

利用 GPS 双频载波相位单历元解算电离层 VTEC*

林 剑^{1,2,3)} 吴 云^{1,2)} 周义炎^{1,2)} 施顺英^{1,2)} 邢乐林^{1,2)}

(1) 中国地震局地震研究所, 武汉 430071
(2) 地壳运动与地球观测实验室, 武汉 430071
(3) 武汉大学测绘学院, 武汉 430079

摘 要 探索了一种新的基准站上空垂直电离层电子浓度(vertical total electron content, VTEC)计算方法,即从单历元整周模糊度和双频观测值入手计算 VTEC。结果表明:用此方法计算得到的 VTEC 与 IGS(International GNSS Service)提供的 VTEC 随时间变化趋势一致,且内符合精度良好,能反映电离层活动随时间和纬度的变化规律。

关键词 垂直电子总含量(VTEC) 单历元 整周模糊度 周跳 内符合精度

中图分类号:P228.4 文献标识码:A

CALCULATION OF IONOSPHERIC VTEC BY USING SINGLE EPOCH GPS DUAL FREQUENCY CARRIER-PHASE

Lin Jian^{1,2,3)}, Wu Yun^{1,2)}, Zhou Yiyang^{1,2)}, Shi Shunying^{1,2)} and Xing Lelin^{1,2)}

(1) Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071
(2) Crustal Movement Laboratory, Wuhan 430071
(3) School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079

Abstract A new calculation method of VTEC(Vertical Total Electron Content) of the vertical space above fiducial station is presented, in which the single integer ambiguity and dual frequency observations are directly used to calculate VTEC. The result shows that the change tendency of the calculated VTEC is consistent with the provided data by IGS(International GNSS Service), and its inner precision is so good that can reflect the ionospheric activity in some extent.

Key words: VTEC(Vertical Total Electron Content), single epoch, integer ambiguity, cycle slips, inner precision

1 引言

研究发现,不仅大地震前孕震区上空垂直电子总含量会出现明显的异常扰动^[1,2],而且太阳耀斑也会对其产生明显的影响^[3],电离层活动还与人类活动相关。在科学技术日益飞速发展的今天,电离层研究越来越引起人们的广泛重视,了解并逐步掌握

电离层变化活动规律,如电离层垂直电子浓度总含量 VTEC(Vertical Total Electron Content)的周日、季节、纬度变化等,不仅有利于电离层精细结构的研究,而且有助于提取高精度的电子含量。近十年来兴起的电离层 GPS 探测技术,以其高精度、实时、高分辨率的时空检测特性,为监测和研究电离层活动规律提供了一条新的途径,也必将服务于大地测量、

* 收稿日期:2007-05-09

基金项目:国家高技术研究发展计划(2007AA12Z169);地震科学联合基金“地基与天基 GPS 监测震前电离层特征的研究”(106006);中国地震局地震研究所所长基金“GPS 非差精密单点定位方法的研究和应用”(IS200726014)

作者简介:林剑,男,博士生,从事电离层 TEC 研究. E-mail:ljian2008@126.com

通讯和空间探测等受电离层活动影响较大的领域^[4-6]。纵观国内外通过 GPS 观测数据对 VTEC 的研究,绝大部分都是通过经验电离层模型(如:本特模型、国际参考站电离层模型、克罗布歇模型等)和实测电离层模型(曲面拟合模型、距离加权模型、多面函数模型等)来完成,这样解算 GPS 基准站上空 VTEC 时,必然导致引入模型参数的误差,且时段之间 VTEC 值的连续性不强(如曲面拟合模型)。本文为避免使用电离层模型,直接从 GPS 观测数据和整周模糊度入手,借助 P³ 软件,利用 2001 年中国地壳观测网络基准站双频 GPS 接收机载波相位和伪距组合观测值,通过 GPS 观测数据预处理,计算多天的多基准站单历元 VTEC,分析出电离层周日和不同纬度的 VTEC 变化情况。

2 单历元 VTEC 计算原理

2.1 周跳的探测与修复

众所周知,周跳的探测与修复对于利用载波相位定位是非常关键的,同样对于利用载波相位来解算 VTEC 也是非常关键的。周跳的探测和修复方法很多,如:载波相位观测值多次差法、多项式拟合法、电离层残差和滤波方法^[7,8]。但在应用中,存在多次插法和多项式拟合法只能探测出大的周跳,电离层残差法没有解决周跳的多值性问题;滤波方法对静态较好但对动态不够理想等^[9]。要想得到较为“干净”的观测数据,通常不是用单一方法能够完成的。下面简单介绍本文所采用方法:对双频载波相位观测值(L_1, L_2)在相邻两个历元求差^[10],由于两个观测历元时间比较接近,大气变化缓慢,电离层和对流层的影响可以消除,因而差值较小,当它超过 0.07 时则认为发生周跳。这种方法对周跳非常敏感,但不能判断是哪个频段上发生周跳及周跳的大小;另外,一旦电离层发生剧烈抖动时周跳探测将不成功。而利用 Melbourne-Wübbena 组合法,能很好地消除电离层、对流层、钟差和计算的几何观测值等因素的影响,而且具有较长的波长(约为 86 cm)、较小的量测噪声等特点,因此非常适用于非差周跳的探测和修复^[11],但如果在两个频段上发生相同的周跳,周跳探测将不成功。由此可见,以上两种方法有良好的互补性,本文采用这两种方法联合进行周跳探测和修复。

2.2 精密星历轨道的拟合

由于 IGS(International GPS Service for Geodynamics)及数据中心仅提供 15 分钟和 5 分钟间隔的精密星历,而在单历元解算 TEC 时,必须知道 30 s(本文所采用 GPS 接收机的采样率为 30 s)间隔的

精密星历。采用切比雪夫(Chebyshev)多项式拟合 GPS 卫星轨道的方法如下^[12]。

假定在时间间隔 $[t_0, t_0 + \Delta t]$ 内用 n 阶切比雪夫多项式逼近,其中 t_0 和 Δt 为开始历元和拟合区间的长度。将变量 $t \in [t_0, t_0 + \Delta t]$, 变成变量 $\tau \in [-1, 1]$, 有

$$\tau = \frac{2}{\Delta t}(t - t_0) - 1, t \in [t_0, t_0 + \Delta t]$$

卫星的坐标可用如下的切比雪夫多项式表示:

$$x(t) = \sum_{i=0}^n Cx_i T_i(\tau)$$

对 y, z 分量,有类似的式子。在以上所表示的式子中, n 为多项式的阶数; Cx_i 为 Chebyshev 多项式系数。可用最小二乘拟合可以求出; T_i 可用下面的递推公式确定:

$$T_0(\tau) = 1, T_1(\tau) = \tau, T_n(\tau) = 2\tau T_{n-1}(\tau) - T_{n-2}(\tau) \\ |\tau| \leq 1, n \geq 2$$

对于一个 6 小时的间隔,12 阶切比雪夫多项式拟合卫星星历,其数值精度可以达到厘米级。

2.3 单历元 VTEC 的计算

国内外学者对电离层 TEC 的研究大都是从电离层模型入手,在电离层模型中一同解出模型参数和 GPS 系统硬件延迟,然后再通过电离层模型求出某点上空的 VTEC,由此在计算 VTEC 时必将引入模型参数误差。本文则是直接从载波相位和整周模糊度入手来求解 VTEC,利用双频伪距观测值和利用载波相位观测值测定电离层 TEC 公式^[13]分别为:

$$TEC - 9.524\ 37B = 9.524\ 37(P_2 - P_1) \\ TEC - 9.524\ 37B = 9.524\ 37[\lambda_1(\varphi_1 + N_1) - \\ \lambda_2(\varphi_2 + N_2)]$$

式中, $\varphi_k, P_k, \lambda_k, N_k$ ($k = 1, 2$) 分别为两个频段上的相位观测值、伪距观测值、波长、整周模糊度。 B 为 GPS 系统的硬件延迟(卫星和接收机两个频率的硬件延迟的差分分别成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)。

在利用 GPS 观测值进行 TEC 解算时,通过伪距和载波相位都可以计算得到 TEC 值。两种方法各有其优缺点:伪距观测不存在模糊度和周跳问题,计算简单、方便,但观测精度较低,解算 TEC 精度为 4~5 TEC;使用载波定位,绝对定位精度可达厘米级,但此方法存在解决载波相位整周模糊度和周跳的难点。一旦整周模糊度确定, GPS 观测值“干净”,则可得到精确的 TEC,其精度为 2 个 TEC 以内。在将斜向 TEC 转为垂直 TEC 过程中利用公式 $VTEC = TEC \cos(e)$ 计算,其中 e 为卫星在电离层星下点处的天顶角,卫星、接收机、电离层平均高度的

几何关系以及 e 的计算公式见文献[14]。得到每颗卫星到基准站的 VTEC,再由电离层曲面拟合模型解算出 GPS 系统的硬件延迟^[13]。

由以上计算得到时间 t 时基准站观测到每颗卫星的 VTEC,本文采用距离加权法(即以穿刺点到测站垂直上空的垂直距离加权),把计算出的每颗卫星的 VTEC 归算到基准站上空的 VTEC,其计算公式^[15]如下:

$$VTEC_{\text{测站}} = \sum_{i=1}^n \frac{VTEC_i}{D_{ij}} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{D_{ij}}$$

3 计算结果与分析

通过以上 VTEC 计算方法,对 2001 年中国多个地壳观测网络基准站相同天数的观测数据进行了处理,现以 DLHA(东经 97.4°,北纬 37.4°)和 KMIN(东经 100.3°,北纬 25.5°)两个基准站处理结果进行分析,时间为 2001 年 10 月 1 日~2001 年 10 月 31 日。考虑到文章篇幅有限,仅分别提取一天解算的 VTEC 和 IGS 站公布的 VTEC 进行对比和分析(图 1),再取载波相位和 P 码计算得到的 3 天 VTEC 进行对比分析(图 2)。

图 1(a)是根据 IGS 提供的 2001 年 10 月 19 日 VTEC 数据绘制成的 KMIN 和 DLHA 两站 VTEC 随时间变化曲线,图 1(b)是根据载波相位计算得到的 VTEC 绘制成的随时间变化曲线。由图 1 可知,利用

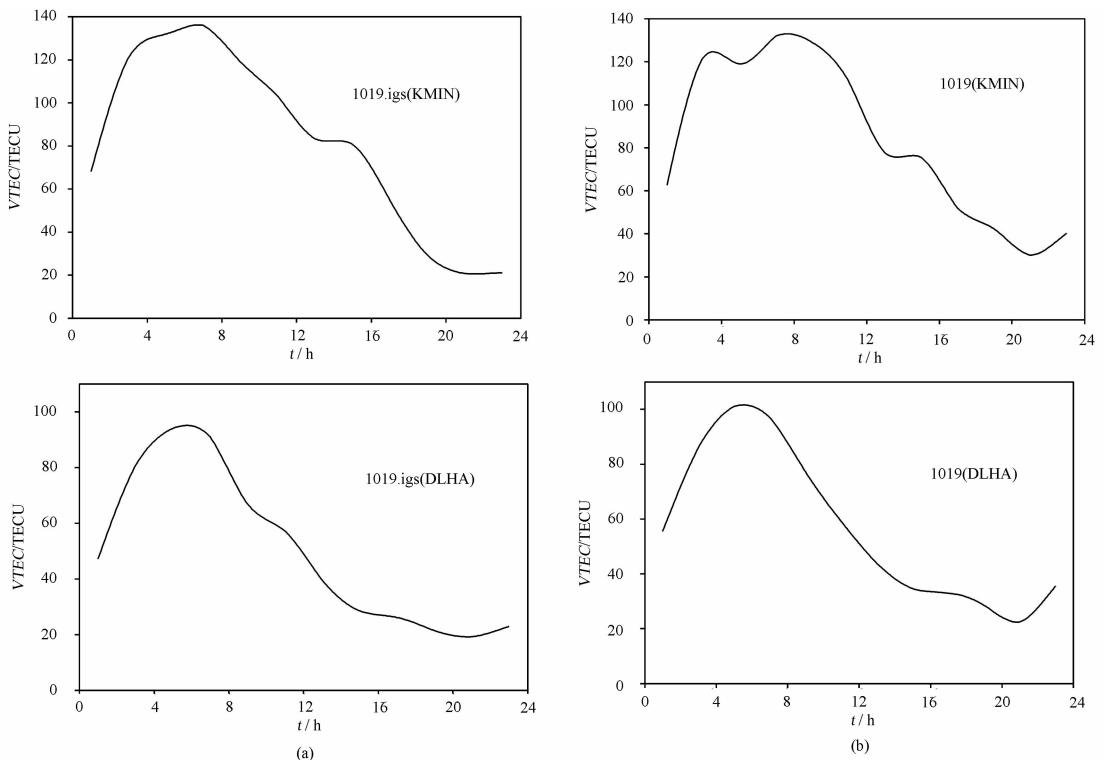


图 1 IGS 站提供的 VTEC(a)和载波相位计算的 VTEC(b)随时间变化曲线

Fig. 1 Comparison between VTEC provided by IGS and VTEC derived form carrier-phase

载波相位计算得到的 VTEC 和 IGS 站公布的 VTEC 整体变化趋势一致,在世界时 5:00~7:00 和 20:00~23:00,也就是北京时间 13:00~15:00 和 4:00~6:00,KMIN 和 DLHA 两站的 VTEC 分别到达最大值和最小值,而且 KMIN 站的 VTEC 普遍比 DLHA 站的 VTEC 大 10~20 个 TECU,由此反映出电离层活动与时间和纬度有较大关系。

图 2 是由 P 码计算得到的 VTEC 和载波计算得到的 VTEC 二者差数的 3 天曲线。由图 2 可知,由 KMIN 站和 DLHA 站 3 天(2001 年 10 月 19~21 日)的载波相位和 P 码的观测数据分别所计算得到的 VTEC 值相差不超过 ± 4 VTEC,这与由载波相位和 P 码求得 VTEC 值理论精度相符合(P 码精度为 4~5 个 VTEC,载波精度为 1 个 VTEC)。由此可知,通过以上方法计算得到的 VTEC 值内符合精度良好。

通过对图 1 和图 2 的讨论,可以看出由该方法计算得到的 VTEC 估计值能够反映电离层活动特性,并且内符合精度良好。

4 结论

本文尝试通过载波相位 L_1 和 L_2 的整周模糊度入手来解算 VTEC,然后与 IGS 站公布的 VTEC 和由 P 码解算得到的 VTEC 做比较,得出:由该方法计算得到的 VTEC 和 IGS 提供的 VTEC 随时间变化趋势

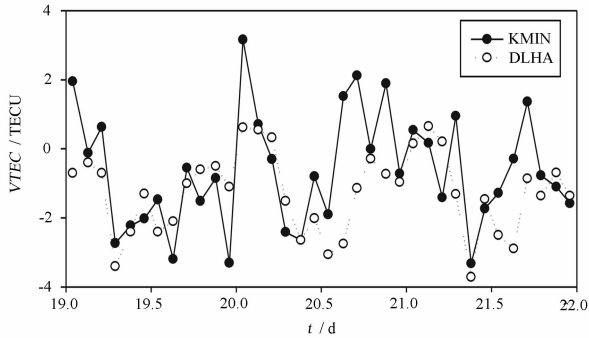


图2 由载波相位和 P 码计算得到的 VTEC

Fig. 2 Comparison between VTEC derived from carrier-phase and VTEC derived from P-code

一致,且内符合精度良好,能反映出电离层活动随时间和纬度的变化规律。但也存在一些问题:1)由直接利用载波和整周模糊度计算和 P 码计算得到 VTEC 都比 IGS 站公布的 TECU(精度为 2 ~ 8 个 TECU)大 10 个左右;2)在计算 VTEC 时需要精密星历,而精密星历必须在 13 天后才能得到,这对于利用 VTEC 来实时监测电离层变化是不合适的,如何实时准确监测电离层变化是今后的研究课题。

致谢 感谢卡尔加里大学提供的 P³ 软件!

References

- 1 吴云,等. 利用地基 GPS 探测震前电离层 TEC 异常[J]. 大地测量与地球动力学,2005,25(2):36~40.
- 1 Wu Yun, et al. Preseismic ionospheric TEC anomaly detected by ground-based GPS [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005, 25(2): 36 - 40. (in Chinese)
- 2 张强,等. 震前电离层 TEC 异常分析[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(3):91~96.
- 2 Zhang Qiang, et al. On ionospheric TEC anomaly before earthquake[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(3): 91 - 96. (in Chinese)
- 3 乔学军,等. 2003 年 10 月 29 ~ 31 日太阳耀斑对中国大陆电离层扰动的 GPS 监测与分析[J]. 大地测量与地球动力学,2005,25(2):41~45.
- 3 Qiao Xuejun, et al. Monitor solar flare during October 29 - 31, 2003 and analysis of its disturbances to ionosphere over China by GPS measurement[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005, 25(2): 41 - 45. (in Chinese)
- 4 Torr M R, et al. The seasonal behavior of the F2 - layer of the ionosphere[J]. J Atmos Terr Phys, 1973, 35(12): 2 237 ~ 2 241.
- 5 Zou L, et al. Annual and semiannual variations in the ionosphere F2 - layer: I, Modelling[J]. Ann Geophysicae, 2000, 18(8): 927 ~ 932.
- 6 陈艳红,等. 武汉地区电离层电子浓度中含量的统计经验模式研究[J]. 空间科学学报,2002,22(1):28~34.
- 6 Chen Yanhong, et al. A statistica TEC model based on the

- observation at Wuhan ionospheric observatory [J]. Chinese Journal of Space Science, 2002, 22 (1): 28 - 34. (in Chinese)
- 7 徐锐,等. 一种改进的双频单 P 码周跳探测与修复方法[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(4):67~71.
- 7 Xu Rui, et al. Improved method for detecting and repairing cycle slips of dual-frequency data with single P-code [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(4): 67 - 71. (in Chinese)
- 8 孔巧丽,等. 星载 GPS 相位非差观测粗差和周跳的探测与修复[J]. 大地测量与地球动力学,2005,25(4):105~109.
- 8 Kong qiaoli, et al. Detection and repair of gross errors and cycle slips in Leo-based GPS data on zero level[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005, 25 (4): 105 - 109. (in Chinese)
- 9 黄德胜,等. 周跳的探测与修复[J]. 全球定位系统,2005,4:32~35.
- 9 Huang Desheng et al. Cycle slip detection and repair [J]. GNSS of China, 2005, 4: 32 - 35. (in Chinese)
- 10 王仁谦,等. 利用双频载波相位观测值求差的方法探讨与修复周跳[J]. 测绘通报,2004,6(9):9~11.
- 10 Wang Renqian et al. Detection and repair for cycle slips using dual frequency differenced carried-phase [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2004, 6 (9): 9 - 11. (in Chinese)
- 11 郑作亚. GPS 数据预处理和星载 GPS 运动学定轨研究及其软件实现[D]. 博士学位论文,中国科学院研究生院,2004.
- 11 Zheng Zuoya. Study and software implementation of GPS data pre-processing and onboard GPS kinematic orbit determination [D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2004.
- 12 余鹏,等. GPS 定位中卫星坐标计算的切比雪夫多项式拟合法[J]. 气象科技,2004,32(3):198~201.
- 12 Yu Peng, et al. Chebyshev polynomial fitting model for GPS orbit calculation [J]. Mseterological Scienc and Technology, 2004, 32 (3): 198 - 201. (in Chinese)
- 13 蔡昌盛,等. 利用 GPS 载波相位组合观测值建立区域电离层模型研究[J]. 测绘通报,2002,14(11):14~16.
- 13 Cai Changsheng, et al. A study of regional ionospheric model using GPS carrier phase observations [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2002, 14 (11): 14 - 16. (in Chinese)
- 14 刘经南,等. 广域差分 GPS 原理和方法[M]. 北京:测绘出版社,1999.
- 14 Liu Jingnan, et al. Priciple and methods of wide area difference GPS [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1999. (in Chinese)
- 15 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.
- 15 Li Zhenghang and Huang Jinsong. GPS surveying and data processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005. (in Chinese)