

太阳耀斑对无线电导航通信的影响

牛有田^{a,b,c,d}, 张安琪^a, 赵歌歌^a, 丁玉玲^a, 曹渊^{a,b,c,d}, 朴金龙^{a,b,c,d}

(河南师范大学 a.电子与电气工程学院;b.河南省电磁波工程院士工作站;c.河南省光电传感集成应用重点实验室;
d.增材智能制造河南省工程实验室,河南 新乡 453007)

摘要:太阳耀斑是太阳最剧烈的活动,其喷射的 X 射线和高能粒子可对无线电导航和通信系统产生很大的影响.分析了太阳耀斑爆发后,影响无线电导航通信系统的机理和过程.耀斑可造成无线电导航定位系统的定位精度下降甚至失效、无线电通信噪声和误码率增大甚至通信中断.提出了降低太阳活动对导航和通信影响的一些应对措施.

关键词:太阳耀斑;电离层;无线电;导航;通信

中图分类号:TN961

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2025)01-0151-06

人们很早就发现,太阳上存在太阳黑子.当太阳黑子增多时,太阳往往出现闪光——太阳耀斑爆发.太阳耀斑是太阳活动最剧烈的形式^[1].耀斑爆发时,太阳会突然喷射出大量的 X 射线和其他高能粒子(“太阳风”).按照在地球附近测量的 X 射线峰值流量 F ,太阳耀斑级别由低到高一般可分为:A 级、B 级、C 级、M 级、X 级^[2-3],详见表 1.2024 年已发生多次 X 级的太阳耀斑事件.北京时间 2024-10-03 20:18,太阳爆发 X9.0 ($F=9.0 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$) 级耀斑,刷新第 25 太阳活动周(2019-12)以来的最强记录.大的太阳耀斑喷射的高能粒子沿磁力线进入地球两极附近,电离大气层中不同成分的气体分子,形成绚丽多彩的极光.然而,这美丽的背后却隐藏着杀机!

1989-03-13,加拿大魁北克省大面积长时间停电;2003-10-19 至 2003-11-07,发生了短波通信中断,欧美日的多颗卫星发生不同程度损坏,我国的“神舟五号”飞船留轨舱运行高度明显降低;2022-02-04,马斯克创建的太空探索技术公司(SpaceX)发射的低轨星链卫星因空气密度突然增大而坠毁 40 余颗^[4].这些事件均由太阳耀斑造成.太阳风主要会对地球大气电离层、地球磁场产生直接影响,从而影响电波传播和电子设备,还会对外太空的电子设备以及生物产生直接影响,但在通过大气层后对中低纬度地区地表设备、生物及环境的直接影响很小.本文着重分析太阳耀斑对无线电导航定位和通信系统的影响,解释其发生的过程和机理,并介绍减少这些影响的一些应对措施.

1 大气层分层结构及无线电导航通信中的电波传播环境

1.1 大气层分层结构

大气层是指围绕地球的气体层.它由多种气体成分混合而成,受地球引力作用被吸引并保持在地球周围.地球的大气层是维持生命和气候的重要保护屏障.根据温度变化和其他特性,地球大气在垂直方向上可以

收稿日期:2024-06-17;修回日期:2024-10-08.

基金项目:国家自然科学基金(U1704134);河南省重点科技攻关项目(162102210263;172102310238).

作者简介(通信作者):牛有田(1966—),男,河南新野人,河南师范大学教授,主要从事电磁波传播及工程应用等方面工作,E-mail:niuyt22@163.com.

引用本文:牛有田,张安琪,赵歌歌,等.太阳耀斑对无线电导航通信的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),2025,53(1):151-156.(Niu Youtian,Zhang Anqi,Zhao Gege,et al.Effects of solar flares on radio navigation and communication[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2025,53(1):151-156.DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.06.17.0002.)

大致分为 5 层(见图 1)^[5-6].从地面向上分别为:对流层、平流层、中间层、热层以及散逸层^[7].大气层中存在一个离子和自由电子浓度较高的区域,分布在中间层和热层.它们被统称为电离层(ionosphere),对无线电导航和通信有重要作用.

表 1 软 X 射线耀斑分类(文献[2])

Tab. 1 Classification of soft X-ray flares(Ref[2])

耀斑级别	A	B	C	M	X
$F/(W \cdot m^{-2})$	$F < 10^{-7}$	$10^{-7} \leq F < 10^{-6}$	$10^{-6} \leq F < 10^{-5}$	$10^{-5} \leq F < 10^{-4}$	$F \geq 10^{-4}$

电离层的大气电离方式主要为光化电离和碰撞电离.在不同的高度,大气层的气体成分不同,吸收的辐射频率不同,再加上温度、大气运动、大气电流和电场以及地磁场等因素,使整个电离层成分层结构^[8].依据电子浓度通常将电离层由下到上分为 D 层、E 层和 F 层^[9].由于太阳辐射差异,电离层电子浓度的昼夜及季节变化明显.

D 层主要受光化学反应控制,在夜间消失,其电子浓度相对较小,中性分子比例极大,电子与中性分子的频繁碰撞导致电波能量转移,所以电离层对电波的吸收效应主要发生在此区域;E 层的电离过程主要受光化学反应和发电机效应控制^[10],其电子浓度与太阳活动呈现正相关,在夜间电子浓度会降低 1~2 个数量级;F 层是电离层中电子浓度最大的层,高度在 150 km 以上,可细分为 F1 和 F2.F1 层主要受光化学反应控制,主要在夏季白天时间内出现;F2 层主要受电离、扩散和地球磁场控制,电子和原子成分的碰撞和复合概率较低,所以该层在夜间也存在.F2 在赤道附近的电子浓度比临近地磁纬度的电子浓度低而呈现“双驼峰”结构^[8].电离层对导航和通信系统有重要影响,具体表现为对信号的反射、折射、吸收和扰动.这些影响程度与电离层的高度、电子浓度和太阳活动的强度相关.

1.2 无线电导航通信中的电波传播环境

无线电波是指 0.03 Hz~3 000 GHz 的电磁波(频率大于 3 000 GHz 的电磁波则为红外线、可见光、紫外线等).无线电波被广泛用于通信、导航和雷达等领域.无线电波的频率不同,其传播特性、可利用的带宽以及应用领域也不同.根据 ITU(International Telecommunication Union)电波频率的划分^[11]和《中华人民共和国无线电频率划分规定》,将无线电波各个频段和主要应用汇总为表 2.为确保全球覆盖和不同环境下的可靠通信,导航和通信会使用多个频段.例如,UHF 电波(300~3 000 MHz)用小型天线就能和发送、接收设备进行通信,UHF 特别适合以手机为代表的各种移动通信终端,其中,700~2 500 MHz 频段的电波主要用于手机等移动通信领域,2 500 MHz 以上频率的电波主要用于雷达和无线电导航等.0.3~3 00 GHz 的电波统称微波,其波长相对较短,穿透性强,能穿透电离层、云雾、雨、植被甚至物质内部,是宇宙探测、遥感技术、卫星通信等的重要技术手段.

在大气自由空间中,无线电波传播损耗较小,主要有如下传播方式^[12].地波传播:沿着地球表面传播的过程;对流层传播:在对流层与平流层中传播;电离层传播:在电离层中的传播;地-电离层波导传播:在以低电离层下缘和地面为两壁,构成的同心球壳形波导中传播^[13].

在水中,无线电波传播频率越高,衰减越快.如果希望将电磁波信号送到深水中,就需要适当降低频率,因此,VLF 在对潜通信方面有重要作用.

电离层作为近地空间环境重要的组成部分,其各个分层都对无线电波的传播有着重要的影响.其中,

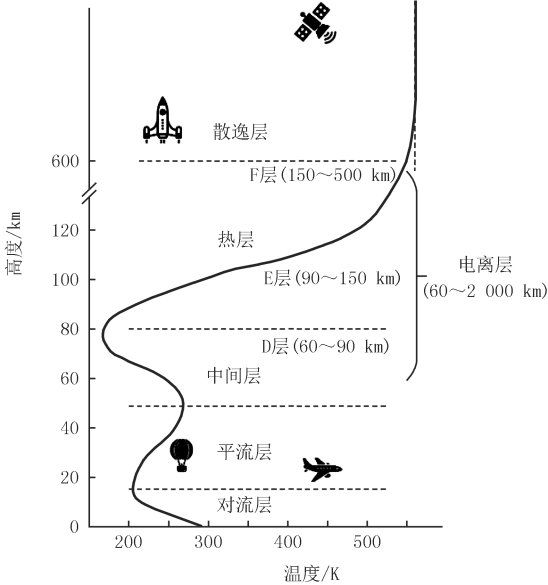


图1 大气层垂直分层情况

Fig.1 Vertical stratification of the atmosphere

D 层会吸收 LF、MF 和 HF 波的能量.在白天,D 层作为地-电离层波导的上边界,会影响在其中传播的 VLF 信号;E 层可以反射 HF,此外,由于电离层的不规则性,会对 VHF 和 SHF 产生散射^[14];地面台站之间的远距离短波通信及天波雷达成像系统主要靠 F 层对无线电波的反射来实现^[8].

空间天气对电波信号的影响通常起源于太阳,太阳活动周期会影响大气层的电离情况,进而影响无线电波的传播.太阳耀斑引发的大气层扰动主要通过增加电离层的电离程度和引发电离层风暴,对电波传播产生显著影响.主要影响包括高频通信中断、导航系统精度下降、信号闪烁和卫星通信干扰.这些影响会对全球范围内的通信和导航系统造成不利影响^[15].

表 2 无线电频谱及用途
Tab. 2 Radio spectrum and uses

带号	频段	波段	典型应用
—1	至低频(TLF)0.03~0.3 Hz	至长波或千兆米波 $10^9\sim10^{10}$ m	
0	至低频(TLF)0.3~3 Hz	至长波或百兆米波 $10^8\sim10^9$ m	
1	极低频(ELF)3~30 Hz	极长波 $10^7\sim10^8$ m	环境监测;深海潜艇通信;地球物理勘探
2	超低频(SLF)30~300 Hz	超长波 $10^6\sim10^7$ m	地球物理勘探;潜艇水下通信
3	特低频(ULF)0.3~3 kHz	特长波 $10^5\sim10^6$ m	矿井通信;地质勘探;地震电磁辐射前兆检测
4	甚低频(VLF)3~30 kHz	甚长波 $10^4\sim10^5$ m	Omega(美)、Alpha(俄)超远程及水下相差导航系统; 全球电报通信及对潜指挥通信;时间频率标准传递;地质探测
5	低频(LF)30~300 kHz	长波 $1\sim10$ km	Loran-C(美)及我国长河二号导航系统;时频标准传递;远程通信广播
6	中频(MF)0.3~3 MHz	中波 $100\sim1\ 000$ m	通信;广播;导航
7	高频(HF)3~30 MHz	短波 $10\sim100$ m	远距离通信广播;超视距天波及地波雷达
8	甚高频(VHF)30~300 MHz	超短波 $1\sim10$ m	语音广播;移动(包括卫星移动)通信
9	特高频(UHF)0.3~3 GHz	分米波 $0.1\sim1$ m	警戒雷达;广播电视;卫星导航
10	超高频(SHF)3~30 GHz	厘米波 $1\sim10$ cm	多路语音与电视信道;卫星遥感
11	极高频(EHF)30~300 GHz	毫米波 $1\sim10$ mm	雷达;短路径通信
12	至高频(THF)300~3 000 GHz	丝米波或亚毫米波 $0.1\sim1$ mm	短路径通信

2 太阳耀斑对无线电导航和通信系统的影响分析

2.1 太阳耀斑对近地环境影响概述

太阳耀斑是太阳表面上一种极为强烈的爆发现象,通常伴随着巨大的能量释放,表现为太阳色球层某些区域的突然增亮,通常与太阳黑子活动紧密相关.太阳黑子和太阳耀斑活动有约 11 a 的周期规律^[16-17](见图 2).耀斑爆发时,太阳会突然喷射出大量的 X 射线和高能粒子等,X 射线以光速约 8.3 min 到达地球;高能粒子速度相对较慢,1~3 d 后到达地球附近^[18].综合文献[7]和空间环境预报中心发布的数据,绘制太阳耀斑影响近地环境时间序列示意图如图 3 所示.耀斑爆发后,黑子区域的磁活动可能会持续几分钟到几十分钟不等.在短暂时间里,耀斑可释放相当于十万至百万次强火山爆发释放的能量.

太阳耀斑爆发出的大量 X 射线、高能粒子流、可见光和紫外线等会对地球磁层和大气产生影响,扰乱近地空间的相对平静环境.高能粒子和 X 射线辐射会对电子设备和卫星等造成损坏,释放的带电粒子和磁场扰动与地球的磁场相互作用,引发磁暴和地磁扰动,会对地磁导航和磁传感器等系统产生干扰,甚至损坏电力设备和通信设备^[19].当耀斑爆发时,大量空气分子被电离,导致电离层 D 层电子浓度突然增加,等效反射高度迅速降低,造成电离层突然骚扰(sudden ionospheric disturbance, SID),导致依赖电离层反射的无线电波的传播受到干扰,进而影响无线电通信、导航和定位系统.此外,耀斑爆发时还伴随着一系列现象,如电磁辐射增强、日冕物质抛射和极光活动等.

2.2 太阳耀斑对地面(波)导航和通信的影响

地波传播是无线电波沿地球表面传播的一种方式,其效果受到地面导电性、频率和发射功率等因素的影

响.低频(30~300 kHz)和中频(0.3~3 MHz)无线电波波长较长,能够绕过障碍物,穿透能力强,地面吸收较小,所以地波传播主要适用于低频和中频频段,广泛应用于中波广播、Loran-C 系统和我国“长河二号”远程(脉冲相位差)导航系统.

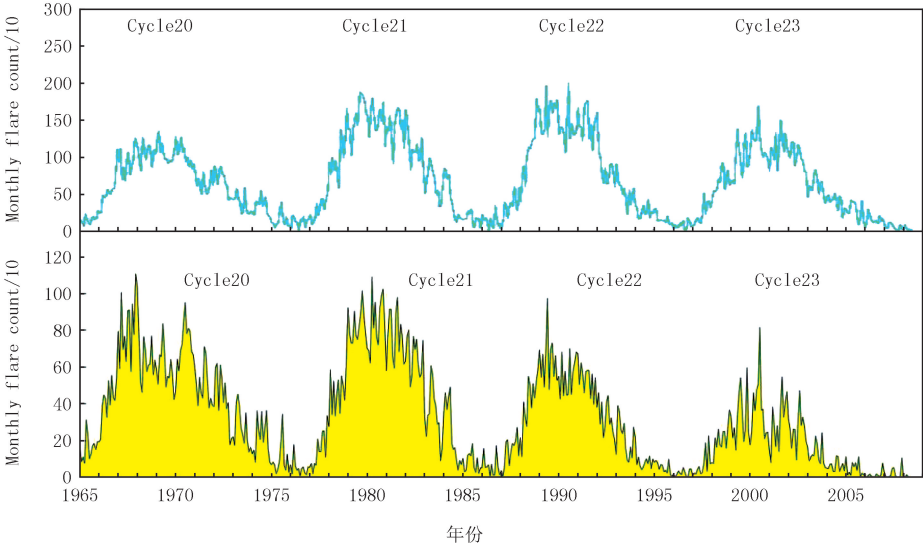


图2 太阳黑子和耀斑数量变化

Fig.2 The evolving numbers of sunspot groups and solar flares

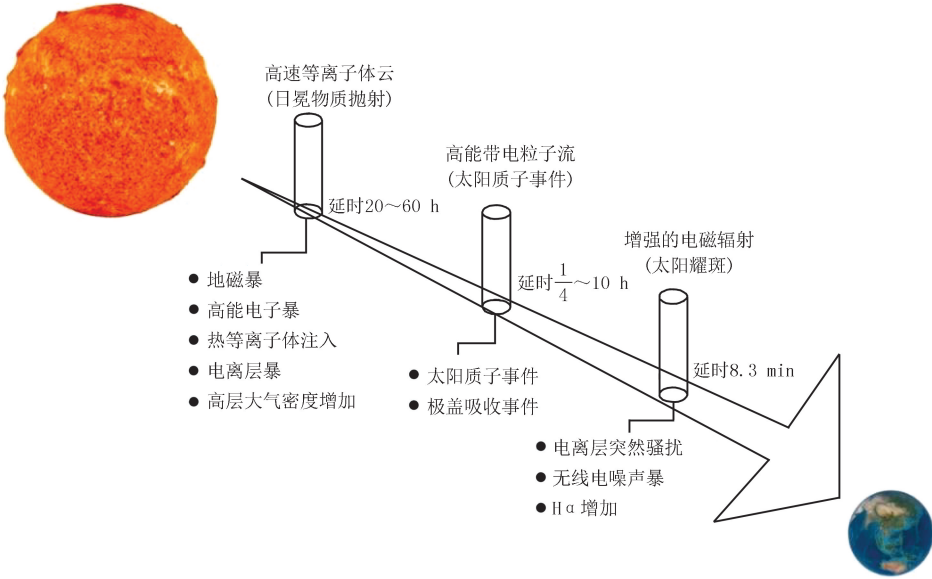


图3 太阳耀斑影响地球事件时间序列示意图

Fig.3 Schematic diagram of time series of solar flares affecting Earth events

由太阳耀斑引起的电离层扰动对于地面上的移动通信系统影响较小,但可能对长波和中波频段的传播产生影响.这种影响可能会改变地球大气层的电导率,导致信号强度变化,尤其是在高纬度地区较高频段的地波传播.M 级以上的耀斑可造成短波通信噪声和误码率增大,可用通信频率减少,甚至通信中断.

2.3 太阳耀斑对天波通信和导航的影响

天波传播是指无线电波通过地球电离层的折射或反射传播.相对地波传播,天波传播信号不稳定,但可以实现有效的远距离通信.主要应适用于高频(HF)频段,通常在 3~30 MHz,常用于短波广播、业余无线电、军事通信、远距离航空和海事通信.

短波通信会穿过电离层的 D 层,在 E 层和 F 层反射.太阳耀斑爆发时,D 层对短波的吸收作用增大,会

导致短波广播覆盖范围减小,可靠性下降,信号减弱、中断,会产生天波导航系统的精度和可靠性降低、无法收听短波广播等影响。

2.4 太阳耀斑对地-电离层波导通信和导航的影响

地-电离层波导传播是指无线电波在地面和电离层形成的波导之间多次反射向前传播^[20],适用于甚低频(VLF)和低频(LF)导航和通信。它在长距离的无线电导航(如 Omega 和 Alpha 甚低频导航系统)、军事潜艇通信、电离层探测等领域有广泛应用。尽管设备复杂且成本较高,但其波长长、衰减小、可以进行超远距离传输等特点,使其在特定场景下具有不可替代的重要作用^[21]。

当太阳耀斑喷射的 X 射线引起 D 层电离度突然增大,低电离层有效的反射高度下降,带来甚低频和低频信号相位发生突然变化,这种现象称为相位突然异常(sudden phase anomaly, SPA),可使得 VLF 和 LF 导航系统定位精度降低。实验证明,用 SPA 现象来发现太阳耀斑,比用短波中断现象更为灵敏^[11]。在极区,太阳耀斑引发的极光活动会增加电磁干扰,进一步影响地-电离层波导传播的信号。极区电离层剧变会导致导航和通信信号在极区的可用性和可靠性大幅下降。

2.5 太阳耀斑对卫星导航和通信的影响

卫星导航和卫星通信是现代科技中不可或缺的两大领域,各自发挥着重要作用,同时又能相互补充和协同工作。卫星导航和通信主要使用微波频段,因为微波具有良好的穿透性、高带宽和抗干扰能力。这些特性使其非常适合用于长距离和高质量的信号传输。卫星导航提供精确定位和授时服务,广泛应用于交通、军事、农业等领域。卫星通信利用人造地球卫星作为中继站来转发微波无线电波,从而实现两个或多个地球站之间的通信,覆盖范围广,可以满足电视广播、电话通信和数据传输等需求。

太阳耀斑爆发引起的电离层扰动和地磁暴引发的空间天气效应会极大程度上影响卫星导航和通信系统。在通信方面,对 L(1~2 GHz)波段和 S(2~4 GHz)波段的通信卫星影响较大,电离层和地磁层的剧烈变化可能导致微波通信链路的临时中断,影响卫星通信和数据传输,尤其是低轨道卫星。电离层扰动可以改变微波信号的传播速度和方向,使依赖微波信号的全球导航卫星系统产生测距偏差。

此外,持续的电离层扰动会导致微波信号的质量下降,影响通信系统的稳定性和可靠性。为减轻对卫星通信的影响,在电离层扰动期间,可以选择受影响较小的频率进行通信。

太阳耀斑引发的高能粒子还会直接造成卫星电子设备损坏、信号干扰和卫星轨道姿态失控等问题。

3 应对措施

为减小太阳耀斑对无线电通信的影响,首先可以建立预警系统。通过光学望远镜直接观测太阳表面的变化和卫星实时监测 X 射线和高能粒子流量,实现对太阳活动的全面监测;利用我国已有的电离层垂测站,可以从地面垂直向上发射调制的高频无线电波,并在同一地点接收它的反射信号,测量出电波来回传播的时间,从而获得不同频率的电离层时延,这样能够提前 1~3 d 更准确地预测太阳耀斑活动效应和电离层变化;还可以通过监测甚低频信号相位变化,进行电离层骚扰预报。其次,在系统设计时可以配置系统冗余进行有效防范,比如使用多卫星系统,确保在某颗卫星受到影响时,其他卫星能够继续提供通信服务,同时建立地面备用通信系统,以应对卫星通信中断的情况,确保重要通信的连续性。还可以采用差分法来提高导航系统精度。

参 考 文 献

- [1] ANDREWS D G. An introduction to atmospheric physics[M]. 2nd ed. Cambridge, Eng: Cambridge University Press, 2010.
- [2] 曾洵文. 基于深度学习的太阳黑子群磁类型识别与太阳耀斑爆发预报研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [3] ABED A K, QAHWAJI R, ABED A. The automated prediction of solar flares from SDO images using deep learning[J]. Advances in Space Research, 2021, 67(8): 2544-2557.
- [4] LIN D, WANG W B, GARCIA-SAGE K, et al. Thermospheric neutral density variation during the "SpaceX" storm: implications from physics-based whole geospace modeling[J]. Space Weather, 2022, 20(12): e2022SW003254.
- [5] 达尼洛夫. 浅论高层大气物理[M]. 刘春林, 译. 北京: 科学出版社, 1984.
- [6] LAVERGNAT J, SYLVAIN M. Radio wave propagation[M]. Berlin: Springer, 2008.

[7] 熊皓.无线电波传播[M].北京:电子工业出版社,2000.

[8] 周彩霞,吴振森.电离层波传播[M].西安:西安电子科技大学出版社,2021.

[9] 吕保维,王贞松.无线电波传播理论及其应用[M].北京:科学出版社,2003.

[10] 熊年禄,唐存琛,李行健.电离层物理概论[M].武汉:武汉大学出版社,1999.

[11] Radio communication Study Group 3.Reference standard atmospheres(ITU-R P.835-3)[R].[S.l.]:International Telecommunication Union,2004.

[12] 《电子工业技术词典》编辑委员会.电子工业技术词典(电波传播与天线)[M].北京:国防工业出版,1977.

[13] 晏裕春,蒋宇中,韩郁,等.应用 FDTD 法分析甚低频传播特性[J].舰船电子工程,2006,26(4):133-136.
YAN Y C,JIANG Y Z,HAN Y,et al.Numerical simulation of the VLF propagation characteristic by applying FDTD method[J].Ship Electronic Engineering,2006,26(4):133-136.

[14] 王严.电离层近垂直电波传播特性研究[D].北京:中国电子科技集团公司电子科学研究院,2021.

[15] 张英辉.太阳耀斑对无线电导航系统的影响[J].大连海运学院学报,1992,18(4):365-368.
ZHANG Y H.Impact of solar flares on radio navigation systems[J].Journal of Dalian Maritime Academy,1992,18(4):365-368.

[16] NGDC.Solar-Geophysical Data prompt reports(Data for May and June 2008)[R].[S.l.:s.n.]:25.

[17] NGDC.Solar-Geophysical Data comprehensive reports(Data for August 2008)[R].[S.l.:s.n.]:7.

[18] 牛有田,朴金龙,苏艳芳,等.中纬度地区粒子沉降和太阳耀斑对甚低频传播的影响分析[J].河南师范大学学报(自然科学版),2017,45(6):31-36.
NIU Y T,PIAO J L,SU Y F,et al.Analysis of particle sedimentation and solar flares on VLF propagation in mid-latitude region[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2017,45(6):31-36.

[19] TULUNAY Y K,BRADLEY P A.The impact of space weather on communication[J].Annals of Geophysics,2009,47:941-942.

[20] 辛楠.甚低频电磁波在地:电离层波导中的传播特性研究[D].西安:西安理工大学,2019.

[21] WAIT A D.甚低频无线工程[M].北京:国防工业出版社,1973.
WAIT A D.Very low frequency wireless engineering[M].Beijing:National Defense Industry Publishing,1973.

Effects of solar flares on radio navigation and communication

Niu Youtian^{a,b,c,d}, Zhang Anqi^a, Zhao Gege^a, Ding Yuling^a, Cao Yuan^{a,b,c,d}, Piao Jinlong^{a,b,c,d}

(a. College of Electronic and Electrical Engineering; b. Academician Workstation of Electromagnetic Wave Engineering of Henan Province; c. Key Laboratory of Optoelectronic Sensing Integrated Application of Henan Province; d. Engineering Laboratory of Intelligent Additive Manufacturing of Henan Province, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: Solar flares are the most intense activity of the Sun, and their ejected X-rays and high-energy particles can have a significant impact on radio navigation and communication systems. This paper analyzes the mechanisms and processes that affect radio navigation and communication systems after solar flares occur. Flares can cause a decrease in the positioning accuracy or even invalidity of radio navigation positioning systems, an increase in radio communication noise and error rate, and even communication interruption. Some measures are proposed to reduce the impact of solar activity on navigation and communication.

Keywords: solar flare; ionosphere; radio; navigation; communication

[责任编辑 杨浦 陈留院]