

# 中国低纬度地区 GPS 周跳季节依赖特点分析

张东和<sup>①\*</sup>, 冯曼<sup>①</sup>, 郝永强<sup>①</sup>, 师立勤<sup>②</sup>, 杨光林<sup>③</sup>, 索玉成<sup>④</sup>

① 北京大学地球物理系, 北京 100871;

② 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080;

③ 国家空间天气监测预警中心, 北京 100080;

④ 中国电波传播研究所, 新乡 453003

\* E-mail: [zhangdh@pku.edu.cn](mailto:zhangdh@pku.edu.cn)

收稿日期: 2006-08-30; 接受日期: 2007-06-08

国家自然科学基金项目(批准号: 40674089, 40636032)、国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2006CB806306)和北京市教委共建项目(批准号: XK100010404)资助

**摘要** 利用中国低纬度地区 6 个 GPS 观测站 2001 年的观测数据, 分析了该地区日周跳发生次数与季节的关系. 结果表明: 该地区的日周跳发生次数与季节关系明显, GPS 周跳主要发生在两分季附近(3~5月和 9~11月), 且一些日期 6 个台站的日周跳发生次数变化趋势一致, 这种周跳的季节依赖特点与同期我国广州电离层扩展 F 出现的季节依赖特点类似. 结合周跳的地方时依赖特点, 可以推断仰角大于一定角度时的周跳与该地区上空电离层不均匀结构有一定的关系. 通过不同地磁纬度观测站日周跳次数的比较, 可以看到在同一时间段内该地区处于较高纬度的 LUZH 台站的日周跳次数要明显小于其他台站. 以相距很近的两个 GPS 台站 2001 年日周跳次数存在明显差异这一事实为出发点, 分析了同样电离层条件下周跳对 GPS 接收机本身硬件质量的依赖性.

**关键词**

GPS

闪烁

电离层不均匀结构

周跳

载波相位

在 GPS 接收机进行载波相位跟踪时, 因一些原因导致的短时整数载波相位跳变叫做周跳 (cycle slips)<sup>[1,2]</sup>. 周跳是一种典型的 GPS 观测异常事件, 过多的周跳事件会影响高精度 GPS 定位的质量. 正因为如此, GPS 投入运行以来, GPS 数据周跳的检验与修复始终是 GPS 应用领域一个重要研究课题, 十几年来发表了大量相关论文, 提出了多种周跳检测方法<sup>[3~7]</sup>. 长期的观测表明, 周跳产生的原因包括卫星信号在传播过程中被障碍物阻隔; 电波在传播过程由外部环境影响导致信噪比 (SNR) 下降或者相位起伏加大; 以及接收机内部信号处理方式和接收机硬件

质量 [8,9]。其中, 对于一个特定的GPS接收机, 由电离层扰动引起的信号强度的减弱和载波相位起伏导致的信号失锁是低纬度地区GPS周跳的主要原因。虽然如此, 有关低纬度地区周跳发生规律方面的统计研究工作开展的很少。我们利用一种周跳检验方法对中国低纬度地区GPS观测数据周跳发生次数进行了地方时方面的统计研究, 发现在这一地区的周跳发生次数具有明显的地方时依赖性, 该地区的周跳主要发生在地方时 19:00~24:00 之间, 在白天几乎不发生周跳。通过分析发现, 这一周跳与地方时的依赖特征与该地区的电离层不均匀结构出现的地方时依赖特征类似。

通过多年低纬度地区电离层不均匀结构以及电离层闪烁方面的研究, 人们大致了解了该地区的电离层不均匀结构以及电离层闪烁的时空分布特点与规律。在低纬度地区, 电离层不均匀结构引起的闪烁在时间分布特点上除了明显的周日变化特点外, 还存在着季节和年变化特点 [10,11]。本文将利用周跳检测结果, 研究 2001 年处于电离层赤道异常北峰及其南北两侧的中国低纬度地区GPS数据周跳发生的季节特点, 试图揭示该地区电离层扰动对GPS观测的影响规律。

## 1 数据与方法

我们利用Jin<sup>[3]</sup>使用的周跳检测方法进行GPS数据周跳检测。为了便于区分电离层扰动引起的周跳, 研究此类周跳的时空分布特点, 周跳检测结果增加了一些时空参量, 包括周跳发生时刻卫星的仰角, 方位角, 周跳发生时刻卫星-接收机视线与电离层壳层的交叉点(IPP)的经纬度以及IPP的地方时等参量。

从中国地壳运动观测网络中选择 2001 年中国地区 6 个低纬度 GPS 观测站的数据作为周跳检验的原始数据, 这些站的硬件配置一致, 接收机为半无码跟踪方式的 Ashtech Z-XII3 接收机, 天线为可以抑制多径效应的扼流圈天线, 数据采样周期为 30 s。表 1 列出了各站的位置参数及接收机类型, 从观测站的地磁纬度可以看到, 这些观测站基本上处于该经度扇区赤道异常北峰及其南北两侧。

表 1 中国地区 6 个 GPS 台站地理、地磁经纬度以及接收机类型

站名	地理纬度/(°)	地理经度/(°)	地磁纬度/(°)	地磁经度/(°)	接收机类型
GUAN	23.18	113.33	11.8	183	Ashtech Z-XII3
KMIN	25.02	102.79	13.7	173	Ashtech Z-XII3
LUZH	28.87	105.41	17.5	175.6	Ashtech Z-XII3
QION	19.02	109.84	7.6	179.7	Ashtech Z-XII3
XIAG	25.50	100.25	14.3	171	Ashtech Z-XII3
XIAM	24.45	118.08	13.2	187	Ashtech Z-XII3

对任一台站全年GPS观测数据进行周跳检测, 可以得到一个一年的周跳检测列表, 列表内容包括卫星号, 周跳发生世界时, 周跳发生时刻IPP点地方时, 发生周跳的载波(L1, L2), IPP经纬度, 卫星仰角和方位角。IPP经纬度的具体计算方法可参考有关文献, 在计算过程中假设电离层壳层高度为 400 km<sup>[12]</sup>。在进行周跳与地方时和季节的关系的分析前, 通过限制周跳发生时刻卫星的仰角剔除多径效应等原因产生的周跳。在下面的分析中卫星仰角小于 15°的周跳

不作为周跳统计数据源.

## 2 结果与分析

图 1 给出了 2001 年 6 个台站 GPS 数据提取的日周跳发生次数随季节的变化情况. 从图 1 可以看到, 周跳发生次数随年积日的变化有明显的规律性. 与其他日期比较起来, 大约在当年年积日的 60 到 140 天之间(春分附近), 240 天到 330 天之间(秋分附近)周跳发生次数明显要多, 即当年的两分季附近日周跳发生累计次数明显高于其他月份, 同时, 2001 年的秋分附近周跳发生次数要比春分附近多. 除了上面总的趋势外, 在一些时间段内 6 个台站之间周跳日发生次数也存在一些明显的一致性. 例如, 在 2001 年的第 120 天, 第 229 天, 第 328 天这 6 个台站的数据几乎都出现了明显的周跳次数的增加(图中标出倒三角的地方). 从图 1 中还可以看到, 在日周跳发生次数比较多的季节, 也存在一些日周跳发生次数少的个别日期. 例如, 在年积日第 90 天到第 120 天之间, 各站的周跳发生次数相比于周围日期要少得多(图 1 中标出正三角的地

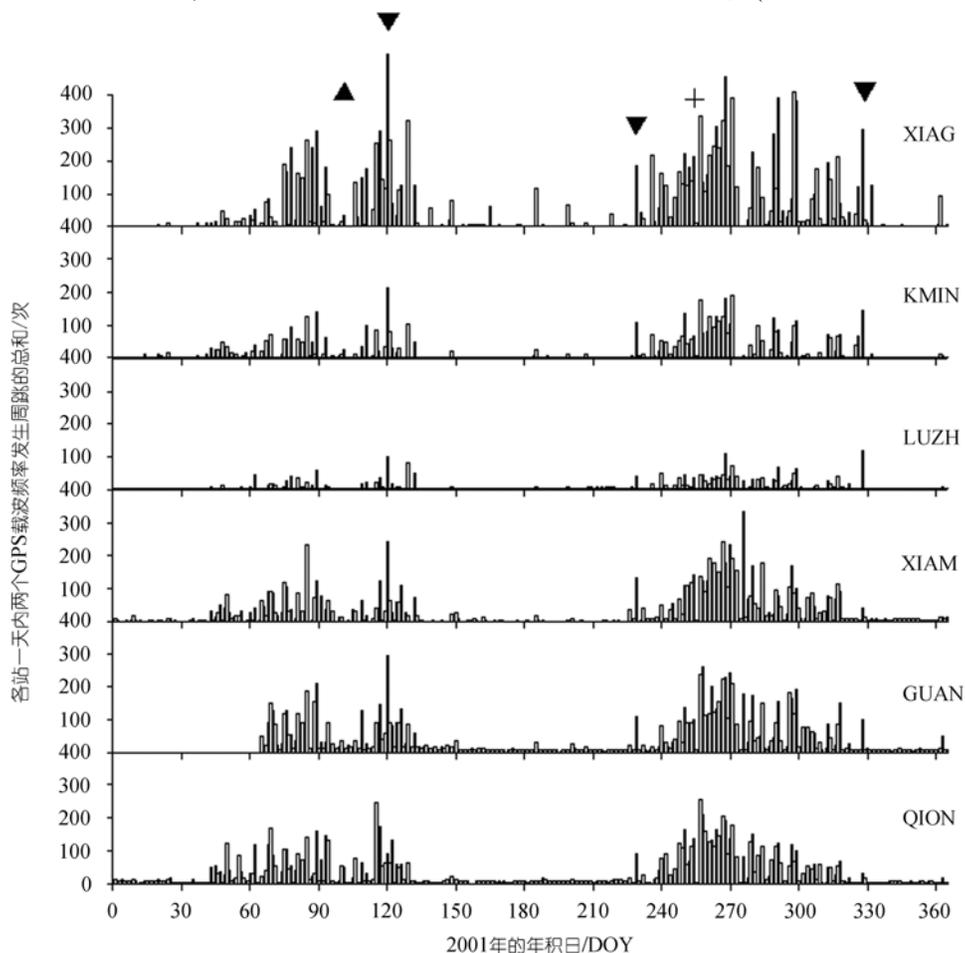


图 1 低纬度台站 2001 年日周跳发生次数随季节变化的统计结果(仰角 $>15^\circ$ )

方). 再例如, 在 2001 年的 240 到 270 天之间, 随着日期的增加, 6 个台站的日周跳发生次数具有明显的增加趋势, 周跳次数从每天的几次发展到每天几百次, 但在当年的第 255 和 256 天 6 个站的周跳次数突然降到很少(图 1 中标出加号的地方).

在高仰角条件下周跳的发生与电离层的状态(主要是电离层不均匀结构)有关. 上面介绍的在这个观测区域内周跳日发生次数出现的明显的依赖于年积日的特点反映了该区域上空电离层状态随季节的变化. 利用 VHF 闪烁观测资料 Basu 等人对全球低纬度地区电离层闪烁的季节变化特点进行了总结, 发现电离层闪烁的季节依赖特点具有明显的经度效应, 大体上印度到整个太平洋经度扇区范围内闪烁的季节依赖特点表现为两分季附近(每年的 3~5 月和 9~11 月)闪烁出现率要高于其他月份, 而欧洲到美洲经度扇区的闪烁的季节依赖特点表现为每年的 9 月到次年的 4 月之间闪烁出现率要高于其他月份<sup>[4]</sup>. 图 1 中整体反映的周跳发生次数随年积日的变化特点以及在部分日期周跳发生次数的增大或者减少可以部分地反映 2001 年该区域内电离层扰动的强弱. 由于在 2001 年在该地区还没有进行严格意义上的基于 GPS 载波信号频率的电离层闪烁的观测, 对以上结论直接的科学验证有一定的困难. 图 2 给出了广州电离层观测站上空 2001 年全年观测到的电离层区域(Q)型扩展 F 日发生次数随季节的分布趋势, 从图 2 中也可以看到与周跳类似的季节分布特点. 当然, 一方面电离层扩展 F 不能反映出电离层扰动强度信息, 另一方面由于电离层闪烁发生规律与观测系统所用的具体频率有关, 而且 GPS 接收机是否发生周跳还与电离层扰动的强度有关系, 因此两者之间的比较还是很初步的.

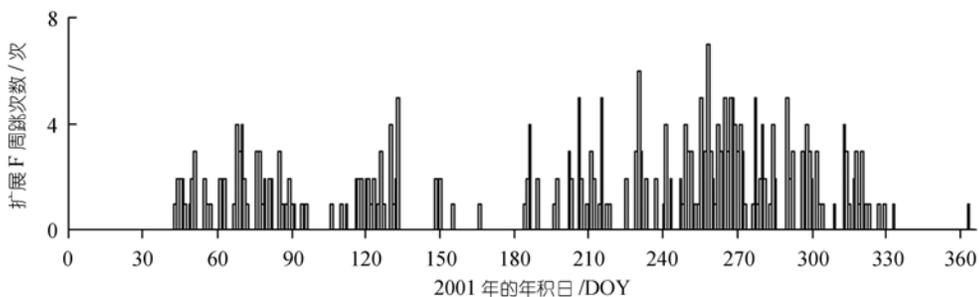


图 2 2001 年广州地区电离层 Q 型扩展 F 日发生次数统计结果

基于以上分析, 我们认为通过站-站之间日周跳发生次数的相关性分析可以研究引起周跳的电离层扰动的相关范围. 图 3 给出了 4 对台站的周跳发生次数的相关情况, 图中的直线为两个对应台站日周跳次数的一次拟合曲线, 图中的数字为两站的日周跳次数的相关系数. 从图 3 中可以看到在两个台站相距不太远的情况下, 台站之间周跳的相关系数大于 0.7, 在两个相距比较远的台站 XIAG 和 XIAM 之间的相关系数只有 0.463. 这说明相距较近台站上空的电离层扰动引起的 GPS 效应有更好的关联. 同时说明虽然在一些特殊时期各站之间的日周跳变化趋势是一致的, 但总的来说相距较远的台站上空的电离层扰动结构的关联性要弱一些.

从不同台站日周跳次数来看, 有两个问题值得注意. 从图 1 不难看出处于地磁纬度  $17.5^\circ$  的 LUZH 台站的周跳次数与其他台站相比要小得多, 该站处于电离层赤道异常北峰的外侧,

但由于该站上空有一部分电离层 IPP 点处于电离层不均匀结构易发区域, 因此该站上空附近的电离层不均匀结构还是会影响到该站的 GPS 观测质量的, 只是影响的强度要小一些. 图 4 给出了一年中该站的周跳发生位置点——电离层 IPP 的经纬度分布, 其中, 空三角为观测站位置. 不难看出周跳发生位置的方向性是明显的, 周跳几乎都发生在观测站的南面, 也就是电离层不均匀结构的易发区域.

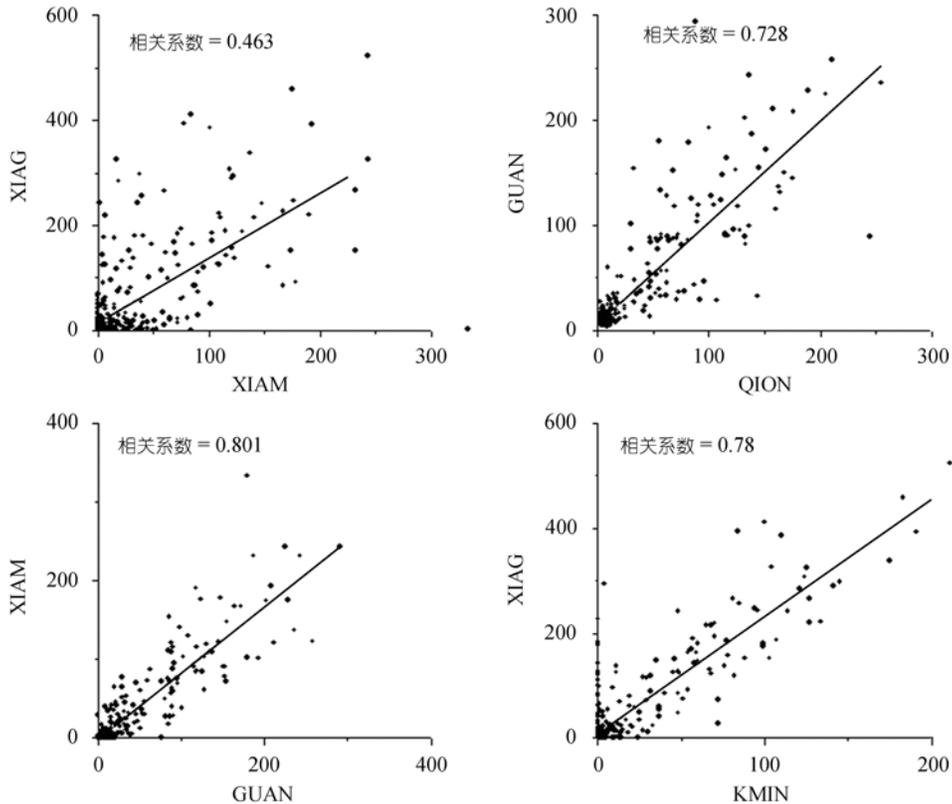


图 3 2001 年几对台站周跳次数随年积日的相关比较

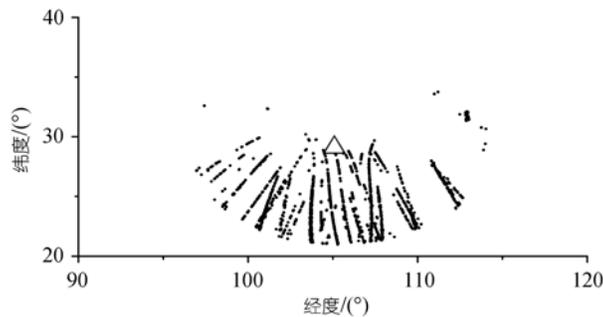


图 4 LUZH 台站仰角大于 20° 发生周跳的电离层 IPP 点的位置分布

另一个值得注意的问题是关于接收机本身质量与周跳发生率的关系. 由于在一定仰角以上产生的周跳基本上由台站上空的电离层扰动状态决定, 因此在接收机观测环境和接收机硬件质量一样的前提下, 在同一地点两个接收机出现周跳的可能性应该一致, 但由于不可能找到两个硬件质量完全一致的GPS接收机, 因此在同样电离层扰动情况下, 实际观测中出现周跳的可能性并不一致. 图 1 中有两个地磁纬度相当, 经度差别也不大的GPS台站, 即XIAG和KMIN台站, 从图 1 中可以看到在 2001 年全年XIAG台站周跳发生次数要远大于KMIN站. 但由于GPS硬件质量等方面的问题, 我们也很难做出有关两站上空电离层不均匀结构扰动强弱的结论. 其实, 即使对于同样类型的接收机, 由于接收机之间存在个体差异, 接收机天线或者接收机本身硬件质量会影响到接收机锁定扰动信号的能力<sup>[13]</sup>. 在同样电离层扰动条件下, 质量好的接收机抑制周跳的能力要优于质量差的系统, 这应该是这两个相距较近的两个GPS台站周跳次数存在明显差异的原因.

从本文的周跳发生次数随季节的变化结果来看, 周跳发生的时空规律确实与电离层扰动有关, 在电离层扰动研究中, GPS 数据的周跳发生率可以作为描述电离层扰动程度的一个辅助参量. 当然, 周跳与电离层闪烁还是有一定区别的. 只有闪烁强度引起的 GPS 信号的信噪比或者相位起伏超过 GPS 接收机的对应阈值时周跳才可能发生. 另一方面, 由于周跳是电离层扰动对 GPS 信号影响的结果, 因此也可以用周跳发生率进行电离层效应方面的研究, 在同样电离层扰动条件下, 可以通过 GPS 数据周跳发生率来判断 GPS 接收系统的质量.

### 3 结论

(i) 研究区域周跳日发生次数有明显的季节依赖特点, 在当年的 3~5 月和 9~11 月附近周跳日发生次数要多一些, 9~11 月附近的周跳日发生次数要多于 3~5 月附近, 而在一年的其他季节周跳日发生次数很少. 除了这种大的相关性外, 在周跳多发季节, 同一天内 6 个台站的周跳发生次数的相关性也很明显, 这些相关性表明周跳不是一个局域性因素引起的, 与该区域的电离层扰动状态有关.

(ii) 通过各台站之间周跳发生次数的相关性分析发现较近台站的发生周跳的相关性要大于较远台站的, 进一步说明产生周跳的原因是相关的.

(iii) 周跳发生次数与台站的位置是有关系的, 6 个台站中 LUZH 台站的纬度最高, 该站上空的电离层 IPP 点只有一部分处于电离层不均匀结构的易发区域, 因此该站的周跳发生次数要明显少于其他台站.

(iv) 周跳发生次数还与接收机的质量有关系, 即使是同样的接收机硬件条件, 由于接收机之间的个体差异, 在同样电离层扰动条件下, 发生周跳的可能也是不一样的, 这可从 XIAG 和 KMIN 台站周跳发生次数的比较看出.

(v) GPS 周跳与电离层闪烁是有区别的, 只有闪烁引起的 GPS 信号的信噪比或者相位起伏超过 GPS 接收机的对应阈值时周跳才会发生. 即便如此, 周跳发生次数还是可以作为描述电离层扰动程度的一个辅助参量. 同时, 在同样电离层扰动情况下, 可以通过周跳发生率来判断 GPS 接收系统的质量.

致谢 本文所用的数据由中国地壳运动观测网络提供.

## 参考文献

- 1 Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Collins J. Global Positioning System, Theory and Practice. 4th ed. New York: Springer-Verlag, 1994
- 2 Misra P, Enge P. Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance. Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press, 2001
- 3 Jin X X. Theory of carrier adjusted DGPS positioning approach and some experimental results. Dissertation of Doctoral Degree. Delft, the Netherlands: Delft University of Technology. 1996
- 4 Gao Y, Li Z. Cycle slip detection and GPS ambiguity resolution algorithms for dual-frequency GPS data processing. *Marine Geodesy*, 1999, 22(2): 169–181 [\[DOI\]](#)
- 5 Blewitt G. An automated editing algorithm for GPS data. *Geophys Res Lett*, 1999, 17(2): 199–202
- 6 Collin F, Warrant R. Application of the wavelet transform for GPS cycle slip correction and comparison with Kalman filtering. *Manuscripta Geodaeica*, 1995, 20(2): 161–172
- 7 Ou J K. A new method of identifying and locating gross errors—quasi-accurate detection. *Chin Sci Bull*, 1999, 44: 1777–1781
- 8 Skone S, de Jong M. The impact of geomagnetic substorms on GPS receiver performance. *Earth Planets Space*, 2000, 52: 1067–1071
- 9 Conker R S, El-Arini M B, Hegarty C J, et al. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/satellite-based augmentation system availability. *Radio Sci*, 2001, 38(1): 1001, [\[DOI\]](#)
- 10 Basu S, Basu S. Equatorial scintillations—A review. *J Atmosph Terr Phys*, 1981, 43: 473–489 [\[DOI\]](#)
- 11 Basu S, Basu S, Makela J, et al. Equatorial anomaly development mapped by TIMED/GUVI: Occurrence/suppression of scintillations at low latitudes and their modeling. In: 2006 Western Pacific Geophysics Meeting (WPGM), 2006
- 12 Zhang D H, Xiao Z. A method of calculating TEC with GPS data and its application to the ionospheric disturbances. *Chin J Geophys (in Chinese)*, 2000, 43: 451–459
- 13 Chen Z Y, Gao Y, Liu Z Z. Evaluation of solar radio bursts' effect on GPS receiver signal tracking within International GPS Service network. *Radio Sci*, 2005, 40(3): RS3012, [\[DOI\]](#)