

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

牛有田, 朴金龙, 苏艳芳, 张益萌

(河南师范大学 电子与电气工程学院;河南省电磁波特征信息探测重点学科开放重点实验室,河南 新乡 453007)

摘要:通过观测俄罗斯 Alpha 甚低频导航台到中纬度地区(新乡)之间的甚低频(VLF)信号的相位变化数据,发现在 2002-07-17—2002-07-20 期间,VLF 信号发生了多次相位超前现象,观测到在 2002-07-19 和 2002-07-20 发生了高能粒子沉降事件,并分析出此次事件是由 2002-07-17 和 2002-07-18 发生的太阳耀斑引起.通过与美国发布的 GOES 卫星数据进行对比,发现两者的数据有很好的 consistency.粒子沉降和太阳耀斑都会使甚低频信号的相位发生相位超前.粒子沉降大多数情况发生在极区,本次在新乡地区观测到高能粒子沉降,是一次极为宝贵的观测数据,对研究中纬度地区的高能粒子沉降有很大的作用.

关键词:VLF 信号;相位变化;高能粒子沉降;太阳耀斑;中纬度

中图分类号:TN98

文献标志码:A

太阳活动有太阳黑子、太阳耀斑、冕洞等活动,太阳活动对人类的生存环境有很大的影响,随着科学技术的进步,人们开始关心自己的生活环境,因此对太阳活动的研究越来越重要.当太阳耀斑爆发后,X 射线和高能粒子流量突然暴增,它将会使 D 层电离层等效高度发生变化^[1],进而影响地球的空间环境,干扰地球磁场和空间电离层,使它失去反射无线电电波的功能,甚至会造成短波无线电通信的中断,全球定位导航系统也会出现很大的偏差或者失灵,电力系统的瘫痪.它也会对在轨飞行的卫星、太空飞船的设备仪器等造成损坏,致使其计算机系统可能发生单粒子翻转(SEU)事件,对正在进行太空活动的航天员身体带来巨大的伤害,甚至危及生命^[2].太阳耀斑喷发的 X 射线大约 8.3 min 首先到达地球,然后太阳风以一定的速度在 2~3 d 后到达地球附近,高能粒子被地球磁场捕获,大多数情况注入两极地区,形成极光^[3-4],中低纬度地区很少能观测到高能粒子沉降,本次在新乡地区观测到高能粒子沉降,因此是一次极为宝贵的观测数据,对研究中纬度地区的高能粒子沉降有很大的作用.

当前,对太阳活动的监测方法有很多种,比如,电离层 ETC 监测^[5-6],GPS 监测和卫星监测^[7],但是这些方法的费用都比较高昂,而且需要处理大量的数据.基于太阳耀斑和高能粒子沉降都与 VLF 信号相位有很好的相关性^[8-9],因此,通过观测 VLF 信号相位变化来监测太阳耀斑和粒子沉降等太阳活动不失为一种简便有效的方法.而且本文通过中纬度地区的观测数据,详细地分析了高能粒子沉降和太阳耀斑对甚低频传播的影响.

1 观测原理与系统

VLF 无线电波在地球表面与低电离层之间的球壳形空间进行远距离传播,通常用“波导模”理论来分析,并且在 VLF 传播的“波导模”理论研究中,通常将地与低电离层之间的空间称为地—电离层波导^[10-12],基于“波导模”理论的 VLF 传播理论为:在给定地—电离层波导模型与激励条件下,求解波导中 VLF 场所满足的麦氏方程,导出代表一系列不同阶次的波导模场之和的总场级数形式解,导出“模方程”并求解“模方程”^[13].

收稿日期:2017-04-05;修回日期:2017-07-15.

基金项目:国家自然科学基金(49070217);河南省重点科技攻关计划项目(162102210263).

作者简介:牛有田(1966—),男,河南新野人,河南师范大学教授,研究方向为电磁波理论及其应用,E-mail:niuyt22@163.com.

通信作者:朴金龙,E-mail:812065287@qq.com.

VLF 信号的频率在 3~30 kHz 之间,其波长长,衰减小,相位十分稳定,可以进行远距离传播,因此在矿产资源探测,导航和地震预报等方面都有广泛的应用^[14].太阳活动发生时,喷射的 X 射线会对电离层产生影响,使 D 层的电离浓度突然增加,使其等效高度降低,这就是突然电离层扰动(Sudden Ionospheric Disturbance, SID)现象.图 1 为 VLF 信号传播示意图.大量的资料数据表明:当发生高能粒子沉降和太阳耀斑时, VLF 相位会发生相位超前现象,这为监测太阳活动提供了非常简便的方法.

图 2 是甚低频监测系统原理框图,该系统由天线、铷原子频标、数字 VLF 接收机、显示器和存储器组成,该系统基于软件无线电的方法,依靠软件来实现硬件的功能,因此,接收机体积小、质量少,而且具有精度高、一致性好、可靠性高的特点,系统采用高稳定度的铷原子频标,为系统提供精确的时间基准.监测系统中在纬度地区的河南新乡,接收俄罗斯 Alpha 导航系统(主台为新西伯利亚,西副台为克拉斯诺达尔,东副台为哈巴罗夫斯克,每个台 3 个频率 11.9 kHz, 12.6 kHz, 14.9 kHz) 9 路 VLF 信号的幅度、相位和信噪比,通过观察显示器 VLF 相位变化,来监测高能粒子沉降和太阳耀斑等太阳活动.

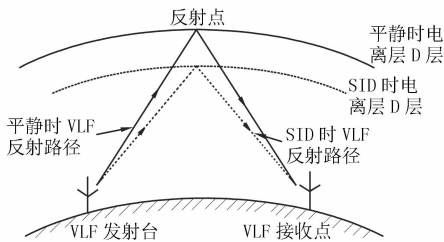


图1 VLF信号传播图

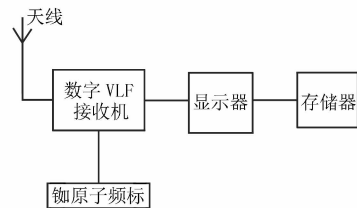


图2 甚低频监测系统原理框图

2 观测数据与分析讨论

2.1 低电离层等效高度与相位变化量的关系

VLF 信号在地和低电离层波导中传输,采用波导模理论对其分析.若太阳耀斑和粒子沉降发生前后 VLF 信号的相位变化为 $\Delta\varphi$, 太阳耀斑和粒子沉降发生前, VLF 信号的相位传播速度为 V_p , 太阳耀斑和粒子沉降发生后, VLF 信号的相位传播速度为 V'_p , 在波导模理论的求解和分析过程中发现, $\Delta\varphi$ 与 V_p, V'_p 具有如下关系^[11]

$$\Delta\varphi = \left(\frac{1}{V_p} - \frac{1}{V'_p} \right) D 2\pi f, \quad (1)$$

式中, D 表示大圆路径距离 $D=2462$ km; 信号频率 $f=11.9$ kHz.

而对于第 n 阶模, VLF 信号的相位传播速度 V_p 有如下表达式

$$V_p = c \left[1 - \lambda^2 \left(\frac{n - \frac{1}{2}}{2h} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{0.36h}{a} \right), \quad (2)$$

式中, n 代表传播模的阶数; c 为光在空间中的传播速度; λ 表示 VLF 信号的波长; h 表示地电离层的等效高度, 因为地电离度的电离度白天比夜晚高, 地电离层等效高度白天取 70 km, 夜晚取 90 km; $a=6371$ km, 表示地球的平均半径.

在 VLF 信号的传输过程中, 在离发射台较近的距离内, 因发射天线会激励出多阶波模, 所以存在多模传播现象, 但是随着传播距离的增加, 高阶波模的衰减很大, 当 VLF 信号接收端距离发射台较远时, 主要是一阶波模存在. 对于一阶模, 将 $n=1$ 代入(2)式可得, VLF 信号的传播相速 V_p 的表达式为

$$v_p = c \left[1 - \frac{\lambda^2}{16h^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{0.36h}{a} \right). \quad (3)$$

因为 VLF 信号的相位传播速度随着地电离层等效高度发生的变化而变化, 因此可将(3)式微分, 得出

V_p, V'_p 之间的关系式:

$$\frac{1}{V_p} - \frac{1}{V'_p} = -c \left(\frac{0.36h}{a} + \frac{\lambda^2}{16h^2} \right) \frac{\Delta h}{h}, \quad (4)$$

式中, Δh 表示地电离层等效高度的下降量.

将(1)式代入(4)式,可得太阳耀斑和粒子沉降发生前后 VLF 信号的相位变化量 $\Delta\varphi$ 与地电离层等效高度下降量 Δh 之间的关系为

$$\Delta\varphi = -c \left(\frac{0.36h}{a} + \frac{\lambda^2}{16h^2} \right) \frac{\Delta h}{h} D\omega. \quad (5)$$

因此,太阳耀斑和粒子沉降发生前后地电离层等效高度下降量 Δh 的表达式为

$$\Delta h = -c \frac{h\Delta\varphi}{D\omega \left(\frac{0.36h}{a} + \frac{\lambda^2}{16h^2} \right)}. \quad (6)$$

因为 VLF 信号的角速度 ω 与波长 λ 之间的关系

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}, \quad (7)$$

可将(7)式代入(6)式,得

$$\Delta h = - \frac{\lambda h \Delta\varphi}{2\pi D \left(\frac{0.36h}{a} + \frac{\lambda^2}{16h^2} \right)}. \quad (8)$$

(4)~(6)式和(8)式的负号仅代表 VLF 信号相位在地电离层等效高度降低时,发生相位突然超前现象.

2.2 粒子沉降事件的分析

从图 3 的中纬度地区河南新乡观测的 VLF 数据可以知道 2002-07-19 22:20—23:40(当地时间, LT) VLF 信号发生了相位超前现象.从图 4 可以知道 2002-07-20 21:00—23:00LT VLF 信号发生了相位超前现象,由于两者此时都正处于夜间,所以推测这个时期发生了两起高能粒子沉降事件.经对比发现 VLF 相位异常数据与美国国家地球物理数据中心 NGDC(National Geophysical Data Center)发布的 GOES 卫星观测到的高能粒子沉降的曲线^[15]一致.粒子沉降事件一般情况下由太阳耀斑引起,在太阳耀斑爆发后的 2~3 d 到达地球.下面分析这 2 起事件发生的原因.

表 1 太阳耀斑及高能粒子沉降观测数据和卫星数据(LT)

太阳耀斑爆发				高能粒子沉降				粒子沉降 与太阳耀 斑相隔 时间/h	GOES 卫星 数据	
日期	VLF 相位异常观测		监测 X 射线量级	日期	VLF 相位异常观测					
	峰值时刻	$\Delta\varphi/\mu\text{s}$			发射台	开始时刻	终止时刻			$\Delta\varphi/\mu\text{s}$
2002-07-17	15:13	22	M8.3	2002-07-19	东副	22:00	23:50	9	55	M8.5
2002-07-18	11:37	15	M2.1	2002-07-20	东副	21:01	22:55	10	54~60	M2.2
2002-07-18	15:44	29.4	X1.8	—	—	—	—	—	—	X1.8

2.3 太阳耀斑的分析

从图 5 和图 6 可知在 2002-07-17 的 14:58—15:58 LT, 2002-07-18 的 11:22—11:40LT 和 15:24—15:49LT 期间,发生了 VLF 信号比较明显的相位超前现象,并且此时正处于白天,所以断定这 2 天发生了 3 起级别比较大的太阳耀斑.由于太阳耀斑可以引起高能粒子沉降,所以推断 2002-07-20 的高能粒子沉降事件,是由于 2002-07-18 的太阳耀斑引起的,2002-07-19 的高能粒子沉降是由于 2002-07-17 的太阳耀斑引起的.

根据 X 射线通量 F 的大小,将耀斑分为 5 级(见表 2).

从图 5 和图 6 可以看出 2002-07-17 VLF 相位变化量为:26 cec, 2002-07-18 VLF 相位变化量分别为:18 cec, 35 cec. 太阳耀斑发生前后 VLF 信号的相位变化量为 $\Delta\varphi$, 经过计算得出 $\Delta h = 16.8 \text{ km}, 10.6 \text{ km}, 20.5 \text{ km}$.

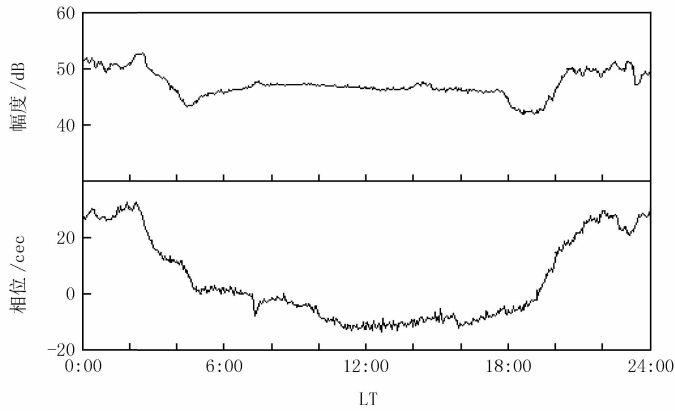


图3 2002-07-19 VLF信号的幅度和相位

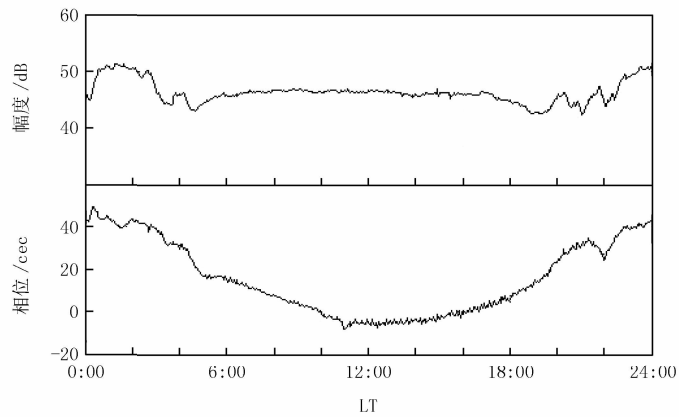


图4 2002-07-20 VLF信号的幅度和相位

表2 X射线太阳耀斑划分标准

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

太阳X射线通量密度 F 与电离层降低高度 Δh 之间的拟合方程^[9],将大量的数据再次整理拟合,重新得出拟合方程为

$$F = 2.04 e^{0.22\Delta h/km} \times 10^{-6} W \cdot m^{-2}. \quad (9)$$

把 $\Delta h = 16.8$ km, 10.6 km 和 20.5 km 分别代入(9)式,可以计算出 $F = 8.3 \times 10^{-5} W \cdot m^{-2}$, $F = 2.1 \times 10^{-5} W \cdot m^{-2}$, $F = 1.8 \times 10^{-4} W \cdot m^{-2}$,通过观测数据并利用拟合公式计算出的结果和表2 X射线太阳耀斑划分标准可知,在2002-07-17的14:58—15:19LT,2002-07-18的11:22—11:40和15:24—15:49LT期间发生了M8.3, M2.1和X1.8级的太阳耀斑,从美国的GOES卫星公布的数据可知,2002-07-17的06:58—07:19(国际时间,UT),2002-07-18的03:22—03:40和07:24—07:49UT期间发生M8.5, M2.2和X1.8级的太阳耀斑.国际时间和地方时间相差8 h.换算之后发现,根据中纬度地区河南新乡监测的太阳耀斑发生的时间与美国的GOES卫星数据一致(表1).由VLF监测数据计算出来的太阳耀斑的级别与卫星数据也基本一致,说明观测数据的正确性,证实了在中纬度地区观测到的这两起粒子沉降事件是由于太阳耀斑引起的,验证了推测的正确性.

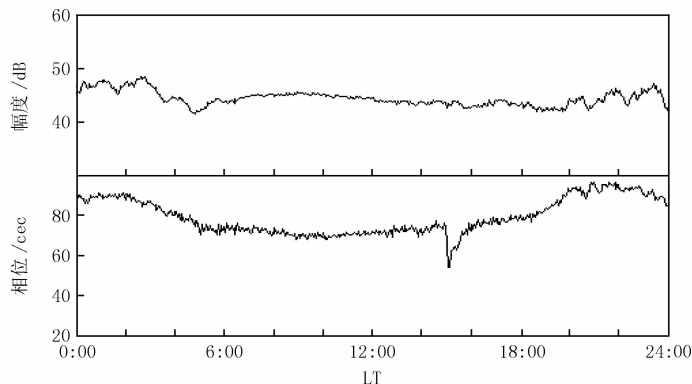


图 5 2002-07-17 VLF 信号的幅度和相位

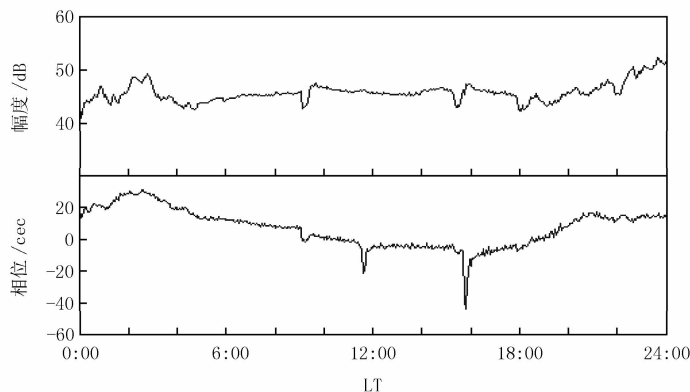


图 6 2002-07-18 VLF 信号的相位和幅度

3 结束语

通过在中纬度地区观测到的两起高能粒子沉降事件,并利用在中纬度地区观测出来的数据,分析出这两起高能粒子沉降事件的起因是太阳耀斑的爆发。太阳耀斑和高能粒子沉降都会使 VLF 信号相位发生变化,因此可以通过观测 VLF 信号相位的变化,来监测太阳耀斑和高能粒子沉降事件。本文中通过拟合公式得出的太阳耀斑的级别和美国 GOES 发布的卫星数据还有一定的误差,这就需要在以后的工作中做大量的数据拟合工作,得到更加精确的拟合公式,减小误差。由于太阳耀斑和粒子沉降对生活环境有很大的关系,因此需要做大量的工作来监测它们,在它们来临之前做出准备,以减小它们的影响。本文分析的粒子沉降事件,是由于太阳耀斑引起的,粒子沉降事件是很复杂的,对于其他原因引起的粒子沉降,还需要再分析其发生的起因。

参 考 文 献

- [1] 王素琴,潘练德,甄卫民,等.电离层 D 层突然骚动与太阳耀斑微波射电爆发的关系[J].陕西天文台台刊,1989,9(1):5-10.
- [2] 王家龙,Yun Hongsik.日地系统学中的太阳活动研究(II)爆发型太阳活动—太阳耀斑[J].地球物理学进展,1995,10(1):23-34.
- [3] 贺龙松,刘瑞源,刘顺林,等.太阳活动低年南极中山站电离层 F 层的平均特性[J].地球物理学报,2000,43(3):289-295.
- [4] 牛有田,李玲,赵协中,等.1991-02-25 特大太阳耀斑与南极 VLF 相位的相关性[J].地球物理学进展,2014,29(6):2526-2529.
- [5] 邓忠新,刘瑞源,甄卫民,等.中国地区电离层 TEC 暴扰动研究[J].地球物理学报,2002,55(7):2177-2184.
- [6] 万卫星,宁百齐,刘立波,等.中国电离层 TEC 现报系统[J].地球物理学进展,2007,22(4):1040-1045.
- [7] 魏奉思.空间天气学[J].地球物理学进展,1999,14(S1):1-7.
- [8] 赵协中,王小京.太阳耀斑期间 X 线流量与 VLF 传播相位偏移相关性研究[J].电波科学学报,1990,5(2):35-43.

- [9] 刘万通.太阳活动对 VLF 传播的一种影响[J].空间科学学报,1993,13(2):134-139.
- [10] Wait J R.Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radiowaves[J].NBS Tech Note,1964,300:1-24.
- [11] 王健,陈恩平,赵协中.甚低频横跨极区传播相位的观测与研究[J].电波科学学报,2006,21(3):386-390.
- [12] 潘威炎.长波超长波极长波传播[M].成都:电子科技大学出版社,2004.
- [13] 胡英娣,杨新德,柳超,等.甚低频波导模方程的求解办法[EB/OL].[2017-03-14].<http://cpfd.cnki.com.cn/Article/CPFDTOTAL-ZDTX200910001168.htm>.
- [14] 牛有田,毕永兴.基于软件无线电的甚低频法探矿接收机[J].河南师范大学学报(自然科学版),2016,44(1):70-73.
- [15] 美国 GOES 卫星高能粒子流量图[EB/OL].[2017-04-01].<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/solar.html>.

Analysis of Particle Sedimentation and Solar Flares on VLF Propagation in Mid-latitude Region

Niu Youtian, Piao Jinlong, Su Yanfang, Zhang Yimeng

(College of Electrical and Electronic Engineering;

Laboratory for Electromagnetic Wave Detection of Henan Province, Henan Normal University, Xinxiang 453007)

Abstract: By observing the very low frequency (VLF) VLF phase anomalies from the Russian Alpha navigation station in mid latitude regions (Xinxiang), we find VLF signal phase leading phenomenon during July 17th, 2002 and July 20th, 2002. Then we observe high-energy particles sedimentation events in the mid latitude zone on July 19th, 2002 and July 20th, 2002. So we analyze those events which are caused by solar flares occurring on July 17th, 2002 and July 18th, 2002. By comparing the GOES satellite data released by the US, we find that they are in good agreement with dates we observe. So VLF signal phase have a good correlation with the solar flare and high-energy particle sedimentation, it confirms the correctness of the analysis. The majority of particle sedimentation occur in the polar regions, Particle sedimentation observed in the Xinxiang is an extremely valuable data, it will have a great effect on studying the high-energy particle sedimentation of latitude regions.

Keywords: VLF signal; phase change; high-energy particle sedimentation; solar flares; mid latitude

[责任编辑 杨浦]