

# 中国电离层 TEC 现报系统

万卫星, 宁百齐, 刘立波, 丁锋, 毛田, 李国主, 熊波

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘要** 作为最重要的电离层参量之一, 电离层电子浓度总含量(TEC)可以通过当前广泛使用的全球定位系统(GPS)的信标进行观测. 我们在我国北起漠河、经北京和武汉、南到三亚四个观测站建立了 GPS 接收站, 经单站数据处理后将原始的单站 GPS TEC 观测数据上载到北京数据处理中心; 采用我们发展的经验基函数模式算法, 用实测数据估算格点 TEC 并提供给用户, 同时生成覆盖中国疆域的 TEC 地图并在因特网上实时发布. 这一电离层 TEC 现报系统是我国首个类似的技术系统, 在观测站布局和 TEC 地图算法上有所创新. 该系统已用于实时监测我国电离层环境, 并可为我国卫星定位导航和测控等技术系统的电波修正提供实测电离层数据.

**关键词** GPS 观测, TEC 算法, 电离层现报

**中图分类号** P35

**文献标识码** A

**文章编号** 1004-2903(2007)04-1040-06

## Nowcasting the Ionospheric Total Electron Content over China

WAN Wei-xing, NING Bai-qi, LIU Li-bo, DING Feng,

MAO Tian, LI Guo-zhu, XIONG Bo

(*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

**Abstract** The total electron content (TEC), as one of the most important ionospheric parameters, can be observed from the global positioning system (GPS) which are used throughout the world. For monitoring the ionospheric TEC over China, we set up four GPS stations distributed from the north most place, Mohe, through Beijing and Wuhan, to the south most location, Sanya, of China. After processing in each station, the original GPS TEC data are uploaded to the data center in Beijing. We then estimate the grid TEC data with a newly developed algorithm based on the model of the empirical base functions. The TEC maps which may cover the whole China are finally produced and provide in the website <http://space.iggcas.ac.cn/>. The presented system has been used for nowcasting the ionospheric TEC over China.

**Keywords** GPS observation, TEC estimation, ionospheric nowcasting

### 0 引言

描述电离层状态和特征的电离层参量, 同时又反映电离层对无线电波传播的影响. 传统的电离层电波传播问题主要涉及高频波段, 主要的电离层参量如峰值浓度  $N_mF_2$  (其平方根正比于电离层临界频率  $f_oF_2$ ), 反映了高频电波在电离层中的反射传播特性. 事实上,  $f_oF_2$  的意义是, 以寻常波模式在垂直方向传播时, 高频电波能被电离层反射的最大频

率. 因此  $f_oF_2$  很容易从高频无线电垂直探测中获取, 反过来又能应用于电离层高频传播的工程问题, 如高频通信、广播中的频率选择. 随着人造卫星上天, 涉及电离层电波传播的无线电工程问题突破了传统的高频波段, 大量的星地信息传输采用了超高频及以上无线电波段. 这些频段的无线电波在电离层中以透射传播为主, 相应的出现了电子浓度总含量 TEC (Total Electron Content) 这一新的重要电离层参量. TEC 参量与电离层引起的无线电波传播

**收稿日期** 2007-03-10; **修回日期** 2007-05-20.

**基金项目** 中科院创新方向性项目(kzcx3-sw-144), 国家重点基础研究发展计划(2006CB806306)和国家自然科学基金(40636032)联合资助.

**作者简介** 万卫星, 男, 1958 年生, 博士, 研究员, 从事空间物理学研究, 主要研究领域为电离层物理和电离层电波传播研究. (E-mail: wanw@mail.iggcas.ac.cn)

的附加时延成正比,因此既可以从星地无线电探测中获得,同时又能直接服务于星地无线电波传播的工程技术,如卫星定位导航的电波修正等。

实验探测中,通过无线电卫星信标(satellite beacon)的地面观测获取电离层 TEC 参量,是主要的和常用的 TEC 探测技术,例如,测量子午卫星系统(NNSS)信标的微分多普勒频移<sup>[1]</sup>和同步卫星信标的法拉第旋转<sup>[2]</sup>效应,可以分别得到电离层 TEC 的空间分布和时间变化。随着全球定位系统(GPS)的广泛使用,测量 GPS 卫星信标的伪码时延和载波相位时延获取 TEC,成为当前电离层 TEC 探测的主流技术<sup>[3,4]</sup>。GPS 星座处于高轨道(约 20200km),运行周期约 12 小时,TEC 测量对应的电离层观测点有百米/秒量级的运动速度,这样观测到的 TEC 同时随时间和空间变化,使问题的复杂性大大增加,这是利用 GPS 观测研究电离层和用于工程中电波修正时必须解决的课题之一。尽管如此,基于 GPS 的 TEC 观测的优点十分突出,即卫星星座多,接收站分布广泛,可以以相当高的时空分辨率实现大范围乃至全球的电离层探测。

自 GPS 建成运行以来,许多电离层工作者投入到 GPS TEC 的探测原理与数据处理方法的研究中,取得了大量的成果<sup>[4~10]</sup>。其中,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)等机构分别完成了全球电离层地图 GIM(global ionospheric map)算法,并事后提供基于国际 GPS 服务中心(IGS)的全球 GPS 观测站数据的 GIM 产品。基于上述工作还建立了全球电离层 TEC 准时实现报系统,并在因特网上发布全球电离层 TEC 地图。此外,美国、澳大利亚、日本、欧洲等国家和地区都建立了实时性更好、精度更高的地区性 TEC 现报系统<sup>[11~14]</sup>。

近年来,国内很多单位纷纷开展了的 GPS TEC 的观测研究与工程应用工作<sup>[15~15]</sup>,其中,中科院地质与地球物理研究所(IGGCAS)开发的我国首个覆盖全境的 TEC 现报系统(以下简称 IGGCAS 系统),其框架如图 1 所示。IGGCAS 系统主要由 3 个部分构成:(1)观测站及单站数据实时处理结点:利用漠河、北京、武汉和三亚四个观测站的 GPS 观测,通过开发 GPS 观测数据的单站实时处理软件,收集和计算 TEC 及时数据,再上载到北京 IGGCAS 的数据处理中心;(2)系统数据处理中心:采用新发展

TEC 地图快速算法,对各观测站上载的数据进行处理,产生覆盖我国疆域的 TEC 现报产品,包括计算格点 TEC 数据和生成 TEC 地图;(3)用户与发布平台,将格点 TEC 数据提供给特定用户,将 TEC 地图在因特网上实时发布(网址:<http://space.iggcas.ac.cn/>)。

本文下面针对 IGGCAS 系统的观测站布局与单站观测数据处理、TEC 地图算法、TEC 现报的发布等内容,简单介绍该系统的工作原理与技术特点,在此基础上对该系统的进一步发展提出建议与展望。

## 1 观测站与单站数据处理

中科院地质与地球物理研究所的空间环境观测链北起我国最北端的漠河(MH),经北京(BJ)和武汉(WH),南至我国领土中最南端的三亚(SY),目前由 4 个国内观测站组成,大致沿 120°E 子午线分布,如图 2 所示。近年来,我们在上述 4 个观测站中设置了双频 GPS 接收机,主要目的是监测我国电离层 TEC 的分布与变化。根据 GPS 星座的分布,上述 4 个站的接收机一般情况下均可接收到 6~12 颗 GPS 卫星的信号,因而同一时刻观测链上可同时在 30 余个观测点上测量电离层 TEC。为了提高 TEC 测量的可靠性与精度,我们将卫星仰角限制在 12°以上,此时各观测站的在电离层高度(400km)上的观测范围如图 2 中的圆圈所示。从图中可以看出,现有的 IGGCAS 系统中的 4 个观测站能很好的覆盖我国东部及沿海地区,可以对这些区域的电离层 TEC 参量进行直接现报。对我国西部广大地区的电离层 TEC 参量而言,目前的系统只能通过外推进行“间接”现报,相关的方法及改进措施将在本文第 2、4 两节中介绍。

将 IGGCAS 系统中各站的 GPS 接收机的采样率设置为每 30 秒一次,同时接收所有可能通道的 GPS 卫星信号,测量两个频率(L1、L2)的伪码和载波相位时延,并解码 GPS 星历信息。利用我们开发的单站 GPS 数据实时处理软件,在每一观测站对每一接收通道,分别从伪码时延和载波相位时延两种观测数据中计算出相应的两种斜向 TEC,从 GPS 星历信息中计算每一次观测所对应的各通道卫星视线的仰角、方位角。通过因特网将这些参数上载到位于北京的 IGGCAS 数据处理中心,用于进一步计算格点 TEC 数据并生成 TEC 地图。

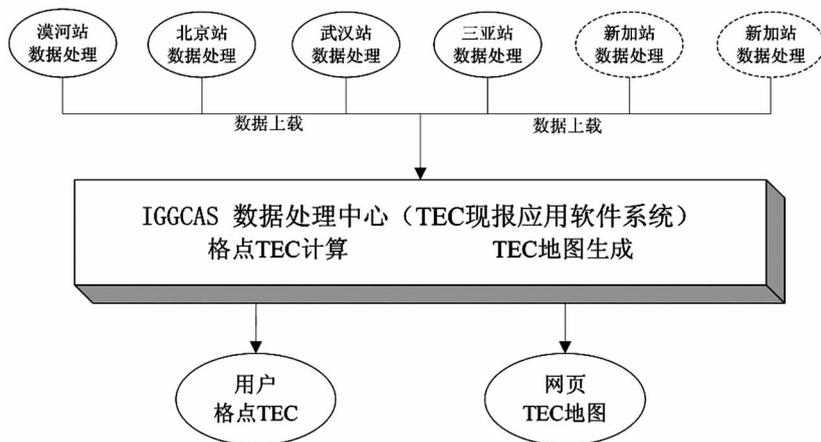


图1 IGGCAS系统的组成. 包括三个主要部分: 观测站及单站数据实时处理结点; 系统数据处理中心; 用户与发布平台  
 Fig.1 Framework of the IGGCAS TEC nowcasting. The system consists of three parts: observation, data center and website

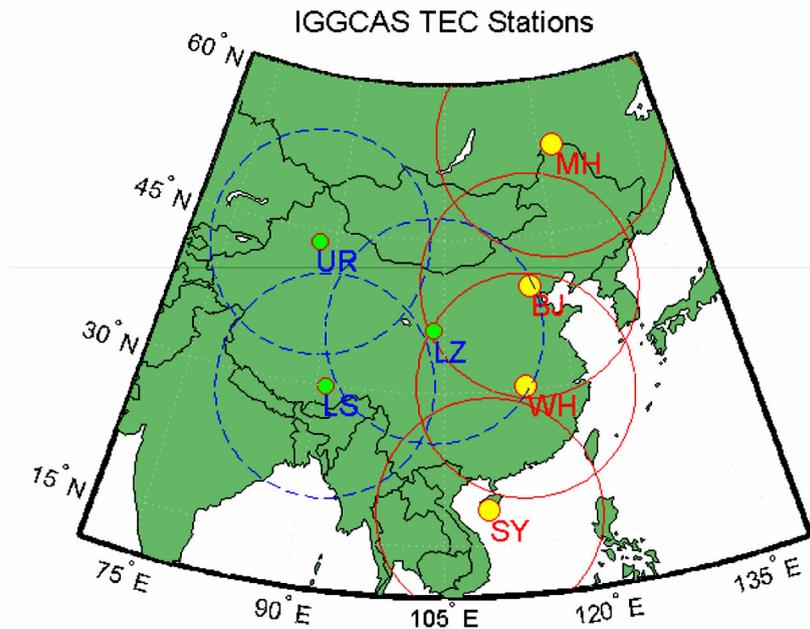


图2 IGGCAS TEC 现报系统的现有的观测站及计划扩充的观测站的分布. 现有观测站分布于中国东部的漠河(MH)、北京(BJ)、武汉(WH)和三亚(SY)构成的子午链上. 计划扩充的观测站分布于中国西部的兰州(LZ)、乌鲁木齐(UR)和拉萨(LS). 图中画出的圆圈代表每一观测站在仰角12度以上时在电离层高度上(400km)的观测覆盖范围.  
 Fig. 2 Station configuration of IGGCAS TEC nowcasting. The current network consists of 4 stations at Mohe (MH), Beijing (BJ), Wuhan (WH) and Sanya (SY). It is suggested to add three stations at Lanzhou (LZ), Urumchi (UR) and Lhasa (LS).

## 2 TEC 地图的计算

根据电离层与太阳辐射的密切相关性,我们采用所谓“日固坐标系”,将通常的 3 维 TEC 分布  $TEC(Lat, Lon, UT)$  缩并为 2 维分布  $TEC(Lat, LT)$ ,其中,  $LT=UT+Lon/15$ . 这里,  $Lat, Lon$  分别为地理纬度和经度(以度为单位),  $UT, LT$  分别为世界时和当地时(以小时为单位). 采用日固坐标系的主要优点是:

(1)通过降维简化了计算,同时提高了计算结果的稳定性;

(2)充分利用 GPS 观测中的高时间分辨率(30 秒)弥补空间分辨率的不足,从而可能提高格点 TEC 的估算精度;

(3)对 IGGCAS 系统而言,为利用提前观测到的位于我国东部的观测站上空的 TEC“现报”当前尚无实际观测的我国西部上空的 TEC 提供了极大的便利.

与大多数 TEC 地图算法一样,为了从无规观测点上的 TEC 观测值估算格点 TEC 值,我们先以一

定的基函数簇  $B_k(Lat, LT)$  将 TEC 分布展开成级数,即

$$TEC(Lat, LT) = \sum_k C_k B_k(Lat, LT), \quad (1)$$

通常的 TEC 地图算法选择基函数簇  $B_k(Lat, LT)$  为某种先验的解析函数类,如 GIM 中选择的球谐函数,以及局域 TEC 地图系统中的样条函数、富里叶级数乃至各类多项式等. 在 IGGCAS 系统中,我们放弃传统的先验基函数方法,采用了来自对历史观测数据进行统计分析得到的经验基函数  $E_k(Lat, LT)$  代替  $B_k(Lat, LT)$ . 经验基函数不具有解析形式,但从统计上讲,用经验基函数展开 TEC 分布的收敛速度远远快于其他任何种类基函数展开的收敛速度. 因此,由经验基函数构建的 TEC 分布模式具有计算快速精确与外推性能良好的明显优点. 在 IGGCAS 系统中,我们首先利用 1996~2004 年期间我国及周边国家与地区的 GPS 观测数据,通过统计分析获得了一组经验基函数  $E_k(Lat, LT)$ ,其前 4 阶分布如图 3 所示.

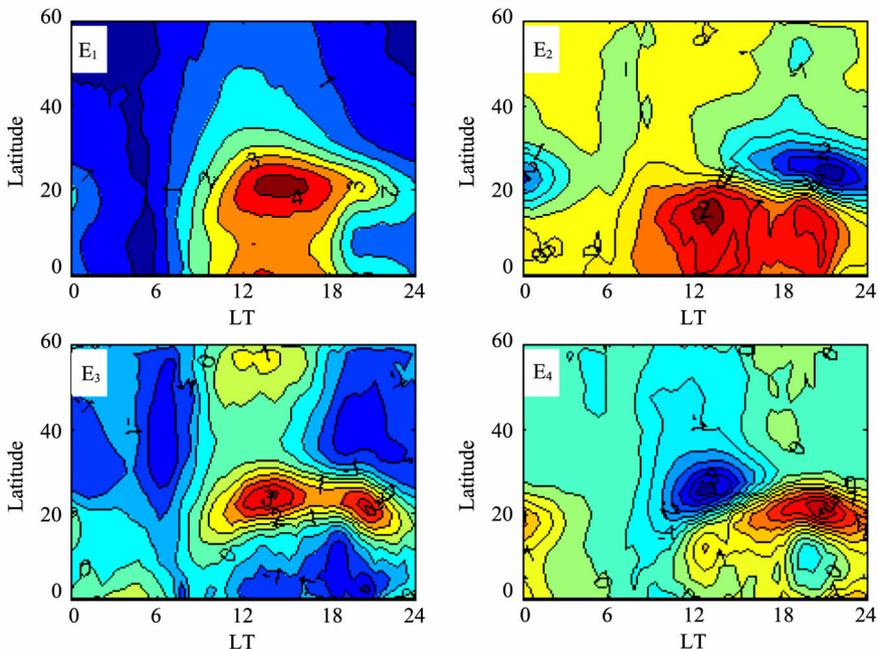


图 3 IGGCAS 系统中 TEC 分布模式使用的前 4 阶经验基函数的分布. 这些基函数来自于对 1996~2004 年期间中国及周边地区的 GPS 观测数据的统计分析

Fig. 3 The first 4 rank base functions used in IGGCAS TEC nowcasting

在 IGGCAS 系统中,计算 UT 时刻的格点 TEC 值的步骤是:首先,以(1)作为观测方程,利用 UT 时刻之前两小时内的各观测站各通道的 TEC 观测值带入(1)式的左边,将图 3 所示的经验基函数  $E_k(Lat, LT)$  代替(1)式右边的  $B_k(Lat, LT)$ ,并以适当阶数截断(1)式右边的级数,采用最小二乘法估计出级数的系数  $C_k$ . 其次,将(1)作为重构方程,利用估算的  $C_k$  和图 3 所示的  $E_k(Lat, LT)$  计算出 TEC 随纬度和当地时间的分布  $TEC(Lat, LT)$ . 最后,利用关系式  $Lon=15(LT-UT)$ ,构建出当前 UT 时刻 TEC 随纬度和经度的分布  $TEC(Lat, Lon)$ ,即格点 TEC 数据,并生成 TEC 地图.

### 3 TEC 现报产品及其发布

采用上述算法和 4 个观测站的观测数据,IGGCAS 系统实时产生格点 TEC 数据和 TEC 地图两种现报产品. 产品的覆盖范围为:  $5 \sim 55^\circ N$ ,  $70 \sim 140^\circ E$ , 覆盖了我国全境,包含电离层赤道谷、北驼峰和部分中纬区域;更新率为每 15 分钟更新一次. TEC 格点数据产品提供给特定用户,用于科学研究和工程任务;TEC 地图则在因特网上实施发布,网址为: <http://space.iggcas.ac.cn/TEC.asp>. 图 4 给出了在 IGGCAS 系统网页上实时发布的一次 TEC 地图现报的实例.

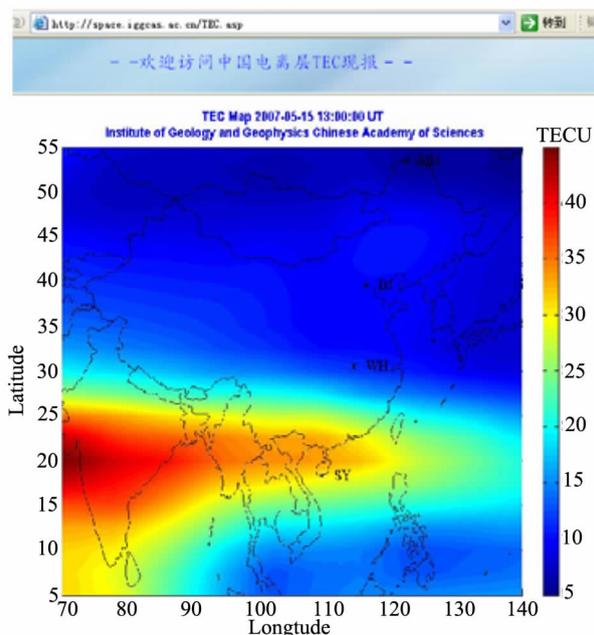


图 4 IGGCAS 系统的 TEC 地图产品发布网页  
Fig. 4 Website of the IGGCAS TEC nowcasting

### 4 建议与展望

本文介绍了我国首个覆盖全境的 TEC 现报系统(IGGCAS 系统)的主要工作原理与技术特点. 该系统利用位于我国东部  $120^\circ E$  子午线附近的漠河、北京、武汉和三亚 4 个 GPS 观测站的 GPS TEC 观测数据,采用统计分析获得的经验基函数所构建的分布模式,在日固坐标系下估算覆盖我国疆域的格点 TEC 数据并生成 TEC 地图,最后将 TEC 现报产品提供相关用户和网上实时发布. IGGCAS 系统在只使用 4 个观测站的条件下,完成了同时涵盖电离层赤道谷、峰与中纬地区等复杂电离层环境的 TEC 现报. 该系统在观测站布局、基于经验基函数模式的 TEC 地图算法等方面均具有一定创新,保证了现报产品良好的精度和稳定性.

目前的 IGGCAS 系统的观测点的覆盖了我东部与沿海地区,但不及我国西部的广大区域,这是该系统进一步发展完善过程中必须考虑的问题. 我们通过采用日固坐标系(以东部观测预测西部情况),以及来自统计分析的经验基函数模式(宜于外推)等技术,克服了当前条件下对我国西部电离层的现报问题,使现报的 TEC 地图具有良好的精度和较高的 LT 分辨率,但 UT 分辨率较低(2 小时). 为此,我们建议,通过适当增加西部观测站数量,例如,增加兰州、新疆和拉萨三个 GPS 观测站,即可使观测点完全覆盖我国疆域,见图 2 中虚线显示的圆圈. 如此将可进一步提高我国电离层 TEC 现报的精度,并大大改善现报的 UT 分辨率,对研究和预报电离层暴等灾害性空间天气有着重要意义.

值得指出,IGGCAS 系统中的一个重要设计理念是系统对观测数据的开放性. 对于新增加的观测站,只需要将观测数据以与系统兼容的格式上传到系统中,系统即可自动计入新增观测数据于格点 TEC 的计算和 TEC 地图的生成. 这一优点将十分有利于系统观测站的进一步扩充.

### 参 考 文 献 (References):

- [1] Leteinger R, Hartmann G K, Lohmar F J, *et al.* Electron content measurements with geodetic Doppler receivers[J]. Radio Science, 1984, 19(3):789~797.
- [2] Titheridge J E. Determination of ionospheric electron content from the Faraday rotation of geostationary satellite signals[J]. Planet. Space Sci, 1972, 20(3).
- [3] Coco D. GPS-satellites of opportunity for ionospheric monitoring[J]. GPS world, 1991, 10: 47~50.

- [4] Jakowski N. TEC monitoring by using satellite positioning systems. In *Modern Ionospheric Science*[J]. EGS Katlenburg-Lindau, FRG 1996, 371~390.
- [5] SardFon E, Rius A, Zarraoa N. Estimation of the transmitter and receiver differential biases on the ionospheric total electron content from global positioning system observations[J]. *Radio Science*, 1994, 29:577~586.
- [6] Mannucci A J, Wilson B D, Yuan D N, *et al.* A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements[J]. *Radio Science*, 1998, 33:565~582.
- [7] Mannucci A J, Iijima B A, Sparks L, *et al.* Assessment of global TEC mapping using a three-dimensional electron density model[J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 1999, 61:1227~1236.
- [8] Orús R, Hernández-Pajares M, Juan J M, *et al.* Improvement of global ionospheric VTEC maps by using kriging interpolation technique[J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2005, 67: 1598~1609.
- [9] Hernández-Pajares M, Juan J M, Sanz J. New approaches in global ionospheric determination using ground GPS data[J]. *J. Atmos and Sol. Terr. Phys.*, 1999, 61:1237~1247.
- [10] Feltens J, Schaer S. IGS products for the ionosphere. In: *Proceedings of the IGS Analysis Center Workshop, ESA/ESOC Darmstadt*[J]. Germany, 1998, 225~232.
- [11] Juan J M, Rius A, Hernández-Pajares M, *et al.* A two-layer model of the ionosphere using global positioning system data [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, 24:393~396.
- [11] Wielgosz P, Grejner-Brzezinska I D, Kashani A I. Regional Ionosphere Mapping with Kriging and Multiquadric Methods [J]. *J. Global Positioning Systems*, 2003, 2(1): 48~55.
- [13] Meggs R W, Mitchell C N, Spencer P S J. A comparison of techniques for mapping total electron content over Europe using GPS signals[J]. *Radio Sci.*, 2004, 39.
- [14] Saito A, Fukao S, Miyazaki S. High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(16):3079~3082.
- [15] Wan W X, Ning B Q, Yuan H, *et al.* TID observation using a short baseline network of GPS receivers[J]. *Acta Geodyn. Geophys. Hung.*, 1997, 32(3-4):321~327.
- [16] Ping J, Kono Y, Matsumoto K, *et al.* Regional ionosphere map over Japanese Islands[J]. *Earth Planet. Space*, 2002, 54: 13~16.
- [17] Ma G, Maruyama T, Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan[J]. *Ann. Geophys.*, 2003, 21: 2083~2093.
- [18] 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.
- [19] 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, 41(5):596~601.
- [20] Mao T, Wan W, Yue X, *et al.* A Climatology model of TEC over China[J]. *Radio Sci.* (inpress), 2007.
- [21] Wang M, Ding F, Wan W X, *et al.* Monitoring global traveling ionospheric disturbances using the worldwide GPS network during the October 2003 storms *Earth Planets Space*, 2007, 59:1~13
- [22] Ding F W, Wan B N, Wang W. Large scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS TEC during the magnetic storm of October 29-30, 2003, *J. Geophys. Res.*, 112, doi:10.1029/2006JA012013, 2007, in press.