

# 巨烈磁暴对全球 GNSS 观测信号的影响

贺黎明<sup>1</sup>, 张世旋<sup>1</sup>, 吴立新<sup>2</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:** 介绍了一种 GNSS  $L_1$  和  $L_2$  信号及测距码失锁率统计计算方法,并考察了不同卫星高度角对失锁率计算结果的影响. 利用全球 GNSS 观测数据,分析了第 23 太阳活动周发生的两次巨烈磁暴期间 GNSS 观测信号的质量. 结果表明:巨烈磁暴发生期间 GNSS  $L_1$  和  $L_2$  信号及  $P_1$  和  $P_2$  码失锁率较平静日均显著增加,信号失锁主要发生在磁暴主相及恢复相前期.  $L_2$  失锁率明显高于  $L_1$  且失锁持续时间更长,表明  $L_2$  比  $L_1$  更易受到磁暴影响. GNSS 信号失锁率与磁暴指数 SYM-H 的高相关性表明信号失锁率的异常增加由巨烈磁暴所驱动. 研究成果可为我国北斗卫星导航系统全球信号质量评估提供方法支持.

**关 键 词:** 全球导航卫星系统;地磁暴;电离层;信号失锁;北斗卫星导航系统

中图分类号: P 228      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2019)10-1480-07

## Influence of Strong Geomagnetic Storms on Global GNSS Observation Signals

HE Li-ming<sup>1</sup>, ZHANG Shi-xuan<sup>1</sup>, WU Li-xin<sup>2</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China. Corresponding author: ZHANG Shi-xuan, E-mail: Zhang\_sx00@163.com)

**Abstract:** A method for calculating the rate of loss-of-lock (LOL) at carrier phase and pseudo-range measurements of GNSS  $L_1$  and  $L_2$  was introduced, and the impacts of different satellite elevation angles on the LOL rate were also investigated. Using global GNSS observations, the qualities of GNSS signals during two strong geomagnetic storms at the 23rd solar cycle were analyzed. The results showed that the LOL rates of  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $P_1$  and  $P_2$  signals significantly increased during strong geomagnetic storms comparing with the quiet days. The LOL mainly occurred in the main phase and the early recovery phase of the storm. The LOL rate of  $L_2$  was significantly higher than  $L_1$ , and the LOL duration was longer. This means the  $L_2$  was more sensitive to geomagnetic storm than  $L_1$ . The high correlation between the LOL rate and SYM-H index indicated that the abnormal increase of global LOL rate was driven by the strong geomagnetic storm. The results could provide methodological support for the assessment of signal quality of the Beidou navigation satellite system.

**Key words:** global navigation satellite system; geomagnetic storm; ionosphere; signal loss-of-lock; Beidou navigation satellite system

磁暴是一种地球磁场全球性的剧烈扰动现象,日冕物质抛射、太阳耀斑和共转相互作用区等提供了地磁暴的主要驱动力<sup>[1]</sup>. 磁暴发生时,地磁水平分量  $H$  变化最大,据此可将磁暴分为三个阶段:初相、主相和恢复相. 磁暴开始时,  $H$  在高于

暴前值的水平上起伏变化称为初相;初相之后  $H$  突然大幅度下降,称为主相;随后  $H$  开始逐渐恢复,一般需要 2~3 天恢复到平静状态,这一阶段称为恢复相.

巨烈磁暴发生时地球空间内磁场剧烈波动,

使得空间天气环境发生恶劣变化,引起电离层电子密度异常扰动. 全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 卫星发射的  $L$  波段信号在穿过电离层时,会受到电离层电子密度异常扰动的影响,使得电离层延迟误差陡增,信号频繁丢失,甚至无法工作,严重影响 GNSS 导航、定位和定时的精度和可靠性<sup>[2]</sup>.

地磁暴的电离层效应主要表现为电离层暴、电离层闪烁、等离子不规则体等电离层异常扰动现象的出现<sup>[3-5]</sup>. 2015 年 3 月 17 日磁暴期间引发的中低纬度电离层暴表现为正相暴后长时间强的负相暴<sup>[6]</sup>. 2001 年 9 月 25 日至 26 日的中等地磁暴期间,在中纬度地区首次观测到强烈的 GPS  $L_1$  振幅闪烁<sup>[7]</sup>. 2000 年 7 月 16 日和 2003 年 10 月 30 日的巨烈磁暴主相阶段发现极光椭圆南边界处有一个强烈的小尺度电子密度不规则区域,导致 GPS 跟踪信号衰弱,定位误差急剧增加<sup>[8]</sup>. 此外,研究表明磁暴期间在中纬度地区观测到电离层中的等离子体超级气泡<sup>[9]</sup>,其不规则性影响导航系统并产生电离层闪烁<sup>[10-11]</sup>.

已有研究主要针对地磁暴期间局部区域 GPS 信号进行分析<sup>[12-15]</sup>,而针对全球 GNSS 信号质量的研究较少. 2014 年 Astafyeva 等分析了磁暴对全球 GPS 信号质量的影响<sup>[16]</sup>. 与 Astafyeva 等的工作相比,本文在以下三个方面进行了拓展:①将单一的 GPS 系统拓展为包括 GPS 和 GLONASS 的多系统;②将载波信号拓展为包括载波和测距码的全部观测信号;③分析了不同卫星高度角下全球 GNSS 信号失锁率的变化情况以确定高度角阈值. 随着我国北斗卫星导航系统 (BDS) 的快速建设,2018 年 11 月 19 日,我国成功完成了北斗三号基本系统的卫星部署,本研究可为 BDS 的全球观测数据质量评价提供方法支持,对保障 BDS 在不同空间天气环境下的定位、导航和授时服务具有重要意义.

## 1 数据与方法

### 1.1 研究案例数据

本研究所用的 GNSS 数据是来自 NGS CORS, UNAVCO, SOPAC 及 IGS 的 RINEX (receiver independent exchange format/与接收机无关的交换格式)格式的 GNSS 原始观测数据,RINEX 格式是一种普遍应用于 GNSS 测量的标准数据格式,其观测值文件中提供了包括载波( $L_1$  和  $L_2$ )及搭载在载波上的多种测距码( $C/A$  码、 $P_1$  码和  $P_2$  码)等不同

类型的观测信号,本文对磁暴期间 GNSS 获取的全部观测信号进行了分析研究. 此外,利用 GPS 和 GLONASS 的 SP3 精密星历数据文件计算各个测站不同观测卫星的高度角.

使用地磁指数来评价地磁暴的强度. 地磁指数是每一个时间段内地磁扰动总体强度或者某类地磁扰动强度的分级指标. 1997 年 Loewe 和 Prolss 根据地磁指数 Dst 将磁暴分为弱磁暴(最小 Dst 在  $-30 \sim -50$  nT 之间),中磁暴(最小 Dst 在  $-50 \sim -100$  nT 之间),强磁暴(最小 Dst 在  $-100 \sim -200$  nT 之间),烈磁暴(最小 Dst 在  $-200 \sim -350$  nT 之间),巨磁暴(最小 Dst 低于  $-350$  nT)<sup>[17]</sup>. 按照以上分类,本文选取了第 23 太阳活动周发生的 2 个典型磁暴事件作为研究对象,有关磁暴的时间、类型等参数详见表 1,每个磁暴研究所用的 GNSS 站点总数达 1 000 ~ 2 000 个,站点的全球分布如图 1 所示,具有很好的全球覆盖率.

表 1 地磁暴及相关参数  
Table 1 Geomagnetic storms and related parameters

时间	类型	最小 Dst	最大 $K_p$	站点数
2003-11-20	巨磁暴	-422 nT	9	1 305
2005-05-15	烈磁暴	-247 nT	9	1 718

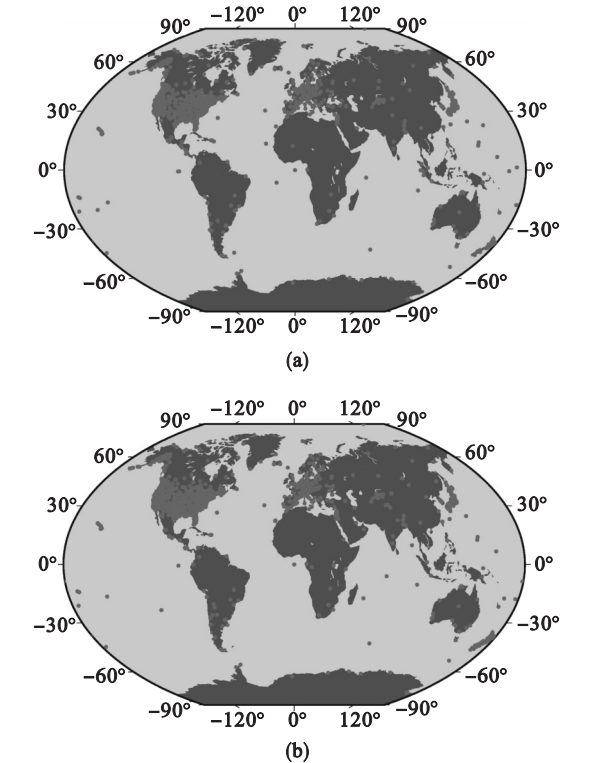


图 1 磁暴日全球 GNSS 站点分布  
Fig. 1 Distribution of global GNSS station on geomagnetic storm days  
(a)—2003-11-20; (b)—2005-05-15.

针对每个磁暴,选取了相应的平静日作为磁暴日的对比,平静日的选取遵循以下三个原则:①为避免间隔天数过长而导致 GNSS 接收机接收的卫星差别过大,尽可能选取与磁暴日间隔天数较少的日期作为平静日,相邻为最佳;②为保证磁暴日与平静日空间环境以及背景电离层差别较小,磁暴日与平静日的太阳活动指数  $F_{10.7}$  相差小于 20;③平静日磁暴指数变化平稳且没有磁暴发生,对应 Dst 指数大于  $-30\text{ nT}$ ,  $K_p$  指数小于 4.

1.2 GNSS 观测信号失锁率统计计算

为了研究磁暴对全球 GNSS 观测信号的整体影响,认为观测值  $O$  文件中某一个历元或多个历元观测值不存在( $O$  文件中观测值无记录)即为观测值缺失. 鉴于观测值缺失意味着 GNSS 信号受到严重影响,认为可对应观测信号“失锁”. GNSS 卫星发射的信号由载波、测距码和导航电文组成,本文使用到的信号涉及载波和测距码,载波是可运载调制信号的高频振荡波;测距码是用于测定从卫星至接收机间的距离的二进制码,包括粗码( $C/A$  码)和精码( $P$  码). GNSS 观测值  $O$  文件包含多种不同的观测值类型,其中  $L_1, L_2$  表示  $L_1$  和  $L_2$  载波相位观测值;  $P_1$  和  $P_2$  码表示搭载在  $L_1$  和  $L_2$  载波上的  $P$  码伪距;  $C/A$  码是用于粗测距和捕获 GNSS 卫星信号的伪随机码,  $C_1$  表示搭载在  $L_1$  载波上的  $C/A$  码伪距. 图 2 为 GNSS 失锁统计流程.

类型观测值的失锁数量. ②将 GNSS 测站的三维空间直角坐标转换为大地坐标:

$$L = \arctan(Y/X), \tag{1}$$

$$B = \arctan\left\{\frac{Z(N+H)}{\sqrt{X^2+Y^2(N(1-e^2)+H)}}\right\}, \tag{2}$$

$$H = Z/\sin B - N(1-e^2). \tag{3}$$

式中:  $B$  为大地纬度;  $L$  为大地经度;  $H$  为大地高程;  $N = a/\sqrt{1-e^2(\sin B)^2}$ , 为该点的卯西圈曲率半径;  $e^2 = (a^2 - b^2)/a^2$ ,  $a, e$  分别为该大地坐标系对应椭球的长半轴和第一偏心率.

2) 高度角计算: ①原始 SP3 文件中的精密轨道数据是以离散的位置和速度的形式给出的, 历元间隔为 15 min, 需利用内插的方法得到 30 s 历元间隔的卫星位置. 本研究使用拉格朗日多项式插值方法. 若已知函数  $y = f(x)$  的  $n + 1$  个节点  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$  及其对应的函数值  $y_0, y_1, y_2, \dots, y_n$ , 对于插值区间内任意一点, 可用下面的拉格朗日多项式来计算函数值:

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \prod_{i=0, i \neq k}^n \left( \frac{x - x_i}{x_k - x_i} \right) y_k. \tag{4}$$

根据每 15 min 所给出的卫星坐标采用 17 阶多项式进行内插, 精度可优于 5 mm, 内插的不确定性要小于轨道数据自身的误差.

②高度角计算: 使用测站坐标和插值后的 GPS 和 GLONASS 的 SP3 精密轨道数据, 可计算测站在任意时刻的卫星高度角.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin L & \cos B \cos L \\ -\sin B \sin L & \cos L & \cos B \sin L \\ \cos B & 0 & \sin B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (N+H) \cos B \cos L \\ (N+H) \cos B \sin L \\ [N(1-e^2)+H] \sin B \end{bmatrix}, \tag{5}$$

$$\theta = \arctan(z/\sqrt{x^2+y^2}). \tag{6}$$

式中:  $\theta$  为卫星的高度角;  $x, y, z$  为站心地平直角坐标系中坐标;  $X, Y, Z$  为测站在直角坐标系中的坐标;  $B, L, H$  为测站在大地坐标系中的坐标.

3) 失锁率计算: 根据高度角筛选对应的观测值( $L_1, L_2, P_1, P_2$  和  $C_1$ ) 数据文件, 计算不同高度角下对应观测值的失锁率. ①统计每个 GNSS 站点  $L_1, L_2, P_1, P_2$  和  $C_1$  的失锁数; ②统计所有的 GNSS 站点的观测总数; ③计算  $L_1, L_2, P_1, P_2$  和  $C_1$  失锁的相对密度即为 GNSS 站点对应观测值的全球失锁率:

$$P_{\text{LOL}} = \frac{N_{\text{LOL}}}{N_{\text{T}}} \times 100\%. \tag{7}$$

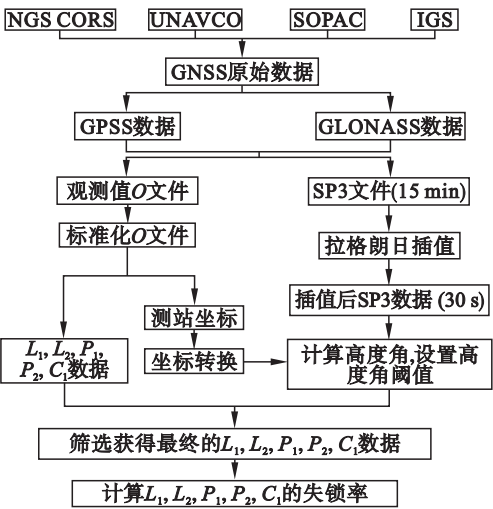


图 2 GNSS 失锁统计计算流程图

Fig. 2 Flow chart for statistical calculation of GNSS loss-of-lock

1) RINEX 格式观测值  $O$  文件的处理: ①从观测值原始数据  $O$  文件中分别提取 GPS 和 GLONASS 的  $L_1$  和  $L_2$  载波观测值数据, 以及相应的  $P_1, P_2$  码和  $C/A$  码观测值数据, 用来统计各



式中： $P_{\text{LOL}}$  表示全球失锁率； $N_{\text{LOL}}$  表示  $L_1, L_2, P_1, P_2$  或  $C_1$  的观测值失锁数； $N_{\text{T}}$  表示总的观测数量。

## 2 不同卫星高度角下全球 GNSS 信号失锁分析

卫星高度角是指从测站到观测卫星的射线与水平面间的夹角,可以控制 GNSS 接收机接收卫星的数量. 为避免卫星高度角过低引入多路径效应和大气传播延迟等误差,分析了不同高度角下磁暴日全球 GNSS 观测信号的失锁率情况以确定高度角阈值。

图 3 为 2003 年 11 月 20 日巨磁暴期间不同高度角对 GNSS  $L_1$  和  $L_2$  信号的全球失锁率计算的影响情况. 可以明显看出高度角为  $0^\circ$  和  $5^\circ$  时,  $L_1$  和  $L_2$  的失锁率整体较大,  $L_1$  失锁率在 0.15% 左右波动,  $L_2$  失锁率在 1.5% 左右波动;而当高度角为  $15^\circ$  和  $20^\circ$  时, GNSS  $L_1$  和  $L_2$  的失锁率变小,  $L_1$  失锁率在 0.02% 左右波动,  $L_2$  失锁率在 0.4% 左右波动. 当卫星高度角过低时,观测值文件中提供的可观测卫星数变多,但是鉴于低高度角卫星在平静期也容易存在失锁情况,使得计算的全球失锁率由于包含低高度角卫星带来的噪声使得结

果整体偏大. 而当卫星高度角设置过高时,由于截断的卫星数较多,导致计算的失锁率大幅度减小,不能真实反映磁暴所带来的影响. 因此,综合考虑不同高度角下全球失锁率的波动情况,选定高度角阈值为  $10^\circ$  来分析巨烈磁暴对全球 GNSS 观测信号的影响。

## 3 巨烈磁暴对全球 GNSS 信号的影响

### 3.1 2003 年 11 月 20 日巨磁暴

2003 年 10 月至 11 月太阳爆发了一系列强烈耀斑,被称为“万圣节风暴”. 根据美国国家海洋和大气局空间环境中心的监测记录,强烈太阳风暴级别达到了 X28 级,峰值达 X45 级,这是有记录以来的最强太阳耀斑,由此引发了 2003 年 11 月 20 日发生的第 23 太阳活动周内最大的一次磁暴. 在 20 日的 21UT 地磁指数 Dst 的最小偏移量达  $-422\text{nT}$ ,最大  $K_p$  为 9. 选定磁暴前一天 (2011 年 11 月 19 日) 作为平静日进行对比分析,其 Dst 最小偏移量为  $-27\text{nT}$ ,最大  $K_p$  值为 3.

图 4a 为磁暴日 20 日与平静日 19 日 SYM-H 指数随时间的变化曲线,20 日的磁暴在 08:02:00UT 发生磁暴急始 (storm sudden commencement, SSC), SYM-H 指数在 18:17:00UT 达到最低值  $-490\text{nT}$ ,从 16:47:00UT 至 22:30:00UT 时间段内 SYM-H 指数一直处在  $-350\text{nT}$  以下. 此次磁暴的恢复相持续时间较长,一直到 24 日才恢复至平静。

图 4b ~ 4e 中的线 2 表示平静日 (19 日) 的  $L_1, L_2$  信号以及  $P_1, P_2$  码的失锁率,从图中可以看出,平静日观测信号失锁率均波动平稳,其中  $L_1$  信号的平静日平均失锁率约为 0.05%,  $L_2$  信号的平静日平均失锁率约为 0.7%,  $P_1$  码和  $P_2$  码的平静日平均失锁率分别约为 0.35% 和 0.8%,均未出现明显异常变化. 受磁暴影响,20 日 GNSS 信号失锁率显著增加.  $L_1$  信号的失锁率在 17:12:30UT 增加到 0.12%,达到第一个峰值,在 18UT 后继续上升直到 20:33:30UT 达到最大值 0.25%,随后开始下降,在 22UT 左右恢复到平静状态.  $L_2$  信号失锁率变化较  $L_1$  波动更加剧烈,持续时间更长,可以看到在 10:46:00UT  $L_2$  失锁率就开始变大,出现小幅度波动,15UT 左右开始大幅度的上升,在 18:47:30UT 达到最大 2.68%,随后开始下降,在 19:50:30 到达 1.4%,之后又突然增加,在 20:32:30UT 达到 2.64%,然后慢慢恢

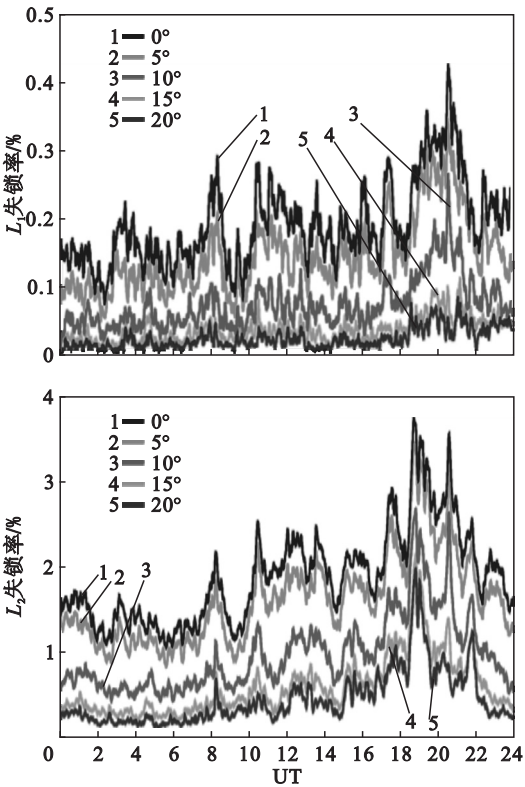


图 3 不同高度角下全球失锁率统计

Fig. 3 Statistical analysis of global loss-of-lock rate at different elevation angles

复到平静水平。 $P_1$  码和  $P_2$  码的失锁率与  $L_2$  信号的失锁率变化趋势十分相似,但是整体失锁率比  $L_2$  更高。 $P_1$  码在 20 日 18:48:00UT 失锁率达 3.62%,在 20:33:00UT 失锁率最大为 4.01%。 $P_2$  码在 20 日 18:46:30 UT 失锁率达 4.72%,在

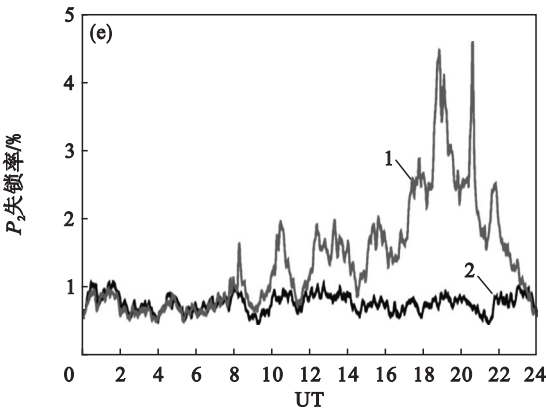
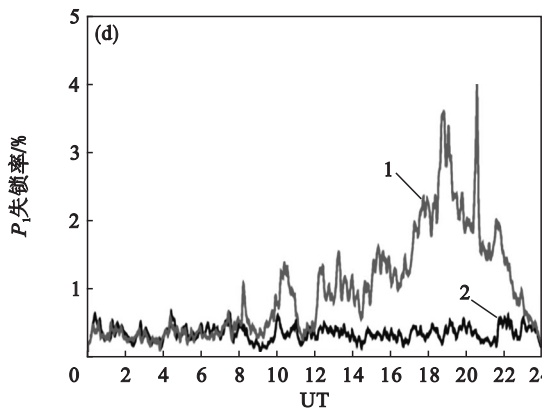
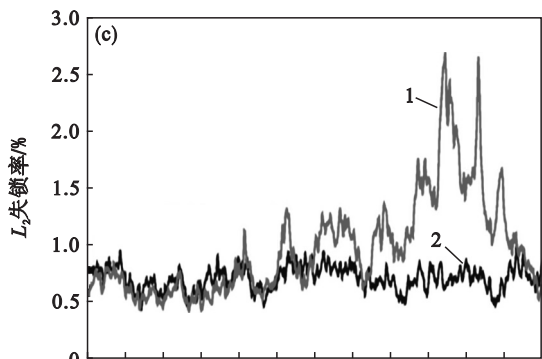
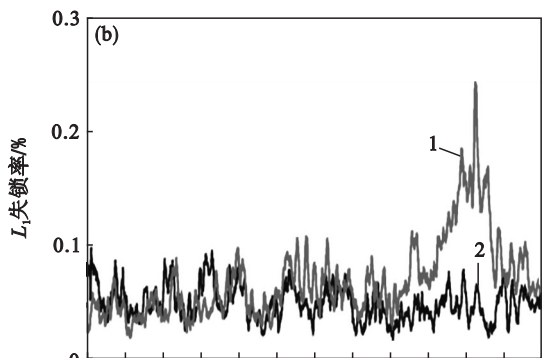
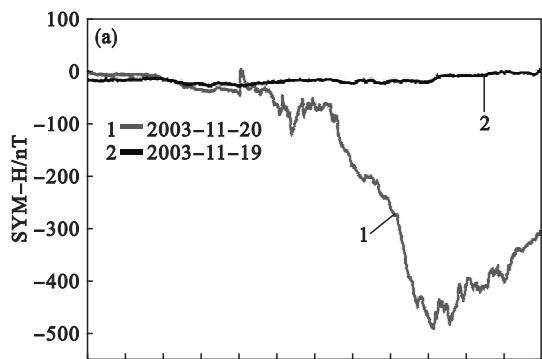


图 4 SYM-H 指数、 $L_1$  失锁率、 $L_2$  失锁率、 $P_1$  失锁率和  $P_2$  失锁率时间序列  
Fig. 4 Time series of SYM-H index and LOL rates of  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $P_1$  and  $P_2$

20:30:30UT 失锁率最大为 4.98%。对比  $L_1$ ,  $L_2$  信号及  $P_1$ ,  $P_2$  码的失锁率变化与磁暴指数 SYM-H,可以看出 GNSS 信号失锁出现的时间与磁暴具有强相关性, $L_1$ ,  $L_2$  信号和  $P_1$ ,  $P_2$  码失锁率主要发生在主相阶段和恢复相的前期。同时, $L_2$  的失锁率比  $L_1$  的失锁率更大,持续时间更长,失锁率波动幅度更大,波动更复杂,显然  $L_2$  信号更容易受到磁暴的影响。

3.2 2005 年 5 月 15 日烈磁暴

2005 年 5 月 13 日太阳上观测到一个中等耀斑,该耀斑伴有日冕物质抛射和射电爆发,引发 5 月 15 日的烈磁暴,其最小 Dst 偏移量在 9UT 为 -247 nT,最大  $K_p$  值为 9。选择前一天 5 月 14 日作为平静日进行对比,14 日的最小 Dst 偏移量为 -28 nT,最大  $K_p$  值为 2。与 2005 年 5 月 15 日的磁暴相比 2003 年 11 月 20 日的磁暴强度稍弱,最大 Dst 相差 175 nT,主相的持续时间较短,起伏变化比较快。

图 5a 为磁暴日 15 日与平静日 14 日 SYM-H 指数随时间的变化曲线,2005 年 5 月 15 日的磁暴是一次典型的烈磁暴,2:40:00—6:22:00UT 为初相阶段,SYM-H 指数在高于磁暴前的水平上起伏变化,在 2:40:00UT 发生了一次 SSC,在 5:59:00UT 发生了一次稍大的波动;6:22:00—8:20:00UT 为主相阶段,SYM-H 指数迅速下降,在 8:20:00UT 降到最低点,SYM-H 指数最低值为 -305nT;8:20:00UT 至 24UT 为恢复相阶段,恢复相持续时间较长。

本次磁暴相对于 2003 年 11 月 20 日的磁暴稍弱,GNSS 信号受到的影响相对较小,但是同样可以观测到 GNSS 信号失锁率明显的异常变化。图 5b~5e 中的线 2 为 5 月 14 日平静日的  $L_1$ ,  $L_2$

信号及  $P_1$ 、 $P_2$  码的失锁率曲线,同样可以看出平静日失锁率变化平稳, $L_1$  信号的平均失锁率约为 0.09%, $L_2$  信号的平均失锁率约为 0.7%, $P_1$  码和  $P_2$  码的平均失锁率分别为 0.42% 和 0.7%。与之对比,磁暴日  $L_1$  的失锁率波动比较复杂,磁暴日的失锁率比平静日的失锁率整体偏高,但是在磁暴的主相阶段  $L_1$  失锁率明显高于其他阶段,在 6:44:00UT 达到最大失锁率 0.21%。 $L_2$  失锁率变化则非常显著,在磁暴的主相开始失锁率突然增大,在主相阶段失锁率保持在 1.15% ~ 1.8% 之间,7:02:30UT 达到最大失锁率 1.8%。 $P_1$  码和  $P_2$  码的失锁率变化趋势和  $L_2$  相似,变化幅度更大。在 6:21:30UT 至 8:28:30UT 期间  $P_1$  码失锁率在 1.8% ~ 3.2% 之间波动,在 8:43:00UT 失锁率达到最大为 5.5%。在 6:22:00UT 至 8:33:00UT 期间  $P_2$  码失锁率在 1.5% ~ 3% 之间波动,在 8:43:00UT 失锁率达到最大为 3.8%。

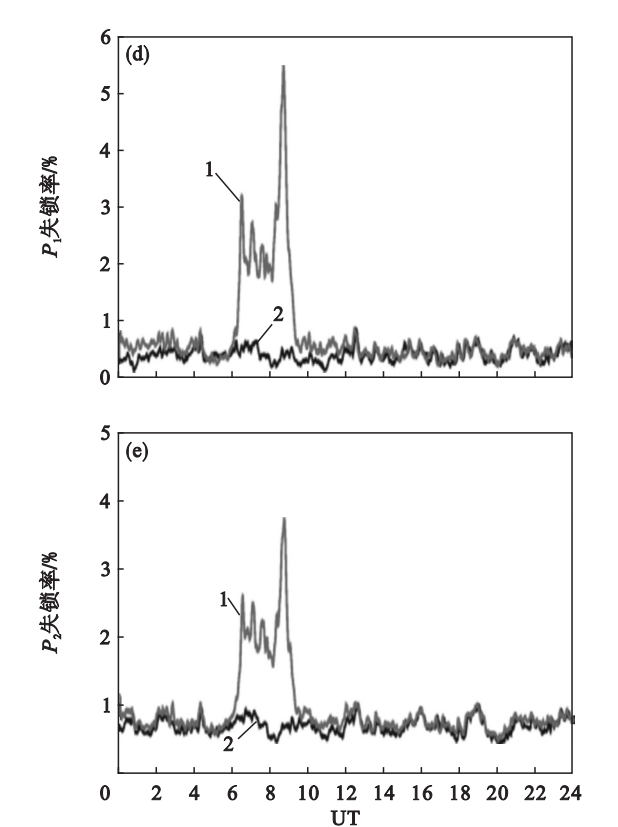
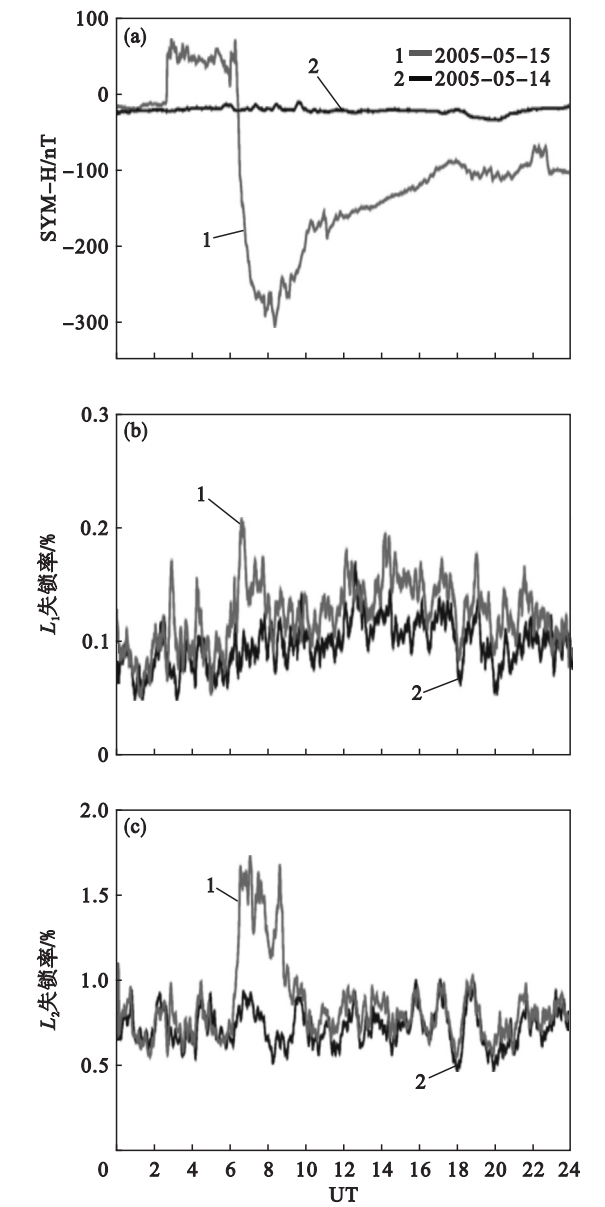


图 5 SYM-H 指数、 $L_1$  失锁率、 $L_2$  失锁率、 $P_1$  失锁率和  $P_2$  失锁率时间序列  
Fig. 5 Time series of SYM-H index and LOL rates of  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $P_1$  and  $P_2$

总体来说, $L_1$ 、 $L_2$  信号和  $P_1$ 、 $P_2$  码的失锁率与磁暴指数 SYM-H 具有高相关性, $L_1$ 、 $L_2$  信号和  $P_1$ 、 $P_2$  码失锁率主要发生在主相阶段和恢复相的前期. 与 2003 年的磁暴类似, $L_2$  信号的失锁率比  $L_1$  信号的失锁率更大,进一步表明  $L_2$  信号更容易受到磁暴的影响.

## 4 结 论

- 1) 在 GNSS 信号失锁率的计算中需要考虑卫星高度角的影响,卫星高度角阈值建议选择  $10^{\circ}$ .
- 2) 巨烈磁暴导致 GNSS 信号失锁率显著增加,信号失锁主要发生在磁暴的主相阶段和恢复相的前期.
- 3) 巨烈磁暴期间,GNSS  $L_2$  信号失锁率高于  $L_1$  信号失锁率,表明  $L_2$  频率比  $L_1$  频率更容易受到磁暴的影响,可能是因为  $L_2$  频率较小,更易受到电离层的影响.
- 4) 巨烈磁暴期间,GNSS 信号失锁率与磁暴指数 SYM-H 具有强相关性,表明全球 GNSS 信号失锁率的异常增加由巨烈磁暴所驱动.

## 参考文献:

- [1] 沈晓飞,倪彬彬,顾旭东,等.第 23 太阳活动周期太阳风参数及地磁指数的统计分析[J].地球物理学报,2015,58(2):362–370.  
(Shen Xiao-fei, Ni Bin-bin, Gu Xu-dong, et al. A statistical of solar wind parameters and geomagnetic indices for the solar cycle 23 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58 (2):362–370.)
- [2] Hapgood M. Satellite navigation—amazing technology but insidious risk: why everyone needs to understand space weather[J]. *Space Weather—the International Journal of Research & Applications*, 2017, 15(4):545–548.
- [3] Kintner P M, Ledvina B M, de Paula E R. GPS and ionospheric scintillations [J]. *Space Weather—the International Journal of Research & Applications*, 2007, 5(9):S09003.
- [4] Xiong C, Stolle C, Lühr H. The swarm satellite loss of GPS signal and its relation to ionospheric plasma irregularities[J]. *Space Weather*, 2016, 14(8):563–577.
- [5] Rao P V S R, Krishna S G, Prasad J V, et al. Geomagnetic storm effects on GPS based navigation [J]. *Annales Geophysicae*, 2009, 27(5):2101–2110.
- [6] 孙文杰,宁百齐,赵必强,等.2015 年 3 月磁暴期间中国中低纬地区电离层变化分析[J].地球物理学报,2017,60(1):1–10.  
(Sun Wen-jie, Ning Bai-qi, Zhao Bi-qiang, et al. Analysis of ionospheric features in middle and low latitude region of China during the geomagnetic storm in March 2015 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(1):1–10.)
- [7] Ledvina B M, Makela J J, Kintner P M. First observations of intense GPS L1 amplitude scintillations at midlatitude[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(14):1659.
- [8] Afraimovich E L, Astafyeva E I, Demyanov V V, et al. Mid-latitude amplitude scintillation of GPS signals and GPS performance slips[J]. *Advances in Space Research*, 2009, 43(6):964–972.
- [9] Ma G, Maruyama T. A super bubble detected by dense GPS network at east Asian longitudes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(21):241–255.
- [10] Demyanov V V, Yasyukevich Y V, Ishin A B, et al. Effects of ionosphere super-bubble on GPS performance depending on the bubble orientation relative to geomagnetic field[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(2):181–189.
- [11] Li G, Ning B, Hu L, et al. Longitudinal development of low-latitude ionospheric irregularities during the geomagnetic storms of July 2004[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 115(A04):A04304.
- [12] Bergeot N, Bruyninx C, Defraigne P, et al. Impact of the Halloween 2003 ionospheric storm on kinematic GPS positioning in Europe [J]. *GPS Solutions*, 2011, 15(2):171–180.
- [13] Skone S, Jong M D. The impact of geomagnetic substorms on GPS receiver performance[J]. *Earth Planets & Space*, 2000, 52(11):1067–1071.
- [14] Skone S, Knudsen K, Ong M D. Limitations in GPS receiver tracking performance under ionospheric scintillation conditions[J]. *Physics & Chemistry of the Earth Part A: Solid Earth & Geodesy*, 2001, 26(6/7/8):613–621.
- [15] Su B, Basu S, Makela J J, et al. Large magnetic storm-induced night time ionospheric flows at midlatitudes and their impacts on GPS-based navigation systems [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, 113(A3):A00A06.
- [16] Astafyeva E, Yasyukevich Y, Maksikov A, et al. Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems [J]. *Space Weather—the International Journal of Research & Applications*, 2016, 12(7):508–525.
- [17] 徐文耀. 地球电磁现象物理学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2009:1–553.  
(Xu Wen-yao. Physics of electromagnetic phenomena of the earth [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2009:1–553.)