



太阳风暴对卫星导航系统的影响分析

陈刘成*, 胡彩波, 谢廷峰, 刘伟

北京环球信息应用开发中心, 北京 100094

*E-mail: jobender@163.net

收稿日期: 2011-03-22; 接受日期: 2011-04-13

摘要 太阳风暴是一种常见的空间灾害天气现象, 对人类的航天活动有着巨大的影响. 面对可能发生的 2012 超强太阳风暴, 基于卫星导航系统发展现状、关键设备工作机理、系统技术体制, 本文对空间段、地面段和用户段可能遭受的影响作了全面分析. 太阳风暴发生期间, 卫星导航系统空间段设施、系统运行控制、系统服务性能可能遭受灾难性影响, 必须提前制定相应的措施进行防护.

关键词 卫星导航系统, 太阳风暴, 空间段, 地面段, 用户段

PACS: 97.75.Rs

1 引言

太阳风暴是由于太阳剧烈活动而引发的一种常见的空间灾害天气, 能够对人类的生产活动产生较大影响, 特别是对航天、通信、电力、卫星导航等领域的影响最为严重. 太阳风暴能量或物质传递方式包括三种: 电磁辐射传递、高能粒子流传递、低能等离子体传递. 剧烈的太阳活动一般持续数分钟, 对地球空间的影响则从数小时到数天不等. 太阳风暴发生期间, 太阳释放出大量带电粒子所形成的高速粒子流以及等离子体流, 对地球磁层、电离层以及中性大气的状态造成影响, 在地球空间导致灾害性响应.

近两个太阳活动周期内发生的强太阳风暴对卫星以及地面输电系统造成的影响应值得关注. 1989 年 3 月太阳风暴(强磁暴)爆发, 曾导致美国共计 46 颗卫星发生异常, 并造成加拿大魁北克省电力系统大面

积损坏, 断电达 9 个小时. 1990 年 11 月初太阳风暴(耀斑)爆发, 曾导致我国“风云一号”气象卫星计算机程序混乱, 卫星姿态失控^[1,2]; 1994 年太阳风暴(日冕物质抛射)爆发, 导致加拿大通信卫星 Anik E1 和 Anik E2 等多颗卫星在轨异常并最终报废^[2]; 2001 年 4 月发生的太阳风暴使我国的短波通信和侦测等用户系统故障, 中断约 3 小时; 2003 年 10 月太阳风暴引起强烈的极光, 曾导致日本高级地球观测卫星 Midori-2 等多颗卫星失灵^[2]. 2006 年 12 月 13 日发生 X3 级的太阳风暴, 造成我国广东、海南、重庆等地无线电波观测中断 3 个多小时.

卫星导航定位系统是 20 世纪 60 年代中期发展起来的一种新型导航系统. 发展至今, 它的用户以每年 50% 以上的速度递增, 逐步形成一个继互联网和移动通信之后的又一个较大的信息产业.

卫星导航定位系统的基本作用是向各类用户和运动平台实时提供准确、连续的位置、速度和时间信

引用格式: 陈刘成, 胡彩波, 谢廷峰, 等. 太阳风暴对卫星导航系统的影响分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 556–563

Chen L C, Hu C B, Xie T F, et al. Effect of satellite navigation system on the solar storm (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2011, 41: 556–563, doi: 10.1360/132011-376

息. 目前世界上发展较好的卫星导航系统有美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧洲的 Galileo 和中国的 COMPASS. 卫星导航系统为整个人类的生活、生产提供了很大的便利, 一旦其受到影响, 将会带来不可估计的损失.

鉴于目前人类对空间天气的监测能力不足, 对日地空间天气系统变化的认识还是处于初级阶段, 国际社会还不能对可能发生的超强太阳风暴爆发时间和强度进行精确预报^[2]. 为了降低超强太阳风暴对我国卫星导航系统可能造成的危害或影响, 本文研究了太阳风暴对卫星导航系统的影响机理, 根据其爆发强度分别预测其对系统、用户可能造成的影响, 为我国卫星导航系统采取应对安全防护措施提供技术支撑.

2 太阳风暴对 GPS 系统的影响

GPS 卫星导航系统自 1995 年建成运行后, 迄今已经历过 2 个太阳活动周期, 即第 23 和现在经历的第 24 太阳活动周期. 太阳风暴爆发是否会对空间导航卫星及其地面设施造成影响, 美国并未对外正式公布. 但相关资料显示, 在第 23 太阳活动周期内爆发的太阳风暴曾给 GPS 系统的应用产生一定的影响, 导致欧美部分地区的 GPS 接收机导航定位精度都有不同程度的下降, 甚至丧失了导航功能. 例如, 2003 年 3 月 26 日太阳风暴爆发期间, 美国马萨诸塞州以及北部地区的许多 GPS 接收机无法跟踪在轨卫星信号; 同年 11 月 20 日太阳风暴(电离层风暴)期间, 美国北部地区用户即使能接收到导航信号, 但导航定位精度误差增大了约 25 m^[3]; 2006 年 12 月 6 日太阳风暴期间, 地球向日面内的很多单频 GPS 接收机功能丧失, 时间持续数分钟. 采用载波相位跟踪技术的高精度接收机同样变得脆弱^[4].

2012~2013 年是太阳活动的又一个高峰年, 空间物理学家认为极有可能发生超强太阳风暴^[5], 届时地球空间环境可能面临以下威胁: (1) 速度大约 2000 km s⁻¹ 的太阳风暴吹袭地球, 地球空间环境发生急剧的灾变. 高轨卫星将可能完全暴露在行星际空间, 受高能粒子辐射流量的损伤概率大大增加; (2) 地球外辐射带内边界从 3R~4R(R 为地球半径)移动到 2R 处, 原来内、外辐射带之间的相对安全的槽区将消失, 辐射带内电子、质子的流量大大增加, 中低轨道卫星受

粒子辐射损伤的概率将大大增高; (3) 位于磁层尾部的等离子体片的内边界将从 5R~10R 收缩到离地面 1200 km 处, 电离层结构大乱. 高频无线电通信将大面积中断达数天; 卫星导航系统会较长时间遭受严重干扰或失效. (4) 我国北方地区的高压电网中的地磁感应电流将会增大到 10^{2I}~10^{3I}, 给电网供电带来麻烦.

基于对历史太阳活动及其危害的认识, 我国卫星导航系统在设计和建设阶段已经对太阳风暴可能引起的灾变影响采取了一定的防护措施. 但是由于对太阳活动规律及其影响认识的不足, 在面临超强太阳风暴时, 系统仍有可能遭受多种损伤, 所提供的业务极有可能受到不同程度的影响.

卫星导航系统一般都是由空间段、地面段、用户段组成, 不同的卫星导航系统空间段的卫星种类不同, 地面段设站数量和范围也根据不同的卫星覆盖区而异. 下面针对系统的不同组成进行影响分析.

3 太阳风暴对卫星导航系统空间段的影响分析

太阳风暴能够对在轨运行的卫星造成多种损伤, 其中对导航卫星影响最大的是太阳风暴引起的卫星电子元器件辐射损伤. 太阳风暴对卫星电磁兼容环境的破坏、通过影响地磁场干扰卫星正常工作造成的影响也比较大. 另外, 太阳风暴还可能对星地链路正常工作造成影响.

3.1 辐射损伤电子元器件

电子元器件辐射损伤效应包括总电离损害和单粒子效应. 总电离损害是装置暴露在电离辐射环境中长期衰变的累计; 单粒子效应是单个电离粒子在装置中引起的个别事件. 单粒子效应可分为两种: 软错误和硬错误. 软错误对装置是非破坏性的, 可以导致存储单元状态的翻转, 状态的锁定或者是发生在输入、输出、逻辑电路及其他电路的瞬间现象, 也包括引起装置中断正常操作的状态. 硬错误是卫星装置的物理损坏, 而且是永久性的, 不可恢复的.

太阳电磁辐射对集成电路的影响是使输入电流增大, 使输出电平提高和输出电平降低, 引起噪声容限下跌. 目前卫星系统的设备组成中, 大部分由 FPGA 和 DSP 元器件组成, 承担着到上行测距、星上

信息处理、导航电文生成、工况信息检测等非常重要的功能,一旦出现问题,将对上述的各功能产生影响.随着元器件集成水平提高,芯片的容量也逐渐增大,动辄百万门,单独元器件承担的处理能力更大,但同时其受损害的风险随之增加,一旦一个元器件出现故障,对系统产生影响的几率也随之加大.从目前导航系统产生信号中断的原因分析,90%以上的故障都和太阳辐射对集成电路影响所致.

原子钟是系统运行的核心,尤其对于导航系统来说,所有业务运行的基准都是基于星载原子钟运行的稳定,其各种时频信号的产生与保持也是依赖于电路各组成元器件的稳定运行.当强太阳辐射来临时,影响到原子钟的基准信号,产生的信号抖动直接影响信号捕获以及发播信号的时序,进而影响测距等功能的实现.

电子元器件遭受辐射效应包括电离总剂量效应、单粒子锁定、单粒子翻转、单粒子瞬态效应、单粒子功能中断等.在卫星系统设计时应采用系统级抗辐射加固、元器件级抗辐射加固、软件编码纠错加固等技术提高卫星系统在轨运行可靠性.

3.2 地磁场扰动影响航天器正常工作

地磁场是航天器运行的重要物理环境,可以减缓太阳高能粒子对航天器的冲击.航天器可以利用地磁场进行姿态定位,有些卫星利用地磁辅助定向,或用地磁力矩卸载动量,减慢反作用轮转动速度.在地磁暴发生期间,地磁场剧烈地不可预测的变化可能使卫星指向、姿态控制发生错误.

航天器本身和星载仪器的大部分是铁磁性物质,它具有固有磁矩.星载仪器的工作电流回路也相当于一个等效磁矩.在地磁场作用下,卫星的自转轴的方向和姿态参数会发生变化.地磁场作为一种摄动力来源,也会引起卫星轨道偏离.当航天器在地磁场中旋转时,会产生感应电流,从而消耗航天器的动能,形成一种阻力.地磁场对航天器产生的磁力矩与转动惯量、自旋角以及磁场强度成正比.这个力矩可以分解为一个自旋衰减力矩和一个旋进力矩,这两个分量使卫星自旋衰减,自旋轴方向发生变化.

GEO 卫星还会遭遇到磁层顶穿越事件.地球磁层向太阳一侧边界称之为磁层顶,通常距离地心约 600000 多千米远.太阳风的压力变化(由太阳风的速度、密度和磁场变化而引起)会改变这个边界的位置.

在高速、高密度和强南向磁场的太阳风的作用下,这个边界可能被压到距离地心小于约 42000 千米处.此时, GEO 卫星在短时间内会完全直接暴露在恶劣的太阳风环境中,故障几率大幅提高.在太阳活动最活跃的期间,如果太阳风暴直接冲向地球,可导致地球磁层的剧烈收缩,中轨道导航卫星、甚至近地轨道卫星也可能直接暴露在高能粒子的冲击之下,引发大面积的卫星故障.

目前,卫星导航地面系统应密切关注空间天气研究与预报相关机构对太阳风暴的预测,避免在太阳风暴期间进行卫星动量卸载或者轨道机动.

3.3 破坏卫星电磁兼容性

卫星是一个有复杂电气和电子结构的混合体,各分系统在对外辐射无线电信号的同时,其本身又受到其他分系统辐射的干扰,同时具有干扰和被干扰的两重性.电磁兼容设计的目的是把这两重性调整到最佳状态.卫星即使在地面大气环境或者其他特定环境下达到了电磁兼容设计的目标,但是由于星体结构的紧凑性,太阳风暴仍可能打破这种最佳状态,继而改变卫星各星载单机的工作状态、天线的输入阻抗、方向图、增益等,影响卫星在轨工作性能.

3.4 影响星地链路工作性能

影响卫星导航系统星地链路信号传输质量的因素很多,如通信信号间的干扰,大气层微粒的散射、吸收,电离层闪烁,日凌,太阳噪声等.太阳风暴会强烈干扰地球附近的电离层,对穿越对流层、电离层的卫星信号造成干扰,使得卫星信号功率下降,信噪比降低,测距精度下降,通信信号误码率增加,甚至造成信号中断.对于卫星导航信号而言,电离层的影响主要表现为折射、散射、闪烁及法拉第旋转效应.

如果电离层相对均匀,折射对于通信信号影响不大.电离层散射效应正常情况下不会产生明显影响,但在剧烈太阳风暴中,紫外线和 X 射线倍增,使电离层离子化程度加剧,不均匀化增强,会增加信号延迟.

电离层闪烁与工作频率、地理位置和太阳活动情况有关.电离层闪烁对 VHF 频段信号影响最重,导航用的 L 波段次之,只有最强的闪烁才会对 C 波段及其以上频段造成影响.在地磁低纬度区,电离层闪烁

现象通常持续 30 min 到数小时, 发生时间通常在晚 20:00 点左右至第二天凌晨 6 点左右. 电离层闪烁在冬季很少造成信号衰落现象(小于 4% 时间), 但在春夏季(4~8 月)能够相对频繁地(大于 10% 时间)引起的信号衰落 10~20 dB, 甚至 30 dB.

导航信号穿过电离层时, 信号极化同时会受到偏转, 即发生法拉第极化旋转效应. 对接收系统而言, 这不仅减小了正极化接收信号的强度, 同时还增大了反极化干扰. 对于一个极化隔离在 35 dB 以上的接收系统, 如果法拉第效应将下行信号极化旋转 5°, 则极化隔离度会降到约 20 dB. 法拉第极化旋转量正比于磁场强度和电离层总离子数, 反比于信号频率的平方根.

卫星导航系统采用较高的工作频率, 正常情况下接收的卫星信号是左旋圆极化, 上行信号是右旋圆极化, 卫星信号功率在设计上一般至少有 10 dB 的裕量, 因此太阳风暴对星地链路的影响较小.

太阳风暴期间, 在确保天线安全的前提下, 地面运控系统应人工调整发射天线增大出站功率, 增大接收天线增益; 采用程序跟踪或者手动跟踪方式精确对准卫星.

4 太阳风暴对卫星导航系统地面段的影响分析

太阳风暴会导致电离层突然扰动、电离层暴、极盖吸收以及电离层闪烁等事件, 其对电波传播的影响直接制约卫星导航系统地面设备与卫星之间的通信效果; 同时也对地面设备直接产生影响. 主要的影响方式有如下两种:

(1) 太阳风暴导致的电离层的快速变化会引起导航系统工作频率信号的快速随机起伏. 卫星导航系统可用工作频率为 4~6 GHz 的 C 波段频率信号、1~2 GHz 的 L 波段频率信号及 1~4 GHz 的 S 波段遥测遥控信号在传播过程中均需穿过电离层, 因此在太阳风暴期间会出现上述频率信号幅度起伏变化较大的现象.

(2) 太阳风暴中含有大量的 X 射线, 导致太阳噪声数百倍增加, 大大增加了天线噪声, 严重影响天线的发射、接收信号的能力.

根据美国空间天气预报中心(SWPC)定义的 5 级无线电衰减指数 R(电离层扰动强度分级), 其对卫星

导航定位信号的影响分别如表 1 所示^[6].

表 1 无线电衰减指数对卫星导航信号的影响
Table 1 The radio attenuation index means to satellite navigation signals

R 指数	分级标准 (X 射线流量)	对卫星导航信号影响
R ₅ 极端	X20, 2×10^{-3} W/m ²	向日面的信号中断多个小时
R ₄ 严重	X10, 1×10^{-3} W/m ²	向日面的信号中断 1~2 小时
R ₃ 强烈	X1, 2×10^{-4} W/m ²	影响严重地区信号中断约 1 小时
R ₂ 中等	M5, 5×10^{-5} W/m ²	部分信号中断几十分钟
R ₁ 小	M4, 1×10^{-5} N/m ²	信号衰减或短时中断

基于不同工作方式或者不同工作环境的地面设备受太阳风暴的影响程度不一, 下面分析地面段不同工作设备可能遭受的影响.

4.1 对抛物面天线、阵列天线的影响

天线接收下行导航信号时需要考虑天线噪声温度的影响, 而天线噪声温度与工作频段、天线性能及其仰角、气候环境等因素密切相关. 太阳静寂期间太阳噪声对导航系统噪声贡献很小, 可以忽略不计; 而太阳风暴期间, 根据太阳风暴的程度, 对系统则会造成不同程度的影响. 随着天线噪声的增加, 会导致接收系统的载噪比降低, 从而导致接收信号误码率增加; 严重的情况下会导致天线无法解调有效信号, 造成入站信号中断, 影响系统正常工作. 当太阳风暴达到 R₃ 以上级别时, 可能会对天线造成短时间压制式干扰, 使天线无法及时完成上行注入及接收任务.

根据太阳风暴等级及其对系统的影响的程度, 在 R₂ 等级以下太阳风暴的情况下, 地面站适当增加功放发射功率, 以保证系统正常接收信号; 在 R₃ 以上级的太阳风暴情况下, 关闭系统至太阳风暴后恢复.

4.2 对信道设备的影响

卫星导航系统地面站信道设备包括高功放、场放、上下变频器等复杂的电子和电气设备. 考虑到系统在收发信号的同时, 要保证较低的误码率, 因此系统在设计上具备较完善的电磁兼容性. 但强烈的太阳风暴可能会瞬间破坏原有的电磁兼容设计, 导致信道设备的杂散抑制、三阶交调、相位噪声等指标变差, 从而影响系统整体性能. 发生 R₄ 以上级太阳风暴时, 可能引起信道设备信号失锁.

建议卫星导航地面系统在发生 R_5 级的太阳风暴时, 关闭所有信道设备; 发射 R_4 级的太阳风暴时, 关闭信道设备的在线备件; 发生 R_3 级以下的太阳风暴时, 提高在线设备的巡检频率。

4.3 对激光测距设备的影响

激光测距设备主要由卫星激光测距望远镜、光学系统、机械系统和计算机自控系统等精密设备组成。在太阳风暴期间受高能粒子的干扰, 可能造成观测数据质量下降甚至错误的情况。因此在太阳风暴期间, 建议地面系统关闭激光观测设备。

4.4 对原子钟设备的影响

氢钟、铯钟、铯喷泉频率基准均需要在稳定的磁场环境下才能正常工作, 对磁场强度变化的要求一般为小于 0.1 Gs ($1 \text{ Gs}=10^{-4} \text{ T}$), 相当于 1000 nT 。显然, 本次周期的地磁暴强度很有可能会超出原子钟工作的磁场环境要求, 原子钟的频标稳定性会受到影响。

地磁场强度变化对原子钟频标稳定性影响的大小由以下参数决定: 原子钟的频率由于磁场变化引起的相对频移正比于 H_c/ν_0^2 , H_c 为磁场强度, ν_0 为原子钟跃迁频率。相对而言, 铯频标对磁场变化最不灵敏, 铷频标次之, 而氢原子频标对磁场变化的敏感性最大。

地磁场的变化对原子钟的实际影响与其设计工艺有关, 可通过实验的方法加以测定。从经验数据来看, 地球磁场 1 Gs 的变化, 对应的铷(Rb)频标的影响系数约相当于 10^{-13} , 对应的氢(H)频标的影响系数约相当于 10^{-14} , 对应的铯(Cs)频标的影响系数约相当于 10^{-15} 。因此, 假设存在 0.2 Gs (2000 nT) 的地磁变化, 对 Cs 和 Rb 原子钟影响基本可以忽略, 对 H 频标的影响在 10^{-15} 量级, 而守时系统中高性能氢钟的稳定度一般在 $10^{-15} \sim 10^{-16}$ 量级, 铯喷泉频率基准装置准确度在 $10^{-15} \sim 10^{-16}$ 量级, 应当考虑地磁暴对氢钟和铯钟基准稳定性的影响。

地球磁场的变化会产生电场, 强太阳风暴期间在每公里空间距离上可能产生 20 V 的感应电压差, 会影响时频信号输出电缆产生感应电压。目前, 1PPS 信号的电压一般为 $3 \sim 5 \text{ V}$, 因此地磁暴可能会对 1PPS 信号波形会产生干扰, 使计数器测量错误, 导致时间比对数据不正确。

地面系统可以采取的措施包括: 通过模拟磁场

实验, 准确测定 Cs, Rb, H 等不同类型原子频标的磁敏感系数和频率变化曲线; 对于受影响较大的原子频标, 如氢钟、铯基准等, 增加地磁防护罩, 削弱地磁暴的影响。

4.5 对监测接收机的影响

导航卫星下行信号在 L 波段频率, 太阳风暴引起的电离层闪烁对星地传输信号功率的影响能够达到 20 dB 以上, 会大大减弱到达监测接收机天线面的信号电平。由于信号电平的瞬间减弱会导致监测接收机频繁失锁甚至信号中断, 造成接收机无法对卫星信号的伪距、载波相位、多普勒观测量的进行有效测量, 无法提供连续、有效的实测数据。另外载波码环失锁还会导致监测接收机的测距精度下降, 对中心站定轨及广域差分、完好性处理性能也会产生影响。

在太阳风暴期间, 地面运控系统应实时掌握、了解到接收机天线口面的卫星下行信号电平, 以确定信号电平是否超限, 并将实际信号电平上报主控站以便决策。

4.6 对主控站业务处理的影响

太阳风暴对主控站业务处理的影响主要体现在电离层建模、时间同步、精密定轨三个方面:

(1) 太阳风暴会导致电离层电子密度增大, 导致信号幅度闪烁、误码率增加、数据失锁或中断, 最终电离层模型精度降低或无法建模。在 2003 年太阳风暴期间, EGNOS 测试床就观测到 GPS L1 信号延迟突然增大 3 m 左右^[6]。

(2) 因太阳风暴导致的信号误码率增大、数据失锁或中断、观测数据质量下降, 这将会使得星地时间同步解算精度降低或者暂时中断。

(3) 若因太阳风暴导致卫星信号失锁或观测数据中断, 精密定轨采用历史数据预报轨道, 其处理结果精度会降低; 在太阳风暴期即使实现正常观测, 短时间内太阳辐射压可能会上升到主要摄动力 J_2 的水平, 卫星定轨光压模型误差增大会使定轨处理结果精度降低。

4.7 对供电网络、通讯网络的影响

电源系统分为强电和弱电, 为系统供电使得系统正常运转的一般为强电(220 V), 系统设备内部,

各个电路板使用的一般为弱电(5 V). 当强太阳风暴来临时, 强电和弱电都会受到不同程度的干扰, 依据美国科学院的报告, 严重的太空天气将在美国境内诱导产生地面电流, 从而在 90 s 内毁坏美国 300 个关键的变压器, 切断至少 1.3 亿居民的电力系统. 现代电力网络通常都是以更高的电压覆盖更广阔的区域, 这样可以让电力网络运营更加高效, 可以尽量减少电力传输过程中的损失以及由于生产过剩所引起的电力浪费. 但是, 同时它也因此变得更容易受到太空气候的攻击. 输电网会变得非常脆弱不稳定, 甚至有可能导致完全关闭. 整个地面站设备会因为停电而停止工作, 影响上行注入电文参数的正确性, 间接影响系统服务. 2003 年 10 月下旬就曾发生过, 全世界的无线电通信被迫中断、美国航空航天局的半数卫星出现故障、瑞典境内 5 万人停止了电力供应.

太阳风暴会由于电磁感应现象造成感应电流, 感应电流会干扰通讯信号, 对地面通讯网络造成干扰或者甚至引起中断, 可能会影响外站数据的传输.

为应对上述情况, 应建立 UPS 供电、柴油发电、多路市电并行供电等多级电源备份机制. 建立电压参数的实时监测系统, 尽可能保证各级备份供电设施的完好性; 在紧急情况可关闭所有的生活、办公、照明用电, 全力保障系统在线设备正常工作. 提高地面数据网络的整体屏蔽级别, 设置备份数据通道、备份网络设备. 对示波仪、交换机等重要设备作为重点进行定期巡检.

5 太阳风暴对卫星导航系统用户段的影响分析

5.1 卫星信号减弱造成的影响

导航卫星发射信号的可用功率为几十瓦, 传递到地球表面的卫星信号很弱, 大约只有 10^{-10} W. 太阳风暴产生的主要影响是电离层的快速随机变化引起的信号快速随机起伏, 使信道的信噪比下降, 降低了用户机的信号可接收功率, 引起误码率上升, 严重时会导致信号失锁.

用户机的处理性能取决于载噪比 C/N_0 及采用的平均处理时间. 通常情况下, RNSS 用户机的捕获门限是 41 dB Hz. 考虑卫星功率增强的因素, 一般会有 10 dB 左右的裕量. 强太阳风暴会使信号减弱 20~40

dB, 极易造成用户机无法寻找到信号的相关峰, 导致导航信号短时间不能被跟踪锁定. 信号误码率增加, 可能导致导航电文数据错误, 使定位、授时计算出现错误.

由于 P 码信号受太阳风暴的影响小, 可改变用户机的信号捕捉模式, 把传统的 C 码定位方式变成相对复杂的 P 码定位方式; 同时修改用户机的捕获跟踪方式, 启用更多的通道并行捕捉卫星信号, 并延长器件的积分处理时间.

5.2 卫星信号畸变造成的影响

在太阳风暴活动剧烈期间, 电离层的 TEC 发生剧变. 导航信号在穿透电离层时所受的折射和衍射次数增多, 卫星信号传输到用户端时会有不同程度的衰减和延迟, 经用户机信道叠加后, 其结果是有时同相叠加而增强, 有时反相叠加而减弱, 使得接收信号的电平、频率、相位都发生变化, 带来电平衰落、相移、码元周期的拓展、频带相干等影响, 导致用户机在时间检测的估计中相关信号发生偏差或污损, 影响伪码测量精度, 从而带来定位精度的降低.

在太阳风暴期间, 用户可以变动用户机天线位置, 尽量放在视野开阔, 没有遮挡的场所, 以提高信号的接收质量. 改变信号通道模块中的码跟踪工作方式, 例如可以将宽相关方式改变成窄相关方式.

5.3 强电磁辐射的影响

太阳风暴期间, 随太阳喷射而来的高能电磁波和高能带电粒子, 对接收机产生有害的辐射和干扰, 有可能堵塞射频通道, 造成信号失真和饱和, 影响射频通道的放大和变频效果, 当到达天线口面的干扰电平大于 20 dB m 时, 甚至有可能击穿或烧毁用户机中的有源器件.

用户段可采取的应对措施包括: 对系统内部的器件分布位置重新规划, 尽量隔开相互干扰大的器件或模块; 在关键位置可增加滤波器, 抑制镜频干扰、中频干扰和带外干扰等各类干扰信号; 对敏感的元器件和电路采用电磁屏蔽设计.

6 提高系统抗太阳风暴能力的措施

从以上分析可以看出, 太阳风暴对卫星导航系统的影响是多方面的、全方位的, 对于一般情况下的

太阳风暴, 其对空间段卫星系统的影响比较大, 卫星单机设备受影响的概率较高; 对于强太阳风暴, 尤其是如专家所预测的 2012 年太阳风暴而言, 目前所做的设备级的防护措施基本失效, 已经不再是某颗星的问题, 而应该是全导航系统共同应对的问题。

6.1 加强部门间配合, 提高信息共享

目前有多个国家、部门在观测太空环境, 根据当前技术手段, 可以准确地预报、探测空间环境的变化, 故应该加强各国、各部门之间的沟通、交流, 实现信息共享, 及早的预知、及时的发现, 将可能的危害减少到最小。

联合国正积极地在 191 个成员国安装无线电接收器。全球都在监测太阳辐射连续爆发对高层大气造成的影响。联合国的这个项目是国际太阳物理年计划的一个组成部分, 虽然计划没有专门的研究预算, 但是国际太阳物理年的组织者还是开始征集提案, 旨在方便科学家们使用研究太阳的仪器设备并获得相关的研究数据。

美国全国大气研究中心的科学家根据太阳表面下发生的现象及以往获得的太阳黑子周期数据, 研发了新的太阳动力学模型。借助于新模型, 天文学家可以提供有关太阳黑子活动的早期预报。他们希望早期预报可以帮助电力公司、卫星操控者和其他方面提前几天甚至几年做好应对太阳黑子活动的准备。据了解, 这种新模型的准确率可以达到 98%。

6.2 提高防护措施, 加强防范能力

针对目前卫星导航系统构成以及各单机设备抵抗太阳风暴的能力分析, 应该对重要的单机设备, 如星载的 FPGA 芯片、星载 DSP 芯片、星载原子钟等, 做出防范措施, 尽可能地选用高等级的元器件, 并加强防护措施, 如在软件设计方面, 提高软件运行状态巡检和复位能力, 一旦出现异常, 尽可能在不影响系统运行的情况下, 进行软件恢复; 在单机设计方面, 在核心元器件的周围, 不影响正常工作情况下, 添加防护层设计, 减缓太阳风暴对重要元器件的冲击。GPS 卫星自 BlockIIA 开始, 其电子部分是防辐射加固的。

6.3 研究规避措施, 减小单星故障影响

对于地面系统, 应该加强完好性监测系统, 实时监视卫星运行状态, 一旦发现卫星出现故障, 及时的将相应的卫星设置为不可用, 该星的数据不参加系统运算, 同时用户也不使用该星参加业务处理, 减少对用户带来的影响; 对于地面设备而言, 系统在运算过程中, 也应该及时地判断地面站设备是否正常运行, 及时地发现异常, 将该站从系统业务运算中剔除。尤其是当预知有大规模太阳风暴来临时, 用户应减少或避免使用卫星导航进行生命、安全相关的业务工作。对于卫星系统, 加强星载设备的防辐射能力, 提高备份设备运行和切换的可靠性, 一旦出现问题, 可以及时地进行切换。

6.4 开展新技术要求, 实现卫星自主导航

强太阳风暴来临时, 如果卫星出现故障, 需要注入指令以使得该星置为不可用, 但是如果上行注入链路也受到影响, 这种情况下, 卫星与地面之间的联系是中断的。需要加强卫星自主状态检测的能力, 发现问题能够及时的自恢复, 并第一时间把状态设为不可用, 在星地联系恢复后, 由地面控制中心判断卫星的状态是否恢复可用。另外如果单是星地链路通信受到影响注入不成功, 卫星应具备自主运行的能力, 确保卫星播发的导航电文的有效性。

7 结论

鉴于超强太阳风暴可能造成的巨大危害, 目前有超过 20 颗人造卫星和 12 个国家在密切监测日地空间天气的变化。美国国家海洋和大气局(NOAA)专门为 GPS 系统提供多种大气及空间监测资料, 以防止或减少太阳风暴对 GPS 可能造成的危害^[3]。

太阳风暴对卫星导航系统的影响是客观存在的, 且不可避免。我们须未雨绸缪, 高度重视, 建立完善的组织管理系统, 制定相关预案, 采取必要措施, 落实抗灾物资储备, 保证系统安全, 平稳度过可能发生的超强太阳风暴。

致谢 非常感谢北京环球信息应用开发中心蔡志武、吴晓莉、冯伟和官磊等同事对完成本文给予的多方面的技术支持。

参考文献

- 1 Lin Y Z. The solar storm and the influence (in Chinese). Chin Sci Technol Terms J, 2001, 3(2): 38–39 [林元章. 太阳风暴及其影响. 科技术语研究, 2001, 3(2): 38–39]
- 2 刘俊. 关注太阳风暴. 北京: 军事科学出版社, 2009. 6–7, 82–92
- 3 Joseph K. Making the least out of solar max. Inside GNSS, 2007, 11: 30–34
- 4 Paul K, Todd H, Joanna H. How to survive the next solar maximum. Inside GNSS, 2009, 8: 22–25
- 5 Sun Y. The strong solar storm will attack the Earth at 2012. Mod Sci, 2009, 7: 44–45 [刘妍. 2012 年强太阳风暴将袭击地球. 今日科苑, 2009, 7: 44–45]
- 6 Hernández-Pajares M, Zornoza J M J, Subirana J S, et al. EGNOS test bed ionospheric corrections under the October and November 2003 storms. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2005, 43(10): 2283–2287

Effect of satellite navigation system on the solar storm

CHEN LiuCheng^{*}, HU CaiBo, XIE TingFeng & LIU Wei

Beijing Global Center of Information Application and Development, Beijing 100094, China

Solar storms are the common space weather disasters which have great impact on human space activities. The conceivable destroying on space segment, ground segment and user segment of satellite navigation system by the coming super max solar storm may happen in 2012 are analyzed all-around respectively. According with the current engineering construction or system technology design of satellite navigation system, the mechanisms how all the representative equipments affected by the solar storm are brought forth to support some measurements, which are taken to prevent the disasters on the space segment, the operation running system or the navigation service as well.

satellite navigation system, solar storm, space segment, ground segment, user segment

PACS: 97.75.Rs

doi: 10.1360/132011-376