

GPS 周跳频次时空特征分析

杨 玲, 宋梵彬, 程碧泉, 孙 楠, 楼立志

(同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要: 利用 TurboEdit 周跳探测方法对 2015—2019 年美国连续运行参考系统(CORS)中均匀分布的 357 个测站的 GPS 观测数据进行周跳探测, 对周跳探测结果的时空特征进行统计分析, 并探讨了周跳频次与高度角、地方时、季节以及年份之间的相关性。结果表明, 低高度角下周跳频次相对更高; 在地方时 12:00—18:00 区间内, 周跳频次显著升高; 3 月和 9 月左右周跳频次达到峰值, 3 月的周跳频次高于 9 月的周跳频次, 而且 2015 年的周跳频次显著高于其他年份。

关键词: 周跳探测; 相关性; 时空特征

中图分类号: P228

文献标志码: A

Spatial-temporal Characteristics of GPS Cycle Slip Frequency

YANG Ling, SONG Fanbin, CHENG Biquan, SUN Nan, LOU Lizhi

(School of Survey and Geo-information, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In this paper, the cycle slip detection method of TurboEdit is used to detect the GPS observation data of 357 stations evenly distributed in the continuous operational reference system (CORS) of the United States of America from 2015 to 2019. The spatial and temporal characteristics of the cycle slip detection results are statistically analyzed, and the correlation between the cycle slip frequency (F-CS) and the elevation angle, local time, season and year is discussed. The results show that F-CS values are relatively higher at low altitude angles and there are more cycle slip events between 12:00—18:00 than those in other times. In addition, F-CS values in March and September reach the peak, and F-CS values in March are higher than those in September. It is notable that F-CS values in 2015 are higher than those in other four years.

Keywords: cycle slip detection; correlations; spatial-temporal characteristics

周跳是磁暴、太阳风暴、极地风暴、地磁活动等现象对全球定位系统(GPS)观测质量影响的重要体现^[1]。由于周跳影响 GPS 定位结果的精确性、完好性、连续性和可用性, 因此对周跳的分析和处理一直是导航界的研究热点。

目前, 常用的周跳探测方法有线性组合法、参数估计法等。从原始观测值出发, 线性组合法采用观测值的随机特性构造具备特定性质的观测值线性组合, 并依据原始观测噪声以及线性组合后的系数设置合理阈值进行周跳探测。TurboEdit 方法通过构造无几何模型(GF)和 Melbourne-Wubben(MW)组合在历元间求差来探测周跳^[2]。Cai 等^[3]设计了窗口滑动阈值算法来改进 TurboEdit 方法, 使其适应诸如电离层误差等噪声变化更加剧烈的观测环境。Chen 等^[4]、Qian 等^[5]探讨了 TurboEdit 方法在实时 GPS 观测中的问题并改进了阈值。参数估计法将周跳视为函数模型异常, 纳入 GPS 函数模型中进行估计, 并通过卡尔曼滤波法或拟准检定法进行探测, 但此类方法受观测噪声影响显著^[6]。

周跳探测是精密单点定位的关键问题之一, 想要获得高精度定位结果必须保证载波相位中无周跳发生^[7]。此外, 周跳探测相关参数包括探测阈值、周跳量级、周跳频次以及周跳发生的时间和空间等^[8], 其结果都是空间物理学等研究领域所需的分析数据。周跳探测阈值可以用来反映电磁暴或者极地电流风暴的短时快速变化。Nie 等^[9]在太阳爆发驱动背景下分析了电磁暴异常活动导致的周跳误探及动态精密单点定位精度恶化, 并探讨了全球高、中、低

收稿日期: 2022-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(41874004, 42274030); 上海市自然科学基金(20ZR1462000); 中央高校基本科研业务费专项资金(221202105-22)

第一作者: 杨 玲, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为卫星导航定位完好性、粗差探测、多源融合等。

E-mail: lingyang@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

不同纬度地区的总电子含量变化与周跳探测阈值之间的关系^[10]。程洁等^[11]对中国岭南地区的电离层闪烁现象和周跳频次时空统计特征之间的强相关性进行了研究。Zhang等^[12]利用1999—2005年中国南方的2个GPS测站数据论证了太阳周期与周跳频次在时间上的正相关性。Skone等^[13]研究了北欧地区靠近极地的电离层磁暴指数 A_1 变化与10个国际GNSS(全球导航卫星系统)服务组织(IGS)测站周跳频次地方时变化之间的关系, A_1 的升高导致周跳频次的急剧上升。Chernyshov等^[14]统计了北极圈附近4个GPS测站周跳频次,论证了周跳频次的上升是因为电离层总电子含量(TEC)的跃升。Geng等^[15]统计了2015—2018年中国区域的周跳频次时空特征及其与电离层异常活动之间的关联性。

本文采用357个美国连续运行参考系统(CORS)5年的GPS双频观测数据,统计并分析了周跳频次的时空特征。首先评估了CORS数据的完整率,其次对TurboEdit算法和周跳频次时空特征统计方法进行了论述,然后分析了周跳频次与高度角、地方时、季节变化之间的关系,最后重点探讨了2015年周跳频次的时空特征。

1 数据及方法

1.1 数据来源

从美国国家大地测量局(NGS)CORS中选取美国本土范围内(不包括阿拉斯加州、夏威夷州以及美国海外属地)相对均匀分布的357个测站5年的观测数据,时间范围为2015-01-01—2019-12-31。

实验所选取的站点覆盖了美国本土,且在空间布局上较为均匀。所采集的数据均为接收机独立交换格式rinex 2.11版本。此外,定义数据完整率为每月可用观测文件数与理想观测文件数的比值。图1为2015—2019年GPS数据完整率的逐月统计结果。可见,数据完整率总体上保持在80%~90%之间,且多数在85%以上。由于美国CORS每月会有新建基站,站点数量处在一个时刻更新的状态,因此数据完整率总体上逐年递增。较高的数据完整率能够为周跳频次时空特征统计分析提供数据量保障。

1.2 周跳探测方法

TurboEdit方法是一种应用较为广泛的周跳探测算法^[2],该算法依据GPS双频伪距和载波相位观测值,分别构造MW组合和无几何模型,计算式为:

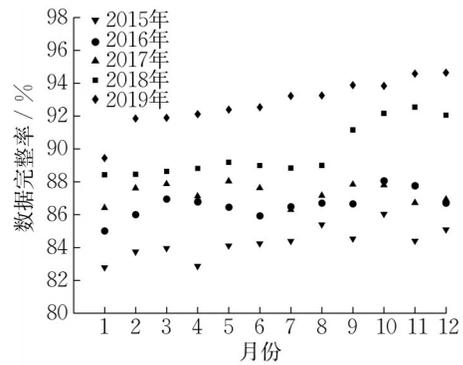


图1 数据完整率

Fig.1 Percentage of data

$$L_{MW} = \frac{f_1 \lambda_1 \varphi_1 + f_2 \lambda_2 \varphi_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} = \lambda_{WL} N_{WL} \quad (1)$$

$$\varphi_{GF} = \lambda_1 \varphi_1 - \lambda_2 \varphi_2 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2} I \quad (2)$$

式中:下标WL表示宽巷载波; $\lambda_{WL} = c/(f_1 - f_2) \approx 0.86$ m和 $N_{WL} = N_1 - N_2$ 分别为宽巷载波波长和模糊度。式(1)、(2)中其余各项符号含义见文献[2]。式(1)、(2)为单历元观测值的线性组合,进一步对前后相邻历元作差可构造如下计算式:

$$\Delta N_{WL} = \Delta \varphi_1 - \Delta \varphi_2 - \frac{f_1 \Delta P_1 + f_2 \Delta P_2}{\lambda_{WL} (f_1 + f_2)} \quad (3)$$

$$\Delta \varphi_{GF} = \lambda_1 \Delta \varphi_1 - \lambda_2 \Delta \varphi_2 = \lambda_1 \Delta N_1 - \lambda_2 \Delta N_2 + \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2} \Delta I \quad (4)$$

式中, Δ 表示单次差分算子。本文所采用数据的相邻历元间隔为30 s。由于历元间差分消除了大部分电离层延迟误差,因此 $((f_1^2 - f_2^2)/f_2^2) \Delta I$ 通常可忽略不计, ΔN_{WL} 、 $\Delta \varphi_{GF}$ 即为进行周跳探测的统计量。

在只考虑测量噪声的情况下, ΔN_{WL} 、 $\Delta \varphi_{GF}$ 是微小常量,一旦产生周跳,统计量就会被放大。利用MW组合和无几何模型,就可探测出绝大多数周跳,探测效率较高^[15]。本文设定MW探测的阈值为1 m,无几何模型探测的阈值为0.05 m^[16],时间系统统一规定为美国中部时间,即UTC-6。

2 结果与分析

本文对周跳频次的定义为:电离层穿刺点(IPP)观测次数和产生周跳的IPP观测次数(SLIPP)各自总数的百分比。

2.1 周跳频次随高度角变化的时空相关性

图2为2015—2019年在 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 高度角空间区域内以10为底周跳频次 n 的对数随高度角的变化,每一幅图中的每一条折线表示 2° 高度角内以10为底周跳频次的对数。可以看到,在同一年内,以10为底周跳频次的对数随着高度角的升高而逐渐降低,表明周跳频次都是随着高度角的升高而逐渐降低。

当高度角为 $10^{\circ}\sim <12^{\circ}$ 时,周跳频次达到了最大值。此后,随着高度角的不断升高,周跳频次明显降低。在 $12^{\circ}\sim <20^{\circ}$ 区间内,周跳频次最为集中。当高度角升高到 $22^{\circ}\sim <30^{\circ}$ 时,周跳频次降低到很小的数量级,在此区间内,尽管周跳频次继续保持随高度角

升高而降低的趋势,但是不同高度角区间之间的周跳频次差异并不显著。在不同年份,周跳频次也存在显著差异,2015年的周跳频次远高于其他年份,在当年的4月达到峰值,尤其是在 $10^{\circ}\sim <12^{\circ}$ 的高度角区间内,周跳频次约为32%。2016年的变化幅值低于2015年,但相较于2017和2018年仍更为剧烈。2017、2018、2019年的变化幅值最小,且不同年份间的差异性相对较小。每年的周跳频次都表现为先升(1—3月附近)—后降(3月附近—7月附近)—再升(7月附近—9月附近)—再降(9月附近—12月)的趋势,在4月和10月前后各出现一次峰值,具有明显的季节性变化特征。

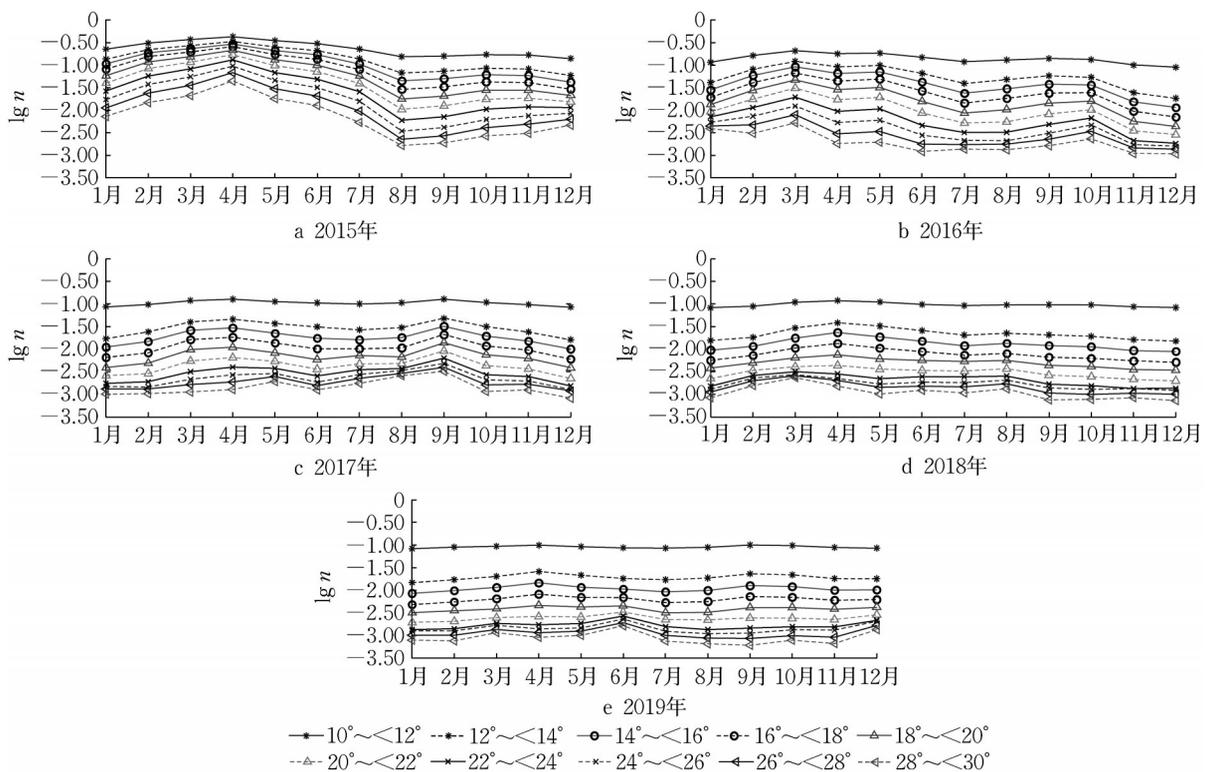


图2 周跳频次与高度角的相关性

Fig.2 Correlations between F-CS and altitude angles

Liu等^[17]研究发现,2015年的太阳活动强度要远高于其他年份,且在当年的3、4月之间的活动尤为频繁,这对卫星信号的传播造成了显著影响。研究表明,热层暴环流、地球磁场冲击、中性风、重力波冲击、地球公转造成的太阳辐射强度等物理因素叠加导致电离层在季节变换前后处在一个较强的活跃状态,导致GPS观测信号受到较大影响^[18-21]。尤其在北半球3月左右,太阳光的照射逐渐向赤道回归,北半球大气层的各种物理变化走向活跃。

图3统计了2015—2019年 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 高度角区间

内的周跳频次。图3显示,在绝大多数月份里,98%以上的周跳都发生在 30° 以下的高度角区间。然而, 30° 以下高度角区间内的观测卫星数仅占总观测卫星数的40%左右,且这种现象在全年具有一致性。因此,下文重点分析 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 高度角区间内周跳频次的时空特征。

2.2 周跳频次随地方时变化的时空相关性

图2表明,在2015年3—4月期间,周跳频次显著高于其他时间段。进一步对该现象进行分析,图4给出了该期间内地方时07:00—21:00周跳频次的

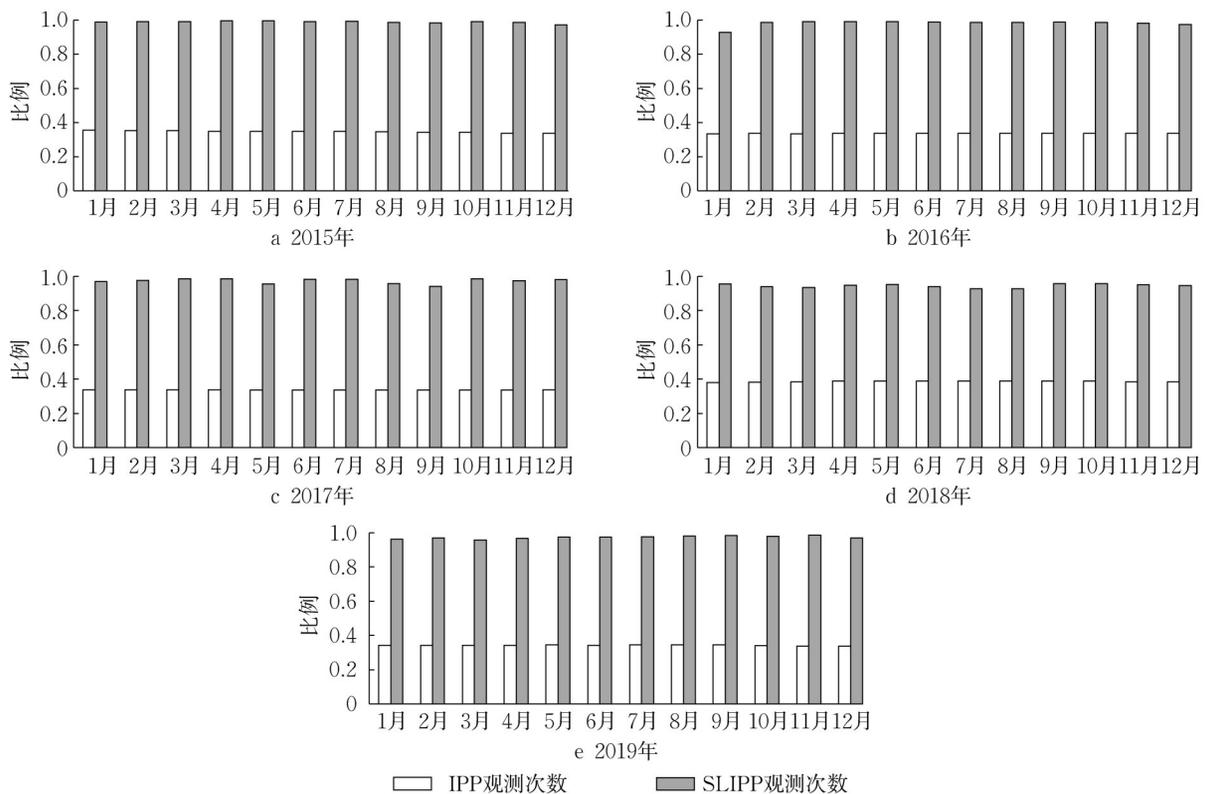


图3 IPP观测次数、SLIPP观测次数的比例

Fig.3 Percentage of IPP and SLIPP

时空地图,时间分辨率为1 h,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。可以看到,07:00和21:00几乎不产生周跳事件。从08:00开始,周跳事件首先出现在东南部的佛罗里达半岛,随着时间推移周跳事件的覆盖范围不断扩大,逐渐从沿海延伸至内陆,周跳频次也逐渐升高,且东部地区的周跳频次高于中西部地区。在13:00—15:00期间,周跳频次在动态波动中保持在一个相对较高的水平,且在地理分布上具有显著差异。总而言之,在边界地区周跳事件相对内地更频繁,在沿海地区周跳频次高于其他地区。在15:00—19:00期间,周跳频次逐渐降低,依次比较相邻时段可以看出,周跳频次峰值呈现出自东向西迁移过程。东部沿海地区的周跳频次逐渐下降至零左右,中西部地区的周跳频次也呈现出下降趋势,但下降速度低于东部沿海地区,同时西南部地区的周跳频次下降速率显著变慢。19:00之后,周跳频次继续下降,并趋于零。总体而言,周跳事件具有明显的时空连续性。随着地方时的变化,周跳所覆盖的范围先扩大后缩小,周跳频次也是先上升后下降。以北纬 42° 为界线,北部地区的周跳频次和事件均要明显少于南部地区,特别是在西北部和东北部,周跳频次基本上都在5%及以下。

针对2015年周跳频次远高于其他年份这一现象,图5给出了2015年每月周跳频次地图。可以看到,在3月和9月左右周跳频次显著升高,并且主要分布在中低纬度地区。在周跳频次显著的1月、3—7月,空间上呈现出自西北向东南方向的条带分布。此外,西南部和东南部以及中部地区是周跳事件较为集中且周跳频次也较为频繁和连续的3个小区域。在8—12月期间,只有零星的周跳事件出现。大部分地区的周跳频次都很小,数值为 10^{-4} 量级。对太阳活动周期的研究认为,2014—2015年是太阳活动峰年,而峰年对于电离层的结构和状态具有很大影响^[22]。此外,2015年的3月、6月、10月和12月都发生了强度较大的磁暴事件。

2.3 周跳频次随季节变化的时空相关性

前文分析结果表明,周跳频次在3月和9月附近显著升高。为了进一步分析周跳频次与季节变化的时空相关性,统计了2015—2019年周跳频次随季节的变化,如图6所示。可以看出,2015—2019年周跳频次总体上逐年降低,而且2015年的周跳频次远高于其他年份。在2015—2019年期间,3月和9月左右的周跳频次都高出其他月份,而且3月的周跳频次显著高于9月,具有明显的季节不对称性。从10:00开始,周跳事件开始

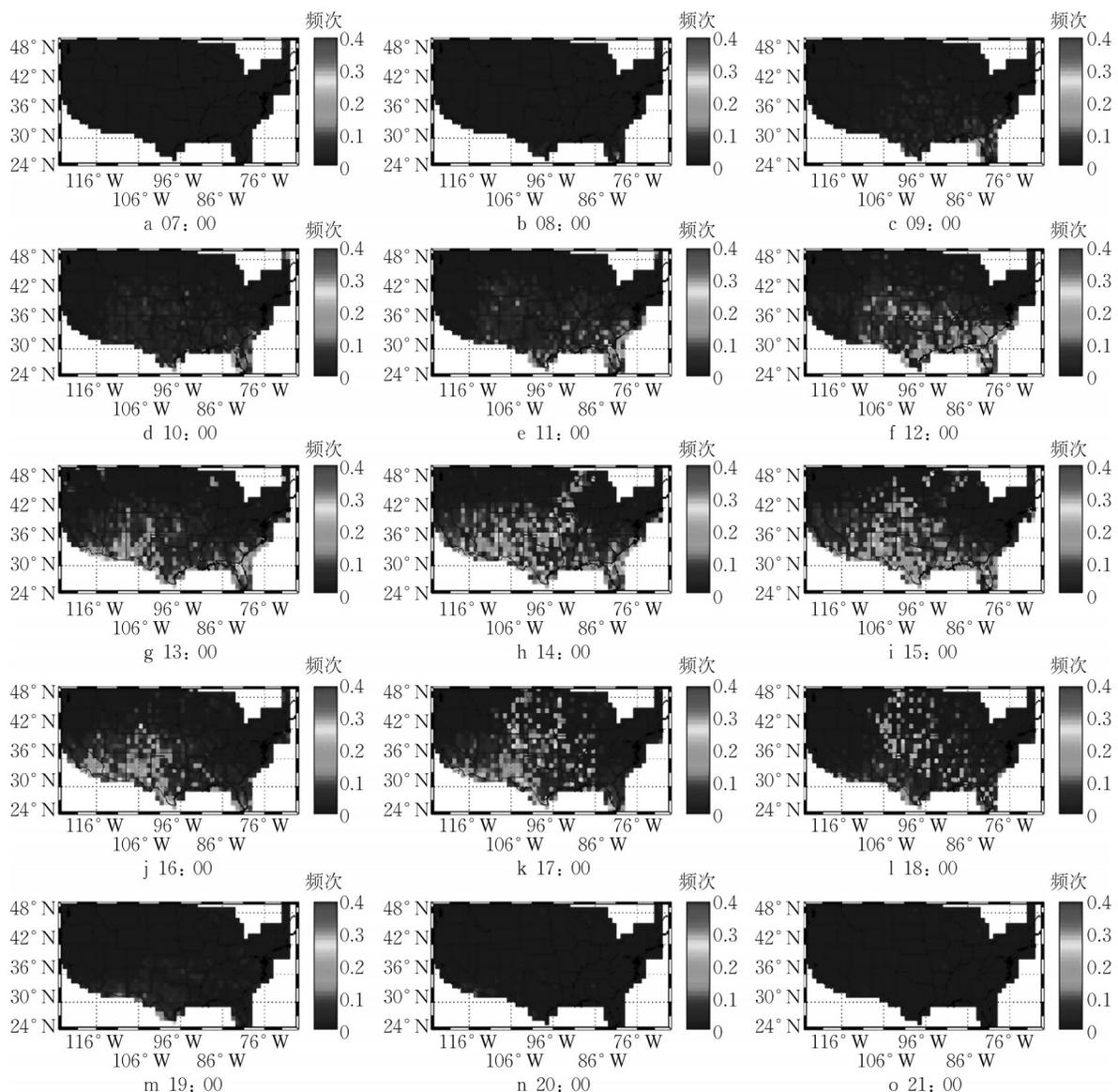


图4 2015年3—4月期间07:00—21:00每小时周跳频次时空图

Fig.4 Hourly F-CS spatial-temporal maps of local time 07:00—21:00 on March–April, 2015

密集出现,多数周跳均集中发生在12:00—18:00之间,周跳频次一般在14:00—15:00时达到峰值,这与图5的实验结果具有一致性。

从图6还可以看出,在周跳频次较高的2015年1—5月,从1月的19:00开始,西南—东北的45°方向上(即1月的19:00、2月的20:00、3月的21:00、4月的22:00、5月的23:00、6月的24:00),左侧附近的热力值都显著高于右侧附近。在2015年的6—11月,从6月的24:00开始,东南—西北的45°方向上(即6月的24:00、7月的23:00、8月的22:00、9月的21:00、10月的20:00、11月的19:00),左侧附近的热力值也高于右侧附近。2015年12月18:00左侧附近的热力值依然高于右侧附近。此外,自1月08:00至5

月06:00至8月11:00至12月07:00这条时间连线上,左侧附近的热力值则低于右侧附近。在不同的月份,日出、日落时间存在差异,同时夏季周跳频次高于冬季。周跳频次具有很明显的随地方时和季节变化的相关性。2016、2017年周跳频次的变化与2015年具有同样的趋势,但周跳频次均低于2015年,而且2017年的趋势变化最弱。单独观察12月的周跳频次,与其他年份数据对比,2015年12月的周跳频次高于同年的11月,这是因为在2015年的12月发生了几次较强的磁暴活动。

图6显示,在所有年份,周跳事件大多集中在12:00—18:00,为了更具体地分析季节性变化特征,逐月统计12:00—18:00间的周跳频次(见图7)。可

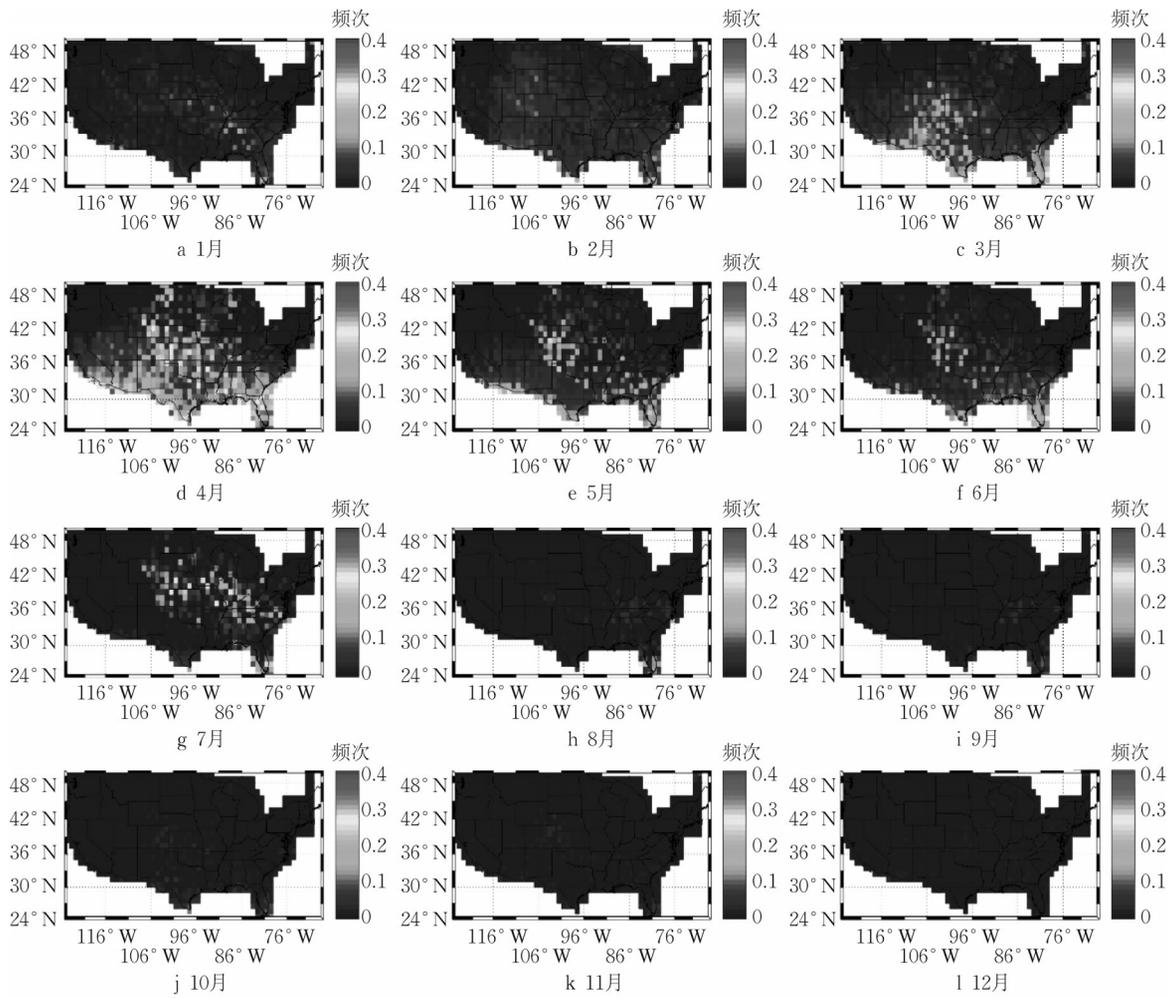


图5 2015年每月周跳频次地图
Fig.5 Monthly F-CS maps in 2015

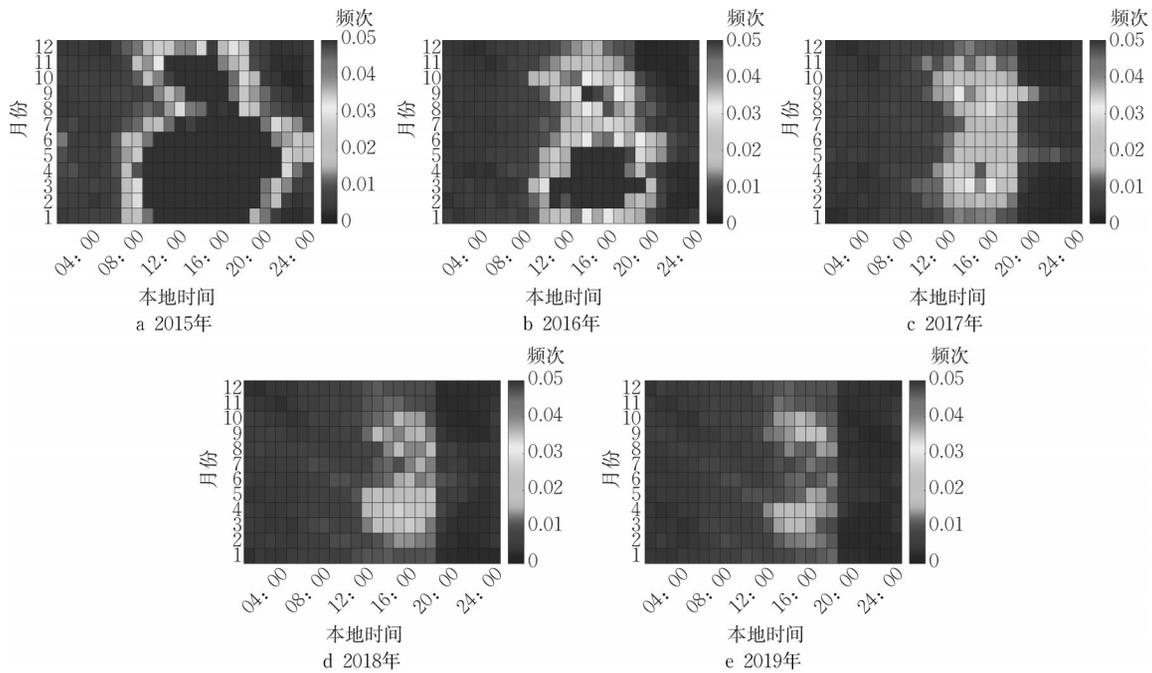


图6 2015—2019年周跳频次与季节变化的相关性
Fig.6 Correlations between F-CS and seasonal variation from 2015 to 2019

见,周跳频次呈现出显著的季节性变化特征,在每年3月和9月附近周跳频次都显著高于其他月份,而在3月附近周跳频次又高于9月附近。总体而言,2015年的周跳频次整体上显著高于其他年份,且这5年中周跳频次基本上逐年递减,这与太阳活动下降的时间周期一致。图7进一步说明了周跳频次与季节之间存在较强的相关性。

为了验证太阳活动强度对周跳频次的影响,给出太阳通量指数F10.7的变化,如图8所示。可以看到,每年的3月和9月附近,太阳通量指数F10.7都处于上升期,而且同时期的周跳频次也高于其他月份,这说明由地球公转产生的季节变化是由太阳活动强度造成的,从而影响周跳频次。2015—2019年期间的太阳通量指数F10.7呈现出整体下降的趋势,这与周跳频次的下降趋势一致。观察F10.7的方差变化可以发现,2015年的方差显著大于其他年份,2019年的方差最小,这与前文所分析的周跳频次时间变化趋势相一致。综合而言,周跳频次在每年

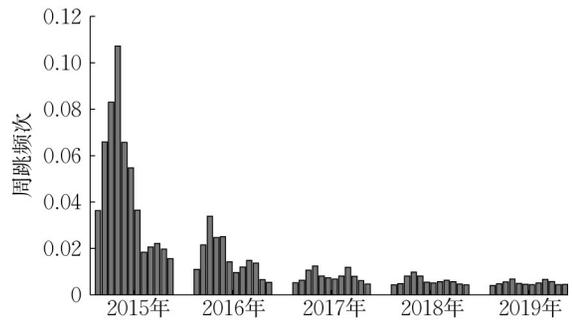


图7 2015—2019年每月12:00—18:00之间周跳频次分布柱状图

Fig.7 Histogram of F-CS occurrence between 12:00 and 18:00 every month from 2015 to 2019

的3月和9月附近达到峰值,这一现象与电离层活跃度的周年特征相吻合。研究表明,在春秋两季交替时期,地磁子午面附近的电离层不规则结构体出现概率明显增大^[23],而且季节变化会加剧电离层闪烁,由此影响电磁波信号的传输^[24]。

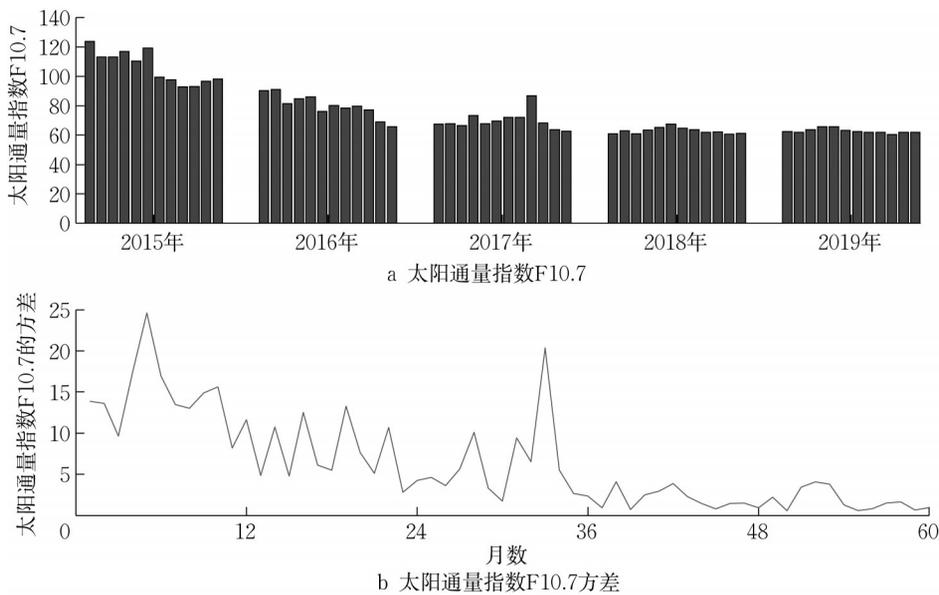


图8 2015—2019年每月太阳通量指数F10.7变化

Fig.8 Monthly change of F10.7(solar flux index) from 2015 to 2019

3 结论

- (1)高度角在 $10^{\circ} \sim <12^{\circ}$ 之间的周跳频次远高于 12° 之上的区间,在 30° 以下的高度角区间内周跳事件次数占总周跳事件次数的90%以上,但可观测卫星数在40%左右。这是因为低高度角区间的观测噪声更大,通视性也更差,从而加剧了周跳的发生。
- (2)周跳频次较高的时段集中在12:00—19:00,

总体上呈现出先升高后降低的趋势,在其余时段内趋于稳定,这是因为太阳活动在对应的时段内处于一天之内的活跃期。

- (3)通过分析2015—2019年的数据发现,每年的3月和9月左右是周跳频次在一年中的2个高峰段,且3月高于9月。这是因为地球公转导致地磁暴活动加强,从而使周跳频次升高。
- (4)通过分析2015—2019年的数据发现,2015

年的周跳频次显著高于其他年份,而且在3、4月更加明显。这是因为2015年3、4月发生了强度较大、次数较多的太阳磁暴活动,并且2015年是2015—2019年太阳活动下降期间强度最大的一年。

作者贡献声明:

杨 玲:统筹论文的研究工作,指导论文的研究方向并修改论文。

宋梵彬:查找文献,分析数据,负责论文的撰写。

程碧泉:查找文献,分析数据,负责论文的撰写。

孙 楠:对论文修改提出部分意见。

楼立志:论文审阅与修订。

参考文献:

- [1] HOFMANN-WELLENHOF B, LICHTENEGGER H, WASLE E. GNSS-global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more [M]. New York: Springer, 2007.
- [2] BLEWITT G. An automatic editing algorithm for GPS data [J]. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(3): 199.
- [3] CAI C, LIU Z, XIA P, *et al.* Cycle slip detection and repair for undifferenced GPS observations under high ionospheric activity[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(2): 247.
- [4] CHEN D, YE S, ZHOU W, *et al.* A double-differenced cycle slip detection and repair method for GNSS CORS network[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(3): 439.
- [5] QIAN N, GAO J, LI Z, *et al.* GPS/BDS triple-frequency cycle slip detection and repair algorithm based on adaptive detection threshold and FNN-derived ionospheric delay compensation[J]. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2020, 17(2): 141.
- [6] TEUNISSEN P J G, MONTENBRUCK O. Springer handbook of global navigation satellite systems [M]. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [7] BANVILLE S, LANGLEY R B. Mitigating the impact of ionospheric cycle slips in GNSS observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 87(2): 179.
- [8] PRIKRYL P, JAYACHANDRAN P T, MUSHINI S C, *et al.* GPS TEC, scintillation and cycle slips observed at high latitudes during solar minimum [J]. *Annales Geophysicae*, 2010, 28(6): 1307.
- [9] NIE W, WANG Y, ROVIRA-GARCIA A, *et al.* Effect of the polar cap ionospheric sporadic-E layer on GNSS-based positioning: a case study at Resolute Bay, Canada, September 5, 2012[J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(2): 60.
- [10] NIE W, ROVIRA-GARCIA A, LI M, *et al.* The mechanism for GNSS-Based kinematic positioning degradation at high-latitudes under the March 2015 Great Storm [J]. *Space Weather*, 2022, 20(6): e2022SW003132.
- [11] 程洁, 徐继生, 蔡磊, 等. 我国低纬电离层闪烁和周跳的统计特征比较[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(1): 18.
- [12] CHENG Jie, XU Jisheng, CAI Lei. A comparison of statistical features of ionospheric scintillations and cycle slips in the mid-south region of China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(1): 18.
- [13] ZHANG D H, CAI L, HAO Y Q, *et al.* Solar cycle variation of the GPS cycle slip occurrence in China low-latitude region [J]. *Space Weather*, 2010, 8(10): S10D10.
- [14] SKONE S, DE JONG M. The impact of geomagnetic substorms on GPS receiver performance[J]. *Earth Planets and Space*, 2000, 52(11): 1067.
- [15] CHERNYSHOV A A, MILOCH W J, JIN Y, *et al.* Relationship between TEC jumps and auroral substorm in the high-latitude ionosphere[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 6363.
- [16] GENG W, HUANG W G, LIU G Q, *et al.* The distribution characteristics of GPS cycle slip over the China Mainland and adjacent region during the declining solar activity (2015-2018) period of solar cycle 24 [J]. *Radio Science*, 2021, 56 (5) : e2020RS007196.
- [17] ZHANG X, GUO F, ZHOU P. Improved precise point positioning in the presence of ionospheric scintillation[J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(1): 51.
- [18] LIU K, LI G, NING B, *et al.* Statistical characteristics of low-latitude ionospheric scintillation over China [J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55(5): 1356.
- [19] DASHORA N, SURESH S. Characteristics of low-latitude TEC during solar cycles 23 and 24 using global ionospheric maps (GIMs) over Indian sector [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, 120(6): 5176.
- [20] 高琴, 刘立波, 赵必强, 等. 东亚扇区中低纬地区电离层暴的统计分析[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(3): 626.
- [21] GAO Qin, LIU Libo, ZHAO Biqiang, *et al.* Statistical study of the storm effects in middle and low latitude ionosphere in the East-Asian sector[J]. *Chinese Journal of Geophysic*, 2008, 51 (3): 626.
- [22] CHEN Y H, WANG W B, QIU N, *et al.* The observation and simulation of ionospheric response to CIR/high-speed streams-induced geomagnetic activity on 4 April 2005 [J]. *Radio Science*, 2016, 51(8): 1297.
- [23] KUAI J W, LIU L B, LIU J, *et al.* Effects of disturbed electric fields in the low-latitude and equatorial ionosphere during the 2015 St. Patrick's Day storm [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, 121(9): 9111.
- [24] SHI K, GUO J, DONG Z, *et al.* Study of ionospheric spatial-temporal variation in Shandong region in solar activity years[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2017, 42(12): 32.
- [25] ABDU M A. Outstanding problems in the equatorial ionosphere-thermosphere electrodynamic relevant to spread F [J]. *Journal of Atmospheric and Solar: Terrestrial Physics*, 2001, 63(9): 869.
- [26] YE H K C, LIU C H. Radiowave scintillations in the ionosphere [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1982, 70(4): 324.