

大耀斑期间向日面电离层总电子 含量的响应个例分析^{*}

张东和^{1,2} 孙 臻¹ 刘四清¹ 龚建村¹ 肖 佐²

¹(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

²(北京大学地球物理系)

摘 要

利用 2001 年 4 月 15 日 1336 UT 耀斑爆发期间向日面 GPS 观测数据提取的总电子含量的时间变化曲线, 分析了向日面电离层对这次耀斑的响应特点. 结果表明, 耀斑期间向日面电离层出现了总电子含量突增事件. 最大总电子含量增加量约为 2.6 TECU, 在 0600 LT 和 1800 LT 都观测到了总电子含量突增, 但增加幅度仅为 0.5—1 TECU. 在高纬地区, 由于电离层闪烁, 从 TEC 时间变化曲线提取不出来总电子含量增加值. 从各卫星星下点处的 TEC 增加量和各星下点处的太阳天顶角的关系可以看到, TEC 增加量与太阳天顶角有关, 太阳天顶角越大, TEC 增幅越小. 另外, 从总电子含量时间变化率曲线上还观测到了时间同步的小尺度扰动, 通过与耀斑期间硬 X 射线辐射通量的比较, 发现两者有明显的相关性, 电离层中的这种扰动与耀斑期间的硬 X 射线或远紫外辐射有关.

关键词 TEC; GPS; 耀斑

1 引言

太阳耀斑爆发期间向地球空间辐射多种频段的电磁辐射, 其中的紫外辐射和 X 射线会电离电离层高度的中性成分, 造成电离层电子密度的增加, 引起多种电离层骚扰现象. 这些现象包括突然频率偏移, 突然相位异常, 突然频率吸收, 耀斑的地磁效应及突然总电子含量增加 (SITEC) 等^{[1]—[5]}. 从 20 世纪 60 年代初开始, 利用各种观测手段对电离层的耀斑效应进行了广泛的研究, Mitra, Davis 对耀斑期间电离层的变化进行了系统的总结^{[6],[7]}. 研究表明, 不同的电离层骚扰现象与电离层不同高度的电子密度的增加有关, 但电离层总电子含量突然增加中的大部分是由于电离层 F 区电子密度增加产生的^{[8]—[10]}. 因此, 电离层总电子含量增量被用来描述耀斑期间电离层 F 区对耀斑的响应趋势. 在电离层对耀斑响应的研究中, 耀斑期间电离层各高度电子密度的响应趋势以及向日面电离层总电子含量的变化规律是两个重要的研究内容. Mendillo 等利用北半球分布的 19 个台站的 Faraday 旋转仪获得的耀斑期间的电离层总电子含量增量观测资料, 首次进行了耀斑期间向日面电离层响应形态的研究, 得到了耀斑期间电离层响应形态的一个大致图像

^{*} 国家自然科学基金项目 (40274953, 40134020) 和国家重点基础研究规划项目 (G2000078408) 共同资助
2003-03-28 收到原稿, 2003-09-27 收到修定稿

[11]. 但由于观测数据及观测站空间分布的限制, 对有些向日面电离层响应的具体问题不能进行细致的研究.

GPS 方法具有高精度、时空分布广、数据量大的特点, 目前利用 GPS 方法已经对多种电离层扰动进行了研究 [12]. 1996 和 1998 年 Ho 等利用全球 GPS 中心 (IGS) 的 GPS 数据对两次磁扰动期间的全球电离层状态进行了研究, 观测到了电离层暴期间全球电离层 TEC 的演化趋势 [13],[14]. Saito 等利用日本境内高密度分布的 GPS 观测数据, 研究了一次磁活动期间在电离层中产生的电离层行扰 [15]. 我们利用向日面 GPS 台站数据对 1997 年 11 月 6 日和 2000 年 7 月 14 日耀斑期间的电离层状态进行了研究 [16],[17]. Afraimovich 等也提出了利用 GPS 方法进行电离层对耀斑响应监测的设想 [18]. 此外, 其他学者还发表了一些利用 GPS 方法提取的电离层 TEC 进行的地面爆炸、地震、火箭发射期间电离层扰动等方面的研究工作 [19]–[21].

电离层对不同耀斑辐射响应特点的比较研究有助于人们理解电离层响应的物理机制, 对于一些大的耀斑爆发过程, 在这方面的个例分析是必不可少的. 2001 年 4 月, 太阳爆发了多起 X 级别的耀斑, 考虑到全球 GPS 数据分布的特点, 我们确定 2001 年 4 月 15 日 1336 UT 爆发的一次耀斑引起的电离层效应作为我们的研究对象, 系统地对耀斑爆发期间的向日面电离层状态进行观测研究.

2 观测与方法

此次耀斑的 X 射线最大辐射通量为 X14.4, 是由编号为 9415 太阳活动区产生的, 其日面位置为 20°S , 85°W , 靠近太阳的西边缘. 耀斑的开始、最大和结束时间分别是 1336 UT, 1349 UT, 1535 UT. 从耀斑的时间演化趋势来看, 该耀斑是一次急始型耀斑. 为了研究该耀斑对向日面电离层的影响, 选择的 GPS 数据为耀斑期间处于 0600 LT 到 1800 LT 之间的 IGS 系统的 GPS 台站的观测数据. 表 1 为这些台站的地理位置参数和耀斑期间台站的地方时参数 (剔除了向日面没有观测数据的部分台站). 这些台站的接收机都是高精度的 GPS 双频接收机, 一般每 30 s 输出两个频率的伪距观测量和载波相位观测量. 利用这 4 个观测量可以提取高精度的电离层总电子含量 [22]. 观测表明, 在正常情况下利用该方法获得的总电子含量的精度在 0.02 TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16}/\text{m}^2$) 以内.

表 1 GPS 台站的地理参数和耀斑爆发期间各台站的地方时

Table 1 GPS sites' parameters

Sitename	Longitude/($^{\circ}$)	Latidute/($^{\circ}$)	LT	Sitename	Longitude/($^{\circ}$)	Latidute/($^{\circ}$)	LT
amc2	255.4754	38.8031	0653	lpgs	302.07	-34.91	0964
ankr	32.7586	39.8875	1568	mad2	355.7503	40.4292	1322
aoml	279.8378	25.7347	0816	mas1	344.3667	27.7637	1246
areq	288.1756	-16.782	0871	mate	16.7045	40.6491	1461
artu	58.5605	56.4298	1740	maw1	62.8707	-67.6048	1769
bahr	50.6081	26.2091	1687	mdvo	37.2236	56.0275	1598
bor1	17.0668	52.1002	1464	met5	24.6953	60.2175	1515

续表

Sitename	Longitude/(°)	Latidute/(°)	LT	Sitename	Longitude/(°)	Latidute/(°)	LT
braz	312.1222	-15.9474	1031	nico	33.3964	35.1409	1573
brus	4.3592	50.7978	1379	nklg	9.6698	0.3523	1414
bucu	26.1257	44.4639	1524	nlib	268.4251	41.7716	0739
cagl	8.9728	39.1359	1410	nya1	11.8653	78.9296	1429
cord	295.5300	-31.7102	0920	pdel	334.3372	37.7477	1179
dubo	264.1338	50.2588	0711	penc	19.2815	47.7896	1478
flin	258.0220	54.7256	0670	reyk	338.0445	64.1388	1204
fort	321.5744	-3.8774	1094	riog	292.25	-53.79	0898
gala	269.6964	-0.7426	0748	riop	281.348	-1.651	0826
glsv	30.4967	50.3642	1553	sant	289.3314	-33.1503	0879
gode	283.1732	39.0217	0838	sch2	293.1674	54.8321	0904
goug	350.1333	-40.3488	1284	sey1	55.4794	-4.6737	1720
gras	6.9204	43.7547	1396	sofi	23.3947	42.5561	1506
harb	27.7075	-25.8869	1535	stjo	307.1889	47.5952	0998
hers	0.3362	50.8673	1352	syog	39.5837	-69.007	1614
hrao	27.6870	-25.8901	1535	thul	291.212	76.5373	0891
jama	283.2191	17.939	0838	tro1	18.9396	69.6627	1476
kely	309.0550	66.9873	1010	wes2	288.506	42.6130	0873
kit3	66.8800	39.14	1796	wtzt	12.8789	49.1442	1436
kour	307.1940	5.2522	0998	zeck	41.5651	43.2884	1627

由于本文关心的只是耀斑期间电离层 TEC 的相对变化, 在计算 TEC 时没有考虑 GPS 系统的硬件延迟误差. 由于耀斑爆发前电离层可能存在着一些扰动, 为了保证 TEC 增量的计算精度, 在从 TEC 时间变化曲线提取总电子含量增量时剔除了存在扰动的曲线. 另外, 在利用 TEC 时间变化曲线提取总电子含量增量时, 扣除了由于背景电离层变化产生的 TEC 变化值.

3 结果与分析

3.1 耀斑期间的 TEC 时间变化曲线

图 1 为 6 个 GPS 台站数据提取的 TEC 时间变化曲线, 每个图中的不同曲线代表同一台站的不同“接收机-卫星对”数据的 TEC 计算结果, 竖虚线代表耀斑的开始和最大时间, 台站名称代码也标在各图中. 其中, 图 1(a), (b) 为两个太阳天顶角比较小的台站数据提取的 TEC 时间变化曲线. 从图中可见, 耀斑期间电离层总电子含量出现了 SITEC 现象, 约在 1344 UT 时 TEC 曲线开始突然增加, 约在 1352 UT 时 TEC 达到最大, 在这 8 min 左右的时间内, 最大 TEC 增加值约为 2.6 TECU. 另外, 从 TEC 时间变化曲线来看, 这次耀斑对电离层的影响在一个小时以上. 与 1997 年 11 月 6 日和 2000 年 7 月 14 日的耀斑相比, 虽然这次耀斑的最大 X 射线辐射通量要大得多, 但 TEC 增量值却小于前两次耀斑. Matsoukas 等曾指出, 耀斑期间 X 射线最大辐射通量并不是决定电离层 TEC 增量值的惟

一因素, 耀斑期间的电离层电子密度, 中性成分, 尤其是太阳耀斑日面位置都对 TEC 增加值有一定影响^[23]. 这次耀斑的日面位置在 85°W 附近, 处于太阳的西边缘, 太阳角距离大于前两次耀斑, 因此该耀斑对电离层的影响小于前两次也是合理的. 另外, 由于耀斑期间造成电离层 TEC 增加的主要原因是紫外辐射, TEC 增量对耀斑日面位置的相关就意味着耀斑期间近地空间紫外辐射通量与太阳日面位置的相关. 从这个结果可以推断, 在近地空间观测到的耀斑软 X 射线通量和紫外辐射通量并不是完全相关, 还与耀斑的日面位置有关. 由于耀斑期间软 X 射线和紫外辐射源处在太阳上的不同区域, 软 X 射线辐射区在日冕区域, 而紫外辐射源一般在太阳大气更低的高度上, 这种紫外辐射强度依赖于耀斑位置的特点也许与太阳大气对紫外辐射的吸收有关. 关于这一问题有必要进行深入的研究.

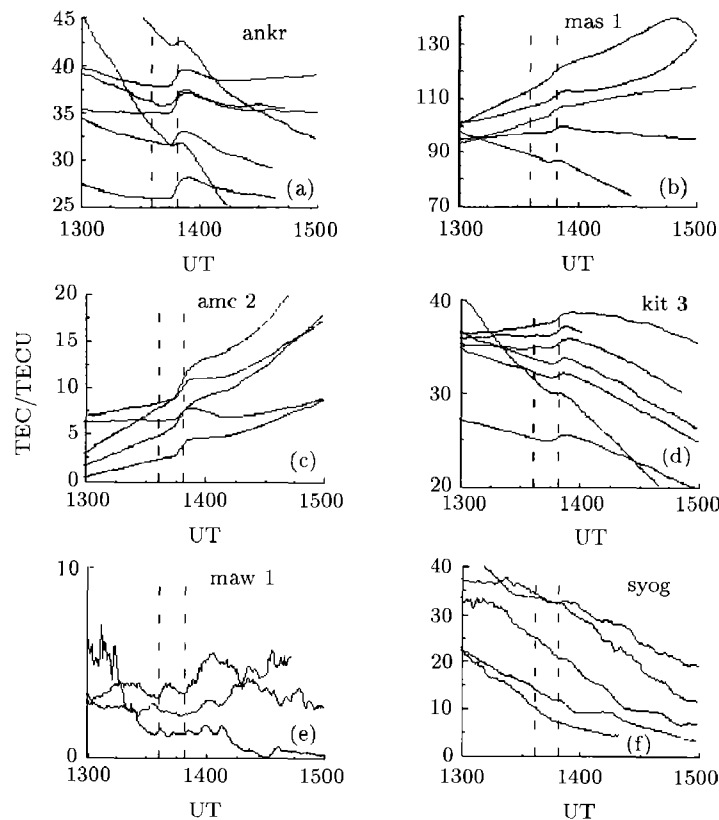


图 1 耀斑期间 6 个 GPS 台站数据提取的电离层 TEC 的时间变化曲线
Fig.1 Temporal TEC variation curves derived from GPS data observed at six different GPS station during the flare

图 1(c), (d) 为两个在耀斑爆发时 0600 LT 和 1800 LT 附近的观测站数据提取的 TEC 时间变化曲线. 由图可见, 即使在太阳天顶角很高的情况下, 耀斑辐射对电离层还是有影响的, 该耀斑辐射产生的总电子含量增加值为 $0.5\text{--}1\text{ TECU}$. 在太阳天顶角 90° 甚至更大的时候, 耀斑辐射已经不能电离低电离层区域的中性成分, 但对高电离层区域的中性成分还是有一定影响的. 因此, 在高太阳天顶角的情况下观测到 SITEC 现象也是合理的.

图 1(e), (f) 为耀斑爆发期间高纬地区 GPS 台站的数据提取的电离层总电子含量时间变化曲线. 由于高纬地区不均匀结构的影响, GPS 信号经常出现强烈的幅度和相位起伏, 造成这一区域 GPS 数据质量下降. 从图中可以看到, TEC 起伏的量级接近甚至高于由于耀斑辐射引起的电离层 TEC 增幅, 因此, 从 TEC 时间变化曲线上很难分辨耀斑辐射对电离层的影响, 这也部分说明了高纬地区电离层闪烁对 GPS 的影响要大于耀斑辐射的影响.

3.2 TEC 增幅与太阳天顶角的关系

从 TEC 时间变化曲线可以提取耀斑辐射引起的电离层 TEC 增量, 从所得结果发现这次耀斑引起的最大 TEC 增量为 2.6 TECU. 耀斑引起的 TEC 增量在向日面不同的地点是不同的, 不难理解 TEC 增量的大小与相对应的太阳天顶角有关. 图 2 给出了所有有效 TEC 时间变化曲线提取的 TEC 增量与耀斑爆发期间各曲线相对应的电离层星下点处的太阳天顶角之间的关系. 图中可以看到非常明显的相关性, 太阳天顶角越小, 耀斑辐射引起的 TEC 增幅越大, 这一点符合传统的电离层光化学理论. 20 世纪 70 年代, 利用耀斑期间北半球 19 个台站的法拉第旋转资料提取的电离层 TEC 增加量, Mendillo 等^[9]分析了电离层 TEC 增加量与太阳天顶角的关系, 但遗憾的是他们没有得到两者之间的明显相关, 我们认为这与他所用台站的空间分布不均及数据量太少有关. 利用与本文类似的方法, 我们进行的 2000 年 7 月 14 日大耀斑期间电离层响应的研究也给出了明显的电离层 TEC 增量与太阳天顶角的关系.

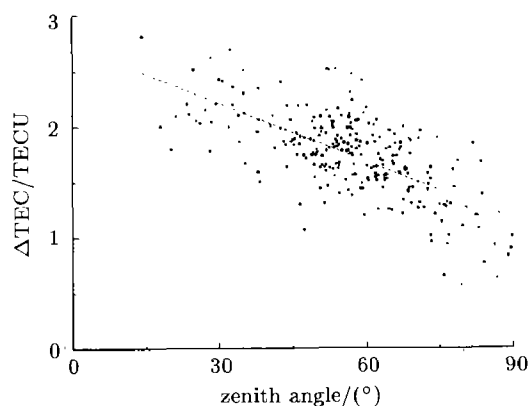


图 2 TEC 增量与电离层星下点处太阳天顶角的关系

Fig.2 The comparison of the TEC enhancement and the corresponding solar zenith angles at the IPPs during the flare. The straight line is its fitting line of the corresponding data

3.3 TEC 时间差分曲线

从各站提取的 TEC 时间变化曲线可以获得 TEC 时间变化率曲线, 图 3 为耀斑期间两个相距很远的台站的 TEC 时间变化率, 从图中可以看到, 在 TEC 增加期间和耀斑期间 TEC 时间变化率增加很快, 约在 1346 UT 变化率达到最大值, 在最大值附近持续了 4 min 左右, 然后开始下降, 约在 1356 UT 恢复到以前的状态. 值得注意的是, 耀斑期间在

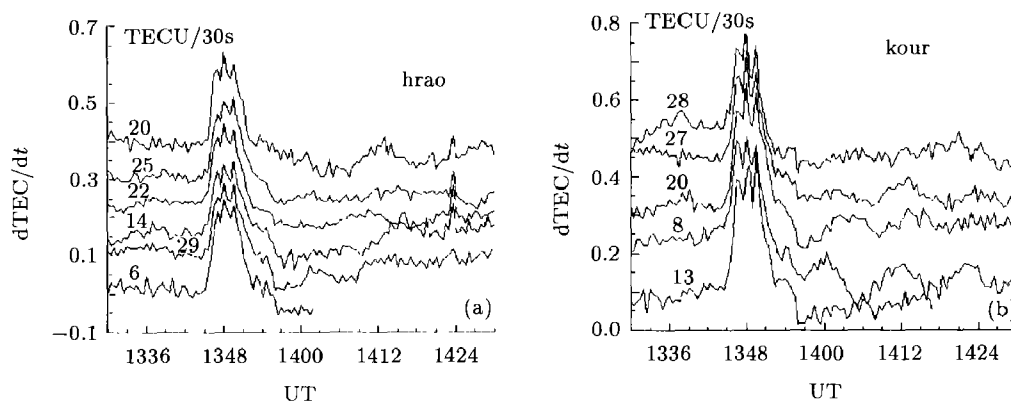


图 3 TEC 时间变化率曲线 (为了便于比较, 各曲线加了不同的常数, 卫星伪随机代码也标在各虚线上)

Fig.3 The rate of change of TEC derived from the observations at two GPS sites

(The profiles have been offset vertically for presentation purposes and the number near each curve means the satellite PRN number)

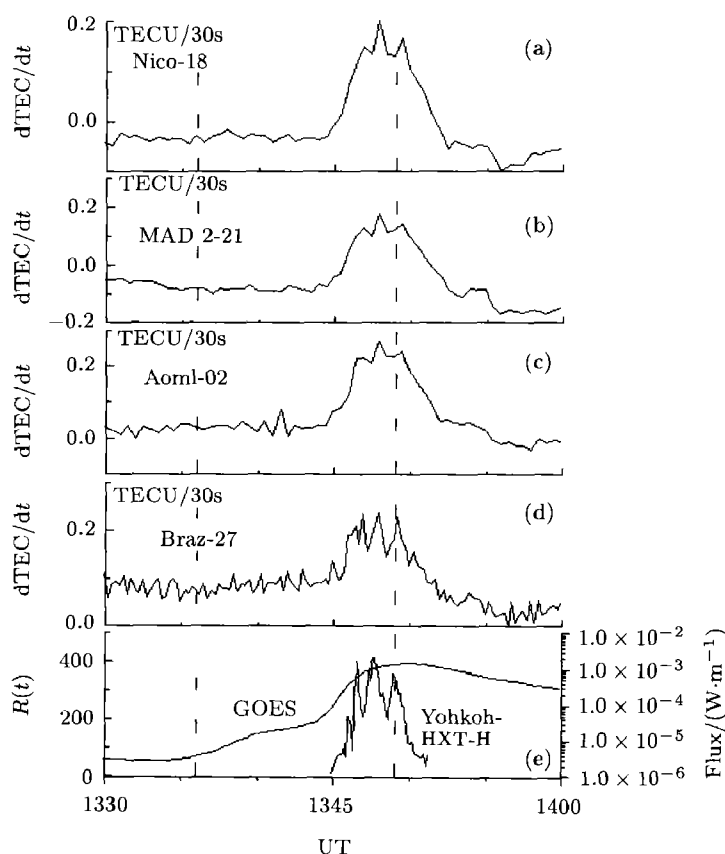


图 4 TEC 时间变化率曲线与 X 射线辐射通量的比较

Fig.4 The comparison of the rate of change of TEC derived from the observations by different satellite-receiver-pairs over a large spatial coverage during the flare on Apr. 15, 2001 and the X-ray flux observed by the GOES and Yohkoh satellites

TEC 时间变化率曲线中出现了相关性很好的同步小时间尺度扰动, 扰动的峰值时间分别在 1347 UT, 1348 UT, 1349 UT 和 1354 UT 附近, 前 3 个小扰动的时间尺度都在 1 min 左右, 最后一个扰动的时间尺度在 2 min 左右, 其中 1348 UT 的扰动幅度最大, 在 0.1 TECU 以上. 事实上这些小时间同步扰动在整个向日面都存在, 因此不可能由电离层的动力学过程产生, 应与这次耀斑的具体爆发过程有关. 按照电离层电子连续性方程, 在不考虑电子损失的前提下, 电子密度的时间变化率与电子产生率成正比. 对电子产生率随高度的积分, 可以发现总电子含量的时间变化率与太阳辐射引起的电子产生率随高度的积分成正比. 另一方面, 能够对电离层中性成分产生电离的太阳辐射主要包括太阳紫外辐射和软、硬 X 射线. 在耀斑爆发期间, 一般认为太阳紫外辐射、硬 X 射线、以及厘米波段的射电流量的相关性很好^{[24],[25]}. Mendillo 曾经对一次大耀斑期间的电离层 TEC 的时间变化率与 35 GHz 射电流量进行比较, 发现两者存在着明显的相关性. 图 4 给出了耀斑期间 TEC 时间变化率与太阳软 X 射线 (GOES, 0.1—0.8 nm) 和硬 X 射线辐射通量 (Yohkoh, 53—93 keV) 的比较, 台站名称和卫星伪随机码也标在图中. 从图中可以看到, 电离层 TEC 时间变化率与软 X 射线辐射通量没有相关性, 但与硬 X 射线相关性很好, 说明这些小时间尺度扰动与软 X 射线辐射无关, 应与硬 X 射线或者远紫外辐射有关. 由此看到, 从 TEC 时间变化率曲线在一定程度上可以推断耀斑爆发的一些具体过程.

4 结论

通过对 2001 年 4 月 15 日 1331 UT 爆发的耀斑期间向日面 54 个 GPS 台站提取的电离层 TEC 时间变化率曲线的分析, 获得了电离层对此次耀斑辐射的响应形态. 结果表明, 耀斑期间向日面电离层出现了总电子含量突增事件. 最大总电子含量增加量为 2.6 TECU 左右, 且在 0600 LT 和 1800 LT 都观测到了 SITEC, 但增加幅度要小得多, 仅为 0.5—1 TECU. 在高纬地区, 由于电离层闪烁的影响, 从 TEC 时间变化率曲线提取不出来总电子含量增加值. 从各卫星星下点处的 TEC 增加量和各星下点处的太阳天顶角的关系可以看到, TEC 增加量与太阳天顶角有关, 太阳天顶角越大, TEC 增幅越小.

从向日面电离层 TEC 时间变化率曲线可以看到, 耀斑爆发期间电离层的响应是同步的, 在 1344 UT 电离层 TEC 开始增加, 在 1346 UT 附近 TEC 增加率达到最大, 并持续了一定的时间. 在 1350 UT 以后 TEC 增加率开始减少, 在 1356 UT 以后, 增加率基本恢复到耀斑爆发前的状态. 在 TEC 增加率从开始增加到最大的时间内, 向日面 TEC 时间变化率曲线出现了 3 次明显的小时间尺度的扰动, 每次扰动的时间在分钟量级. 通过与软、硬 X 射线辐射通量的比较, 发现软 X 射线没有出现相应的扰动, 但硬 X 射线辐射通量中出现了类似的同步扰动. 我们认为电离层中出现的这种小扰动与耀斑爆发期间的硬 X 射线或远紫外辐射有关, 可以部分反映耀斑增长相期间的爆发过程.

致谢 感谢 IGS 中心提供的 GPS 数据.

参 考 文 献

- [1] Donnelly R F. The solar flare radiations responsible for sudden frequency deviations. *J. Geophys. Res.*, 1967, **72**:5 247—5 256
- [2] Jones T B. VLF phase anomalies due to a solar X-ray flare. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1971, **33**:963—965
- [3] Ohshio M. Negative sudden phase anomaly. *Nature*, 1971, **229**:239—240
- [4] Stonehocker G H. Advanced telecommunication forecasting technique in AGY. In: Ionospheric Forecasting, AGARD Conf. Proc., 1970. **29**:27-1—12
- [5] Taylor G N, Watkins C O. Ionospheric electron concentration enhancement during a flare. *Nature*, 1970, **228**:653—654
- [6] Mitra A P. Ionospheric Effect of Solar Flares. Norwell, Mass, 1974
- [7] Davis K. Ionospheric Radio. London: Peter Peregrinus, 1990
- [8] Liu J Y, Chiu C S, Lin C H. The solar flare radiation responsible for sudden frequency deviation and geomagnetic fluctuation. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**:10 855—10 862
- [9] Mendillo M. Incoherent scatter observations of the ionosphere respect to a large solar flare. *Radio Sci.*, 1974, **9A**:197—210
- [10] Thome G D, Wagner L S. Electron density enhancement in the E and F regions of the ionosphere during solar flares. *J. Geophysics. Res.*, 1971, **76**:6883—6894
- [11] Mendillo M, Klobuchar J A, Fritz R B *et al.* Behavior of the ionospheric F region during the great solar flare of August 7, 1972. *J. Geophys. Res.*, 1974, **79B**:665—672
- [12] Moore A W. A review of currently available IGS network summaries. *Phys. Chem. Earth*, 2001, **26**:591—594
- [13] Ho C M *et al.* Global ionospheric perturbations monitored by the worldwide GPS network. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**, 3219—3222
- [14] Ho C M *et al.* Global ionospheric TEC variations during January 10, 1997 storm. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**:2589—2592
- [15] Saito A, Fukao S, Miyazaki S. High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**:3079—3082
- [16] Zhang Donghe, Xiao Zuo. Study of the ionospheric TEC using GPS during the large solar flare burst on Nov. 6, 1997. *Chin. Sci. Bull.*, 2000, **45**:1749—1752
- [17] Zhang Donghe, Xiao Zuo, Igarashi K, Ma G Y. GPS-derived ionospheric total electron content response to a solar flare that occurred on 14 July 2000. *Radio Sci.*, 2002, **37**:656—667
- [18] Afraimovich E L. GPS global detection of the ionospheric response to solar flares. *Radio Sci.*, 2000, **35**:1417—1424
- [19] Calais E, Minster J B. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 1994, Northridge earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**:1045—1048
- [20] Calais E, Minster J B. GPS detection of ionospheric perturbations following a space shuttle ascent. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**:1897—1900
- [21] Fitzgerald R F. Observations of the total electron content perturbations on GPS signals caused by ground level explosion. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1997, **59**:829—834
- [22] Lanyi G E, Roth T. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations. *Radio Sci.*, 1988, **23**:483—492
- [23] Matsoukas D A, Papagiannis M D *et al.* Correlation of solar radio bursts and Sudden Increases of the Total Electron Content (SITEC) of the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1972, **34**:1275—1283
- [24] Adriana V R *et al.* Correlation of Microwave and hard X-ray spectral parameters. *Ap. J.*, 2000, **545**:1116—1123
- [25] Vanderveen K *et al.* Temporal correlations between impulsive ultraviolet and hard X-ray bursts in solar flares observed with high time resolution. *Ap. J.*, 1988, **330**:480—492

ONE CASE STUDY ABOUT THE IONOSPHERIC RESPONSE TO ONE GREAT SOLAR FLARE IN THE SUN-LIT HEMISPHERE

ZHANG Donghe^{1,2} SUN Zhen¹ LIU Siqing¹ GONG Jiancun¹ XIAO Zuo²

¹(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²(Department of Geophysics, Peking University)

Abstract

The characteristics of the ionospheric response to one great solar flare was studied using the total electron content derived from GPS observational stations in the whole sun-lit hemisphere under International GPS Service for Geodynamics (IGS). It was found that the largest enhancement of the Sudden Increase of Total Electron Content (SITEC) during this flare is about 2.6 TECU (1 TECU = $10^{16}/\text{m}^2$). The effects of solar flare radiation on the ionosphere can be recognized even in the region at 0600 LT or 1800 LT. Due to the ionospheric scintillation, the TEC enhancement couldn't be derived from temporal TEC variation curves in the high latitudes. On the other hand, the synoptic picture of the sun-lit ionospheric response to the flare was obtained and the results showed the relationship of TEC enhancements with solar zenith angles. The larger the solar zenith angle, the smaller the TEC enhancement. It was worth mentioning that even the minor fast changes in TEC during this flare can be revealed from the changing rate of the temporal TEC variation curves in mid- and low latitudes. These minor and global synchronous disturbances of TEC were compared with the solar X-ray flux of this flare observed by satellites, and a close correlation between those minor ionospheric disturbances and the hard X-ray flux fluctuations is found.

Key words TEC, GPS, Flare