

磁暴期间电离层扰动的 GPS 台网观测分析^{*}

夏淳亮^{1,2} 万卫星¹ 袁 洪³ 余 涛⁴

¹(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

²(中国科学院武汉物理与数学研究所)

³(中国科学院软件研究所)

⁴(中国气象局国家卫星气象中心)

摘 要

给出了一种利用GPS台网观测获取TEC快速变化的计算方法,并将该方法用于东亚-澳大利亚扇区的GPS台网观测数据,分析了2000年7月14—18日大磁暴期间的电离层响应,揭示出电离层暴期间赤道异常峰的压缩和移动等特性.计算结果表明,在站点分布不均匀、原始观测数据不足且随时间跳变等多种不利因素的影响下,这种新的算法仍能保持很好的计算稳定性,并能快速地提取给定时空范围内的三维TEC短时变化的特征,适用于研究电离层暴等情况下引起的TEC扰动.

关键词 GPS; TEC; 电离层暴

1 引言

电离层电子浓度总含量 (Total Electron Content, TEC), 不仅是描述电离层等离子体状态的重要参量, 也是卫星导航、定位、授时及遥感、遥测等空间应用工程中颇受关注的电离层参量. 近年来, 随着全球定位系统 (GPS) 的出现及全球 GPS 观测台网的建立, 提供了十分有效的观测全球范围 TEC 的分布与变化的手段. 基于 IGS (International GPS Service) 的全球 GPS 观测台网, 美国喷气动力实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 及欧洲卫星定轨中心 (Center for Orbit Determination in Europe, CODE) 已经分别研制出全球 TEC 现报系统, 并实现了 TEC 现报结果的网上准实时发布. 在 JPL 与 CODE 的 TEC 现报产品中均采用了球谐函数分布模式计算 TEC 的全球分布, 提供在日固坐标系和电离层单层模型下全球范围的各时段的 TEC 值^{[2],[3],**}.

JPL 和 CODE 提供的 TEC 的数据产品, 在表现 TEC 的全球大尺度分布与长时间变化模式方面十分有效^{**}, 然而, 在大多情况下, 特别是电离层扰动的观测研究中, 感兴趣的往往是局部的、短期的、突发性的 TEC 变化, 如暴时电离层扰动等, 这就需要采用特

^{*} 国家自然科学基金项目 (49974039) 和国家重点基础研究基金项目 (G2000078407) 共同资助

^{**} Schaer S. How to use CODE's global ionosphere maps. Internal report, Astronomical Institute, University of Berne, 1997

2003-10-16 收到原稿, 2004-05-08 收到修定稿

别的分析方法来针对这些现象进行处理. 许多文献也就这一点进行了研究, 目前已有多种针对短时 TEC 变化的数据分析方法^{[4]–[6]}, 如 Iijima 等人提出的针对 GPS TEC 数据采用 Kalman 滤波获得等效垂直 TEC 的方法^[4], 又如万卫星等人建立的针对磁暴期间数据的二维分析方法^[6], 这些方法都已取得了很多成果.

本文基于我国及周边国家的 GPS 观测网数据, 提出一种新的插值方法, 该方法利用最小二乘准则和采用稀疏矩阵等方法, 来获取具有较高时空分辨率的三维电离层 TEC 分布与变化. 在此基础上, 以 2000 年 7 月 14—18 日特大磁暴期间的数据为例, 分析得出此次磁暴引起的电离层暴演化过程中的一些特性. 结果表明, 本方法确实能弥补 JPL 等提供的大尺度 TEC 数据的不足, 精确、快速地反映出电离层暴期间局部地区 TEC 的扰动特性.

2 分析方法

采用电离层薄层模型, 从 GPS 信标的两个载频上的伪距观测量和载波相位观测量出发, 通过差分及平滑处理可以得到 GPS 接收站到 GPS 卫星间的电波路径上的电子浓度总含量观测量 $TEC_R^S(t)$ ^[7],

$$TEC_R^S(t) = \frac{1}{\sin E_R^S(t)} TECV_R^S(t) + B_R + B^S. \quad (1)$$

其中, $E_R^S(t)$ 为 t 时刻卫星 S 与接收机 R 之间的连线 (即电波射线) 与电离层质心高度面的交点 (通常称为穿透点) 处的射线仰角, $TECV_R^S(t)$ 为穿透点处的等效垂直 TEC, B_R 为当前台站的硬件误差值, B^S 为当前卫星的硬件误差值^[7], 通常认为在计算时段范围内同一卫星及同一接收机的硬件误差固定不变^[8]. 式 (1) 即为计算 TEC 的基础方程.

根据式 (1), 就可根据电波路径上的 TEC 和观测仰角, 解求穿透点处的等效垂直 TEC. 然而通常所感兴趣的、也是 TEC 现报系统比较实际的实现方式, 则是解求出研究范围内规则网格点位置上的电子浓度总含量. 为了求得给定时空网格点上的电子浓度总含量 TEC_i , 我们采用简单的就近插值方法. 根据式 (1) 可导出,

$$TEC_R^S(t) \cdot \sin E_R^S(t) = TEC_i + (B_R + B^S) \cdot \sin E_R^S(t). \quad (2)$$

其中, TEC_i 所对应位置为时空网格点阵中与时间 t 以及卫星 S 和接收机 R 所对应的穿透点最为接近的网格点. 式 (2) 给出了 GPS 网站的观测量 $TEC_R^S(t)$ 、 $E_R^S(t)$ 与待求量, 即网格点 TEC_i 、硬件误差值 B_R 、 B^S 之间的关系, 称为观测方程, 是估算网格点 TEC 的出发方程^[6].

为了保证计算过程的稳定性及减小误差, 在利用式 (2) 对 TEC 进行解算前, 应对计算量进行预处理. 首先, 应剔除因接收原因造成的有误数据 (如 GPS 记录数据中测量 TEC 为负值的部分); 然后, 对于计算量 $TEC_R^S(t)$ 要考虑因接收机周跳以及因接收周天之间数据不连续带来的影响; 对于计算量 $E_R^S(t)$ 要考虑计算范围的纬度位置对其的要求, 因若观测仰角太低的话, 测量 TEC 则会有很大误差, 本文的解算方法在中低纬地区选取的是大于 15° 仰角的观测量. 对于计算中决定待求量 TEC_i 的时空坐标的时空网格点阵的建立,

应考虑到 TEC 的随纬度经度变化特性、GPS 台站的分布情况和磁暴的发展规律及因网格过密而造成的误差等因素。同时为了使计算结果能更好地表现电离层 TEC 的局部的、短期的、突发性的变化特征, 网格点阵可根据情况的不同选取不同的时空间隔, 这一点也是本文所提供的方法与 JPL 和 CODE 所提供的采用不同阶数的球谐展开方程达到拟合 TEC 的不同精度的方法的基本区别之一。

在求解式 (2) 的过程中, 由 GPS 观测数据的性质决定了必须面对的两个困难: 一是由待求未知量数目较多带来的解算结果的误差与不稳定, 二是由 TEC 观测数据数量过于庞大造成的解算速度缓慢。本文中分别利用最小二乘法 (解算结果可靠)、稀疏矩阵解算法 (只存储非零元素, 节省大量的计算内存和计算时间) 来解决上述两个问题。

在具体的解算过程中, 式 (2) 中的就近插值也可用线性插值的方法代替, 利用离时空网格点最为接近的一些穿透点上的 TEC 值, 按照线性插值的方法得出对应网格点上的值。线性插值的好处在于, 网格点阵的 TEC 值会自动地按照插值范围内穿透点的疏密程度决定该范围内网格点上 TEC 解算值是否存在 (即线性插值可自动调整时空网格点阵的分布和疏密程度), 由此可更方便地提取磁暴期间 TEC 的突变特征, 减少因计算量和数据不足带来的误差。

3 特大磁暴期间的 TEC 分析

3.1 数据资料

2000 年 7 月 14 日在太阳 9077 活动区爆发了最近 10 年来最大的 X5 级特大耀斑, 在 7 月 13—14 日高纬地磁已经处于活动状态, 随后在 15—16 日出现了一次特大地磁暴。Dst 指数显示 (见图 1), 此次磁暴的急始出现在 15 日 1500 UT, 磁暴急始出现以后, Dst 指数迅速下降, 在 7 月 15 日 2200 UT Dst 达到最小值约 -300 nT, 磁暴主相持续 6 h, 恢复相持续 2—3 d^[9]。

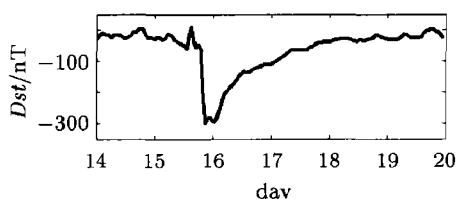


图 1 2000 年 7 月 14—20 日的 Dst 指数的变化

Fig.1 Variation of Dst index on July 14—20, 2000

利用上文介绍的基于 GPS 台网的 TEC 分析方法, 下面将分析这次特大磁暴期间的电离层 TEC 扰动, 所用资料来自位于中国 GPS 观测网及 IGS 在东南亚、澳大利亚的 38 个 GPS 观测站中的原始观测数据, 观测周期为 2000 年 7 月 14—18 日, 分辨率为 0.5 min. 我们将着重讨论暴时电离层赤道异常区的变化特性, 因此分析的是每天的 0900—1300 UT 时段的数据。

3.2 暴时 TEC 分布与变化

利用上文提到的分析方法, 由纬度 30°S — 50°N 、经度 95°E — 140°E 范围内 38 个台站的 GPS 数据, 得到了时空分辨率为经度 2.5° 、纬度 1° 、时间 1h 的电离层 TEC 等值线图, 如图 2 所示。

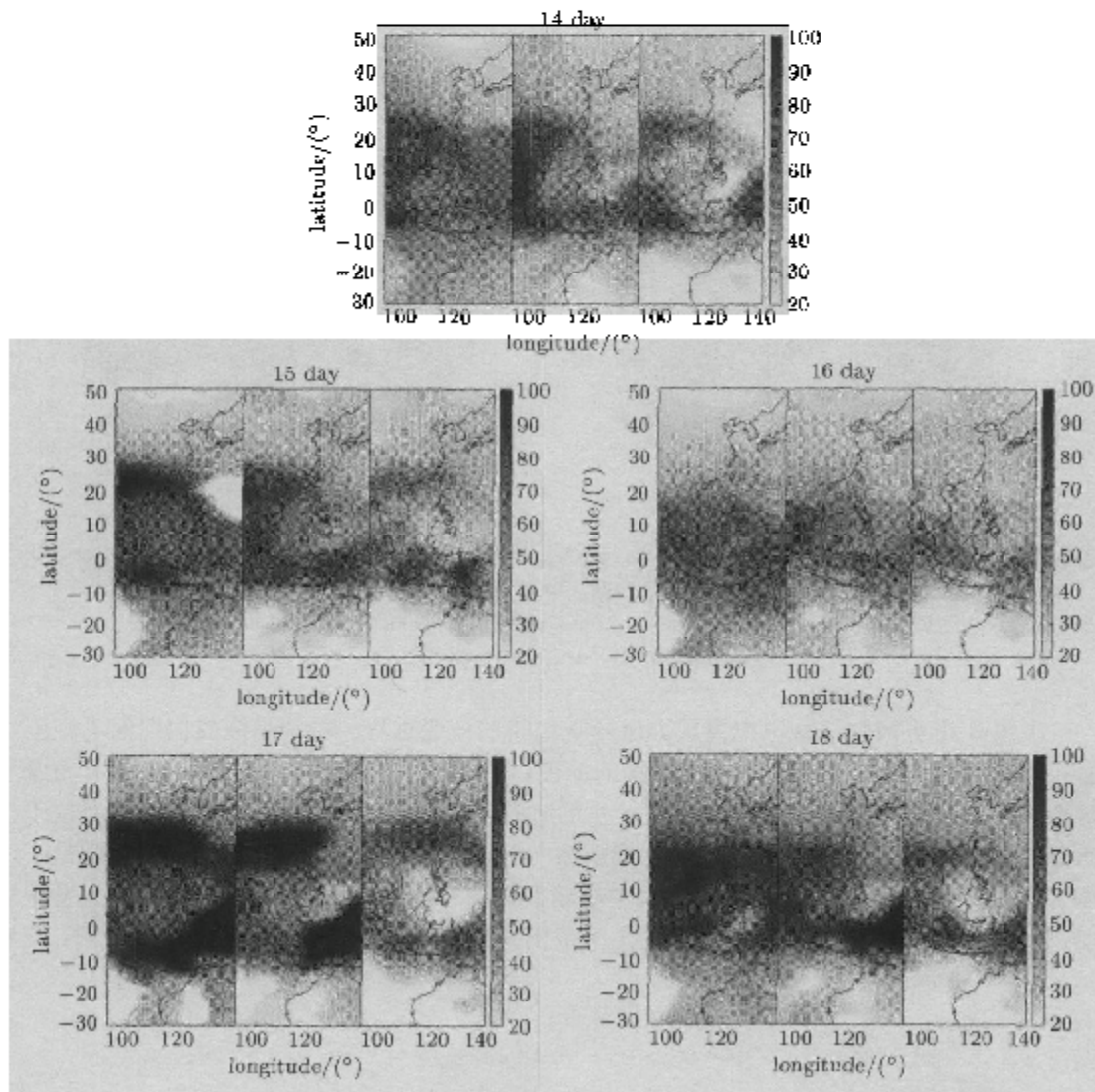


图 2 2000 年 7 月 14—18 日 0900, 1100 和 1300 UT 的 TEC 分布等值线图, 单位为 TECU

Fig.2 The TEC contours at 0900, 1100 and 1300 UT during July 14—18, 2000, unit: TECU

由图 2 可看出, 磁暴期间电离层赤道异常结构有所变化。在 15 日磁暴急始出现后南北半球的驼峰对称结构被破坏, 16 日赤道异常峰被压缩为单峰并向南半球偏移, 17 日恢复双峰结构, 但强度和范围增大, 18 日恢复正常形态^{[8, [13]]}。

为了进一步研究此次特大电离层暴的变化特性, 我们将比较平静的 14 日的电离层 TEC 值作为基准值, 算得 15—18 日的 TEC 变化值, 如图 3 所示。

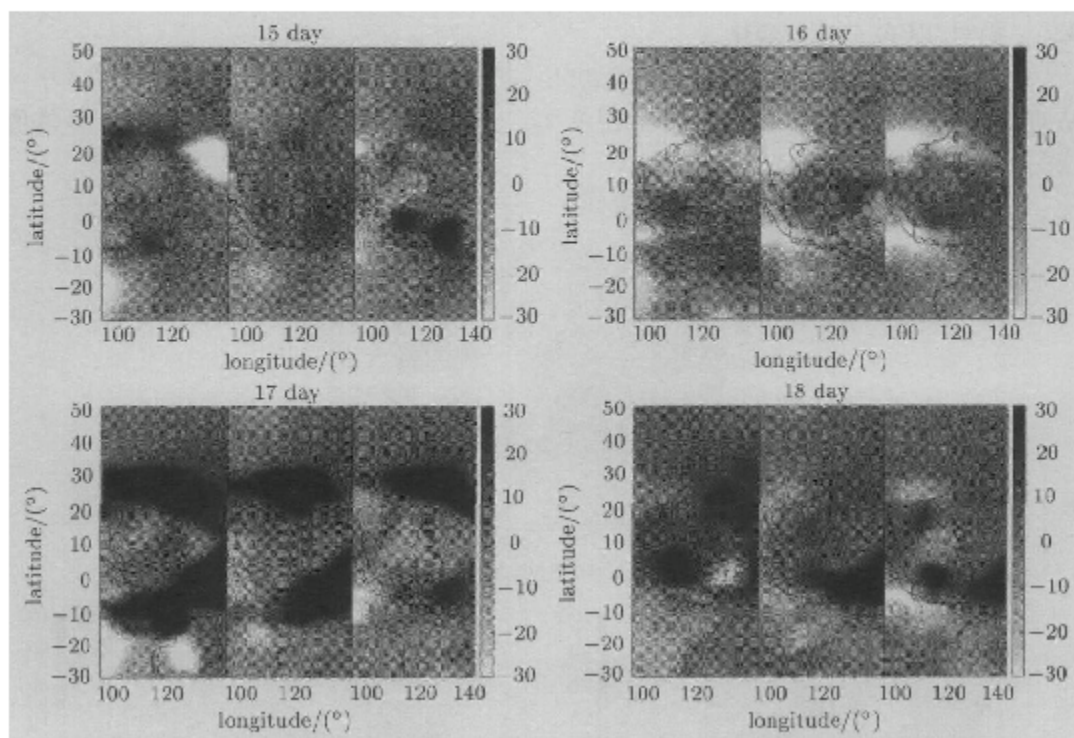


图3 2000年7月15—18日电离层TEC 0900, 1100和1300 UT相对于14日同一时间的TEC绝对变化的等值线图, 单位为TECU

Fig.3 The contours of the variations of TEC at 0900, 1100 and 1300 UT during July 15—18, 2000, unit TECU

由图3可更清楚地看出电离层赤道异常结构的演变过程,特别是恢复相期间单峰压缩和双峰增强。暴时电离层赤道异常峰的演变过程可产生极其复杂的电离层正暴和负暴两种情况。从图3可以看出,负暴主要发生的时间是:急始后第一日即16日,暴中心位于赤道异常峰中心处;15日存在较弱的由中纬向低纬发展的负暴。正暴主要发生时间是:第二日即17日,暴中心比赤道异常峰中心略向外偏移;16日的双峰间赤道地区也发生了一定规模的正暴;18日低纬地区发生了范围较大、强度较弱的正暴^{[9],[10]}。

4 结果与讨论

本文从电离层TEC现报分析的需要出发,给出了一种新的以最小二乘法为基础的分析方法,并以2000年7月14—18日的磁暴期间数据为例,分析了此次磁暴期间东亚-澳大利亚扇区的TEC的发展变化情况。

我们将本文提供的TEC计算方法所得到的结果与CODE提供的TEC数据结果进行比较发现,在大尺度范围内和总体趋势上本方法与CODE的结果一样,但是本方法则更能明显表征出磁暴的细节部分,特别是能明显反映出TEC清晰的精细结构及小尺度的短时变化。以本文的计算结果为例,在15日和17日赤道双峰异常变化(15日的双峰减弱,

17 日的双峰增强且距离拉开)、16 日双峰被压缩为单峰等变化情况,为 CODE 的 TEC 数据产品所不能显示的结果.对于本文提到的现报算法,网格点上的 TEC 值是与对应于每颗卫星的硬件延迟误差同时解算的,在分析了计算结果后我们发现,在磁暴的初始阶段(14—16 日)解求的硬件延迟较为稳定,而磁暴末期及恢复相(17—18 日)对应的硬件延迟则有较大的变化.此项结果与他人研究结果一致^[1],进一步证实了本文方法的可靠性.

本方法试算结果表明,在满足现报分析所需的时空分辨率的要求下,这种计算方法的结果较好地表征了 TEC 局部地域特征和随时间突变的情况,且计算速度较快,能反映出 TEC 的扰动分布情况.本文提出的算法,比起其他着重于分析 TEC 大尺度长时期变化的分析方法,能更有效、快速地得到如磁暴等非正常发生的短期 TEC 的剧烈变化的特征,为电离层 TEC 观测分析的一种有效方法,并可作为基于 GPS 网络观测的 TEC 现报系统的一种实方法.

参 考 文 献

- [1] Warnant R. Reliability of the TEC computed using GPS measurements-the problem of hardware biases. *Acta Geod. Geophys. Hung.*, 1997, **32**(3-4):451—459
- [2] Feltens J. Ionosphere maps — A new product of IGS. IGS summary, Proc. IGS Ana. Center Workshop, Silver Spring, U.S.A, 1996. 177—180
- [3] Schaer S. Mapping and predicting the earth's ionosphere using the global positioning system. *Geodatisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz*. Schweizerische Geodatische Kommission, Institut für Geodasie und Photogrammetrie, Eidg. Technische Hochschule Zurich, Switzerland, 1999
- [4] Iijima B A, Harris I L, Ho C M *et al.* Automated daily process for global ionospheric total electron content maps and satellite ocean altimeter ionospheric calibration based on Global Positioning System data. *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.*, 1999, **61**:1205—1218
- [5] Mannucci A J, Iijima B, Sparks L *et al.* Assessment of global TEC mapping using a three-dimensional electron density model. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1999, **61**:1227—1236
- [6] Wan W X, Liu L B, Yuan H *et al.* Very intense ionospheric storms observed with a GPS network. *Adv. Space. Res.*, 2003
- [7] Bánya L. Single station and single satellite method of GPS ionospheric data processing. *Acta Geod. Geophys. Hung.*, 1997, **32**(3):407—416
- [8] Chang Qing *et al.* A method for estimating GPS instrumental biases and its application in TEC calculation. *Chin. J. Geophys.*, 2001, **44**(5):596—601. in Chinese (常青等. GPS 系统硬件延迟估计方法及其在 TEC 计算中的应用. *地球物理学报*, 2001, **44**(5):596—601)
- [9] Wan Weixing, Yuan Hong, Liu Libo *et al.* The sudden increase in ionospheric total electron content caused by the very intense solar flare on July 14, 2000. *Sci. China (Series A)*, 2001, **31**(Supp):120—125. in Chinese (万卫星, 袁洪, 刘立波, 宁百齐. 2000 年 7 月 14 日特大耀斑引起的电离层 TEC 突然增强现象. *中国科学 (A 辑)*, 2001, **31**(增刊):120—125)
- [10] Zhang Donghe, Xiao Zuo *et al.* Observational study of ionospheric TEC during the magnetic storm on April 6—8, 2000. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(3):212—219. in Chinese (张东和, 肖佐等. 2000 年 4 月 6—8 日磁暴期间电离层 TEC 观测研究. *空间科学学报*, 2002, **22**(3):212—219)

AN ANALYSIS OF THE IONOSPHERIC DISTURBANCES DURING A MAGNETIC STORM OBSERVED WITH A GPS NETWORK

XIA Chunliang^{1,2} WAN Weixing¹ YUAN Hong³ YU Tao⁴

¹(*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

²(*Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences*)

³(*Institute of Software, Chinese Academy of Sciences*)

⁴(*National Satellite Meteorology Center, China Meteorology Administrator*)

Abstract

With a GPS network located in the East Asia and Australia sector, a analysis method to estimate the rapid variation of TEC is proposed and applied to the investigation of the ionospheric responses to the July 14—18, 2000 geomagnetic storm. The analyzed result reveals the perturbation structure around the geomagnetic equator during the storm. The temporal and spatial changes of TEC are obtained and discussed. The results manifest most of the information of the storm-time regional TEC variation in spite of the disadvantageous influences, such as the asymmetrical distribution of the GPS network, the shortfall of observation data, the discontinuous variety of data and etc. It is shown that the method we used is satisfactory in studying the small scale ionospheric disturbance such as the perturbations during ionospheric storms.

Key words GPS, TEC, Ionospheric storms