

利用 CORS 系统实时监测电离层变化*

耿长江^{1,2)} 唐卫明²⁾ 章红平²⁾

(1) 武汉大学测绘学院, 武汉 430079
(2) 武汉大学卫星导航定位研究中心, 武汉 430079)

摘要 论述利用 CORS(Continuously Operating Reference Stations)系统实时监测电离层变化的原理, 讨论求解相对准确的 P2 与 P1 间 DCB(Differential Code Bias)值的方法。根据 DCB 值相对稳定的特点, 采用一定时段求解出的 DCB 值, 实时分离 GPS 信号传播路径上的 VTEC, 并利用单历元观测的 VTEC 实时建立电离层延迟模型, 监测区域电离层变化。数据分析表明这种方法建模求解的内符合精度约为 3 TECU, 外符合精度约为 4 TECU。

关键词 CORS; 实时监测; 电离层; DCB; 单历元

中图分类号: P207; P227

文献标识码: A

REAL-TIME MONITORING OF IONOSPHERE CHANGES BY CORS

Geng Changjiang^{1,2)}, Tang Weiming²⁾ and Zhang Hongping²⁾

(1) School of Geodesy and Geomatics of Wuhan University, Wuhan 430079
(2) GNSS Research Center of Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract From the view of practice, the method for monitoring ionosphere in real time by CORS(Continuously Operating Reference Stations) is analyzed. The way to get precise DCB(Differential Code Bias) between P2 and P1 is also discussed. As the characteristics of DCB value is stable, its value computed before can be used to build an ionosphere model and get real time ionosphere information. The result show, the RMS of this method is about 3 TECU, and compared with observation, the precision of this method is about 4 TECU.

Key words: CORS(Continuously Operating Reference Stations); real time monitoring; ionosphere; DCB(Differential Code Bias); single epoch

1 引言

电离层活动的监测和预报, 可以保护相关通信设施, 揭示太阳和电离层中某些现象发生的规律性, 以及了解地球磁场及其他圈层变化和相互作用的规律。电离层电子总含量(TEC, Total Electron Content)及其变化不但是电离层形态学研究的重要资料, 也是精密定位、导航和电波科学中电离层修正的

重要参数。全球定位系统(GPS)问世以后, 由于它具有高精度、高可靠性、数据量大、全方位、全天候和连续观测等优点, 因此利用 GPS 测量 TEC 受到人们的普遍关注^[1]。

连续运行参考站系统(CORS, Continuously Operating Reference Stations)是利用 GNSS 卫星导航定位、计算机、数据通信和互连网络等技术, 在一个城市、一个地区或一个国家根据需求按一定距离建立

* 收稿日期: 2008-06-30

基金项目: 863 项目(2007AA12Z310)

作者简介: 耿长江, 男, 1984 年生, 博士研究生, 研究方向为高精度 GPS 数据处理. E-mail: gengchangjiang@163.com

常年连续运行的若干个固定 GNSS 基准站组成的数据通信、处理分析的网络系统。CORS 系统在提供实时精密定位结果的同时,可以提供覆盖区域的大气以及电离层信息^[2]。

从 20 世纪 90 年代以来,许多学者如 Schaer^[3]、张东和^[4]、袁运斌^[5]和章红平^[6]等,讨论了运用地基 GPS 的观测数据建立区域电离层模型的方法。目前,全国大规模 CORS 系统的建立为监测区域电离层变化提供了条件。我们可以采用上述学者提出的方法,通过密集的 GPS 参考站观测网络,运用一定的策略建立电离层延迟模型,实时地监测区域电离层的变化。

2 GPS 监测电离层原理

在忽略二、三阶项的情况下,电离层对 GPS 伪距观测值所造成的影响可以表示为:

$$dP_{ion} = \frac{40.28 \text{ m}^3/\text{s}^2}{f^2} \int_{\rho} N_e d\rho = \frac{40.28}{f^2} TEC \quad (1)$$

其中 dP_{ion} 为伪距观测值的电离层效应距离偏差改正, N_e 为电子密度, f 为电磁波的频率, TEC 是底面积为 1 m^2 而贯穿整个电离层的柱体中的自由电子数,单位为 $10^{16}/\text{m}^2$ ^[5]。

通过 GPS 观测量只能计算出 GPS 信号在传播路径上总的电离层延迟量。要想得到其它地方的电离层延迟,通常的方法是建立一个电离层模型,常用的模型有 VTEC 模型、广义三角级数模型和低阶球谐函数模型等^[8]。本文采用 VTEC 模型,其公式如下:

$$\frac{1}{\cos z} \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^n E_{ik} (\phi - \phi_0)^i (S - S_0)^k - B = 9.524 37 (P_2 - P_1) \quad (2)$$

式(2)中 $\cos z$ 是投影函数, P_2 、 P_1 是 GPS 伪距观测值, ϕ 代表 IPP (Ionosphere Pierce Point) 的地磁纬度, S 代表太阳时角, B 代表两个频率的通道存在硬件延迟偏差^[8], 也称作 P_2 、 P_1 间 DCB (Differential Code Bias)。DCB 的确定需要长时间(一天)的观测量,进行整体的平差解算,才可以求得较为稳定的值^[6]。因此在 CORS 系统电离层的实时监测中,要想实时分离 DCB,只能利用 DCB 值相对稳定的特点,直接采用前个时段求解出的 DCB 值。

3 DCB 的求解

数据处理采用的解算策略为电离层模型系数分时段估计,DCB 整体求解,单个测站组方程,多个测站法方程叠加^[6]。为程序设计的方便,参数设置上与文献[6]中方法不同,对于一个星站组合设

置一个 DCB 参数,即没有分离卫星和测站的 DCB 值。尽管这种方法求解时未知数个数随测站数增加而迅速增加,但在原理上与文献[6]的方法是等价的。

为分析该算法的正确性,运用 ALGO、NRCL 和 VALD 3 个 IGS 站建立了区域的电离层模型,总共解算了 5 天的数据(2006 年,年积日 001—005),并分别将单天解算的 ALGO 站星站组的 DCB 与 CODE 提供的值进行了比较,由于 CODE 的结果已经分离了卫星和测站接收机的 DCB,所以在进行比较之前先将所有卫星的 DCB 值与 ALGO 站接收机的 DCB 值相加,得出星站组合的硬件延迟,比较结果如图 1 所示。

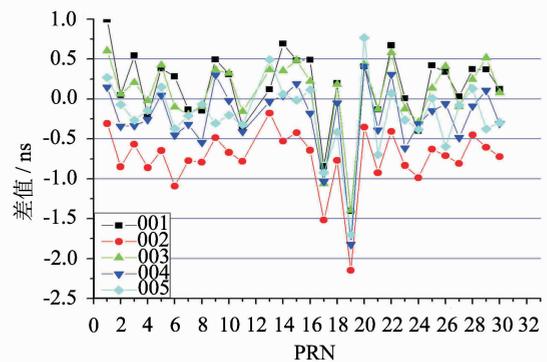


图 1 5 天的 DCB 与 CODE 的结果的比较

Fig. 1 Comparison of DCB in 5 days with that of CODE

从图 1 可以看出除 PRN 17 和 19 两个星站组与 CODE 的偏差稍大外其余各星站组一般在 1 ns 以内。个别的偏差可能与数据处理中采用了不同的电离层延迟模型有关, CODE 采用的是全球电离层模型。另外 CODE 的解算数据是全球分布的 GPS 跟踪站的数据,本文采用的是区域站数据。

4 实时建立电离层模型

公式(2)中消去硬件延迟参数之后,电离层模型解算的未知数个数只与电离层模型系数的个数有关。文中采用的电离层延迟多项式系数为 5 个,在单站情况下只需观测到 5 颗卫星即可建立一个实时的区域模型,在多站的情况下多余观测数会增多,拟合精度也会相应的提高。将此方法实时拟合的电离层的结果与事后全天数据整体解算 DCB 分时段拟合电离层的结果的比较如图 2、3 所示。

图 2 表明,在不加任何约束的情况下,分时段拟合的电离层值在时段间不连续。图 2、3 表明,实时观测数据计算得出的 VTEC 值与事后整天数据分段建立 VTEC 模型得出的电离层变化趋势是相同的。

但一般说来为取得较好的拟合效果都会采用长时间的观测值,但这种方法对电离层的高频变化不够敏感,而实时拟合,由于观测值较少,拟合精度较差,但却可以敏感地反应当前历元电离层延迟的变化。

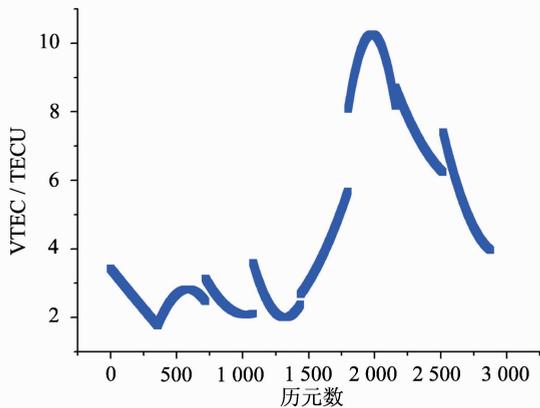


图 2 分段拟合单天数据结果

Fig. 2 Fitting a day's data by sequentation

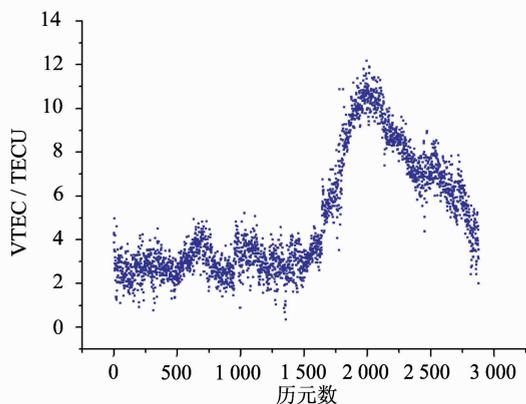


图 3 实时求解结果

Fig. 3 Result from real-time resolution

5 精度分析

实时求解模型系数的均方根 (RMS) 值如图 4 所示。

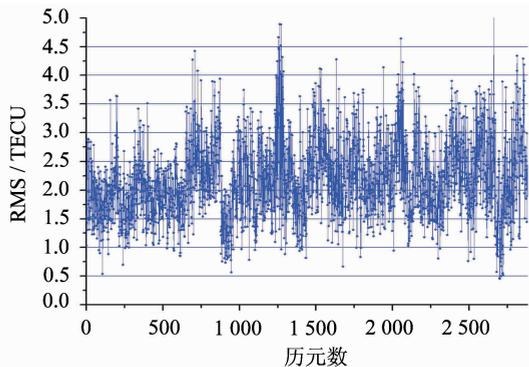


图 4 RMS 值

Fig. 4 RMS value

为进一步检验这种实时求解方法的精度,采用 NRC1 站附近的 CAGS 站上 VTEC 的实际观测值(仅以观测 PRN01 的值为例,为保证穿刺点在模型的覆盖区域之内,将其截止高度角设为 50°)与实时模型所求得的值求差,其结果如图 5 所示。

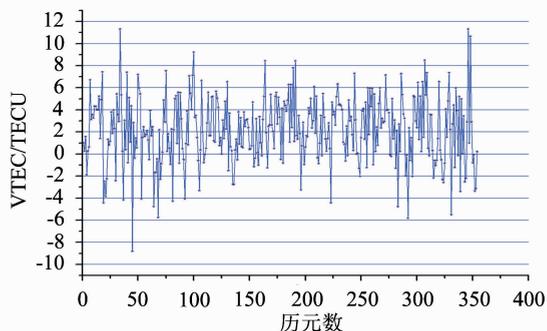


图 5 与实测值的比较

Fig. 5 Comparison between computed value with observation

上述结果表明,实时建立 VTEC 电离层延迟模型的外符合精度可达到 4 个 TECU,内符合精度在 3 个 TECU 左右。

另外,基准站网布局决定 IPP 点的有效数目、密度及几何位置等分布规律。它对电离层模型的精度影响很大^[5]。由于本文仅采用了 3 个站的数据,且其间距离有 200 多千米,考虑到一般 CORS 系统更多更密集的观测站分布,单历元建立的电离层模型的精度较本文的结果会有所提高。

6 结束语

运用伪距和一些精化伪距的方法求得绝对电离层含量,然后用一定的模型对区域的电离层进行拟合,是一种发展了多年的电离层监测算法。这种方法所确定的电离层延迟由于精度的原因一般无法应用于网络 RTK 等精密定位中。本文从实用软件设计的角度,探讨了利用 CORS 观测网络,实时监测绝对电离层变化的方法,可以运用此方法,在 CORS 系统的相关软件中设计电离层实时监测的功能,从而对电离层的变化有一个比较直观的了解。

参 考 文 献

- 王小亚,朱文耀. GPS 监测电离层活动的方法和最新进展 [J]. 天文学进展, 2003, 21(1): 33-40.
- Wang Xiaoya and Zhu Wenyao. Method and progress on monitoring ionosphere activity by GPS [J]. Progress in Astronomy, 2003, 21(1): 33-40. (in Chinese)
- 唐卫明. 大范围长距离 GNSS 网络 RTK 技术研究及软件实现 [D]. 武汉大学, 2006.
- Tang Weiming. Research on techniques of large area and

- long range GNSS network RTK and developing network RTK software[D]. Wuhan University, 2006. (in Chinese)
- 3 Stefan Schear. Global and regional ionosphere models using the GPS double difference phase observable[A]. IGS workshop[C]. Potsdam, 1995.
 - 4 张东和, 萧佐. 利用 GPS 计算 TEC 的方法及其对电离层扰动的观测[J]. 地球物理学报, 2000, 43(4): 575 - 578.
 - 4 Zhang Donghe and Xiao Zuo. A method of calculating TEC with GPS data and its application to the ionospheric disturbances[J]. Journal of Geophysics of China, 2000, 43(4): 575 - 578. (in Chinese)
 - 5 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]. 中国科学院测量与地球物理研究所, 2002.
 - 5 Yuan Yunbin. Study on theories and methods of correcting ionosphere delay and monitoring ionosphere based on GPS [D]. Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Science, 2002. (in Chinese)
 - 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]. 中国科学院上海天文台, 2006.
 - 6 Zhang Hongping. Research on China area ionosphere monitoring and delay correction based on ground - based GPS [D]. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, 2006. (in Chinese)
 - 7 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
 - 7 Liu Jiyu. Theory and method of GPS navigation and positioning[M]. Beijing: Scientific Press, 2003. (in Chinese)
 - 8 刘经南, 等. 广域差分 GPS 原理和方法[M]. 北京: 测绘出版社, 1999.
 - 8 Liu Jingnan, et al. Theory and method of wide area differential GPS [M]. Beijing: Surveying Press, 1999. (in Chinese)

(上接第 104 页)

参 考 文 献

- 1 Chapman S. The absorption and dissociative or ionising effect of monochromatic radiation in atmosphere on a rotating earth[J]. Proc. Phys. Soc., 1931, 43: 483 - 501.
- 2 Chapman S. Note on the grazing-incidence integral for monochromatic radiation in an exponential atmosphere[J]. Proc. Phys. Soc., 1953, B66: 710 - 712.
- 3 Klobuchar J A. Ionospheric time-delay algorithm for single - frequency GPS users[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, 1987, 23(3): 325 - 331.
- 4 Clynch J R, et al. A versatile GPS ionospheric monitor: high latitude measurements of TEC and scintillation[J]. in Proceeding of the ION GPS - 98, Colorado Springs, Colorado, USA: 445 - 450.
- 5 李征航, 等. GNSS 电离层延迟模型的数学统一与方法扩展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(8): 699 - 703.
- 5 Li Zhenghang, et al. Mathematical unification and method expansion of GNSS ionospheric delay model[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2007, 32(8): 699 - 703. (in Chinese)
- 6 李征航, 等. 顾及 f^3 项的电离层延迟模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(2): 139 - 143.
- 6 Li Zhenghang, et al. Ionospheric delay model containing f^3 term[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2007, 32(2): 139 - 143. (in Chinese)
- 7 Brunner F K and Gu Min. An improved model for the dual frequency ionospheric correction of GPS observations[J]. Manuscripta Geodetica, 1991, (16): 205 - 214.
- 8 杨力. 大气对 GPS 测量影响的理论研究[D]. 中国人民解放军信息工程大学测绘学院, 2001.
- 8 Yang Li. The theory and research of atmosphere affection to GPS surveying[D]. The PLA Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, 2001. (in Chinese)
- 9 Ou Jikun. Atmosphere and its effects on GPS surveying[R]. LGR Series (14) Delft, The Netherlands: Delft Geodetic Computing Centre, 1996.
- 10 Sovers O J and Fanselow J L. Observation model and parameter partials for the JPL VLBI parameter estimation software MASTERFIT - 1987 [R]. JPL Publication 83 - 89, Rev. 3, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 1987.
- 11 Xu Guochang. GPS theory, algorithms and applications [M]. Berlin: Springer-verlag Berlin. Heidelberg, 2003.