0254-6124/2022/42(1)-0082-09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WU Jiayan, ZHEN Weimin, OU Ming, YU Xiao, CHEN Longjiang. A Characterization Method of Global Ionospheric Irregularities Activities Based on GNSS Data (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(1): 82–90. DOI:10.11728/cjss2022.01.201009088

一种基于 GNSS 数据的全球电离层不规则结构活动表征方法*

吴家燕[1,2] 甄卫民[1] 欧 明[1]

於 晓[1] 陈龙江[1]

1(中国电波传播研究所 青岛 266107)

2(电波环境特性及模化技术国家重点实验室 青岛 266107)

摘 要 针对如何利用 GNSS（Global Navigation Satellite System）数据进行电离层扰动监测的问题，提出了一种基于 GNSS 数据表征全球电离层扰动的方法。利用大约 400 个 GNSS 地面站点的观测数据，计算总电子含量（Total Electron Content，TEC）变化率的标准差——ROTI（Rate of TEC Index）。将该计算结果作为扰动观测量，在纬度与经度的网格上投影形成 1 h 分辨率的 ROTI 地图。ROTI 地图能够体现几千米到几十千米的电离层不规则体，分析 2015 年 3 月期间电离层平静和扰动剧烈时 ROTI 地图发现，这种大尺度的不规则体主要分布在高纬和低纬区域，磁暴期间 ROTI 地图会出现数值和扰动面积上的变化，ROTI 地图在一定程度上能够表现全球电离层不规则结构的扰动。在此基础上提出了新的全球 ROTI 扰动指数 (Global ROTI index, GROTI)，分析结果表明高纬区域的 GROTI 与地磁指数 *Kp* 及 *AE* 指数存在良好的相关性。

关键词 全球卫星导航系统，电离层不规则体，总电子含量变化率指数，总电子含量变化率，全球电离层扰动

中图分类号 P352

A Characterization Method of Global Ionospheric Irregularities Activities Based on GNSS Data

WU Jiayan[1,2] ZHEN Weimin[1] OU Ming[1]

YU Xiao[1] CHEN Longjiang[1]

1(*China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao* 266107)

2(*National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, Qingdao* 266107)

Abstract For the problem of how to use GNSS (Global Navigation Satellite System) data to monitor

* 国家重点研发计划项目（2018YFF01013700，2018YFF01013702），装备预先研究课题项目（315030409）和中国电波传播研究所稳定支持科研经费项目（A131902W03）共同资助

2020-10-09 收到原稿，2021-08-01 收到修定稿

E-mail: 13047405995@163.com

ionospheric disturbance, this paper proposes a method for characterizing global ionospheric disturbances based on GNSS data. This article uses GNSS (Global Navigation Satellite System) observations of approximately 400 ground stations to calculate the standard deviation of the rate of change of TEC (Total Electron Content)–ROTI (Rate of TEC Index, ROTI), as an ionospheric disturbance observation and projected onto a grid of latitude and longitude to form a 1-hour resolution ROTI map. ROTI maps can reflect ionospheric irregularities ranging from several kilometers to tens of kilometers. The article analyzes the results of ROTI maps when the ionosphere is calm and disturbed during March 2015. And results show that such large-scale irregularities are mainly distributed in high latitude and low latitude regions. During a magnetic storm, ROTI maps show changes in numerical values and disturbance areas. ROTI maps can represent global ionospheric disturbances to a certain extent. On this basis, the index of Global ROTI Disturbance (Global ROTI index, GROTI) is proposed and the analysis results show that GROTI in high regions has a good correlation with the geomagnetic index Kp and AE index.

Key words GNSS, Ionospheric irregularities, ROTI, Rate of TEC, GROTI

0 引言

电离层快速的随机变化会导致穿越其间的无线电信号产生剧烈的幅度和相位变化,引起信号的衰落或者失锁,从而导致卫星通信、导航等无线电信息系统通信中断、导航定位误差增加等。利用各种手段监测电离层中的扰动变化,并采用相应的影响效应减缓措施对于提升系统性能具有重要的意义。随着全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的快速发展,地基 GNSS 台站目前已经基本形成了较好的全球覆盖能力,可以实现对电离层全天候连续监测,目前 GNSS 已成为电离层监测最为重要的技术手段之一。

通常可采用专用型的 GNSS 闪烁接收机实现对电离层扰动变化的监测。但相较于普通的 GNSS 接收机而言,现有的 GNSS 闪烁接收机价格较高且无法实现较好的全球覆盖。如何利用全球公开发布的 GNSS 数据进行电离层扰动监测是国内外研究的热点。对于普通(非闪烁)GNSS 接收机而言,最常见的电离层扰动测量数据是总电子含量变化率指数(Rate of TEC Index, ROTI),其可以方便地根据 RINEX 数据文件中 GPS(Global Positioning System)双频载波相位数据提取得到,目前 ROTI 已成为表征电离层不规则体结构的重要参数之一。Pi 等[1] 在 1997 年首先提出了 TEC (Total Electron Content) 变化率(Rate of TEC, ROT)和 TEC 变化率指数 ROTI 的计算方法。随后 Basu 等[2] 发现 ROTI 与闪烁现象密切相关,可以用作评估电离层闪烁存在的判据。但由于卫星速度的电离层投影变化和电离层不规则体漂移的变化,ROTI 与闪烁指数 S_4 之间的定量关系变化很大,难以通过对 ROTI 的分析来获得闪烁的定量估计。ROTI 使用数据的采样率和计算间隔也会对其与 S_4 之间的关系有影响[3]。Cherniak[4,5] 采用$2^\circ \times 2^\circ$分辨率的栅格构建出了北半球高纬区域每日平均的圆形 ROTI 地图,并被国际大地测量服务 (International GNSS Service, IGS) 接受作为一项表征电离层不规则性和强度的新的电离层数据,在此基础上还研究了极区不规则体椭圆边界与电离层不规则体活动特征参数之间的相关性。

国内方面,Xu 等[6] 研究了位于赤道异常区桂林和武汉两地 GPS 信号闪烁与 TEC 起伏的关系,结果表明 S_4 和 ROTI 呈显著正相关。为了进一步研究 ROTI 与 S_4 的定量关系,Liu 等[7] 研究了有效速度和仰角的变化对 ROTI 与 S_4 的影响,结果表明有效速度对其相关性起着重要的作用。Deng[8] 通过研究 GPS 闪烁、TEC 损耗和 ROTI 发现,同时发生的强闪烁、TEC 损耗和 ROTI 可能与电离层不规则体结构有关。Yin 等[9] 通过研究磁暴期间南极地区电离层相位闪烁和 ROTI 的特征,发现两者有较好的相关性,并且强闪烁在很大概率上会导致较大 ROTI 的出现。Xu[10] 用机器学习的方法实现了对 ROTI 的预测。Shao 等[11] 分析了不同采样频率和不同时间窗口的各类 ROTI 与 S_4 指数的相关性。

国内目前对 ROTI 主要研究其与闪烁的关系,且

以单站或者区域研究为主，根据 Pi 等[1] 的定义，ROTI 能够检测电离层不规则体的存在及测量 TEC 空间梯度的不规则结构。本文基于全球约 400 个站点的 GNSS 数据构建了全球 ROTI 地图，并在全球 ROTI 变化规律分析的基础上，提出了一种新的全球电离层扰动指数。

1 电离层 ROTI 指数计算

卫星导航系统的伪距观测量和相位观测量表示如下：

$$\begin{cases} P(i) = R(i) + I(i) + C(i) + \varepsilon_P(i), \\ L(i) = R(i) - I(i) + C(i) + \lambda N + \varepsilon_\phi(i). \end{cases} \tag{1}$$

式中：i 表示历元；$P(i)$和$L(i)$分别为伪距观测量和相位观测量；$I(i)$为接收机与卫星视线方向上的电离层延迟；$C(i)$为伪距与相位观测量公有误差项，包括卫星钟差、接收机钟差、对流层延迟和星历误差；λ为波长因子；N为整周模糊度；$\varepsilon_P(i)$和$\varepsilon_\phi(i)$分别为伪距和相位噪声以及其他非模型化误差。

由于电离层色散的作用，不同频率的 GPS 信号通过电离层会产生不同的延迟，可以通过两个频率之间观测量的差得到 TEC。ROTI 定义为一定时间间隔内的 TEC 变化率的标准偏差[3]。计算方法如下：

$$L_{\mathrm{GF}}(i) = L_1(i) \cdot \lambda_1 - L_2(i) \cdot \lambda_2, \tag{2}$$

$$\delta_{\mathrm{ROT}}(i) = \frac{L_{\mathrm{GF}}(i) - L_{\mathrm{GF}}(i-1)}{\Delta t \times 10^{16} \times 40.3 \times \left(\dfrac{1}{f_1^2} - \dfrac{1}{f_2^2}\right)}, \tag{3}$$

$$\delta_{\mathrm{ROT}}(k) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{j=k-N}^{k} \left(\delta_{\mathrm{ROT}}(j) - \overline{\delta_{\mathrm{ROT}}}\right)^2}. \tag{4}$$

其中：L_1和L_2为两个频段的相位观测值；$L_{\mathrm{GF}}(i)$为 GNSS 双频观测时刻 i 处的几何无关线性组合；λ_1和λ_2为两个频段对应频率的波长；δ_{ROT}(单位 TECU·min^{-1})为 TEC 的变化率；Δt为相邻历元间的时间差；$\overline{\delta}_{\mathrm{ROT}}$为时间隔 k 内的 ROT 平均值。

2 全球 ROTI 地图构建

2.1 数据来源

IGS 提供 30 s 采样率的全球导航卫星系统观测数据。本文采用了 IGS 全球大约 400 个站点的数据来构建 ROTI 地图，站点分布如图 1 所示。这些数据主要来自于武汉大学 IGS 数据中心，另外一些数据从 EPN(the EUREF Permanent GNSS network)网站补充。

此外，还需要地磁活动指数来研究电离层扰动指数与地磁指数的关系。这些数据可以从 OMNIWEB 官网* 下载。

2.2 ROTI 地图构建

这里采用的原始数据是 GNSS 伪距和相位观测量，时间分辨率是 30 s，计算 ROTI 之前要对原始观测数据进行预处理。首先从 RINEX 格式数据文件中提取出伪距与相位的观测量，然后对观测量进行周跳检测和剔除野值，周跳检测采用电离层残差法。电离层残差法能够消除位置参数、卫星星历误差、接收机和卫星的钟差以及对流层延迟的影响，该方法是对 GNSS 的观测方程进行一定的线性组合，得到电离层残差组合观测方程，即

$$\varphi_{\mathrm{I}} = \varphi_1 - \frac{f_1}{f_2}\varphi_2 = N_1 - \frac{f_1}{f_2}N_2 - \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2} \cdot \frac{I}{cf_1} + \varepsilon_{\varphi I}. \tag{5}$$

式中：φ_1, φ_2是对应f_1, f_2两个频率的载波相位，单位为周；N_1, N_1为两个频段上的模糊度参数；c 为光速；$\varepsilon_{\varphi I}$为电离层残差组合的误差。判断是否有周跳发生需要对式(5)的电离层残差组合的相邻历元求差，即

$$\Delta\varphi_{\mathrm{I}} = \Delta N_1 - \frac{f_1}{f_2}\Delta N_2 - \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2} \cdot \frac{\Delta I}{cf_1} + \Delta\varepsilon_{\varphi I}. \tag{6}$$

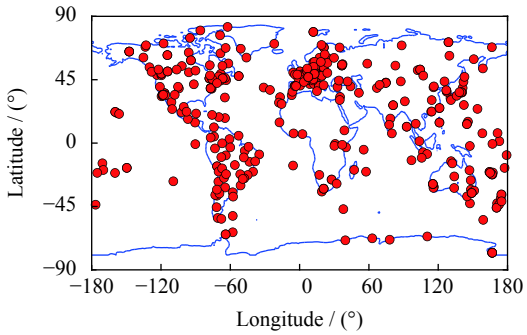


图 1 GNSS 站点分布

Fig. 1 Distribution of GNSS ground station

* https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html

其中, ΔN_1, ΔN_2分别为两个载波上的周跳值。在没有周跳发生的情况下, $\Delta N_1 = \Delta N_2 = 0$, 此时式(6)可改写为

$$\Delta\varphi_{\rm I} = -\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2} \cdot \frac{1}{\lambda_1}\Delta d_{\rm ion1} + \Delta\varepsilon_{\varphi I}. \qquad (7)$$

其中, $\Delta d_{\rm ion1}$是 L_1 载波的电离层误差在历元间求差的值, 根据文献 [12] 将阈值设置为 0.28 周, 如果$|\Delta\varphi_{\rm I}| >$ 0.28周则认为发生了周跳。

另外, 需要将原始文件中 WGS-84 大地坐标系下的观测站位置转换为地理坐标系下的经度和纬度, 并根据星历计算出卫星的位置, 确定卫星的仰角/方位角, 并剔除掉仰角低于 20°的值, 见参考文献 [13]。电离层穿刺点(Ionospheric Pierce Point, IPP)的高度设为 450 km, 计算出穿刺点的经纬度, 以便将 ROTI 的值投影到地图上。

ROTI 是时间间隔 5 min 内 ROT 的标准差, ROT 值的计算见式(3)。本文采用的原始 GNSS 数据的采样频率是 30 s, 在数据处理时, 为了保证连续性和结果的有效性采用滑动窗口的方法, 滑动窗口的长度为 5 min。30 s 采样率和 5 min 时间间隔的 ROTI 需要窗口内至少有 10 个 ROT 值。如果不满足条件, 则窗口继续向下滑动, 直到满足条件为止。假定一个观测站一个时刻能够接收到 10 颗卫星的数据, 那么一天一个观测站大约有$10 \times 24 \times 60/5 = 2880$个 ROTI 数据, 400 个观测站的数据量为$2880 \times 400$个, 即大约为 100 万个 ROTI 数据, 利用这些数据绘制得到 ROTI 地图。

ROTI 地图采用 2.5°(纬度)×5°(经度)分辨率的网格构建, 时间分辨率设为 1 h。将计算出的 ROTI 值根据对应穿刺点的经纬度投影到网格上, 每个网格点的值是对每个小时网格覆盖范围内所有的 ROTI 值取均值得到的。ROTI 地图构建流程如图 2 所示。

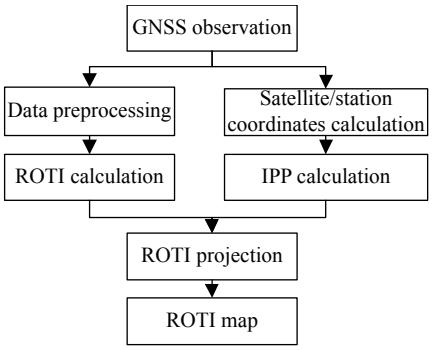


图 2 ROTI 计算流程

Fig. 2 Calculation flowchart of ROTI

3 结果分析

3.1 ROTI 地图结果

ROTI 作为一种反映电离层不规则体的指数, 其对应的空间尺度由 GPS 卫星星下点轨迹的运动速度、垂直于传播路径的不规则体漂移速度的矢量和(大约在 100 m·s^{-1} 的量级)以及 TEC 采样周期共同决定。GPS 数据的采样间隔为 30 s, 则对应的奈奎斯特周期为 60 s, ROTI 采用的时间窗口为 5 min,对应的不规则体空间尺度大约为 6～60 km[14]。图 3 为 2015 年 3 月 16 日 01:00 UT 电磁平静期间的一个 ROTI 地图, 可以看到不规则体活动主要分布在高纬和低纬区域。北半球高纬地区的电离层不规则体主要分布在北纬 55°以上, 对应的 ROTI 值在 0.3～0.5 TECU·min^{-1}。低纬地区不规则体主要存在于夜侧区域, 观察连续时间的 ROTI 地图可以发现, 不规则体主要出现在南美洲上空, 对应的 ROTI 的值在 0.3 TECU·min^{-1}左右。中纬区域 ROTI 值很小, 这表明在中纬区域几千米到几十千米的不规则体很弱或者几乎没有。非闪烁条件下不同区域和时间的大量 ROTI 数据表明[15], ROTI<0.5 TECU·min^{-1} 时没有显著的电离层扰动。

2015 年 3 月 17 日发生了大地磁暴, 图 4 为磁暴期间 09:00 UT 时的 ROTI 地图。可以看出高纬地区出现了强电离层不规则体现象, ROTI 值最高能够达到 5 TECU·min^{-1}, 不规则体覆盖范围也由高纬区域向中低纬扩散, 尤其在北美洲扩大到了北纬 45°左右。而其他区域没有明显的不规则体现象, ROTI 在 0.3 TECU·min^{-1} 以下。

图 5 给出了 2015 年 3 月 15–20 日的行星际磁场 B_z、磁暴环流指数(*Dst*)和地磁活动指数随时间的变化趋势。从图 5 可以看出, 3 月 17 日 05:00 UT *Dst* 突然增大到 56 nT, 这标志着磁暴急始(Storm Sudden Commencement, SSC)。07:00 UT 开始 *Dst* 开始大幅度下降, 磁暴进入主相阶段, 一直到 22:00 UT *Dst* 达到最小值–223 nT, 此后磁暴缓慢进入恢复相阶段。此次磁暴 *Dst* 的下降过程一共分成了三段, 第一次下降与 B_z 的南向偏转有关, 后两次伴

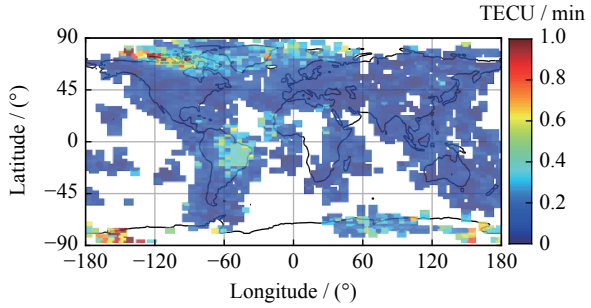


图 3 2015 年 3 月 16 日 01:00 UT 电离层平静时的 ROTI 地图

Fig. 3 ROTI map during ionosphere is calm at 01:00 UT on 16 March 2015

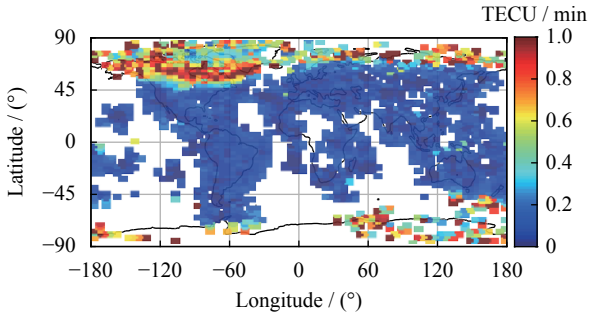


图 4 2015 年 3 月 17 日 09:00 UT 电离层扰动时的 ROTI 地图

Fig. 4 ROTI map during ionospheric disturbance at 09:00 UT on 17 March 2015

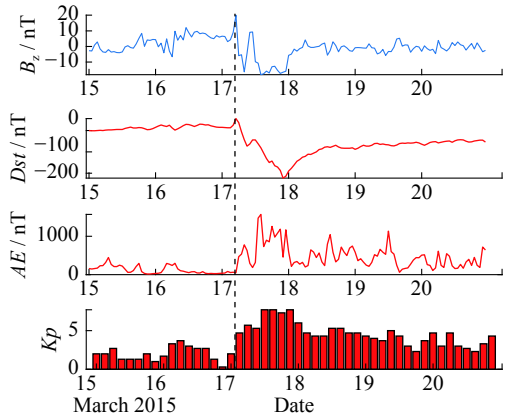


图 5 2015 年 3 月 15—20 日行星际磁场与地磁指数

Fig. 5 Interplanetary magnetic field and geomagnetic index on 15—20 March 2015

随着 *AE* 指数激增, 可能是受极区环电流的影响。

图 6 是磁暴当天 2015 年 3 月 17 日 03:00—14:00 UT 磁暴前和磁暴发生时 40°N—90°N 的 ROTI 地图。可以看出磁暴开始(05:00 UT)以前, 高纬地区的 ROTI 数值相对较小, 电离层仍然比较平静。06:00 UT 开始 ROTI 数值逐渐增大, 09:00 UT 时 ROTI 大范围地明显增加, 不规则体的覆盖范围扩展到北纬 45°, 强度同时增强, 此时 *AE* 指数首次达到第一个尖峰, *Dst* 下降到第一段的末尾。此后 *Dst* 有小幅度的回升, 然后继续下降。不规则体的强度也一直处于较高的范围, 此次磁暴对高纬地区的不规则体起增强作用。

综上所述, ROTI 地图存在明显的数值和扰动面积的特征, 能够表征大尺度不规则体的覆盖范围及强度, 不规则体的变化对磁暴有一定的响应。

3.2 新的 ROTI 扰动指数构建方法

ROTI 地图主要有 ROTI 数值和扰动面积两个特征。结合这两个特征, 可以构建一个能够表现全球电离层扰动的参数。这里利用扰动的 ROTI 投影面积与所有 ROTI 投影面积的比值构建扰动参数。ROTI 值的投影面积 s 可以仿照文献 [16] 的计算方法, 其计算表达式为

$$s = R_e^2 \Delta\varphi \left[\sin\theta - \sin\left(\theta + \Delta\theta\right)\right]. \tag{8}$$

其中, θ为 ROTI 值对应的纬度, φ为 ROTI 值对应的经度, $\Delta\theta$和$\Delta\varphi$为沿纬度和经度方向的角度刻度, R_e为地球半径。

所有的 ROTI 面积就是将全部存在 ROTI 值的投影面积累加, 基于文献 [15] 取 0.5 TECU·min^{-1} 为判断电离层扰动的阈值, 扰动面积为 ROTI>0.5 TECU·min^{-1} 的投影面积的和。定义全球 ROTI 扰动指数(Global ROTI index, GROTI, 定义符号δ_{GROTI})为 ROTI 扰动的投影面积与全球所有 ROTI 投影面积的比值, GROTI 的计算表达式为

$$\delta_{\mathrm{GROTI}} = \frac{\sum_{i=1}^{m} s_i}{\sum_{j=1}^{n} s_{\mathrm{j}}}. \tag{9}$$

其中, m 为 ROTI 值大于 0.5 TECU·min^{-1} 的数量, n 为全球所有 ROTI 值的数量, s 代表 ROTI 对应的投影面积。这里 GROTI 的时间分辨率设为 1 h。

这里对高纬和低纬区域的 GROTI 进行了分析, 低纬区域 GROTI 在地磁相对较小的 9 天(2015 年 3 月 3—11 日)随时间的变化情况如图 7 所示。可以看到 00:00—06:00 UT 的 GROTI 值明显大于其他

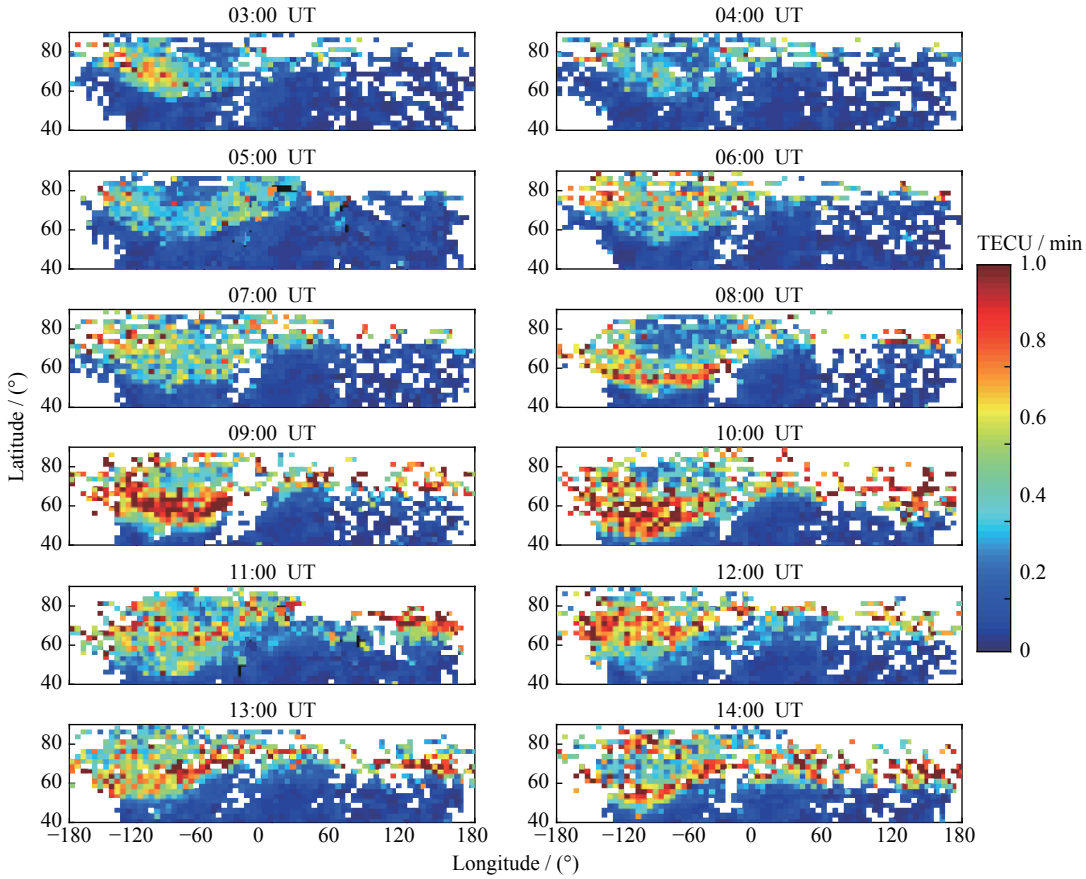


图 6　2015 年 3 月 17 日 03:00—14:00 UT 40°N—90°N 的 ROTI 地图

Fig. 6　ROTI map of 40°N—90°N at 03:00—14:00 UT on 17 March 2015

时刻, 且低纬区域不规则体主要存在于南美洲上空, 以 60°W 为例, 00:00—06:00 UT 对应 20:00—02:00 LT, 则低纬区域的大尺度不规则体主要出现在 20:00—02:00 LT, 这与低纬区域闪烁出现规律一致[14]。图 8 为高纬区域的 GROTI 及地磁指数 Kp 随时间的变化情况, 可以看出高纬区域 GROTI 没有明显的时间变化规律, 而是随着地磁指数的变化而变化, 这说明高纬区域的不规则体受地磁的影响很大。

图 9 给出了 2015 年 3 月 1—31 日 Kp 以及 GROTI 随时间的变化情况, 可以看出具有很好的一致性。为了进一步验证 GROTI 与地磁的关系, 选取地磁指数 Kp、Dst 和极光电集流指数 AE 来分析 GROTI 与空间天气扰动的关系。

由于 Kp 指数的分辨率是 3 h, 与 AE 指数和 GROTI 指数的分辨率都不同, 为了便于统计 GROTI 与地磁指数的相关性, 对 AE 指数和 GROTI 指数取了 3 h 的平均值。按照 Kp 指数的分辨率, 3 h 算作一次事件, 对 31 天共 248 个事件进行统计, 其中扰动期 ($Kp \geqslant 3$)事件 87 个, 平静期($Kp < 3$)事件 161 个。一天的 ROTI 计算需要 400 个站的 GNSS 数据, 且处理这些数据需要消耗比较长的时间, 所以暂时只分析了 2015 年 3 月的结果。

相关系数的计算表达式为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\boldsymbol{X}_i - \bar{\boldsymbol{X}})(\boldsymbol{Y}_i - \bar{\boldsymbol{Y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\boldsymbol{X}_i - \bar{\boldsymbol{X}})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\boldsymbol{Y}_i - \bar{\boldsymbol{Y}})^2}}. \tag{10}$$

其中: $\boldsymbol{X}$, $\boldsymbol{Y}$ 分别代表 GROTI 和地磁指数归一化后的样本向量; n 表示向量的长度; $\bar{\boldsymbol{X}}$, $\bar{\boldsymbol{Y}}$ 分别表示两个向量的均值。相关系数的范围为–1 到+1。–1 表示完全负相关, 而+1 表示完全正相关, 0 表示两个样本之间没有相关性。

ROTI 有很强的区域特性, 所以将 GROTI 分为低纬、中纬、高纬 3 个区域与地磁指数的相关性进行统计分析, 结果列于表 1。由表 1 可以看出: 中高纬区

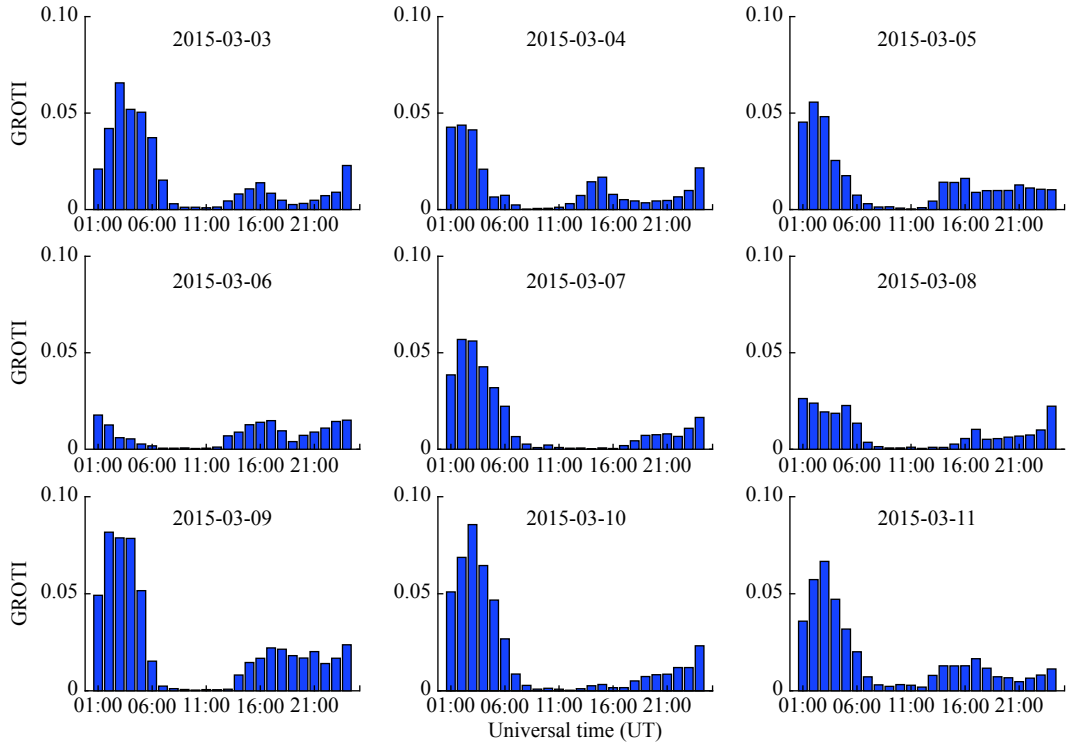


图 7 2015 年 3 月 3—11 日低纬区域 GROTI 变化

Fig. 7 GROTI changes in low-latitude regions from 3 to 11 March 2015

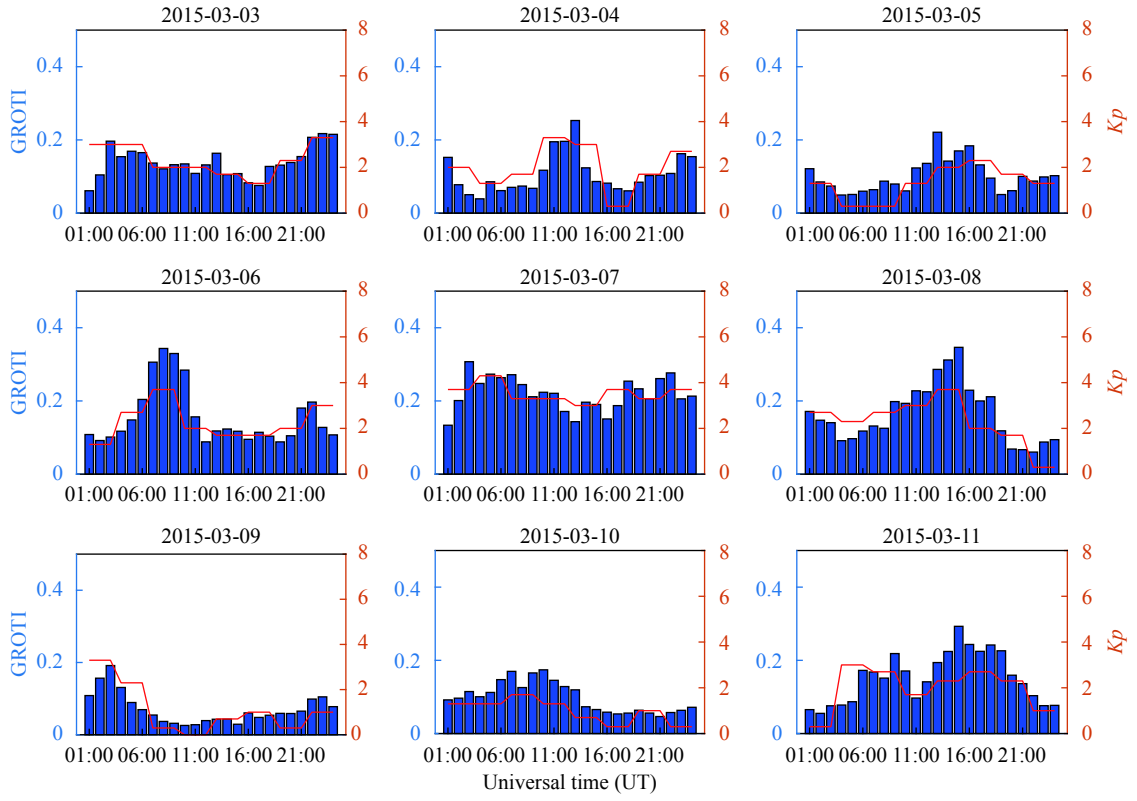


图 8 2015 年 3 月 3—11 日高纬区域 GROTI 及 *Kp* 变化

Fig. 8 GROTI and *Kp* changes in high-latitude regions from 3 to 11 March 2015

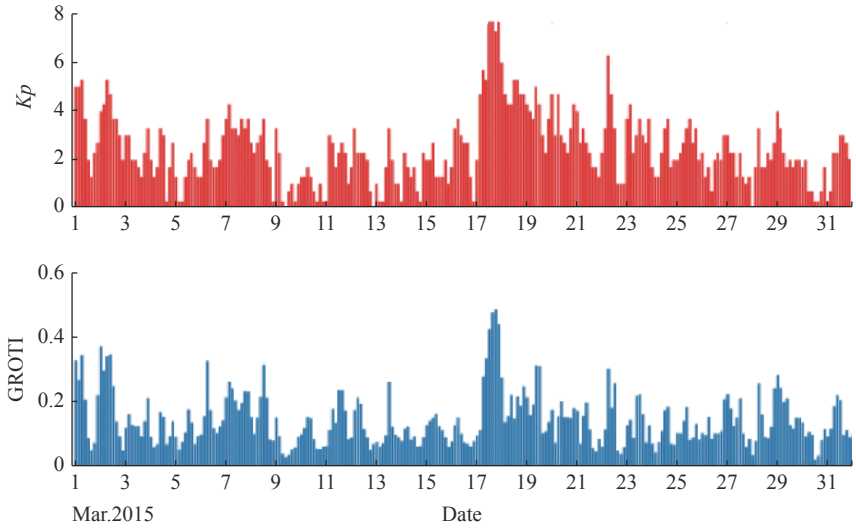


图 9　2015 年 3 月 *Kp* 指数和 GROTI 变化

Fig. 9　Changes of *Kp* index and GROTI in March 2015

表 1　GROTI 与地磁指数的相关性

Table 1　Correlation between GROTI and geomagnetic indices

GROTI	地磁指数		
	Kp	*AE*	*Dst*
高纬	0.8052	0.8383	–0.4846
中纬	0.7485	0.7272	–0.6144
低纬	–0.0061	–0.0933	0.0921

域 GROTI 与 *Kp* 和 *AE* 指数的相关性较好，高纬区域 GROTI 与 *AE* 指数相关性最好，达到 0.83；而低纬区域 GROTI 与 *Kp* 和 *AE* 指数几乎没有相关性。*Dst* 指数与 GROTI 的关系都不明显，这是因为 *Dst* 指数是来源于多个近赤道区的地磁观测站，所以与中、高纬的 GROTI 相关性不是很好，而与低纬 GROTI 几乎没有相关性，这说明观测到的低纬区域不规则体的主要影响因素可能不是地磁指数。

高纬的 GROTI 与 *Kp* 指数和 *AE* 指数有着较好的相关性。基于 GROTI 与 *Kp* 指数的关系，可以考虑用 GROTI 来估计 *Kp* 指数。因为 *Kp* 指数是从多个地磁观测站综合计算得出，而各个天文台无法实时报告数据，所以想要获取实时 *Kp* 指数需要对 *Kp* 指数进行估计。GROTI 的时间分辨率是 1 h，要实现对 *Kp* 指数近实时的估计，根据实际情况可以将时间分辨率进行调整，这也为利用电离层数据来估计 *Kp* 指数提供了思路。

4　结论

本文基于 GNSS 数据构建出全球 ROTI 地图，并对地磁平静和扰动期间不同的 ROTI 地图进行分析，在此基础上尝试提出一个新的全球 ROTI 扰动指数 GROTI。

ROTI 地图具有表征几千米到几十千米的大尺度不规则体的能力。在电离层较为平静时期，全球 ROTI 的值主要分布在 0.5 TECU·min^{-1} 以下，不规则体主要分布在高纬和低纬区域。当有剧烈的电离层扰动时，例如发生磁暴时，高纬区域 ROTI 值明显增大，最大可以达到 5 TECU·min^{-1}，出现了强不规则体现象，且覆盖范围由极区向中低纬地区扩展。而中纬区域无论在平静还是扰动期间，ROTI 值都相对较小，这表明中纬区域大尺度不规则体很弱或者不存在。

结合 ROTI 地图数值和面积变化的特征，尝试提出了一个可以表征全球电离层扰动的指数 GROTI。结果表明，在地磁活动相对平静期间，低纬区域不规则体主要出现在 20:00—02:00 LT，与低纬区域闪烁的出现规律一致；而高纬区域的 GROTI 则与 *Kp* 指数变化一致，不规则体主要受地磁的影响。进一步对低纬、中纬和高纬 3 个区域的 GROTI 与地磁指数的关系进行统计分析，发现高纬区域 GROTI 与 *Kp* 以及 *AE* 指数相关性较好，与 *AE* 指数的相关性最高达到了 0.83。为了保证其科学性与一致性，GROTI 指数还需要大量的数据去验证。由于 ROTI 计算需要很

多的 GNSS 测站数据，且数据处理需要一定的时间和计算机资源，验证工作需要一定的时间。

致 谢 GNSS 数据由武汉大学 IGS 数据中心 (http://www.igs.gnsswhu.cn/)和 http://www.epncb.oma.be/_networkdata/data_access/dailyandhourly/datacentres.php 网站提供，地磁指数由 OMNIWEB 网站提供。

参考文献

[1] PI X, MANNUCCI A J, LINDQWISTER U J, *et al*. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, **24**: 2283

[2] BASU S, GROVES K M, QUINN J M, *et al*. A comparison of TEC fluctuation and scintillations at Ascension Island[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1999, **61**: 1219-1226

[3] WEI W, LI W, SONG S, *et al*. Study on the Calculation Strategies of Ionospheric Scintillation Index ROTI from GPS [C]//IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama: IGARSS, 2019: 9894-9897

[4] CHERNIAK I, KRANKOWSKI A, ZAKHARENKOVA I. ROTI maps: a new IGS ionospheric product characterizing the ionospheric irregularities occurrence[J]. *GPS Solutions*, 2018, **22**: 69

[5] CHERNIAK I, KRANKOWSKI A, ZAKHARENKOVA I. Observation of the ionospheric irregularities over the Northern Hemisphere: methodology and service[J]. *Radio Science*, 2014, **49**(8): 653-662

[6] XU Jisheng, ZHU Jie, LI Li, *et al*. Comparison of L-band radio wave scintillations and TEC fluctuations from observation of Wuhan and Guilin[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2007(2): 181-186 (徐继生, 朱劼, 李莉, 等. 武汉与桂林L-波段电波闪烁与TEC起伏特征比较[J]. 电波科学学报, 2007(2): 181-186)

[7] LIU Y, RADICELLA S. On the correlation between ROTI and S_4[J]. *Annales Geophysicae Discussions*, 2019: 1-14

[8] DENG K, MA Y, LIU M, *et al*. Observations of TEC depletion, periodic structure of TEC, ROTI and scintillation associated with ESF irregularities over South China[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(3): 331-340

[9] YIN Ping, WANG Huimei, PAN Lijing, *et al*. Correlation between ionospheric scintillations and GPS TEC spatiotemporal variations at the South Pole and McMurdo stations during a magnetic storm[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2016, **28**(4): 514-522 (尹萍, 王慧美, 潘丽静, 等. 磁暴期间南极South Pole站和McMurdo站电离层闪烁与GPS TEC时空变化相关性研究[J]. 极地研究, 2016, **28**(4): 514-522)

[10] XU F. An Investigation of optimal machine learning methods for the prediction of ROTI[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2020, **3**(2): 1-15

[11] SHAO Lengleng, SONG Shuli. The preliminary comparative analysis of ROTI calculation[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2017, **58**(6): 90-102 (邵冷冷, 宋淑丽. ROTI计算策略的初步分析比较[J]. 天文学报, 2017, **58**(6): 90-102)

[12] HE Haibo. Precise Kinematic GPS Surveying and Quality Control[D]. Henan: Information Engineering University, 2002 (何海波. 高精度GPS动态测量及质量控制[D]. 河南: 中国人民解放军信息工程大学, 2002)

[13] MENG Weixiao, HAN Shuai, CHI Yonggang. Principles of Satellite Navigation and Positioning[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2013 (孟维晓, 韩帅, 迟永钢. 卫星定位导航原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2013)

[14] LI Guozhu. Studies on Monitoring, Analysis and Application of Mid- and Low-Latitude Ionospheric Scintillation in China[D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences(Wuhan Institute of Physics and Mathematics), 2007 (李国主. 中国中低纬电离层闪烁监测、分析与应用研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(武汉物理与数学研究所), 2007)

[15] PI X, IIJIMA B A, LU W. Effects of ionospheric scintillation on GNSS-Based positioning[J]. *Journal of The Institute of Navigation*, 2017, **64**: 3-22

[16] AFRAIMOVICH E L, ASTAFYEVA E I, OINATS A V, *et al*. Global electron content: a new conception to track solar activity[J]. *Annales Geophysicae*, 2008, **26**(2): 763769

(责任编辑：孙伟英)