

利用 GPS 监测电离层总电子含量的季节性变化

蔡昌盛^{1,2} 高井祥¹ 李征航³

(1 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州市泉山区翟山, 221008)

(2 辽宁工程技术大学地理空间信息技术与应用实验室, 阜新市中华路 47 号, 123000)

(3 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要: 利用 Georgiadiou 电离层模型计算了 GPS 系统硬件延迟, 从而由双频伪距观测值获取绝对电离层总电子含量值。利用北京 IGS 站的 GPS 观测数据分别计算了 2000 年和 2004 年各个不同月份的总电子含量值, 对两年各月份的总电子含量进行多项式拟合, 发现总电子含量的季节性变化趋势一致。

关键词: GPS; 硬件延迟; 电离层; 总电子含量

中图分类号: P182.52; P183.5; P228.42

自 2000 年 5 月 1 日 SA 政策被取消以后, 电离层便成为了单频接收机定位和导航的最大误差源, 在太阳活动强烈的年份, 电离层延迟误差可达到 100 m 以上^[1], 因而必须仔细改正。电离层延迟误差的大小取决于总电子含量 (total electron content, TEC), 因此研究 TEC 的变化规律对于建立精确的电离层改正模型具有十分重要的意义。电离层 TEC 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^[2]。电离层 TEC 的变化与多种因素有关, 首先由于电子密度与大气所吸收的太阳辐射能量有关, 而某处所吸收的太阳辐射能量又与地方时有关, 所以 TEC 是地方时的函数, 它将随地球自转作周日变化。其次, 由于太阳的辐射能量与太阳活动程度有关, 因此 TEC 也和太阳活动情况一样作周期为 11 a 的周期性变化。另外, 地球上吸收的太阳辐射能量显然还取决于地球与太阳间的相对位置, 故 TEC 还将随着地球绕日公转而产生季节性变化^[3]。

由于电离层的色散效应, 因而利用 GPS 双频观测数据为研究 TEC 的变化规律提供了一条有效的途径。CODE 利用全球 200 个左右 IGS 跟踪站的观测数据每 2 h 提供一次全球电离层分布

图, 它采用 15 阶的球谐函数来表示天顶方向的 TEC, 并将接收机和卫星的硬件延迟在 1 d 内当作常数处理, 从而获得绝对的 TEC 值。Goldovsky 等人研究了电离层 TEC 的高频 (电离层闪烁)、中频 (周日和季节) 和低频 (11 a) 变化, 但没有考虑硬件延迟的影响^[4]。Warnant 等人将电离层 TEC 看成纬度和地方时的多项式函数获取卫星和接收机的硬件延迟, 得到绝对 TEC, 从而研究了比利时布鲁塞尔地区电离层 TEC 的季节变化^[5]。萧佐等人研究了电离层 TEC 的周日变化^[2,6]。本文利用 Georgiadiou 模型^[7], 将天顶方向的 TEC 看作纬差和太阳时角差的函数, 获取 GPS 系统硬件延迟, 从而获得绝对 TEC, 利用北京 IGS 站的 GPS 观测资料研究电离层 TEC 的季节性变化。

1 获取绝对 TEC 的方法

GPS 两个频率的卫星信号是在卫星钟的控制下生成的, 然而这两个频率的信号从生成到离开天线是有一定时间延迟的, 由于经过的线路不同, 它们所产生的时间延迟也不相同, 这种时间延迟间的差值叫作卫星硬件延迟偏差。同样也存在

收稿日期: 2006-01-05。

项目来源: 辽宁工程技术大学地理空间信息技术与应用实验室开放研究基金资助项目 (2005010); 中国矿业大学青年科研基金资助项目 (2005A031); 中国矿业大学科技基金资助项目 (2005B020)。

接收机硬件延迟偏差。由于卫星硬件延迟偏差和接收机硬件延迟偏差一般很难分离,将其合称为GPS系统硬件延迟偏差^[2]。在计算TEC过程中,若不消除这一偏差的影响,卫星硬件延迟和接收机硬件延迟将有可能分别造成±3 ns和±10 ns的误差^[8],考虑这一误差因素进行TEC研究才更有意义。

由于GPS系统硬件延迟偏差的值并不是长期不变的,因而很难精确确定。通常的做法是把这些偏差值当作待估参数引入观测方程,通过平差计算把电离层模型的系数和这些偏差参数一并解出。采用Georgiadiou电离层模型获取GPS系统硬件延迟的表达式为^[3,7]:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^m E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (S - S_0)^k + 9.52437B \cos z$$

$$= 9.52437(P_2 - P_1) \cos z \quad (1)$$

式中, φ_0 为测区中心点的地理纬度; 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, $S - S_0 = (\lambda - \lambda_0) + (t_1 - t_0)$; λ 为信号路径与单层交点的地理经度; t_1 为观测时刻; E 为模型系数。 P_1 和 P_2 为伪距观测值; B 为GPS系统硬件延迟偏差换算为距离后的值(m); z 为卫星在电离层星下点处的天顶角。

获取GPS系统硬件延迟偏差后,绝对TEC可表示为:

$$TEC = 9.52437(P_2 - P_1 - B) \quad (2)$$

TEC以TECU(10^{16} 个电子/ m^2)为单位。为便于研究TEC的变化规律,常采用天顶方向的总电子含量(VTEC)来进行讨论:

$$VIEC = 9.52437(P_2 - P_1 - B) \cos z \quad (3)$$

图1是利用2004年1月14日北京房山IGS站(BJFS)的GPS观测数据,考虑GPS系统硬件延迟偏差前后获得的VTEC周日变化图。未考虑硬件延迟偏差时,由于硬件延迟偏差对VTEC的影响较大,因而掩盖了TEC随时间的变化。考虑硬件延迟偏差后,周日变化规律比较明显。

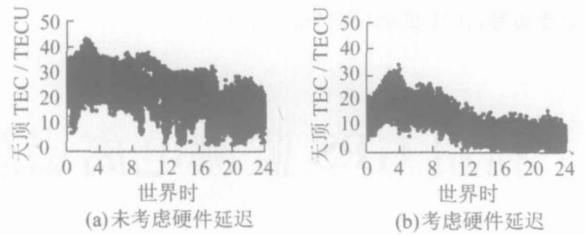


图1 电离层VTEC周日变化
Fig. 1 Diurnal Variation of Ionospheric VTEC

2 电离层TEC的季节性变化

太阳活动的周期为11 a,2000年为太阳活动高峰期,2004年是太阳活动平稳年,为了反映电离层TEC在太阳活动强度年份和太阳活动平稳年份的季节性变化规律,利用BJFS站的GPS观测数据分别计算了2000年和2004年各个不同月份的TEC值。为了便于反映变化趋势,每月的TEC曲线由当月的14日、15日、16日3 d的TEC周日变化取平均值获得。

图2和图3分别描述了2000年和2004年北京地区电离层TEC的变化情况。可以看出,每个季节的电离层TEC表现出较强的相关性。2000年观测到的TEC明显高于2004年的TEC值,由于2000年是太阳活动高峰期,说明电离层TEC的大小在很大程度上取决于太阳的活动强度。电离层TEC白天变化幅度大,可近似看成余弦波中等的部分;而夜晚的电离层TEC变化幅度小,可以近似看成一个常数。为了更加直观地分析TEC的季节变化趋势,本文计算了每月电离层TEC的平均值和最大值。

图4和图5分别描述了电离层TEC的每月平均值和最大值,从中可以得出以下结论。

- 1) 2000年的TEC月平均值和最大值均为2004年的2倍多,说明电离层TEC受太阳活动周期的影响大。
- 2) 2000年TEC月平均值变化幅度较大,从

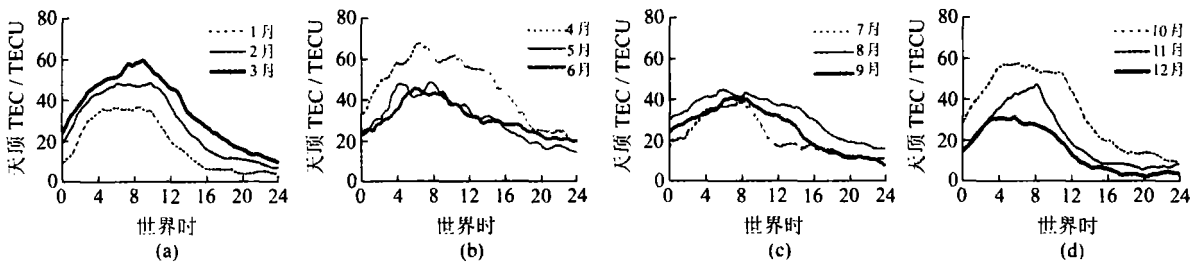


图2 2000年北京地区电离层TEC季节变化图

Fig. 2 Monthly Vertical TEC at Beijing During 2000

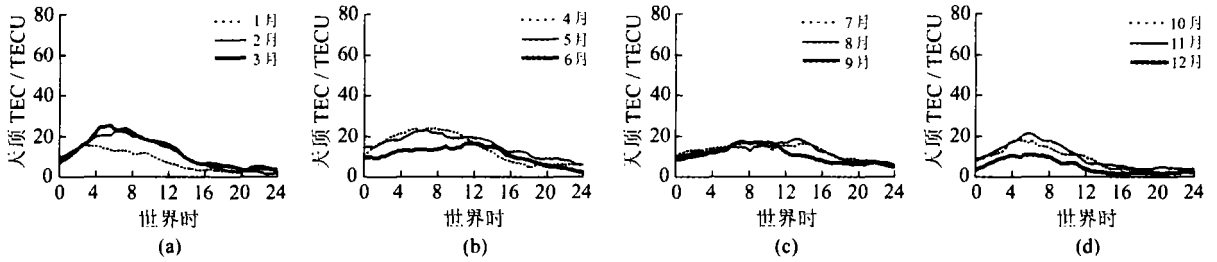


图 3 2004 年北京地区电离层 TEC 季节变化图

Fig. 3 Monthly Vertical TEC at Beijing During 2004

12 月的 15TECU 到 4 月的 45TECU, 增加了 2 倍。而 2004 年变化幅度不大, 增幅最大为 10TECU。

3) 2000 年和 2004 年 TEC 的最大值均发生在 3 月和 4 月, 最大值分别达到 68TECU 和

25TECU。

4) 从 6 阶多项式拟合的结果来看, 电离层 TEC 呈现季节变化的趋势比较明显, 太阳活动高峰年和太阳活动平稳年 TEC 的季节变化趋于一致。

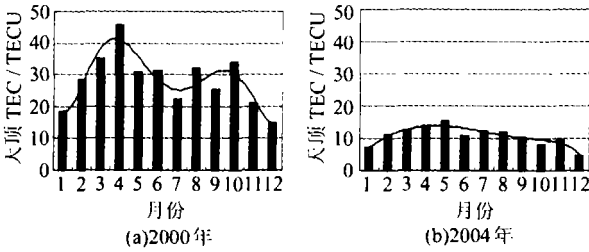


图 4 每月电离层 TEC 的平均值

Fig. 4 Monthly Averaged Values of Vertical TEC at Beijing

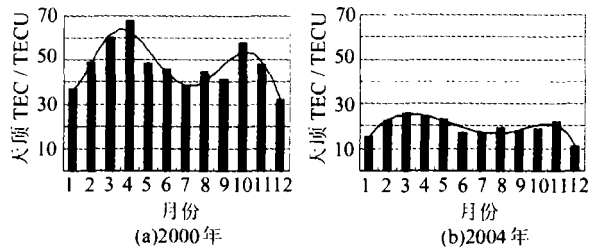


图 5 每月电离层 TEC 的最大值

Fig. 5 Monthly Amplitudes of Vertical TEC at Beijing

3 结 语

利用 GPS 双频观测数据为测量 TEC 提供了一条有效的途径。本文计算了 2000 年和 2004 年北京地区电离层 TEC 的变化情况, 发现电离层 TEC 的大小与太阳活动强度具有很强的相关性。从多项式的拟合结果来看, 2000 年和 2004 年电离层 TEC 季节变化的趋势是一致的, 3 月和 4 月达到最大值, 12 月达到最小值。本文仅计算了 BJFS 站的观测数据, 更大范围的 TEC 变化情况还有待进一步研究。

参 考 文 献

[1] Camargo P O, Monico J F G, Ferreira L D D. Application of Ionospheric Corrections in the Equatorial Region for L1 GPS Users[J]. Earth Planets Space, 2000, 52: 1 083-1 089

[2] 常青, 张东和, 萧佐, 等. GPS 系统硬件延迟估计方法及其在 TEC 计算中的应用[J]. 地球物理学报, 2001, 44(5): 596-601

[3] 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

[4] Goldovsky N, Luria M. Ionospheric Delay Contribution to the Uncertainty of Time and Frequency Measurements by One-way Satellite Time Transfer Method[J]. Measurement, 2004, 35: 353-362

[5] Warnant R, Pottiaux E. The Increase of the Ionospheric Activity as Measured by GPS[J]. Earth Planets Space, 2000, 52: 1 055-1 060

[6] 萧佐, 张东和. 通过 GPS 测量数据研究电离层电子总含量的逐日变化[J]. 空间科学学报, 2000, 20(2): 97-102

[7] Wild U. Ionosphere and Geodetic Satellite Systems: Permanent GPS Tracking Data for Modeling and Monitoring [D]. Zurich: Technische Hochschule Zurich, 1994

[8] Wilson B, Mannucci A. Extracting Ionospheric Measurements from GPS in the Presence of Anti-Spoofing[C]. ION GPS-94, Salt Lake City, 1994

第一作者简介: 蔡昌盛, 讲师, 博士生, 现主要从事 GPS 卫星定位技术理论和应用的教学与科研工作。
E-mail: cai_chang_sheng@sina.com

(下转第 465 页)

Background Rebuilding of Time Sequence Signal Base on Lebesgue Integral

LIU Fei^{1,2} WANG Xinzhou³ ZHANG Penglin¹ YU Xu⁴

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Department of Surveying, Heilongjiang Engineering Institute, 999 Hongqi Road, Harbin 150008, China)

(3 Hazard Monitoring & Prevention Research Center, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(4 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, 11A Datun Road, Chaoyang District, Beijing 100101, China)

Abstract: The paper presents a method for the rebuilding of the background based on Lebesgue integral. For the method, the time space is segmented by measure function. And from the segmentation of the time space, the energy of the signal is segmented too. Finally the aim of rebuilding the background is achieved.

Key words: signal analysis; time sequence; Lebesgue integral; background rebuilding

About the first author: LIU Fei, postgraduate, engaged in moving target detect and time series analysis.

E-mail: liufei_7711@126.com

(上接第 453 页)

Monitoring Seasonal Variations of Ionospheric TEC Using GPS Measurements

CAI Changsheng^{1,2} GAO Jingxiang¹ LI Zhenghang³

(1 School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Zhaishan, Quanshan District, Xuzhou 221008, China)

(2 Geomatics and Applications Laboratory, Liaoning Technical University, 47 Zhonghua Road, Fuxin 123000, China)

(3 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: Georgiadiou ionospheric model was adopted to determine satellite-plus-receiver differential delay. The satellite-plus-receiver differential delay was estimated as constant values for each day. Dual-frequency GPS pseudorange observables were used to compute vertical TEC (VTEC). All the monthly mean VTEC profiles were presented using GPS data of Beijing IGS site between 2000 and 2004. All the monthly averaged values and amplitudes of VTEC were also presented. The results indicate that the VTEC has seasonal dependency. The maximum VTEC values are observed in March and April, the minimum VTEC values in December. The seasonal variations trend is found to be the same after polynomial fitting between 2000 and 2004.

Key words: GPS; differential delay; ionosphere; TEC

About the first author: CAI Changsheng, Ph. D candidate. He is concentrated on the research and education in the GPS theory and application.

E-mail: cai_chang_sheng@sina.com