果曲线在外围, 三条曲线之间的互差一般在 6.0 TECU 以上; 而距离 SHPD 较近的 SHBS、SHDD、SHWG、SHFX 站建立的电离层模型校正 SHPD-PRN25 的效果曲线在中间, 且这四条曲线之间的互差一般在 2.0 TECU 以内。这表明测站间的距离越短, 建立的电离层模型相互校正的效果越好。因此, 测站间距离的差异会影响单站电离层单层多项式展开模型的求解。而测站间距离的差异反映在穿刺点的天空视图上, 则对应了观测时段内用于求解模型参数的穿刺点几何分布图形的差异, 故卫星天空视图的变化对单站模型参数解算产生了影响。

为了说明这一问题, 依据观测方程(3), 利用上述 8 个测站的数据建立上海区域上空的电离层多项式模型, 同时解算出这些站到各观测卫星的组合硬件延迟。另外, 利用单站数据建立模型时, 也可计算出各测站到各观测卫星的组合硬件延迟。表 1 给出了利用 8 测站数据建立多站模型计算得到的 4 个测站到各观测卫星的组合硬件延迟, 同时给出了分别利用这些站的数据单独建立电离层模型时得到的组合硬件延迟。其中, 单站数据建立电离层多项式展开模型和 8 测站建立多站模型时, 模型展开点相同, 在 SHDD 附近(如图 1 所示)。表 1 中的数据说明, 利用单站数据和多站数据解算的组合硬件延迟是不相同的。而且, 与多项式模型展开点相近的 SHDD、SHBS 站, 其组合硬件延迟的两种结果相差不大, 一般在 1.0 TECU 以内, 而与多项式模型展开点较远的 SHBH、SHSS 站, 其组合硬件延迟的两种结果相差较大, 一般在 2.5 TECU 以上。

笔者认为, 出现这种现象的原因有:

表 1 测站卫星组合硬件延迟的单站模型解和多站模型解/TECU

Tab. 1 Solution to Combined Hardware Delay by Single- and Multi-stations' Short-term VTEC Model

测站名	卫星号	多站解	单站解	差异	测站名	卫星号	多站解	单站解	差异
SHDD	PRN14	-19.32	-19.24	-0.07	SHSS	PRN22	5.55	2.36	3.19
SHDD	PRN25	-23.43	-23.50	0.07	SHSS	PRN25	-18.25	-21.54	3.29
SHDD	PRN1	-30.58	-30.75	0.17	SHSS	PRN14	-13.68	-16.21	2.54
SHDD	PRN 5	-28.51	-28.89	0.38	SHSS	PRN1	-25.46	-27.88	2.42
SHDD	PRN30	-21.07	-21.08	0.01	SHSS	PRN30	-15.60	-18.02	2.41
SHDD	PRN22	-0.99	-0.09	-0.90	SHSS	PRN5	-23.70	-25.21	1.51
SHDD	PRN6	-32.47	-32.22	-0.25	SHSS	PRN6	-26.84	-31.81	4.97
SHDD	PRN16	-22.01	-21.74	-0.27	SHSS	PRN16	-16.10	-19.79	3.69
SHBS	PRN14	-20.12	-20.47	0.36	SHBH	PRN14	-33.83	-37.15	3.32
SHBS	PRN5	-28.35	-29.04	0.69	SHBH	PRN25	-38.40	-42.96	4.56
SHBS	PRN25	-24.71	-25.03	0.31	SHBH	PRN22	-15.08	-17.93	2.85
SHBS	PRN30	-21.87	-22.43	0.55	SHBH	PRN1	-44.50	-48.83	4.33
SHBS	PRN1	-31.39	-31.60	0.21	SHBH	PRN5	-40.98	-46.93	5.95
SHBS	PRN22	-1.91	-2.67	0.76	SHBH	PRN30	-34.53	-38.87	4.34
SHBS	PRN6	-32.93	-33.69	0.75	SHBH	PRN6	-45.98	-49.87	3.89
SHBS	PRN16	-22.66	-23.18	0.52	SHBH	PRN16	-39.24	-41.71	2.47

1) 多站数据求解时,穿刺点的空间分布较开阔;在多项式展开点附近的测站,它观测的穿刺点的分布在中心。另外,这 8 个测站之间的距离较短,最长的基线也仅为 52 km,因此,多站观测的穿刺点分布基本上与展开点附近的测站单站观测的穿刺点分布相同,只是穿刺点向四周延伸了一点,且中间区域加密了一些。

2) 电离层多项式展开模型在空间分布特性上具有发散效应,距离展开点近的范围内,结果较准确;距离展开点远的区域,电离层延迟模拟不准确,甚至出现负值。图 2 中,SHFX 站校正的结果在低高度角时就出现了这一现象,这与多项式展开模型采用的地理经度  $\lambda$  和地理纬度  $\varphi$  为变量,且当成尺度均匀的变量有关。事实上,由于  $\varphi, \lambda$  描述球形特征时,在高纬度地区,相同的  $\varphi$  对应的纬圈弧长较短,而低纬度地区则较长,故采用同尺度的  $\varphi$  描述它们时,会在建模的坐标参考框架上引入变形,由此会引起多项式展开模型的畸变。

第一个原因的存在使得处于展开点附近的 SHBS、SHDD 两个测站的单站组合硬件延迟的参数解与多站解相差很小。第二个原因引起了多站模型参数与以 SHSS 或 SHBH 测站为中心的穿刺点覆盖区域内解算的单站模型的不一致,而且此时单站观测的穿刺点分布位于多站穿刺点空间分布的一侧,穿刺点几何构型的差异也引起了参数解算的差异,因而两种方式解算的组合硬件延迟有较大的差异。

### 3 分段常数模型计算分析

前面的分析表明,在 GPS 数据处理并建立电

离层多项式模型中,由于卫星天空视图和多项式模型变量设置的自身缺陷的影响,时段内的电离层模型参数和硬件延迟的估计存在着系统偏差。这种偏差的存在必然导致从 GPS 电离层延迟观测量中分离总电子含量 TEC 的不准确。另外,大量的研究表明,电离层观测量中的卫星和接收机的电路硬件延迟具有稳定性,在一段时间内基本保持不变<sup>[1,2,9,10]</sup>。这里依据电离层的周日变化特性,采用分段常数的方法来进行相关的分析。

如图 3 所示,对于某地理经纬度上空的电离层 TEC 的周日变化曲线,可以将其分成 6 个时段,分别对每个时段内的电离层 TEC 进行拟合。然而对于区域而言,电离层 TEC 在时空上是三维变化的(平面二维+时间)。此时,在太阳方向固定的地理坐标系中,采用前面描述的区域电离层多项式展开模型,可以描述某时段内(如 4 h)电离层的三维时空变化。

对于区域电离层 TEC 的三维周日变化,可以将一天 24 h 按每 4 h 为一时段分成 6 个时段,每个时段内,采用区域电离层多项式展开模型进行拟合。此时,某测站全天观测数据的单站建模并解算硬件延迟的处理,其参数设置由两部分组成:① 6 个时段的电离层多项式模型系数;② 卫星和接收机的组合硬件延迟。如果各时段内的电离层多项式模型均按  $3 \times 4$  阶 12 参数展开建模,且全天观测了 29 颗 GPS 卫星,则待估参数的个数为  $6 \times 3 \times 4 + 29 = 101$ 。对于多站数据电离层多项式建模并解算硬件延迟的情况,其参数个数则对应地多加入了各测站和卫星的组合硬件延迟。此时,对于每一测站对某卫星的电离层观测量,依据

观测方程(3),采用上述分段线性方法解算时,按照法方程叠加的方法,法方程的形成过程如图4所示。图4中,数组前半部分为电离层系数,后半部分为卫星与测站的组合硬件延迟。为了减少稀疏矩阵中诸多0元素相乘耗费的计算机资源和计算时间,在程序编写过程中,只考虑了法方程非零元素的乘法,并采用法方程叠加的方式,按观测量逐步读写调入、逐步形成法方程的方式,形成最终的法方程。

依据上述方法,本文开发了利用GPS全天的观测数据进行电离层后处理建模和硬件延迟估算

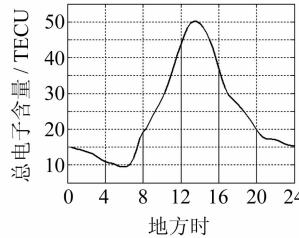


图3 电离层 TEC  
周日变化分段图

Fig. 3 Piece-Wise Strategy  
for Ionospheric TEC  
Variations

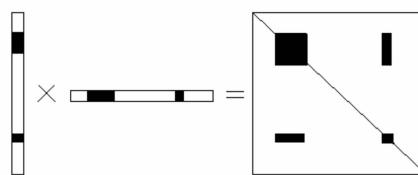


图4 法方程形成过程  
Fig. 4 Process for Forming  
Normal Equation

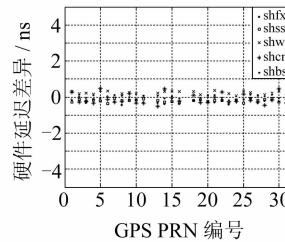


图5 全天模型单站、多站数据分别  
解算的组合硬件延迟差异  
Fig. 5 Combined Hardware Delay  
Difference Calculated by Single- and  
Multi-GPS Stations' Daily Solution

## 4 结语

本文提出的电离层建模方法可以用于构建区域GPS电离层延迟建模的数据处理系统。在具体工程化实践中,还可继续探讨本文方法的数据处理效率、速度问题,以期获得更快、更好的电离层延迟建模。

致谢:感谢上海天文台为本文研究提供的上海区域GPS数据。

## 参 考 文 献

- [1] Sardon E, 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] Schaer S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System [D]. Bern: The University of Bern, 1999
- [3] Mannucci A J, Wilson B D, Yuan D N, et al. A Global Mapping Technique for GPS-derived Ionospheric Total Electron Content Measurements[J].

的程序。利用该程序对2005年9月18日上海市内的几个GPS跟踪站(与前同)进行了计算。图5给出了单站、多站两种计算模式估计的卫星、接收机的组合硬件延迟。图中的数据表明,利用全天模型,单站、多站两种计算模式得到的组合硬件延迟的差异很小,一般在0.4 ns以下,且与测站到展开点的距离无关。这表明两种计算方式的结果是一致的,与前面的结论刚好相反,说明一天24 h的数据、卫星的全弧段观测、分段线性处理的方法可以削弱卫星天空视图对参数估计的影响。

Radio Science, 1998, 33(3): 565-582

- [4] 袁运斌. 基于GPS的电离层监测及延迟改正理论与方法的研究[D]. 武汉:中国科学院测量与地球物理研究所, 2002
- [5] 万卫星, 宁百齐, 刘立波, 等. 中国电离层TEC现报系统[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1 040-1 045
- [6] 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]. 北京:中国科学院, 2006
- [7] 王一举, 袁洪, 万卫星, 等. 低纬地区电离层时延网格算法偏差的研究[J]. 全球定位系统, 2001, 26(2): 5-9
- [8] 刘经南, 陈俊勇, 张燕平, 等. 广域差分GPS原理和方法[M]. 北京:测绘出版社, 1999
- [9] 常青, 张东和, 肖佐, 等. GPS系统硬件延迟修正方法[J]. 科学通报, 2000, 45(15): 1 676-1 680
- [10] 袁运斌, 欧吉坤. GPS观测数据中的仪器偏差对确定电离层延迟的影响及处理方法[J]. 测绘学报, 1999, 28(2): 110-114

第一作者简介:章红平,博士,副教授。现主要从事GPS/电离层、GPS工程测量/大地测量、GNSS接收机导航定位算法等方面的研究。

E-mail: hpzhang\_zhp@hotmail.com

# United Solution to Polynomial VTEC Modeling and DCB Analysis Using Ground-based GPS Observations

ZHANG Hongping<sup>1,2</sup> SHI Chuang<sup>2</sup> TANG Weiming<sup>2</sup>

(1 State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,  
Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Based on the estimation of polynomial coefficients, the inter-frequency bias of GPS satellites and receivers' PCB between P-codes of GPS pseudoranges are combined, and the ground-based GPS observations are used to construct regional VTEC model. Data analysis indicates that, while short-term (i. e. 4 hours') GPS observations are used, the result of inter-frequency bias is not stable, and polynomial VTEC model has systematical error and shows large errors in the edge of the covered region. However, if the piecewise constant modeling is used to estimate several sets (i. e. 6 groups) of VTEC polynomial coefficients and one group of the combined inter-frequency bias while using 24-hour's GPS dual frequencies' observations, the result of differential P-code bias is consistent and stable, and the new polynomial VTEC model is more accurate.

**Key words:** GPS; VTEC; ionosphere; polynomial model; DCB

**About the first author:** ZHANG Hongping, Ph. D, associate professor, majors in GPS/ionosphere, GPS engineering surveying and geodetic surveying, GNSS receivers' navigation algorithm.

E-mail: hpzhang\_zhp@hotmail.com

(上接第 799 页)

## Preliminary Tomography Spatial Wet Refractivity Distribution Based on Kalman Filter

ZHANG Shuangcheng<sup>1</sup> YE Shirong<sup>1</sup> WAN Rong<sup>2</sup> CHEN Bo<sup>2</sup>

(1 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Wuhan Institute of Heavy Rain, 3 East Donghu Road, Hongshan District, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Tomography voxel model based SPD is introduced. Tomography based on Kalman filter is presented, and the method is used to retrieve the 3D wet refractivity from Hong Kong field experiment. The preliminary results show that this method can effectively retrieve water vapor and is more easily implemented than the constrained tomography.

**Key words:** ground-based GNSS meteorology; tomography voxel model; Kalman filter; wet refractivity

**About the first author:** ZHANG Shuangcheng, Ph. D candidate, majors in precise GNSS data processing and real-time GNSS atmospheric model.

E-mail: shuangcheng1979@163.com