引文格式：明飞雄, 马锦山. 磁暴期间北斗 GEO 卫星电离层异常研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(8): 100-103. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.08.026

磁暴期间北斗 GEO 卫星电离层异常研究

明飞雄[1]，马锦山[2]
（1. 自然资源部重庆测绘院，重庆 401120；2. 西宁市国土勘测规划研究院有限公司，青海 西宁 810000）

摘　要：北斗GEO卫星可获取准固定穿刺点处的电离层TEC时变序列。基于北斗GEO卫星观测数据解算电离层TEC及相应ROTI指数，并分析2017年9月磁暴期间电离层TEC异常变化特征。实验结果表明，在磁暴发生前后，GEO卫星解算得到的电离层TEC值均出现了明显增强，且LHAZ测站处的TEC最大值出现在磁暴前一天。同时，在磁暴主相阶段2个测站多颗GEO卫星解算得到的电离层ROTI指数均探测到了异常变化，表明在此次磁暴期间发生了明显的电离层闪烁事件。实验结果验证了北斗GEO卫星监测电离层时空变化的可行性，为电离层研究提供了更丰富的监测手段。

关键词：北斗；GEO卫星；电离层TEC；ROTI；电离层闪烁
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）08-0100-04

Study on Ionospheric Anomaly During Geomagnetic Storm by Beidou GEO Satellites

MING Feixiong[1], MA Jinshan[2]
(1. Chongqing Institute of Surveying and Mapping, MNR, Chongqing 401120, China;
2. Land Surveying and Planning Institute Co., Ltd., Xining 810000, China)

Abstract: Beidou GEO satellites can obtain the ionospheric TEC time-varying sequence at the quasi fixed puncture point. Based on the observation data of Beidou GEO satellites, we calculated ionospheric TEC and ROTI index and analyzed the change characteristics of ionosphericanomalyduring the geomagnetic storm in September 2017. The results show that ionospheric TEC values calculated by GEO satellites are significantly enhanced, and the maximum TEC values at LHAZ station appear on the day before the geomagnetic storm. Meanwhile, abnormal changes are detected in the ionospheric ROTI index calculated by GEO satellites at two stations during the main phase of storm, indicating that an obvious ionospheric scintillation event occurred during the storm. The results verify the feasibility of Beidou GEO satellite to monitor the ionosphere spatio-temporal changes, which can provide moremonitoring methods for ionosphere research.

Key words: Beidou, GEO satellites, ionospheric TEC, ROTI, ionospheric scintillation

电离层主要分布在离地球表面约60~1 000 km范围内的电离区域。电离层总电子含量（total electron content, TEC）是描述电离层特征的一个重要参量，在研究电离层时空变化特性和电离层延迟修正中得以广泛应用。由于电磁波信号会穿越整个电离层区域，因此可把电离层想象为距离地面一定高度的单层模型，接收机与卫星之间的连线与单层模型相交于一点，该点称为电离层穿刺点(ionosphere pierce point，IPP)，利用GNSS双频数据可以计算得到的电离层穿刺点处总电子含量反映电离层变化特征[1]。国内外诸多学者基于GPS观测数据电离层监测和建模研究以及磁暴对电离层的影响，有效地分析不同空间环境变化下电离层所表现出的特征[2-6]。由于GPS卫星观测的电离层穿刺点位置会随着GPS卫星的运动而发生改变，因此，电离层的时空特性不能直接通过原始的GPS数据获得。随着中国北斗卫星导航系统的快速发展，利用北斗GEO卫星独有的静地特性，由GEO卫星与地面测站形成的电离层穿刺点位置基本保持不变，实现对电离层固定穿刺点TEC实时连续性观测，从而得到TEC时间变化序列。文献[7]选取亚太地区20多个测站的GEO观测数据分析电离层TEC半年及全年长尺度周期变化特性。文献[8]利用北斗GEO卫星发播3种不同频率的测距信号，实现伪距双频组差方法解算电离层总电子含量，为实时监测中国区域电离层变化提供新的技术手段。文献[9]利用分布在亚太地区9个GNSS观测站的北斗GEO卫星观测数据对2017年5月28日磁暴期间电离层扰动变化进行了分析，并使用北斗GEO实测数据对全球电离层图进行精度评估。

收稿日期：2022-04-19；修回日期：2022-08-12。
项目来源：湖北省面上基金资助项目（2020CFB603）；湖北珞珈实验室开放基金资助项目（220100046）。
第一作者简介：明飞雄（1976—），高级工程师，主要从事自然资源督察执法、产品质量检验、地理信息系统开发等方面工作，E-mail：375741756@qq.com。

综上所述，本文欲利用北斗GEO卫星观测数据解算得到的TEC值及电离层ROTI指数分析2017年9月磁暴期间电离层异常变化特征，目的在于验证北斗GEO卫星监测电离层时空变化的可行性。

1　数据来源及方法

1.1　数据来源

本文选取2个接收北斗GEO卫星信号的GNSS测站进行2017年9月磁暴期间电离层TEC变化及电离层闪烁事件研究，其中测站分别为LHAZ、JFNG。GEO卫星观测数据采样间隔为30 s，其中卫星截止高度角设为15°。图1为GEO卫星测站分布位置及相应电离层穿刺点位置。从图中可以看出，北斗GEO卫星与地面测站形成的电离层穿刺点基本保持不变，这种准静止特性可以对电离层TEC进行长期连续的监测。



图1　GEO卫星测站及电离层穿刺点分布位置

1.2　电离层TEC计算方法

电离层带来的延迟误差是高精度定位服务的主要误差源，对其精确的计算决定了导航定位的精度。本文采用非组合PPP的方法解算电离层延迟[11-12]。

$$\hat{I}_1 = I_1 + \frac{1}{1-\gamma_2}(\mathrm{DCB}^r - \mathrm{DCB}^s) \tag{1}$$

式中，$\hat{I}_1$为解算的电离层延迟；I_1为f_1频率下实际电离层延迟；DCB^r、DCB^s分别为接收机的DCB及卫星的DCB；$\gamma_2 = f_1^2/f_2^2$。

本文利用电离层单层假设模型（single layer model，SLM）将斜电离层TEC（slant tec，stec）通过投影函数转换为垂直电离层TEC（vertical tec，vtec），并引入低阶球谐函数模型对电离层VTEC进行建模，从而分离卫星及接收机DCB对电离层延迟的影响，具体如下式所示[14]：

$$\begin{aligned}\mathrm{VTEC} &= MF(z)\times\left[\frac{f_1^2}{40.28}I_{ion} + \frac{f_1^2 f_2^2}{(f_1^2-f_2^2)40.28}(\mathrm{DCB}^r - \mathrm{DCB}^s)\right] \\ &= \sum_{n=0}^{n_{\max}}\sum_{m=0}^{n}\tilde{P}_{nm}(\sin\beta)(a_{nm}\cos ms + b_{nm}\sin ms)\end{aligned} \tag{2}$$

式中，MF为投影函数；z为卫星高度角（rad）；I_{ion}为电离层延迟；β为电离层穿刺点（ionospheric pierce point，IPP）地理纬度；s为穿刺点处的日固经度；$\tilde{P}_{nm}$为正则化的勒让德多项式。建立上式方程后，结合GEO卫星双频观测数据并使用最小二乘法对球谐函数系数、卫星及接收机DCB同时进行解算。

1.3　电离层ROTI计算方法

电离层的闪烁事件还可以用TEC的变化率表示，为进一步表征在一个观测弧段内电离层TEC的平均扰动变化，选取一定间隔时间内（一般为5 min）TEC变化率的标准差作为电离层异常闪烁的指标，具体如下式所示：

$$\begin{cases}\mathrm{ROT}(i+1) = \dfrac{\Delta\mathrm{TEC}_{t_i,t_{i+1}}}{t_{i+1}-t_i} = \dfrac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2-f_2^2)}\left[(L_1-L_2)_{t_{i+1}} - (L_1-L_2)_{t_i}\right]\times\dfrac{60}{t_{i+1}-t_i} \\ \overline{\mathrm{ROT}} = \dfrac{1}{N}\sum\limits_{i=k-N+1}^{k}\mathrm{ROT}(i) \\ \mathrm{ROTI}(k) = \sqrt{\dfrac{1}{N}\sum\limits_{i=k-N+1}^{k}(\mathrm{ROT}(i)-\overline{\mathrm{ROT}})^2}\end{cases} \tag{3}$$

式中，f_1、f_2为GNSS卫星信号的频率；L_1、L_2为经过数据预处理后的载波相位观测值；t_i、t_{i+1}为相邻的2个观测历元；由于本文所用观测数据的采样间隔为30 s，因此$N=10$。

2　结果与讨论

2.1　地磁状态变化

进行电离层异常扰动变化分析前，应对观测时段内的地磁环境指数进行分析以判断电离层平静期与磁暴期的时间节点。本文选取地磁指数Dst及Kp分析近地空间环境的变化。图2为9月6日至9日地磁指数变化趋势图，从图中可以看出，在9月7日世界时18：00UT开始，SYM-H地磁指数突然发生扰动，表明此时磁暴进入主相阶段，同时地磁指数在数值上剧烈减小，直到9月8日01：00UT数值分别达到了-142 nT。与此同时，地磁指数Kp在该时刻数值达到最大值8，表明产生了强烈的磁暴，与一般磁暴发展过程不同的是，本次磁暴在进入恢复相阶段后，产生了较为强烈的二次扰动。从图中可以看出，在9月8日12：00UT开始，逐渐恢复平静状态的SYM-H指数突然发生再次扰动，数值在17：00

UT时达到最小值−124 nT。同时，地磁 *Kp* 级数值再次达到级别8，表明在磁暴恢复相阶段发生了与主相阶段规模相当的地磁场扰动过程。在18：00UT后2种指数的数值逐渐恢复到平静状态，此次磁暴过程全部结束。通过以上分析，本文将分析在此次磁暴期间电离层TEC的异常扰动变化及可能发生的电离层闪烁事件。

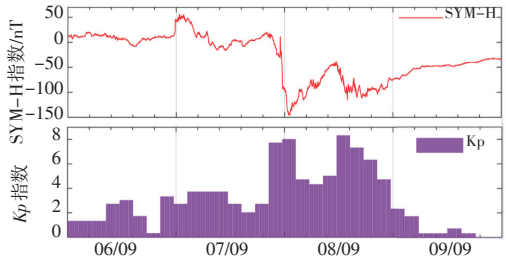


图2 地磁指数SYM-H、Kp变化图

2.2 电离层TEC、ROTI变化

本文选取LHAZ、JFNG2个测站接收到的北斗GEO卫星观测数据分析在此次磁暴期间电离层TEC的变化特征。图3为LHAZ、JGNG测站观测到的2颗GEO卫星提取的不同电离层穿刺点处TEC的变化趋势。从图中可以看出，同一个测站与电离层形成的穿刺点在纬度上几乎相等，并且穿刺点处TEC的变化趋势基本一致，该结果表明TEC在小范围内不同经度上数值基本相等，TEC的变化主要受纬度因素的影响；从测站JFNG的TEC变化可以看出，在磁暴进入主相阶段后该区域内的TEC发生明显的增大，在9月8日15：00UT达到最大值约50 TECU，而后逐渐减小。测站LHAZ观测到的TEC变化与JGNG测站不同，该测站主要位于较低纬度区域，从TEC的变化可以看出在磁暴进入主相阶段前，该区域内的电离层TEC最大值便达到了近50 TECU。

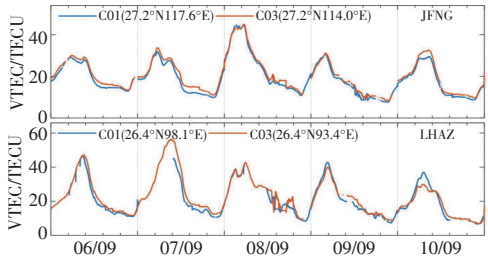


图3 LHAZ、JFNG测站GEO卫星电离层TEC变化

为分析在此次磁暴期间电离层闪烁事件的变化特征，利用北斗GEO卫星双频载波相位观测数据，计算了ROTI指数的变化。图4为LHAZ测站不同GEO卫星解算得到的电离层ROTI指数变化图。从图中可以看出，4颗GEO卫星均探测到在9月8日世界时13：00UT（当地时21：00LT）到世界时19：00UT（当地时03：00LT）之间产生了明显的ROTI指数增强。以上结果表明该区域在磁暴期间发生了电离层闪烁事件。从不同GEO卫星ROTI指数的幅值变化可以发现，C05卫星ROTI指数在磁暴期间最大值接近0.5 TECU，其他3颗GEO卫星ROTI指数变化范围在1.5~2 TECU，该结果表明在90~100°E范围内电离层闪烁的强度更大，且向西逐渐减弱。

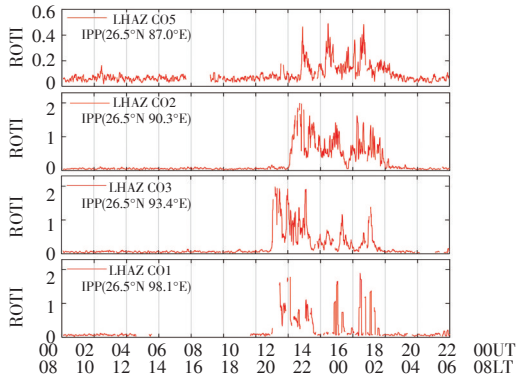


图4 LHAZ测站不同GEO卫星ROTI指数变化

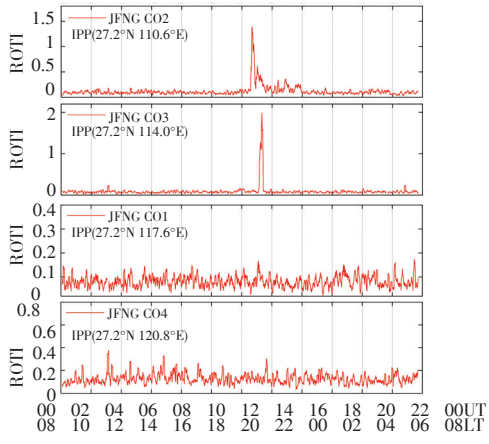


图5 JFNG测站不同GEO卫星ROTI指数变化

图5为JFNG测站不同GEO卫星解算得到的电离层ROTI指数变化图。从图中可以看出，C02、C03卫星探测到在9月8日世界时12：30UT（当地时20：30LT）到世界时13：30UT（当地时21：30LT）之间产生了明显的ROTI指数增强。而C01、C04卫星未探测到明显的ROTI指数扰动变化。JFNG测站结果表明在此次磁暴期间经度110.6°~114.0°E区域发生了电离层闪烁事件，持续时间约为1 h。从2颗GEO卫星ROTI指数的幅值变化可以发现，C02卫星ROTI指数在磁暴期间最大值接近1.5 TECU，C03卫星ROTI指数最大变化约2 TECU，表明随着时间的推移，ROTI指数的扰动在增强。

3 结 论

本文利用LHAZ，JFNG测站接收到的北斗GEO卫星观测值解算电离层TEC值及ROTI指数，分析2017年

9月磁暴期间电离层异常变化特征。结果表明，同一测站不同GEO卫星解算得到的电离层TEC整体变化趋势相近，且同一测站与不同GEO卫星形成的电离层穿刺点位于近似纬度上，经度方向上按一定间隔均匀分布。在9月8日磁暴发生前后，不同测站GEO卫星电离层TEC值均出现了明显增强，且LHAZ测站处的TEC最大值出现在磁暴前一天。从电离层ROTI指数的变化可以看出，在9月8日2个测站多颗GEO卫星解算的ROTI指数均探测到了明显的增大变化，数值达到了1.5~2 TECU，该结果表明在此次磁暴期间发生了明显的电离层闪烁事件。本文实验结果验证了北斗GEO卫星监测电离层时空变化的可行性，证明北斗GEO卫星可为电离层研究提供更丰富的探测手段。

参考文献

[1] 吴晓莉,韩春好,平劲松. GEO卫星区域电离层监测分析[J]. 测绘学报,2013,42(1):13-18

[2] 柳景斌,王泽民,王海军,等. 利用球冠谐分析方法和GPS数据建立中国区域电离层TEC模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2008,33(8):792-795

[3] 孟泱,安家春,王泽民,等. 基于GPS的南极电离层电子总含量空间分布特征研究[J]. 测绘学报,2011,40(1):37-40

[4] 袁运斌,霍星亮,张宝成. 近年来我国GNSS电离层延迟精确建模及修正研究进展[J]. 测绘学报,2017,46(10):1 364-1 378

[5] Huang F,Lei J,Zhang R,et al. Prominent Daytime TEC Enhancements Under the Quiescent Condition of January 2017 [J]. Geophysical Research Letters,2020,47:e2020GL088398

[6] Mansilla G A, Zossi M M. Longitudinal Variation of the Ionospheric Response to the 26 August 2018 Geomagnetic Storm at Equatorial/Low Latitudes [J]. Pure and Applied Geophysics,2020,177:5 833-5 844

[7] Bai X, Cai C. Independent Temporal and Spatial Variation Analysis of Ionospheric TEC over Asia-pacific Area Based on BDS GEO Satellites [J]. Measurement Science and Technology,2020,31:1-10

[8] 董恩强,曹月玲,宫磊,等. 利用北斗观测数据实时监测中国区域电离层变化[J]. 空间科学学报,2017,37(1):67-74

[9] 白晓涛,蔡昌盛. 基于北斗GEO卫星的磁暴期间电离层TEC响应分析[J]. 大地测量与地球动力学,2020,40(2):129-133

[10] 张宝成,欧吉坤,李子申,等. 利用精密单点定位求解电离层延迟[J]. 地球物理学报,2011,54(4):950-957

[11] 张宝成,欧吉坤,袁运斌,等. 基于GPS双频原始观测值的精密单点定位算法及应用[J]. 测绘学报,2010,39(5):478-483

[12] 张宝成. GNSS非差非组合精密单点定位的理论方法与应用研究[J]. 测绘学报,2014,43(10):1 099

[13] 魏乐惠,姜春华,赵正予. 2017年9月磁暴期间大尺度电离层行进式扰动的传播特性研究[J]. 地球物理学进展,2021,36(2):508-515

[14] 欧明,吴家燕,陈龙江,等. 一次中等磁暴期间全球电离层TEC及ROTI指数变化分析[J]. 空间科学学报,2021,41(6):887-897

[15] 尹萍,宁泽浩,闫晓鹏. 基于BDS/GPS数据的中国及周边地区电离层暴层析成像研究[J]. 电波科学学报,2021,37(5):1-11

[16] 汤俊,高鑫,李垠健,等. 2018年8月磁暴期间北斗GEO卫星电离层TEC时空变化分析[J]. 测绘学报,2022,51(3):317-326

（上接第85页）

展至现房交易项目；二是将“交房即交证”服务纳入新建商品房预售合同条款，明确压缩预售合同约定的购房至交房时间；三是研究推行新建商品房预售阶段征收税款，实现“交房即交证”常态化，扩大社会群众受益面，提升社会群众购房、收房和办证体验，维护产权人的合法权益。

参考文献

[1] 陈金库. 交房即交证:郑州市不动产登记中心推出便民服务新举措[J]. 资源导刊,2020(11):22-22

[2] 张鹏程,杜剑光,杨梅. 智慧广州时空云平台在不动产信息化中的应用与实践[J]. 地理空间信息,2019,17(10):10-13

[3] 赵麟生. 不动产登记信息平台建设关键技术研究[J]. 地理空间信息,2019,17(8):108-111

[4] 焦庆东,王建弟,杨永高,等. 基于不动产空间本体模型的数据共享研究[J]. 地理空间信息,2019,17(11):10-12

[5] 骆祖萌,焦汉科. 不动产登记信息共享方案与实施路径设计[J]. 地理空间信息,2020,18(7):109-113

[6] 邱海泉. 广东省不动产统一登记信息管理基础平台的设计与实现[J]. 测绘通报,2017(4):116-120

[7] 张伟,刘言东. 河南省级不动产“一窗受理平台”系统设计与实现[J]. 地理空间信息,2021,19(2):107-109

[8] 张晶晶,李秋艳,刘硕,等. 基于深度学习的人脸识别在身份认证领域应用综述[J]. 数据通信,2021(4):1-6

[9] 梁铭,刘如. 基于GIS的不动产登记信息管理基础平台设计与实现[J]. 测绘地理信息,2020,44(5):107-111

[10] 罗明俊. 基于武汉市不动产登记信息平台的电子票据系统建设实践[J]. 地理空间信息,2020,18(11):121-124