

侍颢,张东和,郝永强等. 2014. 中国低纬度地区电离层闪烁效应模式化研究. 地球物理学报, 57(3):691-702, doi:10. 6038/cjg20140301.

Shi H, Zhang D H, Hao Y Q, et al. 2014. Modeling study of the effect of ionospheric scintillation at low latitudes in China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(3):691-702, doi:10. 6038/cjg20140301.

中国低纬度地区电离层闪烁效应模式化研究

侍颢,张东和*,郝永强,肖佐

北京大学地球物理系,北京 100871

摘要 GPS(Global Positioning System)周跳是一种 GPS 信号异常现象. 研究发现一定仰角以上的 GPS 周跳与电离层闪烁有关,是强电离层闪烁造成的 GPS 载波信号短时失锁现象,因此其可作为表征电离层闪烁效应的参量. 本文通过分析由中国低纬度地区 GPS 台站原始观测数据提取的 GPS 周跳发生率与地方时、季节、太阳活动以及磁活动之间的关系,开展电离层闪烁效应与这几种参量之间关系的模式化研究. 研究结果表明:(1)周跳发生率存在着地方时分布,发生时段主要在日落 19:00LT 后到午夜 02:00LT 之前,发生次数在 22:00LT 左右达到极大,然后缓慢减少,这一变化特点可以用自变量为地方时的 Chapman 函数形式来描述;(2)周跳发生率存在年变化特点,主要发生在年积日 45~135 天(春分季节)和 225~315 天(秋分季节),可以通过高斯函数来描述每个分季闪烁效应的变化特点;(3)可以利用太阳辐射指数 F10.7 作为描述周跳随太阳活动周变化的参量,根据周跳随太阳活动周的变化特点,我们使用一个以 F10.7 为自变量的三次函数来描述这种变化;(4)电离层闪烁与磁活动的关系比较复杂,由于大多数情况下表现为磁活动对电离层闪烁的抑制作用,在本研究中使用一个以地磁活动指数 A_p 为自变量的平方根函数来拟合这种变化.

关键词 电离层闪烁, GPS, 周跳, 电离层不均匀结构

doi:10. 6038/cjg20140301

中图分类号 P352

收稿日期 2013-03-18, 2014-02-26 收修定稿

Modeling study of the effect of ionospheric scintillation at low latitudes in China

SHI Hao, ZHANG Dong-He*, HAO Yong-Qiang, XIAO Zuo

Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract GPS (Global Positioning System) CS (Cycle Slip) is a typical anomaly phenomenon for GPS operations that is usually related to severe ionospheric scintillation. Based on the variation of the occurrence of CS at low-latitude stations in China and its connection with local time (LT), season, solar activity and geomagnetic activity, modeling study of the effect of the ionospheric scintillation has been carried out and a preliminary effect model has been developed. On the whole, the CS occurrence increases at about 19:00LT, peaks at about 22:00LT, and then decreases gradually, this local time dependence can be fitted by the Chapman function. CS reaches two maximum periods during one year roughly from DOY (day of year) of 45~135 (near spring equinox) and from DOY of 225~315 (near autumnal equinox), this seasonal dependence can be described by the Gaussian function. Solar radio flux index F10.7 can be used as a parameter to reveal the solar cycle dependence of ionospheric scintillation effect, and the cubic function of F10.7 is proved to be an acceptable option to describe this dependence. The

基金项目 国家自然科学基金委自然科学基金项目(41174134, 41274156)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB811405)联合资助.

作者简介 侍颢,男,1985 年生,江苏盐城人,博士研究生,研究方向:电离层物理学和电波传播. E-mail: shihao_26@126.com

* 通讯作者 张东和, E-mail: zhangdh@pku.edu.cn

relationship between ionospheric scintillation and geomagnetic activity is more complicated. Because the majority of the magnetic active events show suppression effects on ionospheric scintillation, as a preliminary step, a square root function of A_p is used to model the geomagnetic effect on ionospheric scintillation.

Keywords Ionospheric scintillation, GPS, Cycle Slip, Ionospheric irregularity

1 引言

电离层中的不均匀结构使传播其中的无线电波的相位和强度出现闪烁现象,从而降低星地通讯链路的传播质量,在强闪烁情况下甚至造成无线电通讯系统无法正常工作,是重要的电离层天气现象(Afraimovich et al., 2003; Skone and de Jong, 2000). 由于这一现象的危害性,从星地通讯得到应用以来,研究者们针对电离层闪烁现象开展了大量的观测研究工作,内容涉及电离层闪烁的观测、电离层闪烁的时空形态特征、电离层闪烁的效应、电离层不均匀结构的产生机理、以及电离层闪烁的预报等(Conker et al., 2003; Mendillo et al., 1992, 2001; Nicolls and Kelley, 2005; Sahai et al., 1998; 张天华和肖佐, 2000). 在这些研究内容中,电离层闪烁的观测是基础,传统的电离层闪烁研究依赖的观测手段包括电离层测高仪、基于卫星信标信号的闪烁接收机以及雷达方法(Abdu et al., 1998, 2003; Abdu, 2012; Afraimovich et al., 2002; Chen et al., 2006). 除了这些方法外,卫星实地电离层探测是电离层闪烁研究的重要补充(Ko and Yeh, 2010).

电离层闪烁主要发生在地球低纬度地区和高纬度地区(Kelley, 2009). 在低纬度地区,电离层闪烁发生率具有时间变化特点. 在地方时变化上,其主要发生在日落以后到日出之前. 电离层闪烁也存在明显的季节依赖性,但这种季节依赖性特点与经度有关,美洲—大西洋扇区电离层闪烁的季节依赖性特点与亚洲—太平洋扇区的季节依赖特点明显不同(Basu et al., 2006). 电离层闪烁的发生率和强度还存在着明显的太阳活动周变化特点,太阳活动高年的电离层闪烁发生率要远大于太阳活动低年(Zhang et al., 2010a). 另外电离层闪烁具有很强的日-日变化特征,这一特征增加了电离层闪烁预报的难度. 除了这些时间变化特征外,电离层闪烁与磁活动的关系也是电离层闪烁研究的一个值得关注的问题. 在高纬地区,电离层闪烁发生率和强度与磁活动正相关(Skone et al., 2008),而在低纬度地区,闪烁

与磁活动的关系比较复杂,表现为在有些磁暴期间电离层闪烁发生率和强度会得到增强,但有些磁暴期间电离层闪烁的发生率和强度会降低(Li et al., 2009, 2010; Zhang et al., 2012).

电离层闪烁的观测是研究电离层闪烁形态和认识电离层闪烁机理的基础,但由于电离层闪烁观测台站分布不均,对电离层闪烁的认识在全球范围内是不均衡的. 美洲地区的电离层闪烁研究不论从研究的深度还是时间跨度来看都领先于世界其他地区. 在亚洲扇区,印度和日本扇区的电离层闪烁研究开展的相对较多(Rama et al., 2006). 中国扇区的电离层闪烁研究始于 20 世纪 70 年代,但由于观测手段有限,研究相对偏少(Xu and Yeh, 1993). GPS 是当今电离层研究的常规手段之一,20 世纪 90 年代中期,基于商业 GPS 接收机改造的专业电离层闪烁监测仪研制成功,通过这一手段,研究者们开展了大量电离层闪烁研究(Beach and Kintner, 2001; Van Dierendonck et al., 1993). 此外,除了传统的通过测量 GPS 载波信号的强度和相位来获得电离层闪烁指数外,通过双频 GPS 接收机输出的观测量也可获得一些能够反映电离层闪烁信息的参量. 例如,利用 GPS 数据提取的星地链路电离层总电子含量的时间微分量 ROT(the Rate Of change of TEC),通过 GPS 数据周跳检测方法提取的 GPS 数据周跳信息等(Aarons et al., 1996; Zhang et al., 2010b).

中国从 2003 年开始进行基于 GPS 载波信号的电离层闪烁观测,部分研究部门在低纬地区架设了一些电离层闪烁监测仪,利用这些数据开展了针对中国扇区的电离层闪烁形态分析工作,促进了中国扇区电离层闪烁时空变化规律的认识(尚社平等, 2005; 王斯宇等, 2010; 徐继生等, 2007),但由于台站所属机构、接收机类型和观测模式等方面的原因,目前整合这些数据建立电离层闪烁模式的条件还不够成熟. 比较而言,常规 GPS 观测数据的空间分辨率高,这类数据相对更容易获取. 我们在前期工作中开展了利用低纬度地区 GPS 观测数据提取电离层闪烁效应信息(周跳)的方法和基于 GPS 常规数据的电离层闪烁效应研究,利用这些闪烁造成的周跳信

息可以开展电离层闪烁效应模式研究,获得一种与实际应用紧密相关的电离层闪烁效应模式(Zhang et al., 2010a, 2010b). 本研究将通过分析由电离层闪烁造成的 GPS 周跳发生率的时空变化特点来研究电离层闪烁效应的规律,开展中国赤道异常峰附近电离层闪烁效应模式化研究.

2 数据与方法

本文使用的 GPS 数据所属台站分布在中国低纬度地区,时间从 1999 年到 2005 年. 台站隶属于中国地震局地壳形变监测网,所有台站的接收机型号和配置一致,均为 Ashtech Z-XII3 型高精度双频 GPS 接收机,天线为可抑制多径效应的扼流圈天线,接收机采用半无码方式工作,采样时间间隔为 30 s. 表 1 给出了这些台站的位置信息.

表 1 本文用到的 GPS 台站的站名及其地理、地磁经纬度
Table 1 Names, geographical and geomagnetic coordinates of the GPS stations used in this paper

台站名	地理纬度 / (°)	地理经度 / (°)	地磁纬度 / (°)	地磁经度 / (°)
LUZH	28.9	105.4	17.5	175.6
XIAM	24.5	118.1	13.2	187.3
GUAN	23.2	113.3	11.8	183.2
QION	19.0	109.8	7.6	179.7

周跳现象表现为在一个观测历元内 GPS 接收机对载波相位的短时失锁. 由于周跳会破坏 GPS 数据的连续性,影响 GPS 的定位精度,从 GPS 投入运行以来, GPS 领域各研究团体研制了多种周跳检测和修复方法. 最常见的方法包括电离层三差法、宽巷组合法、卡尔曼滤波法、以及高可靠性的 DIA (Detection, Identification, and Adaptation) 方法等 (Blewitt, 1990; Chen et al., 2006; Collin and Warrant, 1995; Gao and Li, 1999; Teunissen, 1990). 本研究使用的周跳提取方法为 DIA 方法,将这一方法应用于各台站的 GPS 原始观测数据,可以获得电离层闪烁效应周跳数据库. 为了便于对周跳产生的原因以及周跳发生的时空特点进行分析,每条周跳事件记录中还增加了周跳发生时刻的卫星仰角和方位角,周跳发生时刻星地连线与电离层球层交叉点 IPP (Ionosphere Pierce Point) 的经纬度等信息.

在使用周跳现象进行电离层闪烁效应研究时,有三个问题需要说明. GPS 有两个载波频率 (L1, L2), 由于载波 L2 信号的带宽更窄,更容易受到环

境因素的影响 (Hofmann et al., 1993; Misra and Enge, 2001), 因此在研究电离层闪烁对 GPS 信号的影响时,载波信号 L2 更便于反映电离层闪烁的效应. 在本研究中,我们选用 L2 的周跳数据作为电离层闪烁效应研究数据库. 另外,研究发现,并不是所有周跳都与电离层闪烁有关. 当卫星仰角比较低时,电波的多径效应会明显增加,这也会造成周跳的发生. 而在相对较高的仰角情况下, GPS 周跳现象基本上是电离层闪烁引起的. 为了更加明确地给出电离层闪烁效应规律,在进行周跳时间依赖性分析前,需要将周跳数据库中低仰角周跳事件剔除,在本研究中,我们将卫星最小仰角限定为 25°. 最后一个需要说明的问题是周跳和闪烁强度的关系, GPS 系统设计时已经考虑到了电离层闪烁的影响,因此,只有闪烁强度达到一定程度时, GPS 接收机才可能发生周跳现象. 因此本文所给出的周跳发生率反映的应该是一定强度以上的电离层闪烁的出现规律. 图 1 给出了 2003 年在中国海南富克镇 (19.3°N, 109.1°E) 观测的电离层闪烁发生率与同年厦门和广州 GPS 周跳发生率的关系,从图中可以看到,周跳发生率与强闪烁发生率的相关性更好.

3 周跳发生率的统计形态特征

利用 GPS 数据,我们对中国地区的电离层闪烁造成的周跳事件进行了统计分析,结果表明,电离层周跳的时空分布规律与中国低纬度地区的电离层闪烁具有很强的关联性,周跳数据可以作为描述电离层闪烁的一个补充参量 (Zhang et al., 2007, 2010b). 下面将对周跳发生率与地方时、季节、太阳活动性以及磁活动的关系进行归纳,作为下一步电离层闪烁效应模式化的基础.

3.1 周跳的地方时变化

地方时变化是低纬度地区电离层闪烁的重要特征之一,由于日落后电离层 E 区电子与分子性离子的复合速度要远大于电离层 F 区电子与原子性离子的复合速度,造成日落后电子密度剖面不稳定,具备造成引起电波闪烁的电离层不均匀结构发生的背景条件. 图 2 是中国低纬度地区 4 个台站的 GPS 周跳发生率的地方时变化. 从图中可以看到,虽然不同台站的周跳发生次数差别很大,但在地方时分布上规律基本一致. 在 19:00LT 后,周跳发生次数开始增加,在夜间 22:00LT 附近周跳发生次数达到最大,然后周跳次数逐渐减少,在午夜后周跳发生的很

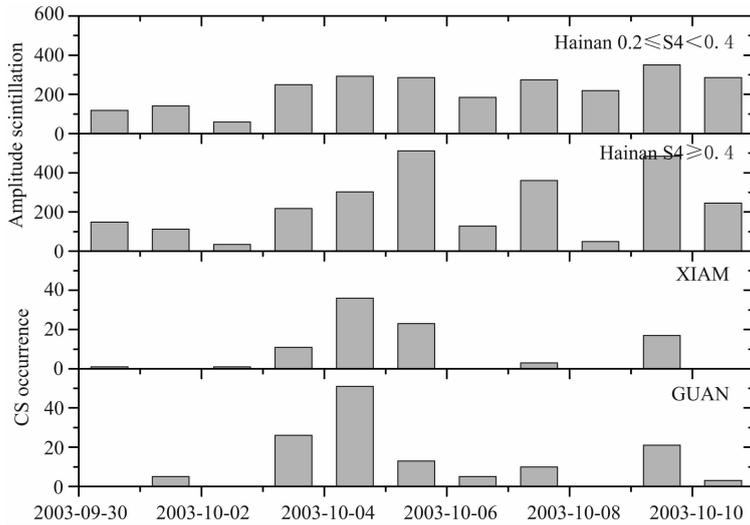


图 1 2003 年海南富克镇电离层不同强度闪烁月发生率与厦门和广州 GPS 周跳月发生率的比较

Fig. 1 The comparison between the monthly occurrence of amplitude scintillation observed at FUKU, HAINAN and Cycle Slip occurrence derived from XIAM and GUAN stations

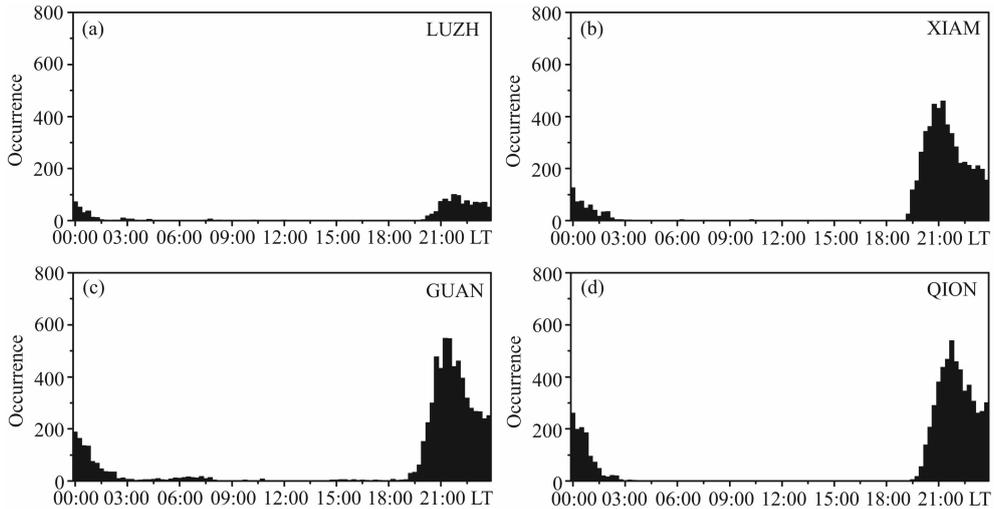


图 2 2001 年中国低纬度地区 4 个台站的 GPS 周跳发生数随地方时的变化

Fig. 2 The stacked occurrence of the GPS Cycle Slips in each 15 minutes of a day at 4 low latitude stations in China in 2001

少,在 02:00LT 以后几乎没有周跳发生。

低纬度地区的电离层闪烁主要发生在赤道异常峰附近区域,比赤道异常峰纬度更高的区域上电离层闪烁发生率会快速下降。到了中纬度地区,电离层闪烁很少发生,一般认为该区域观测到的电离层闪烁主要是电离层赤道异常峰区域或者是极区的电离层不均匀结构沿着磁力线扩散到中纬的结果,而这种不均匀结构向中纬度漂移的情况一般都发生在磁活动期间。从图 2 可以看到, GPS 观测数据中,在赤道异常峰附近分布的 GPS 台站出现周跳的次数要明显多于位于赤道异常峰外侧的 LUZH 台站。图 3 是 LUZH 台站和 QION 台站在 2001 年发生的周跳事件的空间分布情况,从图中可以明显看到,周跳发

生区域主要在 LUZH 台站以南、QION 台站以北,也就是赤道异常峰出现的区域。

3.2 季节变化

低纬度电离层闪烁季节变化的一个重要特征是它的经度差异,美洲扇区与东亚—太平洋扇区的电离层闪烁季节变化规律明显不同,前者闪烁主要发生在 10 月到来年的 3 月之间,12 月到 1 月闪烁发生次数和强度最大,而后者闪烁主要发生在两分季附近,也就是 2 月到 4 月间和 8 月到 10 月间,其中 3 月和 10 月闪烁发生次数和强度最大 (Zhang et al., 2010b)。图 4 给出了 2001 年 4 个台站 GPS 周跳发生次数随年积日的变化。从图中可以看到,这 4 个台站的周跳主要发生在两分季附近,这种分布规律与

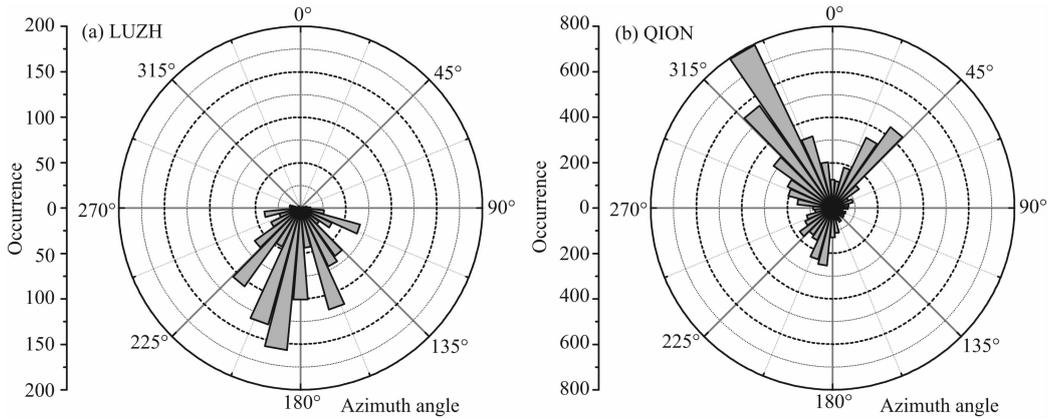


图 3 两台站在 2001 年发生的 GPS 周跳次数随方位角分布

Fig. 3 The distribution of the occurrence of the GPS Cycle Slips versus azimuth angle at two stations in 2001

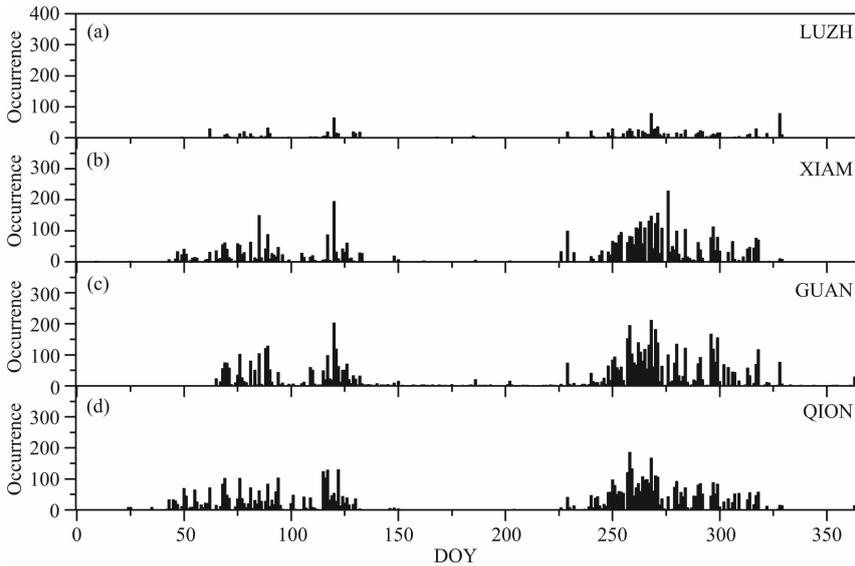


图 4 2001 年中国低纬度地区 4 个台站的 GPS 周跳发生率随年积日 DOY(Day of Year)的变化

Fig. 4 Daily occurrence of the GPS Cycle Slips at 4 low latitude stations in China in 2001

太平洋扇区电离层闪烁发生率随季节的变化规律一致. 说明在中国扇区闪烁的季节依赖特点与太平洋扇区一致. 另外, 从图中还可以看到, 周跳的日-日变化是非常明显的, 即使在周跳多发月份, 也不是所有日期周跳发生次数都多, 不同日期的周跳发生次数差别比较明显, 这是电离层闪烁预报的难点之一.

3.3 太阳活动周变化

电离层闪烁与太阳活动周的相关性表现在太阳活动高年电离层闪烁发生率和闪烁强度大, 而太阳活动低年电离层闪烁发生率和强度小. 图 5 为 XIAM 和 GUAN 两个 GPS 台站数据获得的 1999 年到 2005 年间周跳发生次数的分布规律, 除了前面提到的季节依赖特点之外, 其太阳活动周依赖性也非常明显, 总的来看依赖关系与电离层闪烁规律类似. 从图 5 可以看到, 周跳发生次数与太阳活动指数的关系并不是线性的, 在 2002 年到 2003 年之间, 也

就是太阳活动性处于下降阶段的时候, 由于电离层闪烁造成的周跳现象急剧减少, 2003 年以后周跳就很少发生, 这一特征在图 5a 中表现得更为明显. 我们认为出现这一现象的原因与 GPS 接收机对信号强度的设计域值有关. 强闪烁更容易造成 GPS 周跳的发生, 而当闪烁强度降到一定程度时, 其闪烁已不足以造成 GPS 系统周跳现象的发生.

3.4 磁活动变化

磁活动期间的电离层闪烁形态是电离层闪烁研究中的一个重要内容, 由于磁活动期间空间环境变化过程的复杂性, 对这期间的电离层闪烁规律以及机理的认识还不够完善. 从形态上来看, 磁活动期间的电离层闪烁存在着增加、减少和没变化这三种情况. 但从统计上来看, 强磁活动期间电离层闪烁的减少, 也就是抑制事件要大于其他两种情况. 从电离层不均匀结构的激发机制来看, 有多种物理因素影响

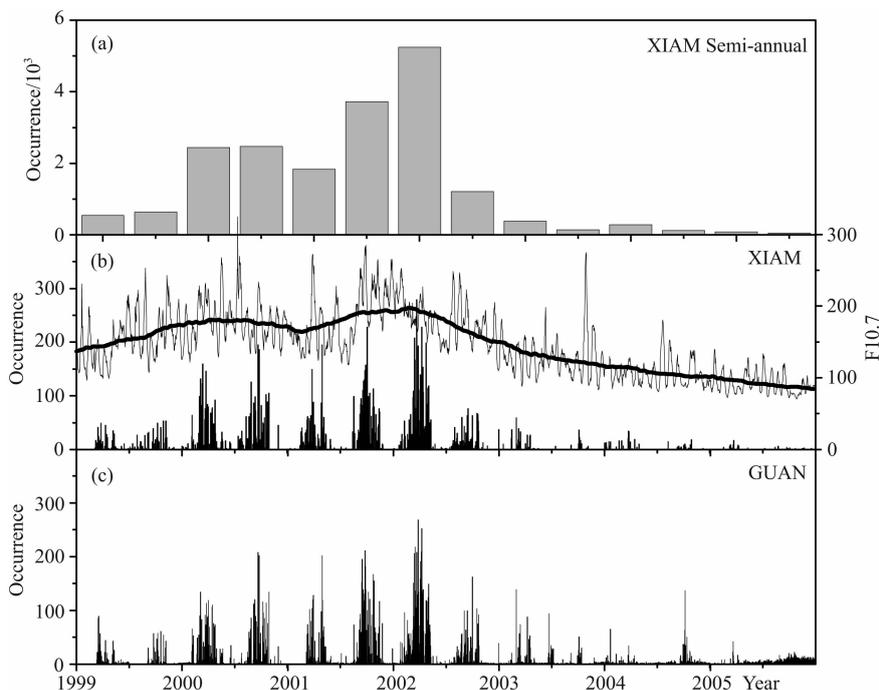


图5 1999年到2005年间(a)XIAM 台站 GPS 周跳半年总数, (b下)XIAM 和(c)GUAN 两个台站的 GPS 周跳日发生次数及其与(b上, 细线)太阳 F10.7($10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$) 指数及(b上, 粗线)年滑动平均的比较

Fig. 5 (a) Semi-annual sum of the GPS Cycle Slip occurrence at XIAM station from 1999 to 2005. Daily occurrence of the GPS Cycle Slips at (b down) XIAM and (c) GUAN stations from 1999 to 2005, and comparing with (b up, thin line) the solar F10.7($10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$) index and (b up, thick line) its annual slip average

到不均匀结构的产生与发展, 这些因素包括电离层电子密度剖面、电离层电场、电离层电导率、风场、磁场等参数, 这些参数在磁活动期间都会发生一定的变化, 而这些因素中, 有些对电离层不均匀结构的产生与发展起促进作用, 有些对电离层不均匀结构的产生起抑制作用. 造成磁活动期间电离层闪烁形态变化不确定的原因与磁活动期间这些物理因素的变化有关, 电离层不均匀结构是这些物理因素综合作用的结果. 图 6 是 2001 年周跳发生次数与地磁活动指数 A_p 之间的关系, 从图中虚线框中的部分可以看到, 强磁活动期间的周跳发生次数一般很少, 但也不排除磁活动期间周跳发生次数增加的情况. 要揭示磁活动期间电离层闪烁的发生规律, 对一些磁活动期间空间环境参数与电离层闪烁的个例分析是必要的.

4 闪烁效应模式化

根据上面的分析, 可以发现, 周跳随着以下几个因素有规律的变化: 地方时、季节、太阳活动以及磁活动. 因此我们在模式化时可以根据这几个因素分别计算其影响, 然后综合这几个方面的因子, 计算出

模式的系数项, 即可完成初步的电离层效应模式. 公式(1)给出了闪烁每 15 min 间隔的发生率的计算公式, 对 15 min 间隔的闪烁发生率进行积分, 即可得到日发生率, 即公式(2). 下面我们对各个因素分别进行模式化计算.

$$\begin{aligned} \text{CS_Occurrence_in_15_min} = & \text{Amplitude_of_15_min} \\ & \times \text{LT_factor} \times \text{Season_factor} \times \text{Solar_factor} \\ & \times \text{GeoMag_factor} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{CS_Occurrence_Daily} = & \text{Amplitude_Daily} \\ & \times \text{LT_factor} \times \text{Season_factor} \times \text{Solar_factor} \\ & \times \text{GeoMag_factor} \end{aligned} \quad (2)$$

4.1 地方时因子的模式化

从图2的周跳的地方时变化规律可以看到, 周跳主要发生在 19:00LT 以后到午夜 02:00LT 之间, 在周跳发生率增加过程中, 发现周跳在开始出现到周跳发生率最大之间的增加速度很快, 而在最大值处到午夜两点之间的下降速度要缓慢得多. 我们发现这种变化规律与电离层电子产生率随高度的变化类似, 因此针对周跳的地方时变化, 我们采用电离层电子产生率的函数曲线形式来拟合, 只是这时的自变量是地方时. 具体公式形式如下:

$$p_l = A \times e^{1-x-c^{-x}}, \quad (3)$$

$$x = (t - t_M) / H_t, \quad (4)$$

电离层闪烁效应的地方时因子模式化工作就是确定相应的时间参考值 t_M 和系数 H_t , 并进行归一化.

通过分析实测数据, t_M 被定在 21:00LT 处, 即 $t_M = 21, 24$ 小时制下 $H_t = 1$, 公式(5)是相应的获得的拟合公式, 其中 h 为 24 小时制地方时, sgn 为符号函数.

$$\text{LT_factor}(h) = e^{1-(h-9-12 \times \text{sgn}(h-12))} - e^{-(h-9-12 \times \text{sgn}(h-12))}, \quad (5)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (6)$$

图 7 是归一化后用 Chapman 函数拟合出来的地方时变化趋势.

4.2 季节因子的模式化

根据周跳的年变化特点, 周跳的年积日覆盖范

围大致为 45~135 天(春分季节)和 225~315 天(秋分季节), 每个分季闪烁效应的变化趋势可以用一个高斯函数来描述, 高斯函数的幅度由太阳活动指数和地磁活动指数来调制. 需要指出的是, 高斯函数并不能反映闪烁效应的日-日变化特征, 这一点由太阳活动和地磁活动指数的日-日变化来反映. 通过计算, 高斯函数的半高宽为 55.

根据以上原则对闪烁的季节效应进行模式化, 公式(7)为归一化的季节因子模式化公式

$$\text{Season_factor}(d) = e^{-(d-182-91 \times \text{sgn}(d-182))^2 / 1000}, \quad (7)$$

其中 d 为年积日. 图 8 为公式(4)的图形表示.

4.3 太阳活动因子的模式化

周跳表现出的电离层闪烁效应的太阳活动周变化特征主要包括两个方面. 首先, 从长期趋势看, 周跳发生次数具有太阳活动周依赖性, 但与太阳活动

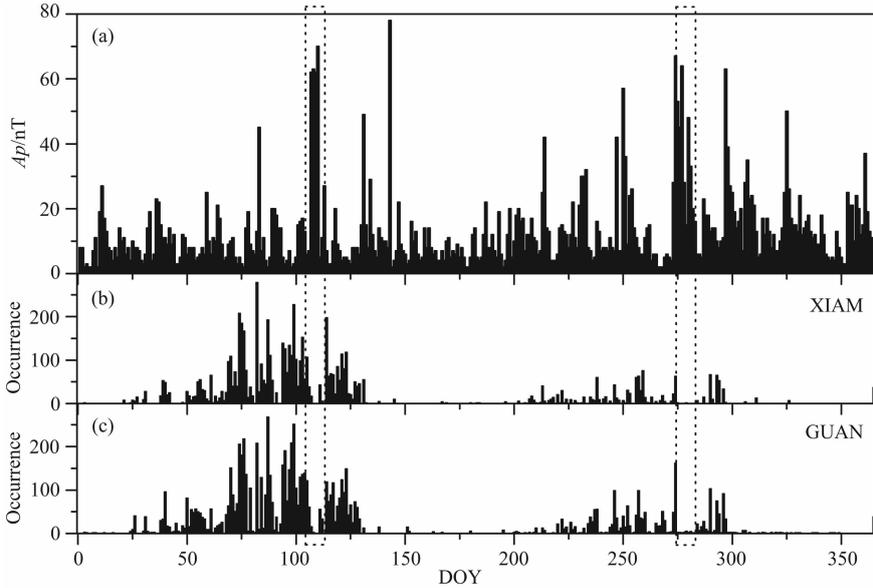


图 6 2002 年地磁 (a) A_p 指数与 (b) XIAM 和 (c) GUAN 台站的 GPS 周跳日发生次数分布规律的比较

Fig. 6 The (a) A_p index comparing with daily occurrence of the GPS Cycle Slips at (b) XIAM and (c) GUAN stations in 2002

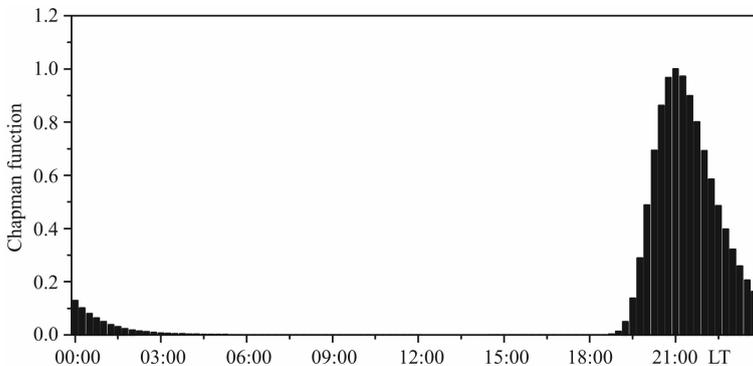


图 7 使用 Chapman 函数拟合的 GPS 周跳发生率地方时变化趋势

Fig. 7 The daily trend of the GPS Cycle Slip occurrence in each 15 minutes, modeled by using the Chapman function

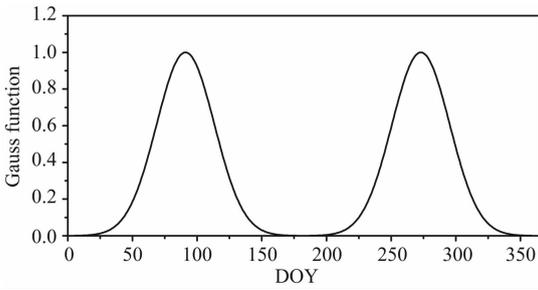


图 8 使用 Gauss 函数拟合的 GPS 周跳发生率季节变化趋势
Fig. 8 The seasonal trend of the GPS Cycle Slip occurrence, modeled by using the Gauss function

强度并不是线性相关的. 再就是 2002 年下半年周跳发生次数锐减, 2003 年以后周跳发生次数很少. 从图 5 中可以看出, 直接用 F10.7 指数不能反映这种突然减少现象, 我们试图用一个与 F10.7 指数有关的函数来反映这种特征. 图 9 给出了关于 F10.7 指数年平均值的四种函数随太阳活动周的变化, 分别对应 1 到 4 次幂形式. 通过与周跳发生次数随太阳活动周变化的相关性分析, 我们选择图 9 中第 3 种函数来描述电离层闪烁效应的太阳活动周影响. 函数表示为如下形式:

$$\text{Solar_factor}(F10.7) = ((F10.7 > 100) - 100)^3, \tag{8}$$

其中

$$(F10.7 > 100) - 100 = \begin{cases} F10.7 - 100, & F10.7 > 100 \\ 0, & F10.7 \leq 100 \end{cases} \tag{9}$$

4.4 地磁因子的模式化

电离层闪烁与地磁扰动的关系一直是电离层研究者关注的问题. 磁活动与电离层闪烁之间有很多

不确定性因素, 这说明控制电离层闪烁发展或者抑制因素的复杂性. 从强磁活动期间周跳的统计结果来看, 可以归纳以下三点: 第一, 强磁活动期间的周跳发生次数要少于地磁平静期; 第二, 对单个事件的分析表明部分情况下地磁具有抑制周跳发生的趋势, 但也有磁活动期间周跳发生率明显增多的情况; 第三, 大的周跳发生次数基本上都发生在 A_p 指数小于 20 的情况. 要搞清楚这些关系, 更全面的空间环境以及电离层形态数据是必要的.

图 10 给出了地磁指数与周跳发生次数的关系, 从图中可以看到, 磁活动对周跳发生次数, 也就是电离层闪烁的抑制作用特征更加明显, 在对磁活动对电离层闪烁效应的模式化中, 这种抑制作用应该首先体现. 通过分析, 作为初步的探索, 我们给出如下地磁因子的模式化公式

$$\text{GeoMag_factor}(A_p) = 1/\sqrt{A_p + 3}. \tag{10}$$

最后, 使用 XIAM 站 1999 年到 2005 年的周跳发生率的数据, 对模式中的常数项进行拟合得到

$$\text{Amplitude_of_15_min} = 4.4228 \times 10^{-5}, \tag{11}$$

由 (11) 式的数值与地方时因子相乘之后, 对一天 24 h 积分得到

$$\text{Amplitude_Daily} = 48.0898 \times 10^{-5}. \tag{12}$$

4.5 模式化计算结果与分析

对于上述系数以及各因素对应的子式, 我们使用 F10.7 原始数值、21 天滑动平均以及 183 天滑动平均分别作为太阳影响因素的输入量, A_p 指数作为磁活动影响因素的输入量, 计算得到的结果如图 11 所示. 由图可见, 使用 F10.7 原始数值进行计算, 在 F10.7 数值较大的情况下, 模型会过高估计周跳

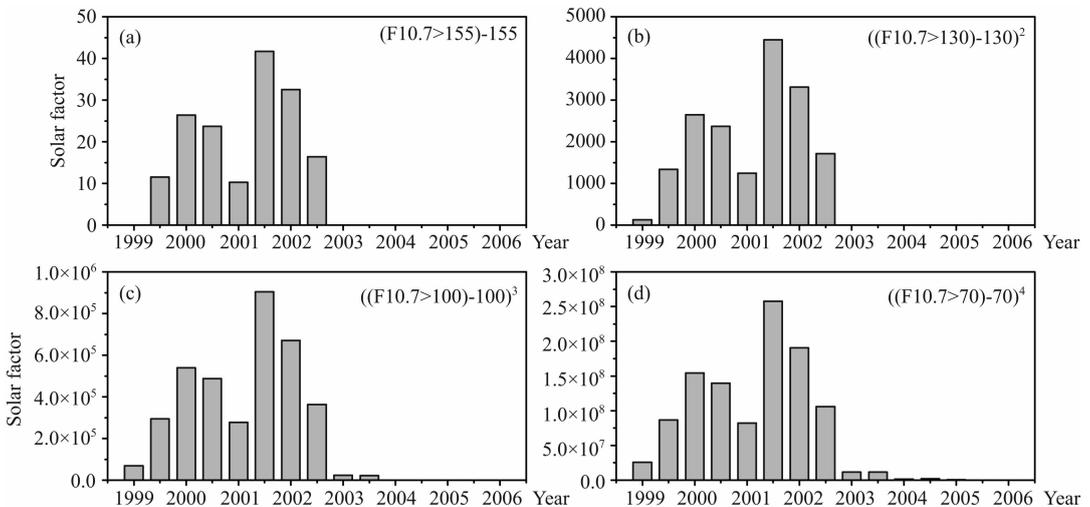


图 9 关于 F10.7 指数年平均值的四组函数, 分别对应 1 到 4 次幂形式

Fig. 9 Four functions on the annual mean F10.7 index, corresponding the forms from first to fourth power

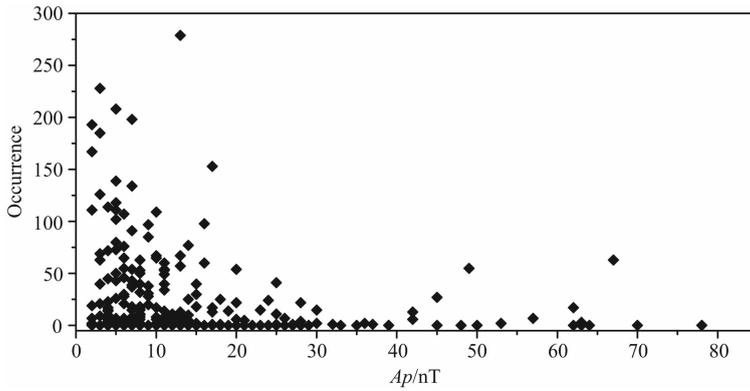


图 10 2002 年 XIAM 站 GPS 周跳发生次数与地磁指数 A_p 的比较

Fig. 10 The occurrence of the GPS Cycle Slips at XIAM station versus geomagnetic A_p index in 2002

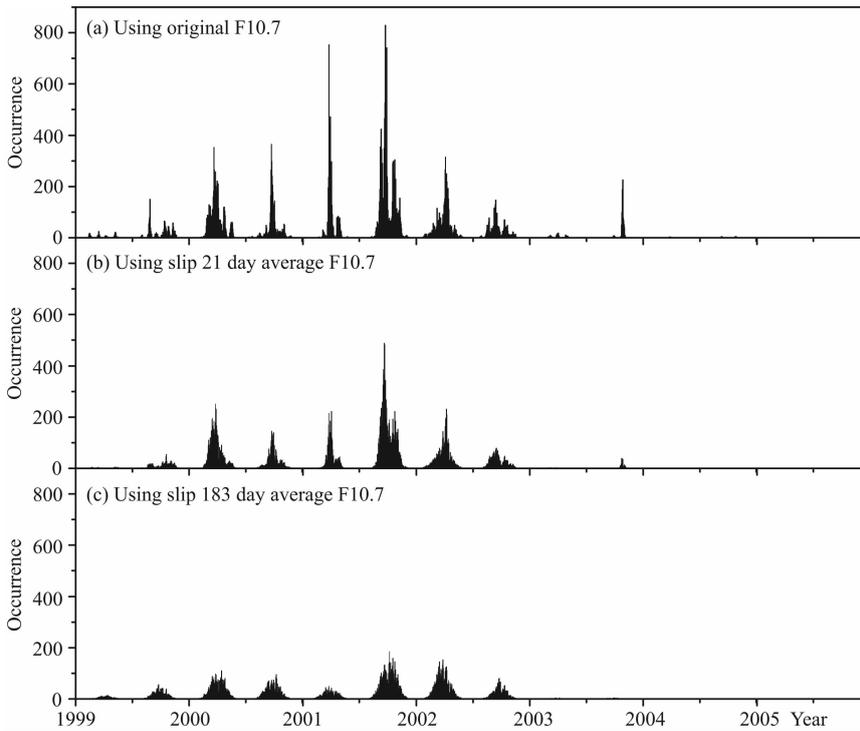


图 11 使用(a)F10.7 原始数据,(b)F10.7 的 21 天滑动平均,(c)F10.7 的 183 天滑动平均输入模型计算 1999 年至 2005 年 XIAM 站的周跳日发生率

Fig. 11 Modeled daily occurrence of the GPS Cycle Slips at XIAM station from 1999 to 2005, inputting with (a) the original F10.7 index, (b) 21-day slip average of the F10.7 index, (c) 183-day slip average of the F10.7 index

的发生率,使用 21 天滑动平均计算得到的结果能够部分地反映周跳发生率的日-日变化情况,但仍存在过高估计周跳发生率的情况,而使用 183 天滑动平均计算得到的周跳发生率日-日变化虽不明显,但总体趋势仍与实际情况符合较好。

表 2 是对模型计算精度的整体评估,表中给出了模型使用不同 F10.7 参量的计算结果与 XIAM 和 GUAN 台站之间的相关系数.使用原始 F10.7 计算的结果与实测数据的相关系数最小,约为 0.5,使用 F10.7 的 21 天滑动平均计算的结果有所改

表 2 模型计算的 1999—2005 年周跳发生率与实测数据的相关系数

Table 2 The correlation coefficients between modeling and observation of GPS Cycle Slip daily occurrence, using three different types of F10.7 as input

	相关系数		
	F10.7 原始数据	21 天滑动平均	183 天滑动平均
XIAM	0.5	0.55	0.58
GUAN	0.51	0.56	0.61

善,相关系数约为 0.55,使用 183 天滑动平均计算的结果则有明显的改善,相关系数约 0.6.

表 3 中列出了模型使用 183 天滑动平均 F10.7 计算的结果与实测数据之间的详细比较结果. 这里我们将日周跳计数大于等于 25 记为闪烁日,表中所分析的对象为模型对于闪烁日的预报精度(准确率: Acc%; 误报率: Mis%). 其中

$$\text{Acc}\% = \frac{\text{Accuracy_Count}}{\text{Cycle_Slip_Day_Count}} \times 100\%, \quad (13)$$

$$\text{Mis}\% = \frac{\text{Miss_Count}}{\text{Quiet_Day_Count}} \times 100\%. \quad (14)$$

式中的 Accuracy_Count 为模型预报的闪烁日与实际闪烁日相符的天数, Cycle_Slip_Day_Count 为实际的闪烁日天数, Miss_Count 为模型预报的闪烁日与实际闪烁日不相符的天数, Quiet_Day_Count 为

非闪烁日的天数. 结果表明,模型对于闪烁日的预报准确率约为 80%,而误报率约为 20%.

另外,由于我们选择的进行模式化的参数为 GPS 周跳,该参数是一种效应参数,可以理解为是电离层闪烁效应的一种示踪量. 它与电离层闪烁有直接的关系,但不能全面描述电离层闪烁强度分布的连续变化. 可以将周跳的统计分布规律理解为电离层闪烁大于一定强度的电离层闪烁的分布规律. 可以从在地方时变化上周跳主要发生在午夜前,以及在 2003 年以后周跳很少发生这两个方面看出这一点. 因此本文开展的电离层闪烁效应模式化研究结果描述的是电离层强闪烁统计规律,进一步的工作就是通过与其具体电离层强闪烁数据的相关分析,修正模式的系数.

表 3 XIAM 站与 GUAN 站使用 183 天滑动平均的 F10.7 作为输入,在 2000—2002 年间对闪烁日的预报准确率比较

Table 3 Prediction accuracy for days of 2000 to 2002 that GPS Cycle Slip counts ≥ 25 by using slip 183 day average of F10.7 for modeling at XIAM and GUAN station

	XIAM		183 天滑动平均			GUAN		183 天滑动平均		
	CS	Mod	Acc	Acc%	Mis%	CS	Mod	Acc	Acc%	Mis%
2000	60	126	48	80.0	25.5	76	126	62	81.5	22.1
2001	73	109	53	72.6	19.1	73	109	57	78.0	17.8
2002	73	115	60	82.1	18.8	90	115	70	77.7	16.3

注:CS 为实测天数, Mod 为预报天数, Acc 为命中天数, Acc% 为准确率, Mis% 为误报率.

5 结论

针对周跳发生率的统计分析表明,周跳发生率具有明显的时间变化特点,这些特点与中国低纬度地区的闪烁发生率的时间变化特点是一致的,可以作为闪烁效应数据开展电离层闪烁效应模式化工作. 从建模过程中开展的工作来看,闪烁效应的计算模式基本考虑了影响电离层闪烁效应的各种参数,以地方时、年积日、F10.7、 A_p 指数为输入参数,能够在一定程度上反映电离层闪烁效应的规律. 研究结果表明:

(1)周跳发生率存在着地方时分布,周跳主要发生在日落 19:00LT 后到午夜 02:00LT 之前,周跳发生次数在 22:00LT 左右达到极大,然后缓慢减少,这一变化过程可以用自变量为地方时的 Chapman 函数形式来描述;

(2)根据周跳的年变化特点,周跳主要发生在年积日 45~135 天(春分季节)和 225~315 天(秋分季

节)期间,而每个分季闪烁效应的变化趋势可以用高斯函数来描述;

(3)可以利用太阳辐射指数 F10.7 作为描述周跳随太阳活动周变化的参量,但由于周跳发生次数与 F10.7 并不是线性相关的,根据周跳随太阳活动周的变化特点,本文使用一个以 F10.7 为自变量的三次函数来描述这种依赖性;

(4)电离层闪烁与磁活动的关系比较复杂,大多数情况下表现为磁活动对电离层闪烁的抑制作用,在本研究中我们使用一个以地磁活动指数 A_p 为自变量的平方根函数来拟合这种变化.

同时也应该指出,由于 GPS 系统本身具有一定的抗电离层闪烁能力,该模式给出的输出结果反映的是闪烁强度大于一定等级的电离层闪烁效应的发生规律,进一步的工作就是通过与其具体电离层强闪烁数据的相关分析,修正模式的系数.

致谢 本研究所用的 GPS 数据来自于中国地震局中国地壳形变监测网,海南富克镇的电离层闪烁数据由中国科学院空间科学与应用中心尚社平博士提供.

References

- Aarons J, Mendillo M, Yantosca R, et al. 1996. GPS phase fluctuations in the equatorial region during the MISETA 1994 campaign. *J. Geophys. Res.*, 101(A12): 26851-26862.
- Abdu M A, Jayachandran P, MacDougall J, et al. 1998. Equatorial F region zonal plasma irregularity drifts under magnetospheric disturbances. *Geophys. Res. Lett.*, 25(22): 4137-4140.
- Abdu M A, Batista I S, Takahashi H, et al. 2003. Magnetospheric disturbance induced equatorial plasma bubble development and dynamics: A case study in Brazilian sector. *J. Geophys. Res.*, 108 (A12): 1449.
- Abdu M A. 2012. Equatorial spread F/plasma bubble irregularities under storm time disturbance electric fields. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 75-76: 44-56.
- Afraimovich E L, Lesyuta O S, Ushakov I I, et al. 2002. Geomagnetic storms and the occurrence of phase slips in the reception of GPS signals. *Ann. Geophys.*, 45(1): 55-71.
- Afraimovich E L, Demyanov V V, Kondakova T N. 2003. Degradation of GPS performance in geomagnetically disturbed conditions. *GPS Solutions*, 7(2): 109-119.
- Basu S, Basu S, Makela J, et al. 2006. Equatorial anomaly development mapped by TIMED/GUVI: Occurrence/suppression of scintillations at low latitudes and their modeling. Western Pacific Geophysics Meeting (WPGM).
- Beach T L, Kintner P M. 2001. Development and use of a GPS ionospheric scintillation monitor. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(5): 918-928.
- Blewitt G. 1990. An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophys. Res. Lett.*, 17(3): 199-202.
- Chen W S, Lee C C, Liu J Y, et al. 2006. Digisonde spread F and GPS phase fluctuations in the equatorial ionosphere during solar maximum. *J. Geophys. Res.*, 111: A12305.
- Collin F, Warrant R. 1995. Applications of the wavelet transform for GPS cycle slip correction and comparison with Kalman filter. *Manuscripta Geodaetica*, 20(3): 161-172.
- Conker R S, El-Arini M B, Hegarty C J, et al. 2003. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/satellite-based augmentation system availability. *Radio Sci.*, 38(1): 1-1-1-23.
- Gao Y, Li Z F. 1999. Cycle slip detection and ambiguity resolution algorithms for dual-frequency GPS data processing. *Marine Geodesy*, 22(3): 169-181.
- Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Collins J. 1993. Global Positioning System: Theory and Practice. 4th ed. Wien (Austria): Springer.
- Kelley M C. 2009. The Earth's Ionosphere: Plasma Physics & Electrodynamics. San Diego, CA USA: Academic Press.
- Ko C P, Yeh H C. 2010. COSMIC/FORMOSAT-3 observations of equatorial F region irregularities in the SAA longitude sector. *J. Geophys. Res.*, 115: A11309.
- Li G Z, Ning B Q, Zhao B Q, et al. 2009. Characterizing the 10 November 2004 storm-time middle-latitude plasma bubble event in Southeast Asia using multi-instrument observations. *J. Geophys. Res.*, 114: A07304.
- Li G Z, Ning B Q, Hu L H, et al. 2010. Longitudinal development of low-latitude ionospheric irregularities during the geomagnetic storms of July 2004. *J. Geophys. Res.*, 115: A04304.
- Mendillo M, Baumgardner J, Pi X Q, et al. 1992. Onset conditions for equatorial spread F. *J. Geophys. Res.*, 97(A9): 13865-13876.
- Mendillo M, Merriwether J, Biondi M. 2001. Testing the thermospheric neutral wind suppression mechanism for day-to-day variability of equatorial spread F. *J. Geophys. Res.*, 106(A3): 3655-3663.
- Misra P, Enge P. 2001. Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance. Lincoln, Massachusetts: Ganga-Jamuna Press.
- Nicolls M J, Kelley M C. 2005. Strong evidence for gravity wave seeding of an ionospheric plasma instability. *Geophys. Res. Lett.*, 32(5): L05108. 1-L05108. 4.
- Rama Rao P V S, Gopi Krishna S, Niranjana K, et al. 2006. Study of spatial and temporal characteristics of L-band scintillations over the Indian low-latitude region and their possible effects on GPS navigation. *Ann. Geophys.*, 24(6): 1567-1580.
- Sahai Y, Fagundes P R, Bittencourt J A, et al. 1998. Occurrence of large scale equatorial F region plasma depletions during geomagnetic disturbances. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 60(16): 1593-1604.
- Shang S P, Shi J K, Guo J S, et al. 2005. Ionospheric scintillation monitoring and preliminary statistic analysis over Hainan region. *Chin. J. Space Sci.* (in Chinese), 25(1): 23-28.
- Skone S, Feng M, Ghafoori F, et al. 2008. Investigation of scintillation characteristics for high latitude phenomena. // Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2008). Savannah, Georgia, USA.
- Skone S, de Jong M. 2000. The impact of geomagnetic substorms on GPS receiver performance. *Earth Planets Space*, 52: 1067-1071.
- Teunissen P J G. 1990. Quality control in integrated navigation systems. // Position Location and Navigation Symposium, 1990. Record. The 1990's—A Decade of Excellence in the Navigation Sciences. IEEE PLANS'90, IEEE. Las Vegas, NV; IEEE: 158-165.
- Van Dierendonck A J, Klobuchar J, Hua Q Y. 1993. Ionospheric scintillation monitoring using commercial single frequency C/A code receivers. Proceedings of ION GPS-93.
- Wang S Y, Wang J S, Yu T, et al. 2010. Preliminary analysis of ionospheric scintillations over Guangzhou region of China. *Chin. J. Space Sci.* (in Chinese), 30(2): 141-147.
- Xu J S, Yeh K C. 1993. Nocturnal disturbances of total electron content and their correlation with VHF radio wave scintillations in the Pacific-Asia region. *Radio Sci.*, 28(5): 767-774.
- Xu J S, Zhu J, Li L, et al. 2007. Comparison of L-band radio wave

- scintillations and TEC fluctuations from observation of Wuhan and Guilin. *Chin. J. Radio Sci.* (in Chinese), 22(2): 181-186.
- Zhang D H, Feng M, Xiao Z, et al. 2007. The seasonal dependence of cycle slip occurrence of GPS data over China low latitude region. *Science in China Series E*, 50(4): 422-429.
- Zhang D H, Cai L, Hao Y Q, et al. 2010a. Solar cycle variation of the GPS cycle slip occurrence in China low-latitude region. *Space Weather*, 8(10): S10D10.
- Zhang D H, Xiao Z, Feng M, et al. 2010b. Temporal dependence of GPS cycle slip related to ionospheric irregularities over China low-latitude region. *Space Weather*, 8(4): S04D08.
- Zhang D H, Mo X H, Ercha A, et al. 2012. Case study of ionospheric fluctuation over mid - latitude region during one large magnetic storm. *Science China Technological Sciences*, 55(5): 1198-1206.
- Zhang T H, Xiao Z. 2000. Effect of the coupling of different Ionospheric regions on the nighttime F region irregularities in mid-low latitudes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 43(5): 589-597.

附中文参考文献

- 尚社平, 史建魁, 郭兼善等. 2005. 海南地区电离层闪烁监测及初步统计分析. *空间科学学报*, 25(1): 23-28.
- 王斯宇, 王劲松, 余涛等. 2010. 中国广州地区电离层闪烁观测结果的初步统计分析. *空间科学学报*, 30(2): 141-147.
- 徐继生, 朱劼, 李莉等. 2007. 武汉与桂林 L-波段电波闪烁与 TEC 起伏特征比较. *电波科学学报*, 22(2): 181-186.
- 张天华, 肖佐. 2000. 中、低纬度地区电离层不同层结间的耦合对夜晚 F 区不规则结构的影响. *地球物理学报*, 43(5): 589-597.

(本文编辑 何燕)