0254-6124/2011/31(5)-602–05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Wang Hu, Wang Jiexian, Bai Guixia, Zhu Weidong. Real-time monitoring of ionosphere changes in the Shanghai region by GPS technology. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(5): 602-606

利用 GPS 技术实时监测上海区域电离层变化*

王 虎[1] 王解先[1,2] 白贵霞[2,3] 朱卫东[1]

1(同济大学测量与国土信息工程系 上海 200092)

2(现代工程测量国家测绘局重点实验室 上海 200092)

3(陕西测绘局 西安 710054)

摘 要 基于 GPS 技术实时监测电离层变化原理, 利用载波平滑伪距观测值建立区域电离层模型的方法, 计算了电离层延迟量和硬件延迟, 根据硬件延迟值相对稳定的特点, 采取一定时段求解出硬件延迟量, 对实时硬件延迟量进行预报, 进而实时分离 GPS 信号传播路径上的垂直总电子含量 VTEC. 利用上海区域内的 GPS 网的观测数据, 建立实时上海区域电离层延迟模型, 监测上海区域的电离层变化. 数据分析结果表明, 这种方法的内符合精度优于 3 TECU.

关键词 GPS, 载波平滑伪距, 电离层模型, 硬件延迟

中图法分类号 P 353

Real-time Monitoring of Ionosphere Changes in the Shanghai Region by GPS Technology

WANG Hu[1] WANG Jiexian[1,2] BAI Guixia[2,3] ZHU Weidong[1]

1(*Department of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai* 200092)

2(*Key Laboratory of Modern Engineering Surveying, State Bureau of Surveying and Mapping, Shanghai* 200092)

3(*Shanxi Bureau of Surveying, Xi'an* 710054)

Abstract A method of real-time monitoring ionosphere based on GPS technology is described in this paper. The regional ionosphere model is constructed using GPS phase-smoothed pseudo-range measurements. The ionosphere delay and instrumental bias are also calculated. Because the instrumental bias is stable, its value can be obtained after a period of time. Using this value, real-time instrumental bias can be forecasted. After deducted the instrumental bias from GPS signal, the real-time ionosphere information can be extracted in path of signal propagation. To validate this method, the data of Shanghai regional GPS network are used and a real-time regional ionosphere model is created. The results show the internal precision of this regional ionosphere model are better than 3 TECU.

Key words Global Position System (GPS), Phase-smoothed pseudo-range, Ionosphere model, Instrumental biases

---

* 国家自然科学基金项目资助 (40974018)

2010-04-13 收到原稿, 2011-03-17 收到修定稿

E-mail: wanghutongji@126.com

1 引言

对于电离层的监测有助于加深认识电离层活动规律及其变化机制. 近年来, 以 GPS 为代表的全球导航卫星系统 (GNSS) 观测技术不断发展, 全球分布的 GPS 跟踪站连续观测的数据, 使得利用 GPS 观测数据实时精确提取和测定电离层电子总含量 (TEC), 进而实时监测电离层 TEC 变化活动成为可能. 上海 GPS 综合应用 CROS 网的建立, 可以很好地利用 GPS 技术对上海区域电离层变化进行实时监测. 在 GPS 观测中, 伪距的观测精度低, 载波相位尽管有很高的观测精度, 但是整周模糊度又难以准确处理. 本文通过利用载波相位平滑伪距来提高伪距观测值, 平滑的方法采用 Hatch 滤波. 利用上海 GPS 区域网的数据, 通过曲面拟合模型的方法, 计算得到电离层延迟量和硬件延迟. 根据硬件延迟值相对稳定的特点, 采取一定时段求解出来的硬件延迟量, 对实时的硬件延迟量进行预报, 进而实时分离 GPS 信号传播路径上的垂直总电子含量 VTEC, 对上海区域的电离层变化进行实时监测. 对进一步研究上海区域电离层的变化规律和特性具有一定的科学意义和应用价值.

2 利用 GPS 双频观测值监测区域电离层延迟的方法

利用双频伪距观测值计算 TEC 值 [1−3]:

$$\mathrm{TEC}-9.52437B=9.52437(P_2-P_1). \tag{1}$$

其中, B 为 GPS 系统的硬件延迟 (卫星与接收机两个频率的硬件延迟的差分别称为卫星硬件延迟和接收机硬件延迟, 它们的和称为 GPS 系统硬件延迟), P_1 和 P_2 为 GPS 伪距观测值.

利用双频载波相位观测值计算 TEC 值:

$$\begin{aligned}\mathrm{TEC}-9.52437B=&9.52437(\lambda_1\varphi_1-\lambda_2\varphi_2)+\\&9.52437(\lambda_1N_1-\lambda_2N_2).\end{aligned} \tag{2}$$

同样, B 为 GPS 系统的硬件延迟; λ_1 和 λ_2 分别表示 L_1 和 L_2 载波的波长, N_1 和 N_2 分别代表 L_1 和 L_2 相位的模糊度.

在通过上述两种方法计算电离层延迟时, 都可以得到电离层延迟量. 利用双频伪距观测值计算简单, 由于观测精度较低, 计算 TEC 精度约为 5 TECU 左右; 利用双频载波相位观测值计算精度高, 但存在周跳和载波相位模糊度的问题, 处理难度较大. 因此本文采用载波相位平滑伪距的方法计算实时电离层延迟量. 假定第 i 个历元 ΔP (即为 P_1-P_2) 的平滑值表达式为

$$\begin{aligned}\Delta\bar{P}_i=&W_i\Delta P_i+\\&(1-W_i)[\Delta\bar{P}_{i-1}+(\Delta\Phi_i-\Delta\Phi_{i-1})].\end{aligned} \tag{3}$$

其中, 当 $i=1$ 时, $W_1=1.0$, $\Delta\bar{P}_1=\Delta P_1$. 式中, $\Delta\Phi_i$ 为第 i 个历元调制在 L_1 和 L_2 载波上的相位距离之差 $(\lambda_1\varphi_1-\lambda_2\varphi_2)$, 前提为两个历元间都没有周跳产生; W_i 为相位平滑权重因子.

在文献 [4–5] 滤波公式的基础上, 根据卫星高度角 α_i 确定当前观测值的权 $q_i=\sin\alpha_i$, $i=1,2,3,\cdots$, 则

$$W_i=q_i\Big/\sum_{k=1}^{i}q_k. \tag{4}$$

相位平滑伪距的公式为

$$\begin{aligned}\Delta\bar{P}_i=&\Big(q_i\Big/\sum_{k=1}^{i}q_k\Big)\Delta P_i+\Big(1-q_i\Big/\sum_{k=1}^{i}q_k\Big)\\&[\Delta\bar{P}_{i-1}+(\Delta\Phi_i-\Delta\Phi_{i-1})].\end{aligned} \tag{5}$$

基于以上得到的平滑伪距观测值, 采用曲面拟合 VTEC 模型, 其公式如下 [2]:

$$\begin{aligned}\mathrm{VTEC}=&\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}E_{ij}(\varphi-\varphi_0)^i(S-S_0)^j-\\&9.52437B\cos Z'=\\&9.52437\Delta\bar{P}\cos Z'.\end{aligned} \tag{6}$$

式中, φ_0 为测区中心点的地理纬度; 太阳时角差 $(S-S_0)=(\lambda-\lambda_0)+(t-t_0)$, φ 和 λ 分别为穿刺点的地理纬度和经度; S_0 为测区中心点 (φ_0,λ_0) 在该时段中央时刻 t_0 时的太阳时角; S 为观测时刻穿刺点处 (φ,λ) 的太阳时角, t 为观测时刻; Z' 为穿刺点处天顶距, VTEC 为天顶方向的总电子含量.

3 建立实时电离层模型

3.1 GPS 系统硬件延迟的求解

GPS 系统硬件延迟 [6] $q^j=q_{\mathrm{s}}^j+q_{\mathrm{r}}$, 其中 q_{s}^j 为卫星 j 的硬件延迟, q_{r} 为接收机的硬件延迟. 在利

用 GPS 测量电离层延迟量时最大误差为 GPS 系统的硬件延迟. 其计算结果表明, GPS 系统硬件延迟最大可达 7 ns (1 ns = 2.86 TECU), 因此在利用 GPS 测量电离层延迟量时, 必须尽可能准确地计算出 GPS 系统的硬件延迟, 在实时计算电离层延迟量时必须预先对 GPS 系统硬件延迟的稳定性做出评价. 本文在计算实时监测上海区域电离层变化时, 利用前一时段计算的 GPS 系统硬件延迟, 求得较为稳定的 GPS 系统硬件延迟, 在实时解算时进行分离. 这里采用上海 GPS 综合应用网的数据, 其测站分布如图 1 所示, 解算了从 2009 年 7 月 1 日到 2009 年 7 月 29 日, 共 29 天的数据. 图 2 为相对平均值的卫星硬件延迟, 假定观测了 n 颗卫星, 则可估计出 n 个 GPS 系统硬件延迟, 将其取平均, 并将平均值与 q^j 相减. 由于这个值不包含接收机的硬件延迟, 因此它可以反映卫星硬件延迟的变化. 图 3 给出了相对平均值的接收机之间的硬件延迟, 假定两个接收机同时观测了 n 颗卫星, 则将两接收机观测的 n 个 GPS 系统硬件延迟相减, 再除以 n, 由于这个值不包含卫星的硬件延迟, 因此它可以反映接收机的硬件延迟变化. 用上述两个量的结果来验证该算法的正确性. 其解算结果如图 2 和图 3 所示.

从图 2 和图 3 可以看出, 相对平均值的卫星硬件延迟和相对平均值的接收机之间的硬件延迟标准差值都在 0.5 ns 左右, 这进一步说明了 GPS 系统硬件延迟在短时期内是非常稳定的, 因此本文在实时计算中, 对此前一段时间的 GPS 系统硬件延迟取平均, 在实时解算中剔除掉了 GPS 系统硬件延迟参数.

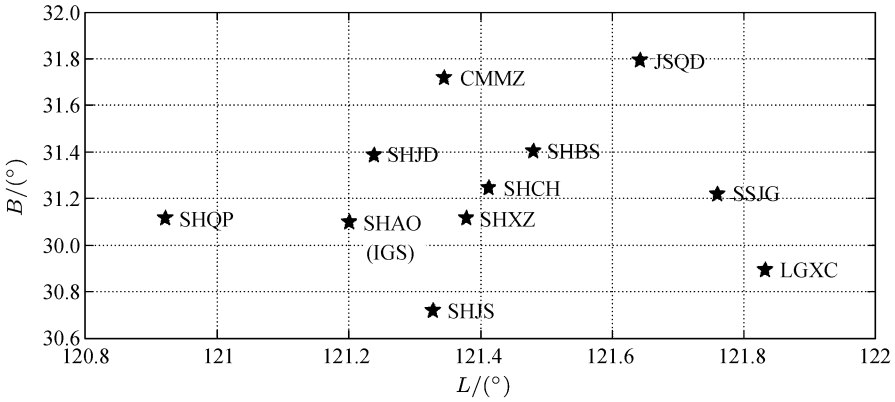

图 1 上海 GPS 综合应用网测站分布

Fig. 1 Distribution of Shanghai regional GPS network

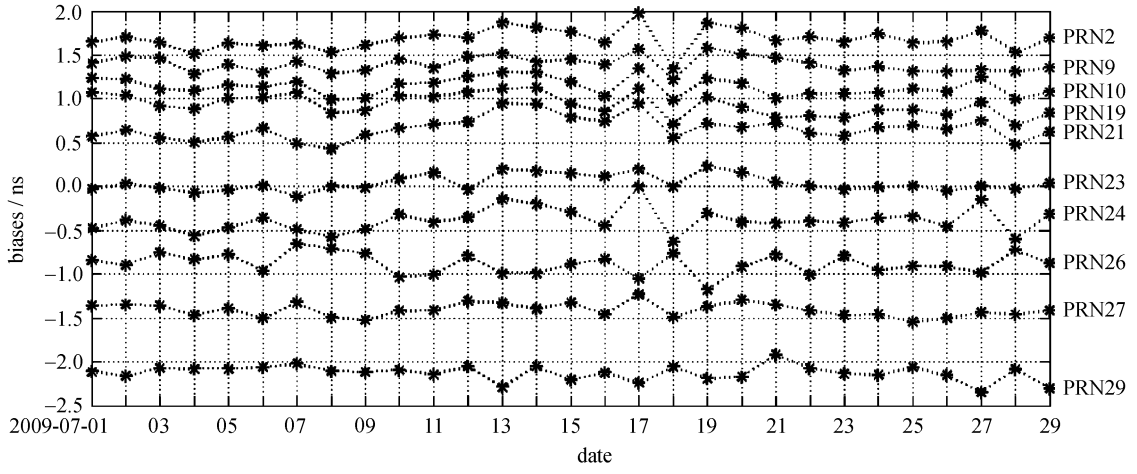

图 2 相对于平均值的卫星硬件延迟

Fig. 2 Satellite instrumental biases relative to the mean value

3.2 实时区域电离层监测

根据 GPS 系统硬件延迟相对稳定的特点, 利用此前一段时间求解出来的 GPS 系统硬件延迟, 来消除 GPS 系统硬件延迟参数, 仅保留电离层模型系数参数. 计算中采用 $n = 3$, $m = 4$, 电离层延迟多项式系数为 12, 在上海综合应用网的 10 个站数据, 每个站观测至少 6 颗卫星, 将有 $10 \times 6 = 60$ 个观测数据, 通过周跳探测和剔除粗差, 利用两个历元的数据, 由于多余观测数据会增大, 确保了实时拟合的精度. 计算中采用 2009 年 7 月 26 日上海区域的数据. 通过上述方法实时拟合的电离层结果与后处理采用全天数据整体解算每隔 2 h 拟合的电离层结果的比较如图 4~6 所示.

图 4 为每隔 2 h 拟合的电离层延迟量, 在计算中没有附加任何约束, 其分时段拟合的时间段间是不连续的. 图 5 为每隔 2 个历元实时拟合的电离层延迟量, 其实时观测数据得到的电离层延迟量与事后全天数据分段拟合得到的电离层延迟量的变化趋势是一致的. 其实时拟合的精度 RMS 统计结果表明 (见图 6), 内符合精度优于 3 TECU. 上述结果还表明, 其实时拟合求解的结果能够较全面地反映当前电离层延迟量的变化.

4 总结

利用上海 GPS 综合应用网的数据, 建立了上海区域的实时监测电离层延迟变化算法. 采用载波相位平滑伪距提高拟合精度和对前期的 GPS 系统硬件延迟进行解算, 在实时解算中分离 GPS 系统硬件延迟, 通过数据拟合, 实时对上海区域进行电离层延迟变化量的监测, 解算结果表明内符合精度优于 3 TECU, 能够实时、敏感地反映区域电离层延迟

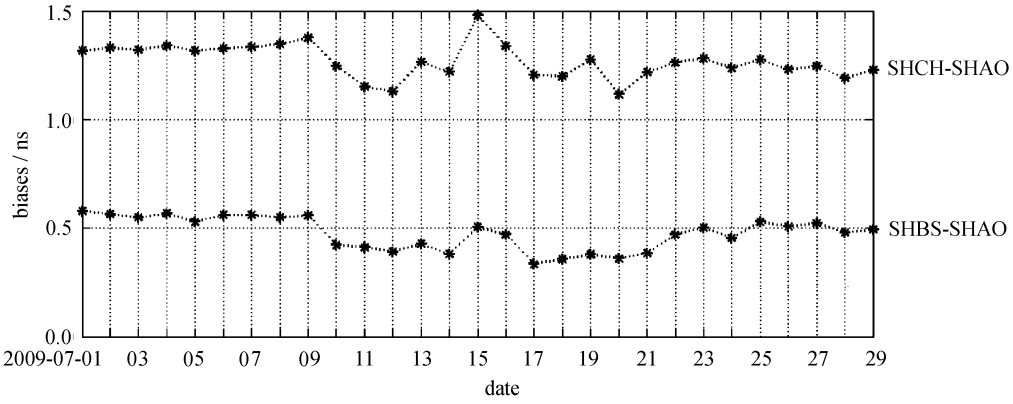

图 3 相对于平均值的接收机之间的硬件延迟

Fig. 3 Receiver instrumental biases relative to the mean value

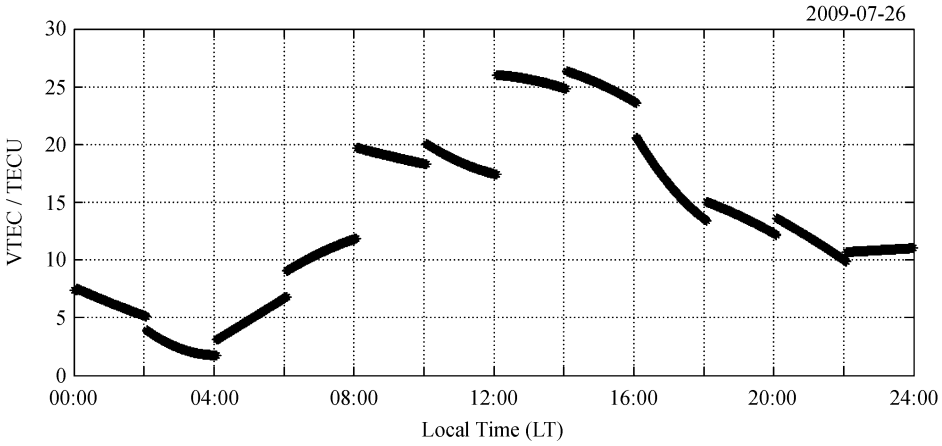

图 4 每隔 2 h 拟合的单天数据结果

Fig. 4 Fitting the results of a day's data every two hours

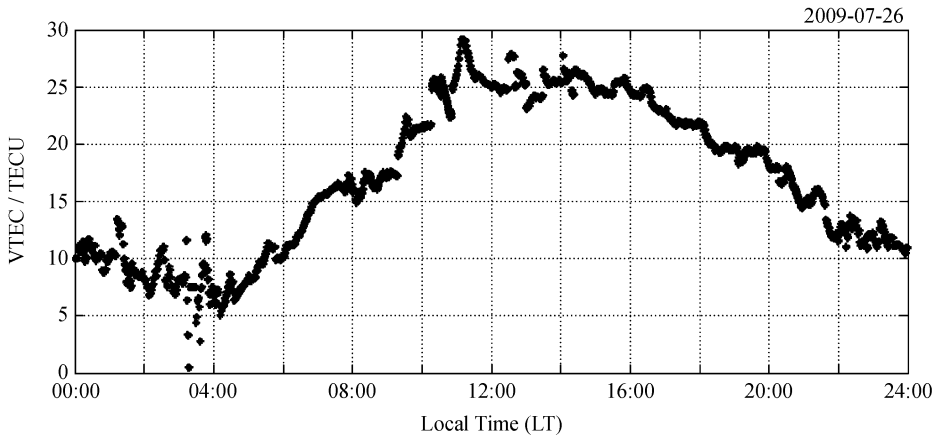

图 5 实时拟合求解的结果

Fig. 5 Results from real time resolution

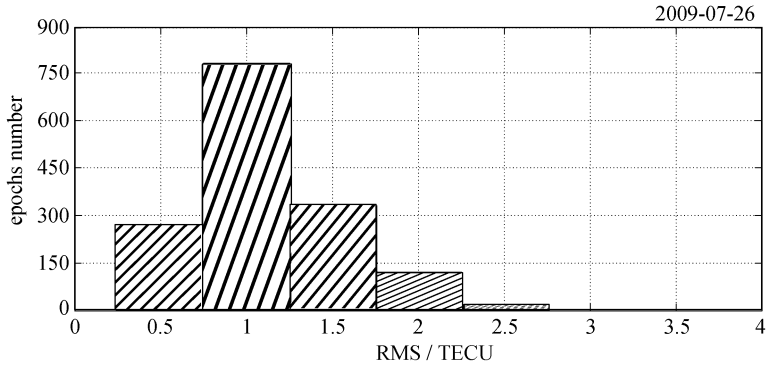

图 6 实时拟合 RMS 统计

Fig. 6 RMS value from real time resolution

变化量. 随着 GPS 监测电离层方法和技术的改进, 将使区域电离层异常活动监测更加准确, 进而提供更多的相关气候研究资料.

参考文献

[1] Wang Jiexian. GPS Precise Positioning and Orbit Determination [M]. Shanghai: Publishing House of Tongji University, 1997. In Chinese (王解先. GPS 精密定轨定位 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1997)

[2] Li Zhenghang, Huang Jinsong. GPS Surveying and Data Processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005. In Chinese (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)

[3] Wei Ziqing, Ge Maorong. The Mathematical Model of GPS Relative Positioning [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1998. In Chinese (魏子卿, 葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型 [M]. 北京: 测绘出版社, 1998)

[4] Hatch R. The synergism of GPS code and carrier measurements [C]//Proceedings of the Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, 1982, **2**(2):1213-1232

[5] Yang Gao, Zhao Zhiliu. Precise ionosphere modeling using regional GPS network data [J]. *J. Global Pos. Sys.*, 2002, **1**(1):18-24

[6] Chang Qing, Zhang Donghe, Xiao Zuo. Study of the estimation method of GPS instrumental biases [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2000, **45**(15):1676-1680. In Chinese (常青, 张东和, 肖佐. GPS 系统硬件延迟修正方法 [J]. 科学通报, 2000, **45**(15):1676-1680)

[7] Zhang Xiaohong, Li Zhenghang, Cai Changsheng. Study on regional ionospheric model using Dual_frequency GPS measurements [J]. *Geomat. Inf. Sci. Wuhan Univ.*, 2001, **26**(2):140-143. In Chinese (张小红, 李征航, 蔡昌盛. 用双频 GPS 观测值建立小区域电离层延迟模型研究 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2001, **26**(2):140-143)