应用GNSS TEC技术观测行星际激波对等离子体层的压缩

郝永强^{1*}, 李泉翰¹, 张东和¹, 肖佐¹, 杨光林², 黄聪²

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

2. 中国气象局国家空间天气监测预警中心, 北京 100081

*E-mail: hao@pku.edu.cn

收稿日期: 2017-10-13; 接受日期: 2018-03-06; 网络版发表日期: 2018-06-27

国家自然科学基金项目(批准号: 41574144)和中国科学院空间科学战略性先导科技专项(编号: XDA15052400)资助

摘要 2015年3月17日一个强太阳风激波到达地球, 同时地面GPS接收机网络观测到TEC的突然变化, 在Hao等人(2017)的工作中把TEC变化初步归因于激波对向阳面磁层的压缩, 本文进一步分析北斗接收机和更高时间分辨率的GPS接收机的观测, 并推断等离子体沿垂直地磁场磁力线的方向朝向地球运动, 会在低纬赤道面附近形成一个等离子体汇聚的区域, 所有穿过该区域的GPS和北斗卫星信号都会观测到TEC的变化. 此外, 本文考察了多个LEO卫星上搭载的GPS接收机观测, 没有发现相关的TEC扰动, 原因可能是事件发生的瞬间LEO卫星没有处于最佳的观测位置. 通过考察上述多种观测数据, 我们认为GNSS TEC技术可用于对激波压缩磁层过程的遥感观测, 未来有望成为卫星实地探测技术的有效补充.

关键词 总电子含量(TEC), 磁层压缩, 行星际激波

1 引言

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)发射编码无线电信号, 被地面接收机接收后用于计算位置信息. 在无线电波从卫星传播到地面接收机的过程中, 会穿过近地空间中分布着大量等离子体的区域. 因为等离子体对于电磁波而言是色散介质, 利用双频接收机可以测量沿电波传播路径的积分总电子含量(Total Electron Content, TEC)^[1-3]. 以美国全球定位系统(Global Positioning System, GPS)为例,

卫星轨道高度约为20200 km, 所以地面接收机测量的TEC既包含电离层(距地面高度60~1000 km)的贡献, 也包括等离子体层(高度1000~20000 km左右)的贡献. 如果将地面接收机测得的TEC表示为 $TEC = TEC_i + TEC_p$, 其中 TEC_i 表示电离层贡献, TEC_p 表示等离子体层贡献, 大多数情况下前者比后者大几倍, 所以TEC观测经常被用于电离层的形态变化研究^[4-7]. 但在夜间或太阳活动低年时, TEC_i 的总体水平较低, TEC_p 所占的比重会显著增加^[8].

当考察TEC的扰动量时, $\Delta TEC = \Delta TEC_i + \Delta TEC_p$,

引用格式: 郝永强, 李泉翰, 张东和, 等. 应用GNSS TEC技术观测行星际激波对等离子体层的压缩. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 853-862
Hao Y Q, Li Q H, Zhang D H, et al. Using GNSS TEC technique to observe compression of the plasmasphere by an interplanetary shock (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 853-862, doi: 10.1360/N092017-00348

此时电离层和等离子体层各自的绝对TEC大小不再重要, 在电离层没有变化时, 测量到的 ΔTEC 将完全反映等离子体层的变化. 最近, 在2015年的一次行星际激波事件期间, Hao等人^[9]发现大量地面接收机观测到TEC的突然变化, 通过地面多台站的联合观测, 他们排除了来自于电离层变化, 而认为是等离子体层的扰动导致了TEC变化: 在激波压缩向阳面磁层的过程中, 冻结磁场中的等离子体朝向地球运动, 使得部分等离子体由GPS卫星轨道外移动至轨道内, 从而增加卫星信号所穿过的等离子体总量.

此前, 一些工作利用磁层卫星的观测分析了行星际激波压缩磁层这一现象, 如发现突然增强的磁场^[10-13]、伴随的短时电场变化^[14,15], 以及低能的电子和质子朝向地球的漂移^[16-18]. 这些局地探测从磁场、电场、能量粒子的运动等角度描述了磁层被压缩的过程, 但局限是这些卫星多运行于地球同步轨道(36000 km高度), 即处于等离子体层以外. 此外, 由于卫星探测技术的限制, 对压缩过程中的冷等离子体运动的直接观测非常困难. Hao等人^[9]首次将GPS TEC技术用于该现象的研究, 并指出TEC的变化其实反映了GPS卫星轨道(20000 km高度)以内冷等离子体的运动和变化, 可以作为等离子体层响应激波压缩的一种有效观测手段.

目前已有多个GNSS导航卫星星座在轨运行, 包括中国的北斗导航系统, 越来越多的GNSS TEC观测可用于研究近地空间等离子体环境的变化. 本文旨在拓展Hao等人^[9]的工作, 全面考察GNSS TEC技术在研究上述现象时的能力, 包括使用更高时间分辨率地面接收机、使用北斗接收机数据, 以及尝试使用低轨卫星上搭载的接收机等. 这些数据都是首次被用于观测行星际激波压缩磁层, 结果表明GNSS TEC技术对该现象的观测研究具有一些优势, 是值得进一步关注发展的技术应用方向.

2 事件和数据

本文研究的事件是2015年3月17日的行星际激波事件, 随后到达地球的CME引发了第24太阳活动周以来最大的一次磁暴^[19]. 该激波在0445 UT到达磁层顶, Wind卫星测量到太阳风动压由4 nPa增加到20 nPa^[9], 与历史上的激波事件相比也是较为强烈的一次事件.

International GNSS Service(IGS)提供全球数百个GPS台站的标准观测文件, 这些台站接收32颗GPS卫星的信号, 可计算30 s时间间隔的TEC数据. 对这大量数据的分析发现, 只有PRN 15, 18, 25, 31这4颗GPS卫星的信号中检测到了此次激波压缩导致的TEC变化, 而在事件发生时, 这4颗卫星正处于向阳面磁层的赤道平面附近^[9]. 这与激波压缩磁层的纬度和地方时差异恰好一致: 根据以前的磁层卫星观测(如文献^[10-13]), 在向阳面磁层的正午、赤道附近区域观测到最强的压缩效应. 因此, 这4颗GPS卫星的信号会穿过压缩最显著的等离子体层区域, 而能接收到它们信号的接收机主要位于东亚扇区(日侧及正午), 中国区域的接收机非常有利于对这次事件的研究. 本文所用数据来自IGS、中国气象局、中国大陆构造环境监测网络(陆态网)和子午工程等, 除30 s时间分辨率的数据外, 还特别收集了部分时间间隔为1 s的高分辨率接收机数据. 图1(a)中显示了激波到达时刻(0445 UT)这些接收机及其所接收的GPS卫星所处的经纬度位置.

随着北斗导航系统的建设, 北斗卫星的定位导航信号也将成为一个重要的TEC观测信号源, 且在某些方面比GPS更具优势. 本文使用了由中国科学院地质与地球物理所提供的5台北斗接收机的数据, 激波到达时刻这些接收机及北斗卫星所处的经纬度位置如图1(b)所示. 北斗卫星的轨道有3种类型: 第一种是地球静止轨道, 包括图1(b)中的C01~C05, 固定于5个不同经度的赤道上空; 第二种是倾斜地球同步轨道, 如图1(b)中的C06~C10, 分为两组固定于95°E和120°E, 它们的轨迹投影到地面是“8”字形的; 第三种轨道是类似于GPS卫星的中地球轨道, 图1(b)中C11, C12, C14即是这种轨道. 这三种均为圆形轨道, 其中前两种轨道高度为36000 km左右, 第三种轨道高度与GPS卫星相近, 为21500 km左右.

近年来, 越来越多的低轨(low Earth orbit, LEO)卫星上安装了用于定轨的GPS接收机(Precise Orbit Determination, POD), 当无线电信号在GPS-LEO卫星连线的路径上传播时, 测量到的主要是等离子体层的TEC, 而剔除了低于LEO卫星轨道的电离层部分的贡献, 所以这种数据常被用于对等离子体层的观测研究. 本文收集分析了国内外10台搭载于低轨道卫星上的GPS接收机数据, 其中包括搭载于“风云”气象卫星(FY-3C)上的中国首台此类仪器. 第3节将逐个介绍各

图1 本文所使用的GPS和北斗接收机的地理分布, 以及激波事件发生时卫星所处的经纬度位置. (a) GPS接收机和卫星位置, 包括陆态网的30 s分辨率接收机(黑色圆点)、中国气象局和IGS的1 s分辨率接收机(蓝色圆点和圆圈), 卫星位置由方块表示, 其中实心方块表示G18, G22, G25, G31这4颗观测到TEC扰动的卫星; (b) 北斗接收机(红色十字)和卫星的位置, 蓝色圆圈表示5颗地球同步轨道的北斗卫星, 其他北斗卫星在一段时间内的轨迹由灰色线表示. 另外还标识出磁倾角赤道及激波事件时日下点位置(黄色圆点)和晨昏交界线

类型数据所获得的观测结果.

3 观测和分析

3.1 时间分辨率为30 s的地面GPS接收机观测

从陆态网的30 s分辨率接收机中选取了一部分, 接收机地理位置见图1(a)所示. 以PRN 18卫星信号所提取的TEC为例, 图2(a)显示了激波到达磁层顶后在原始TEC序列中突然出现的扰动, 相比于TEC中常见的起伏变化, 图2所示扰动迅速而短暂. 在对图2(a)中的TEC序列进行多项式拟合并去除背景趋势和长周期扰动后, 得到该扰动更清楚的形态如图2(b)所示, 可见各台站观测到的扰动形态基本是类似的, TEC变化的幅度不超过0.3 TECU.

首先需说明的是, 该TEC变化与典型的电离层扰动特征相矛盾. 第一, 图中所列台站的经纬度跨越约30°, 但扰动的出现几乎是同时的, 在电离层中只有太阳耀斑导致的突然电离增强会产生类似的现象^[20-22], 而根据NOAA空间环境预报中心的耀斑事件列表(<http://www.swpc.noaa.gov/products/solar-and-geophysical-event-reports>), 在这一时刻并无太阳耀斑发生. 第二, 如果这是大尺度的电离层扰动, 以往的观测研究表明它应会影响接收机上空所有可见的卫星信号, 但该事件的TEC扰动只存在于特定的卫星信号中(即前文提到的PRN 15, 18, 25, 31), 而在其他可见的卫星(如PRN 12, 14等)信号中则观察不到. 基于上述原因, Hao

等人^[9]推断该扰动不是来自于电离层的, 在后文中将展现更全面的观测数据, 进一步探讨等离子体层变化导致该扰动的特征和机制.

对于中国区域的接收机而言, PRN 15过于偏东, 接收不到其信号; PRN 18, 25, 31的观测与Hao等人^[9]给出的一致, 此处不再赘述. 经过细致的分析, 我们发现PRN 22的信号中存在有趣的现象, 如图3, 在hyde及纬度更低的台站接收PRN 22信号时可观测到TEC扰动, 而在更高纬度的台站则无扰动, 纬度的分界线可确定在hyde(18.2°)和yibl(23.2°)之间. 扰动的幅度虽比PRN 15, 18, 25, 31观测的幅度要小一些, 但扰动特征是类似. 这种纬度的依赖可能是因为GPS信号从卫星到达不同纬度的接收机时, 信号穿过的等离子体层区域有所不同, 后文将具体加以解释.

3.2 时间分辨率为1 s的地面GPS接收机观测

在IGS和中国气象局GPS观测网络中, 有一部分1 s时间间隔的高分辨率接收机, 它们的地理位置见图1(a). 把这些接收机所观测的TEC时间序列同样去除背景趋势后, 得到图4所示的结果.

1 s分辨率的观测可以发现更多的TEC扰动细节, 更准确地判定扰动发生的时间. 如图4所示, TEC扰动在0446 UT附近达到最大之后, 在0448 UT附近有第2个峰. 注意扰动发生的时间, 可以看到PRN 18信号的扰动发生最早, 大概在0445 UT+20 s后开始, 其他卫星信号的扰动出现的要更晚10 s左右. 该时间上的先后

图2 (网络版彩图) 激波事件期间GPS卫星(PRN 18)信号中检测到的TEC突然扰动. (a) 从较长时间尺度看该扰动在TEC时间序列中的表现形式; (b) 去除背景趋势后仅留下短时扰动的形态. 右侧列出各接收机台站的名称和纬度、经度, 并按纬度由低到高排列; 竖虚线表示激波到达磁层顶的时刻0445 UT

关系, 用30 s分辨率的数据是无法发现的. 另外, 比较不同纬度的台站, 似可看到扰动最先出现在低纬度台站的观测中, 如图4(c)中赤道附近的ntus, pohm两站比更高纬度处的chan, usud稍早观测到扰动. 然而该时间差非常微小, 其特征和形成机制还需进一步的细致分析.

至于PRN 22(图4(b)), 与3.1节30 s分辨率的观测具有一致的特征: 在纬度低于约 23° 的台站可以观测到TEC扰动, 且在纬度较低的区域幅度较大.

3.3 北斗导航卫星TEC观测

我们使用了中国境内的5台北斗接收机, 其位置见图1(b). 以bjgg(40.0°N, 116.4°E)为例, 图5显示了此处接收到的所有北斗卫星信号中提取的TEC扰动. 从图5(a)的原始时间序列中可见, 在激波到达后, 多数卫星

的TEC都发生突然的跳变, 去除背景趋势后, 图5(b)更清楚地显示了这种TEC的突然扰动. C01~C06的扰动形态基本一致, 也与前文GPS卫星的TEC扰动非常类似, 可以认为是同一现象; 而C07, C09, C10和C14的扰动不明显.

为了显示不同轨道的卫星和不同台站位置的观测特征, 图6选取其中4颗卫星, 显示了在5个台站接收其信号的观测结果. 除bjgg外, 由于未知的接收机原因, 其他4个台站在044530 UT时缺少一个数据点, 但并不影响扰动的识别. 图6(a)显示的C01代表地球静止轨道的5颗卫星, 除C05由于经度上过于偏西导致有些台站无法接收其信号以外, C01~C04观测到的现象是类似的: 所有5台接收机都观测到突然的TEC变化.

C06~C10虽然属于同一轨道类型, 但由图1(b)所示, 在激波到达时刻C06的位置非常靠近赤道面, 它的

图3 (网络版彩图)不同经纬度的接收机从GPS卫星(PRN 22)信号中检测到的TEC短时扰动。右侧列出各接收机台站的名称和纬度、经度,并按纬度由低到高排列;竖虚线表示激波到达磁层顶的时刻0445 UT

观测结果类似于赤道上方的C01~C04(图6(a))。C07和C09离赤道面较远,且位置非常接近,它们二者观测到的现象是相似的,如图6(b)显示,没有明显的与激波相关的TEC扰动。图6(d)所示的C14在地面的投影位置也与C07、C09相近,虽然C14在高度较低的中地球轨道上,但从图6(b)和(d)可见C14与C07、C09的观测现象是相同的。

C10的观测较为特别,如图6(c),sybg接收机观测到明显的TEC扰动,与图6(a)中的扰动非常相似,但其他更高纬度的接收机没有观测到C10的扰动。这一现象前文所述的GPS卫星PRN 22的情况(图3)类似,即只有低纬接收机可观测到激波相关的TEC变化,后文将分析该现象。

3.4 低轨卫星上的GPS接收机观测

理论上,LEO卫星上的POD接收机测量几百km至GPS卫星轨道(20200 km)高度之间的TEC,可为等离子体层扰动提供直接的观测证据。为此我们收集了国内

外几乎所有星上POD接收机数据,这些卫星及其在激波事件期间的轨道位置见图7。但在仔细分析了所有卫星的数据后,没有发现明确的与激波事件相关的TEC变化。推测其原因,可能由于事件发生时LEO卫星都没有处于最佳的观测位置上,即向日侧的赤道附近。虽然我们收集了多颗卫星的数据,但仍不足以提供充分的空间覆盖。如图7所示,在激波到达时,只有ME-TOP-A和FY-3C卫星处于日侧。

FY-3C卫星发射于2013年9月23日,轨道高度为836 km,其搭载了我国气象卫星上的首个掩星探测仪GNOS(GNSS Occultation Sounder),其中包括顶部POD接收天线^[23]。图8(a)显示了事件期间其POD TEC的记录,可见在激波到达后PRN 22有小幅度的TEC增加(0446~0450 UT),但相比背景变化并不显著;PRN 01, 14, 32则未观测到与激波相关的变化。结合图7所示GPS卫星位置,PRN 01, 14, 32均处于中纬度,且PRN 01, 32靠近夜侧,而PRN 22最靠近日侧赤道,这可能是它观测到TEC变化的原因。

LEO卫星的轨道周期一般为90 min左右,相比于地面固定的接收机而言其运动速度很快,接收任一颗GPS卫星信号的连续观测时间只有20 min左右。图8(b)给出了FY-3C卫星所处纬度和GPS卫星的仰角,随着LEO卫星的快速运动,GPS卫星进入或离开视野,在仰角较低时,TEC记录有较大幅度的起伏;同时,GPS信号会快速扫过电离层的各种空间结构,如当FY-3C处于高纬区域时TEC也会有大幅变化。上述特点在进行TEC快速变化的事件研究时都是不利的。

4 讨论

在Hao等人^[9]的工作中,把地面GPS接收机观测到的突然TEC增加解释为激波压缩磁层导致。他们主要考虑磁场中等离子体冻结情况,在磁场被压缩时等离子体朝向地球运动;仅简单考虑赤道平面内的径向运动,等离子体从GPS卫星轨道外运动到轨道内,即可贡献于TEC的增加。本文在北斗卫星的TEC观测中发现了同样的扰动,但上述解释不能简单地应用于北斗TEC扰动。因为,与GPS轨道不同,北斗卫星的地球静止轨道和倾斜地球同步轨道的高度为36000 km(距地心6.6 Re),位于等离子体层顶(一般不超过5 Re)以外,赤道面内的等离子体的径向运动不会从轨道外跨越到

图 4 (网络版彩图)不同经纬度的接收机从GPS卫星(PRN 18, 22, 25, 31)信号中提取1 s时间分辨率的TEC数据, 经去除背景趋势后得到的短时扰动. 每条记录右侧给出接收机台站名称和纬度、经度. 第1条竖虚线表示激波到达磁层顶的时刻0445 UT, 第2条竖虚线为再延迟20 s

轨道内, 也就不会改变TEC的测量值.

如果把整个中低纬等离子体层区域纳入考虑, 当

磁场被压缩时, 假设等离子体沿垂直磁力线的方向朝向地球运动, 如图9所示, 则会在低纬赤道面附近形成

图 5 激波事件期间, 在bjgg(40.0°N, 116.4°E)台站接收到的北斗各卫星信号中提取的TEC扰动。(a) 原始TEC时间序列, 将各条曲线垂直平移使其错开; (b) 去除背景趋势后仅留下短时TEC扰动。每条记录右侧给出对应的北斗卫星的编号, 竖虚线表示激波到达磁层顶的时刻0445 UT

一个等离子体汇聚的区域。对于赤道区域的GPS和北斗卫星, 所有的地面接收机接收的信号都会穿过这个区域, 所以会观测到TEC的增加; 而对于稍偏离赤道的卫星, 如PRN 22和C10, 低纬度的地面接收机也会接收到穿过该区域的信号(如图9中虚线所示)。这样一个位于低纬的等离子体含量增加的区域, 大致可解释前文所述GPS和北斗TEC的主要观测现象, 但确切的结论还需要进一步的观测和模拟工作来证实。

此外, 这次激波事件的激波法向向量为 $(-0.845,$

图 6 5台北斗接收机从北斗卫星(C01, C09, C10, C14)信号中提取的TEC, 经去除背景趋势后得到的短时扰动

$-0.275, 0.458)$, 这是几种方法计算结果的中值(https://www.cfa.harvard.edu/shocks/wi_data/00677/wi_00677).

图 7 搭载GPS接收机的LEO卫星及其在激波事件期间的轨道位置。图中显示出每颗卫星0440–0500 UT的轨迹, 五角星为轨迹开始处; 轨迹上颜色加深的部分对应0445–0450 UT时段, 即地面接收机观测到TEC变化的时段。FY-3C卫星可见的几颗GPS卫星所处位置由粉色方块标出。图中另外还画出了磁倾角赤道及激波事件时目下点位置(黄色圆点)和晨昏交界线

图8 FY-3C卫星在图7所示轨迹上的GPS TEC观测。(a) GPS TEC的相对变化;(b) FY-3C卫星所处纬度(实线)和所观测的GPS卫星的仰角(虚线)。竖虚线表示激波到达磁层顶的时刻0445 UT

html)。可知该激波是较为正面的撞击地球磁层, 略微由南向北, 结合图9, 这可能导致南北半球的台站观测的现象有所差别, 这一点还需要对高时间分辨率的数据进行深入分析来确认。

5 结论

利用GPS和北斗卫星的地面接收机, 观测到2015年3月17日激波导致的TEC突然增加。该现象的发生依赖于事件发生时的卫星位置, 当卫星处于日侧赤道平面附近时(GPS卫星PRN 15, 18, 25, 31和北斗卫星C01~06), 所有地面接收机接收它们的信号中都提取到TEC扰动; 两个特殊的情况是PRN 22和C10, 它们的位置偏离赤道平面但仍处于较低纬度, 此时只有位于

图9 激波压缩磁层导致GPS和北斗卫星TEC增加的示意图。绿色阴影区域表示 $L=4 R_E$ 和 $5 R_E$ 的磁力线内的等离子体层区域, 白色箭头指示磁层压缩时等离子体朝向地球的运动, 结果会导致深色阴影区域内等离子体含量增加。星地连线表示赤道附近和低纬(实线和虚线)卫星信号传输到地面接收机所穿过的区域

低纬区域的接收机可以观测到TEC变化。

地球静止轨道的北斗卫星观测要求对之前GPS TEC扰动的简单解释进行修正。考虑磁层对激波压缩的响应, 当磁场被压缩时, 等离子体沿垂直磁力线的方向朝向地球运动, 则会在低纬形成一个等离子体汇聚的区域, 穿过该区域的信号就会观测到更多的等离子体含量, 这样可以解释地球同步轨道的北斗卫星信号也可观测到TEC扰动, 以及该扰动对卫星和接收机纬度的依赖。

本文也分析了1 s时间间隔的GPS接收机数据, 高时间分辨率数据揭示了更多的时延特征: 最接近正午的PRN 18信号中的TEC扰动发生最早, 在赤道平面上其他地方时(经度)的卫星信号扰动要晚10 s左右; 比较不同纬度的台站, 赤道附近的接收机比远离赤道的接收机更早观测到扰动。另外, 我们分析了多个LEO卫星上搭载的GPS接收机观测, 包括FY-3C卫星, 没有发现相关的TEC扰动, 原因可能是在事件发生时卫星没有处于最佳的观测位置。

本文考察了多种GNSS TEC观测数据的应用, 结果表明该技术可用于对激波压缩磁层过程的遥感观测, 随着更多GNSS星座的建设, 该技术可进一步完善发展, 并成为科学卫星实地探测技术的有效补充。

致谢 地面GPS接收机数据来自International GNSS Service (<http://www.igs.org>)、中国气象局、中国大陆构造环境监测网络和子午工程(<http://www.meridianproject.ac.cn>); 北斗接收机数据是中国科学院地质与地球物理研究所北京空间环境国家野外科学观测研究站观测所得, 由国家地球系统科学数据共享服务平台-地球物理科学数据中心提供; FY-3C卫星星载GPS观测数据由中国科学院国家空间科学中心提供, 其他星载GPS TEC数据主要来自CDAAC (COSMIC Data Analysis and Archive Center, <http://cdaac-www.cosmic.ucar.edu>).

参考文献

- 1 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
- 2 Coco D S, Coker C, Dahlke S R, et al. Variability of GPS satellite differential group delay biases. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 1991, 27: 931–938
- 3 张东和, 萧佐. 利用GPS计算TEC的方法及其对电离层扰动的观测. *地球物理学报*, 2000, 43: 451–458
- 4 Zhang D H, Mo X H, Ercha A, et al. Case study of ionospheric fluctuation over mid-latitude region during one large magnetic storm. *Sci China Tech Sci*, 2012, 55: 1198–1206
- 5 Foster J C. Cold plasma redistribution throughout geospace. *Sci China Tech Sci*, 2016, 59: 1340–1345
- 6 Yu S, Xiao Z, Aa E, et al. Observational investigation of the possible correlation between medium-scale TIDs and mid-latitude spread F. *Adv Space Res*, 2016, 58: 349–357
- 7 Mo X H, Zhang D H, Goncharenko L, et al. Meridional movement of northern and southern equatorial ionization anomaly crests in the East-Asian sector during 2002–2003 SSW. *Sci China Earth Sci*, 2017, 60: 776–785
- 8 Yizengaw E, Moldwin M B, Galvan D, et al. Global plasmaspheric TEC and its relative contribution to GPS TEC. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 2008, 70: 1541–1548
- 9 Hao Y, Huang J, Liu W, et al. Prompt GPS TEC response to magnetospheric compression. *J Geophys Res-Space Phys*, 2017, 122: 4357–4366
- 10 Kokubun S. Characteristics of storm sudden commencement at geostationary orbit. *J Geophys Res*, 1983, 88: 10025–10033
- 11 Borodkova N L, Liu J B, Huang Z H, et al. Effect of change in large and fast solar wind dynamic pressure on geosynchronous magnetic field. *Chin Phys*, 2006, 15: 2458–2464
- 12 Villante U, Piersanti M. Sudden impulses at geosynchronous orbit and at ground. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 2011, 73: 61–76
- 13 Park J S, Kim K H, Lee D H, et al. Statistical analysis of SC-associated geosynchronous magnetic field perturbations. *J Geophys Res*, 2012, 117: A09212
- 14 Laakso H, Schmidt R. Pc 4–5 pulsations in the electric field at geostationary orbit (GEOS 2) triggered by sudden storm commencements. *J Geophys Res*, 1989, 94: 6626–6632
- 15 Shinbori A, Ono T, Iizima M, et al. SC related electric and magnetic field phenomena observed by the Akebono satellite inside the plasmasphere. *Earth Planet Space*, 2004, 56: 269–282
- 16 Baumjohann W, Bauer O H, Haerendel G, et al. Magnetospheric plasma drifts during a sudden impulse. *J Geophys Res*, 1983, 88: 9287–9289
- 17 Keika K, Nakamura R, Baumjohann W, et al. Response of the inner magnetosphere and the plasma sheet to a sudden impulse. *J Geophys Res*, 2008, 113: A07S35
- 18 Zhang H, Sibeck D G, Zong Q G, et al. Global magnetospheric response to an interplanetary shock: THEMIS observations. *Ann Geophys*, 2012, 30: 379–387
- 19 Kamide Y, Kusano K. No major solar flares but the largest geomagnetic storm in the present solar cycle. *Space Weather*, 2015, 13: 365–367
- 20 Zhang D H, Xiao Z. Study of the ionospheric total electron content response to the great flare on 15 April 2001 using the International GPS Service network for the whole sunlit hemisphere. *J Geophys Res*, 2003, 108: 1330
- 21 Zhang D H, Xiao Z. Study of ionospheric response to the 4B flare on 28 October 2003 using International GPS Service network data. *J Geophys Res*, 2005, 110: A03307
- 22 Tsurutani B T, Verkhoglyadova O P, Mannucci A J, et al. A brief review of “solar flare effects” on the ionosphere. *Radio Sci*, 2009, 44: RS0A17
- 23 Bai W H, Sun Y Q, Du Q F, et al. An introduction to the FY3 GNOS instrument and mountain-top tests. *Atmos Meas Tech*, 2014, 7: 1817–1823

Using GNSS TEC technique to observe compression of the plasmasphere by an interplanetary shock

HAO YongQiang¹, LI QuanHan¹, ZHANG DongHe¹, XIAO Zuo¹,
YANG GuangLin² & HUANG Cong²

¹ School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

² National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

An interplanetary shock impinged on the Earth's magnetosphere on 17 March 2015, and caused instant change of total electron content (TEC) measured by ground-based global positioning system (GPS) receivers. Hao et al. (2017) attributed the sudden TEC variation to magnetospheric compression by the shock, and in this paper we follow to examine the process by incorporating high time-resolution (1 s) TEC data from some GPS receivers as well as TEC measurements from BeiDou Navigation Satellite System. These observations add new understandings to the reaction of magnetosphere to a strong shock. The compression drives plasma in dayside magnetosphere to move earthward, and the contraction of the Earth's magnetic field will make plasma concentrate near the equatorial plane. The scenario involves dynamics of the plasmasphere where the plasma is dense enough to contribute to the variations of both GPS and Beidou TEC. In addition, we also inspect TEC measured onboard several low Earth orbit satellites, but no significant change is identified possibly due to inappropriate satellite position. The above TEC measurements, known collectively as global navigation satellite system (GNSS) TEC techniques, exhibit an unprecedented capability of remote sensing and will hopefully provide new insight into the dynamics of magnetosphere.

total electron content (TEC), magnetospheric compression, interplanetary shock

doi: [10.1360/N092017-00348](https://doi.org/10.1360/N092017-00348)