第 47 卷 第 2 期 天 文 学 报 Vol.47 No.2
2006 年 4 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Apr., 2006

电离层 TEC 对小耀斑的响应*

黄文耿 古士芬 陈艳红 马冠一 沈 华

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘要 利用国际 GPS 观测网 (IGS) 提供的多个台站的观测数据，分析了 M 级别以下的小、暗太阳耀斑对向阳面电离层 TEC 的影响. 利用传统分析方法的结果表明，从单条视线 (LOS) 观测数据得到的电离层 TEC 及其时间变化率曲线来看，由于它们的波动水平和正常情况下的背景电离层变化相当，使此类小耀斑的信息完全淹没在背景噪声中，不能够显示和分辨出耀斑的发生. 利用相干求和的数据处理方法，选用向阳面 18 个 GPS 台站的观测数据研究了一次 C 级 SF 耀斑引起的电离层 TEC 增加，结果发现，这种方法能有效地消除背景电离层变化噪声，电离层对耀斑的响应非常清楚和明显，这通常只能在 X 级别的大耀斑中看到. 和 GOES 卫星 X 射线数据相比，电离层 TEC 变化的时间特征和耀斑爆发的开始、最大和结束时间均有很好的符合，其最大平均 TEC 增量在 0.1TECU 以下，和 X 级别的大耀斑相比有一个或多个量级上的差别.

关键词 **天体测量学**: GPS, **总电子含量** (TEC)

中图分类号: P 123; **文献标识码**: A

1 引言

自 20 世纪 90 年代以来，随着 GPS 技术的完善和推广， GPS 方法被广泛应用于空间物理领域. 和一些常规的手段相比，它具有低成本、高精度、全天候等特点，在电离层扰动的监测和研究方面，具有很大的优势. 国内外诸多学者利用双频 GPS 接收机的观测数据在电离层对太阳耀斑的响应 [1−3] 、电离层 TEC 的监测和预报 [4,5] 、磁暴期间的电离层形态 [6] 、电离层的大尺度行扰 [7] 、电离层不规则结构的运动和演化 [8] 、日蚀的电离层响应等方面进行了大量研究 [9,10], 取得了丰富的成果. 对于电离层 TEC 对耀斑的响应，研究表明，在 X 级别的大耀斑期间由 GPS 观测量得到的不论是电离层的绝对 TEC 还是相对 TEC, 均有非常明显的增加, 有的增加量甚至高达 17 个 TECU[11]. 但对于 M3.0 以下级别的小耀斑，单从 TEC 的时间变化曲线来看，很难分辨出耀斑的影响 [2].

M 级以下如 C 级、 B 级之类的小耀斑是常见的，几乎每天都会发生，经常一天内有多次爆发. 由于这类耀斑爆发前的先兆 (如太阳暗条的变化等) 不明显，准确地预报它的发生比较困难. 事实上，从 VLF 电波对电离层 D 区的日常监测结果来看，这些小耀斑也同样会引起电离层突然骚扰 (SID) 事件 **, 在一定程度上影响到无线电波的传播,

2005-03-14 收到

* 中国科学院知识创新项目 (KGCX2-SW-408)

**http://moondog.astro.louisville.edu/

但人们没有给予必要的关注，国内外利用 GPS 方法来研究小耀斑的文献很少看到. 本文利用国际 GPS 服务网提供的观测数据和一定的数据处理方法，研究小耀斑 (M 级以下) 的电离层 TEC 响应.

2 数据与方法

一般而言，向阳面电离层 TEC 在 M 级以下的小耀斑期间，X 射线和 EUV 的增加引起电离层 TEC 的增加量不大，其 TEC 的变化幅度常常和背景电离层的波动相当，因此耀斑期间的电离层 TEC 变化信息一般淹没在背景电离层正常变化 “噪声 ” 之中. 利用双频 GPS 接收机伪距和载波相位 4 个观测量能得到的绝对 TEC，其精度大约为 0.02 TECU，研究表明利用这种方法在分析大耀斑的电离层响应时 [1,2,11]，效果是十分明显的. GPS 载波相位观测量具有很高的精度，由于整数模糊周的影响，只能得到电离层相对 TEC 值，但如果研究的只是 TEC 的增量，也可以用来分析电离层 TEC 的扰动. Afraimovich 利用 IGS 提供的载波相位数据使用相干求和的数据处理方法研究了大耀斑和日全蚀期间电离层 TEC 的波动 [3,10]，基本公式为：

$$I(t) = \frac{1}{40.308}\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}(L_1(t)\lambda_1 - L_2(t)\lambda_2)\,, \tag{1}$$

$$K_i = \cos\left[\arcsin\left(\frac{R}{R+h}\cos\theta_i\right)\right] \tag{2}$$

$$s\,(t) = \sum_i^N \mathrm{d}I\,(t)\,/\mathrm{d}t_i K_i\,, \tag{3}$$

在上式中， N 是 t 时刻所有台站锁定卫星的总数，即 t 时刻所有视线数目 (LOS)；f_1, f_2 和 λ_1, λ_2 分别是 GPS 卫星发射的 2 个信号的频率及其对应的波长， $L_1(t)$, $L_2(t)$ 是 GPS 的载波相位观测量， $I(t)$ 是由相位观测量计算得到的电离层相对 TEC 值； R 和 h 分别是地球半径和电离层质心高度， θ_i 是 GPS 卫星的仰角，计算中忽略低仰角卫星的数据. 研究表明这种方法可以提高分析数据的信噪比 [3,9]，对于利用 GPS 方法来研究电离层 TEC 对耀斑的响应而言，信噪比可以提高 $\sqrt{N}$ 倍，适合于研究电离层小的扰动，下面任取一个 M 级以下的小耀斑来详细分析耀斑期间电离层 TEC 的波动.

2003 年 3 月 29 日 10:11 UT 爆发了一次 C7.2/SF 级耀斑，按照传统的耀斑分类法，SF 耀斑是爆发亮度最暗且爆发面积最小的耀斑，此次耀斑的开始、最大、结束时间分别为 10:11 UT 、10:15 UT 、10:25 UT. 从 IGS 网站上下载向阳面 18 个台站的相关数据，为了减少电离层中自然存在的不规则结构对分析结果的过多影响，尽量避免选取高纬和地方时为日落、日出时的台站， 18 个台站的经纬度见图 1. 在耀斑期间的任一时刻，可用的 LOS 数不少于 90 条，因此信噪比大约能提高 1 个量级.

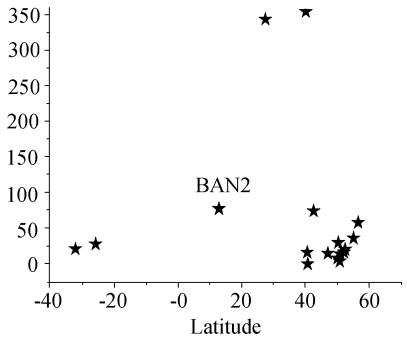

图 1 相关 GPS 台站的坐标

Fig. 1 Latitude and longitude of the selected stations

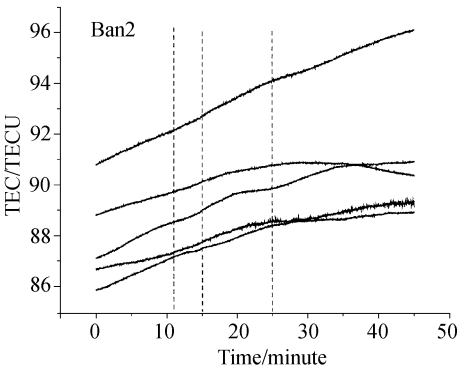

图 2 利用多条 LOS 数的电离层 TEC 的时间变化率

Fig. 2 Curves for ionospheric TEC during solar flare

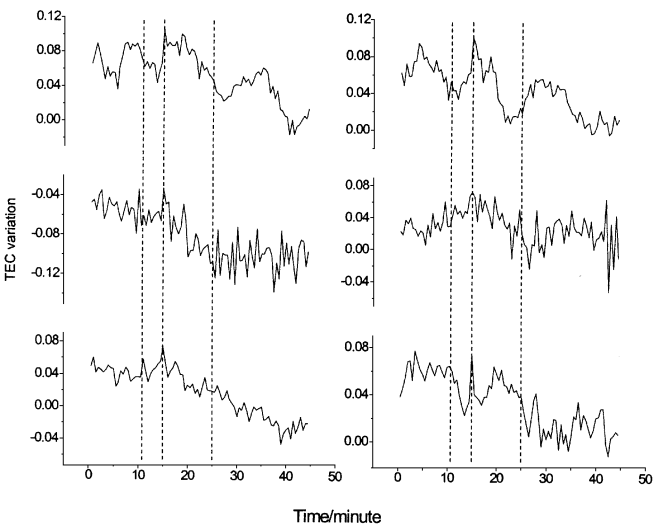

图 3 耀斑期间电离层 TEC 的时间变化率

Fig. 3 Curves for ionospheric TEC change rate with respect to time during solar flare

3　结果和讨论

图 2 、图 3 分别是此次耀斑期间利用 BAN2 台站的 GPS 观测量得到的电离层星下点的垂直 TEC 和它们随时间的变化率，不同曲线代表不同 GPS 卫星的计算结果，其中 3 条虚线分别表示耀斑爆发的开始、最大和结束时间.

从图 2 可见，耀斑期间 TEC 的时间演化不明显，几乎看不出耀斑的影响. 从图 3 也可以看出，相对 TEC 随时间变化率的波动在耀斑爆发期间和在耀斑前后水平相当，变化幅度均在 0.02 TECU 左右，因此，弱耀斑期间电离层 TEC 扰动信息完全淹没在正常的电离层本底波动 “噪声” 中.

图 4 是由公式 (1)—(3) 利用相干求和的方法得到的电离层 TEC 随时间的变化率，可以直观地看出，考虑多条 LOS 数后，此次小耀斑对电离层 TEC 的影响十分明显.

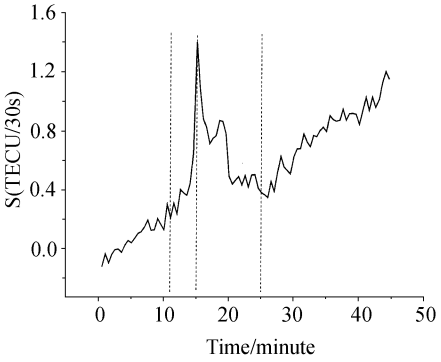

图 4　利用多条 LOS 数的电离层 TEC 的时间变化率变化率

Fig. 4　Curve for ionospheric TEC change rate with respect to time, when muti-LOS are used

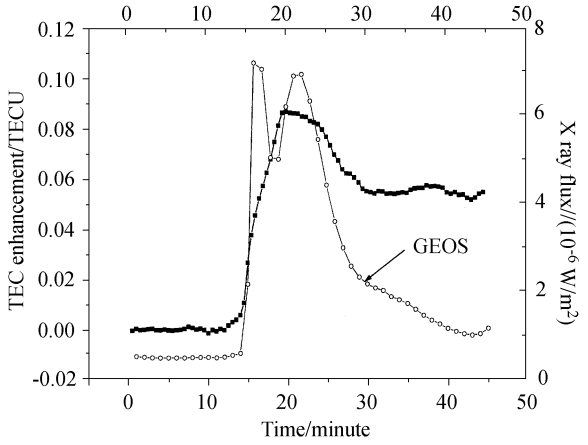

图 5　小耀斑期间的电离层 TEC 增量

Fig. 5　The ionospheric TEC enhancement during small and faint solar flare

将图 4 中对耀斑期间的数据作多项式拟合，得到 TEC 的时间变化率增量，然后对时间积分得到此次耀斑引起的电离层 TEC 的平均增量，结果见图 5.

由图 5 可见，这次耀斑使电离层 TEC 最大增量只有 0.08 TECU 左右，和 X 级别的大耀斑相比相差几个数量级 [1−3,11,12]，这也是从单条 LOS 计算得到的 TEC 看不到弱耀斑影响的原因. 将 TEC 的平均增量和 GEOS 的 X 射线数据比较，耀斑期间 TEC 的增量和耀斑爆发的开始、最大和结束时间有很好的符合. 我们分析了多个 C 级和更小的 B 级耀斑对电离层 TEC 的影响，均得到和图 5 相似的结果，在这些小耀斑期间电离层 TEC 的变化都比较小，其最大增量均小于 0.1 TECU.

4 结论

本文利用相干求和的数据处理方法，利用 GPS 观测数据研究了 M 级以下小耀斑的电离层响应. 结果表明，在小耀斑期间，从 GPS 单条 LOS 得到的 TEC 及其时间变化率看不出耀斑对向阳面电离层的影响，而利用多个台站多条 LOS 的 GPS 观测数据，可以明显地分辨出电离层 TEC 的响应. M 级以下小耀斑引起的电离层 TEC 最大增量和 X 级别大耀斑的电离层效应相比较，它们有量级上的差别.

致谢 感谢世界 GPS 观测网 (IGS) 提供的观测数据

参 考 文 献

1 张东和，萧佐. 科学通报， 2002, 47(2) ： 96
2 张东和，萧佐，常青. 自然科学进展， 2002, 12(2): 166
3 Afraimovich E L. Radio Science, 2000, 35(6): 1417
4 Jin Shuang-gen, J Wang, Zhang Hong-ping, et al. ChA&A, 2004, 28(3): 331
5 Jin Shuang-gen, J Wang, Zhang Hong-ping, et al. AcASn, 2004, 45(2):213 (金双根， J Wang, 章红平, 等. 天文学报， 2004, 45(2): 213)
6 Ho C M, Mannucci A J, Lindqwister U J, et al. Geophys Res Lett, 1998, 25(14): 2589
7 张东和，萧佐， Igarashi K, 等. 地球物理学报， 2002, 45(4): 453
8 朱文耀，章红平，黄铖，等. 地球物理学报， 2004, 47(6): 941
9 Korenkov Y N, Klimenko V V, Baran V, et al. Adv Space Res, 2003, 31(4): 983
10 Afraimovich E L, Kosogorov E A, Lesyuta O S. J Atmos Terr Phys, 2002, 64 (18): 1933
11 张东和，萧佐，刘静. 科学通报， 2004, 49(14): 1351
12 Zhang Donghe, Xiao Zuo. J Geophys Res, 2003, 108(A8): SIA6-1

The Response of Ionospheric TEC to Small and Faint Solar Flares

HUANG Wen-geng GU Shi-fen CHEN Yan-hong MA Guan-yi SHEN Hua
(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

Abstract Using GPS observational data of multi-sites provided by International GPS Service (IGS), the effect of below M-class small and faint solar flares on ionospheric total electron content (TEC) of sunlit hemisphere were analyzed. By traditional method, the results show that one cannot see and distinguish this typical flare occurred from curves for TEC and its change rate with time obtained by single line of sight (LOS) between receiver on the ground and GPS satellite, because their fluctuation levels are comparable with normal ionospheric variations, which make flare information be immerged in background noise. A data processing method name by coherent summation was used to investigate ionospheric TEC enhancement caused by a small and faint C-class SF solar flare derived from 18 GPS stations data (which is composed of more than 90 LOS at any time during flare). It is found that this method can substantially eliminate background ionospheric TEC variation "noise", and ionospheric response to flare is very clear and obvious by this method, which can usually only be seen in big flares. By comparison, the time characteristic of TEC variation is in good agreement with X-ray data from GOES satellite in start, peak and end time of flare occurred, and the maximum enhancement of average TEC is below 0.1 TECU, which is about one or more orders smaller than that caused by X-class large solar flares.

Key words astrometry: GPS, total electron content(TEC)