

# 甚低频电磁波方法预报地磁暴

牛有田,李丹丹,李玲,位书军,毕永兴

(河南师范大学 物理与电子工程学院;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:**通过观察甚低频电磁波的相位变化,预测太阳耀斑的级别.当太阳耀斑爆发时,太阳表面首先会发出大量电磁辐射(主要是 X 射线),甚低频电磁波能很好地感应到此辐射;其次还喷射出大量带电低能粒子流,这会引起地磁暴,且通常在耀斑爆发 1~2 d 之后到达地球.给出了一个预报地磁暴的实例.两事件的时间间隔约为 28 h,太阳风的速度约为 1 484.1 km/s.

**关键词:**地磁暴;太阳耀斑;VLF

**中图分类号:**TN011.2;O44

**文献标志码:**A

早在 1859 年 9 月 1 日,人们便已经认识到磁暴与太阳耀斑有关.还发现磁暴时极光十分活跃.太阳耀斑向外辐射出的大量紫外线、X 射线等,当这些高能粒子到达地球之后,就会严重干扰电离层对电波的吸收和反射作用,使得部分或全部短波无线电波被吸收掉,短波衰减甚至完全中断.地磁暴的发生还会引起重大停电事故<sup>[1]</sup>,干扰无线电通讯和卫星的运行,加快油气管线的锈蚀,乃至在生产灵敏电子器件中,废品率大大提升.因此对于地磁暴的预报和研究工作具有非常重大的科学和经济意义.2001 年以来,随着我国阳-淮等多条 500 kV 长距离线路的相继建成投运,江苏上河、广东岭澳等地变压器多次发现不明原因的强烈振动和噪声增大事件<sup>[2]</sup>.目前,举世瞩目的 1 000 kV 特高压工程已开工建设,特高压线路的单位电阻最多是 500 kV 的 1/2,并且线路长、规划规模大,变压器采用单相变压器组结构,磁暴影响问题迫切需要研究.耀斑爆发,X 射线流量突然增加,最多达 2~3 个数量级.低电离层电子浓度增大,等效反高度降低,导致甚低频(VLF)传播相位突然超前几十至上百微秒<sup>[3]</sup>.本文研究了利用 VLF 信号监测电离层突然骚扰(SID)事件,进而预报地磁暴的方法,此方法的预警时间比测量地磁感应电流(GIC)的方法长很多.给出了一个预报地磁暴的实例,2 事件的时间间隔约为 28 h,太阳风的速度约为 1 484.1 km/s.

## 1 VLF 传播特性对太阳耀斑响应的分析

太阳表面有黑子、耀斑、冕洞等活动现象.人们发现太阳耀斑与太阳黑子数之间有很好的对应关系,太阳耀斑和太阳黑子数有约 11 年的周期变化.太阳耀斑爆发后,强烈的 X 光线很快到达地球,引起电离层电离度增加,低电离层高度突然降低,即发生了所谓的 SID 事件.

VLF 主要是在低电离层下边缘与地球表面之间形成的地-电离层波导中传播的.白天低电离层为 D 层,位于距离地面以上大约 70 km 的地方;夜晚 D 层消失,低电离层为 E 层下部,位于距离地面以上大约 90 km 左右的地方<sup>[4]</sup>.由于太阳耀斑爆发的 X 射线只对白天正对太阳的电离层起作用.因此,此时的电离层为 D 层.当出现 SID 事件时,由于低电离层等效反射高度突然下降,引起 VLF 相位突然超前.大量的监测结果发现,在相同的传播条件下,即发射台和接收点相同、时间大致相同时,太阳耀斑的级别越大,VLF 相位的变化

收稿日期:2014-08-31;修回日期:2014-10-23.

基金项目:国防科研计划项目(29.3.2.2)

作者简介:牛有田(1966-),男,河南新野人,河南师范大学教授,主要从事电波传播及其工程应用等研究,E-mail:niuyt22@163.com.

通信作者:李丹丹,E-mail:327612397@qq.com.

量也越大.

### 2 VLF 方法预报地磁暴系统及预报实例

VLF 方法监测预报地磁暴系统如图 1 所示. 该系统采用软件无线电技术研制, 可靠性好. 天线采用垂直于地面的鞭状天线, 接收 VLF 信号的垂直电场分量. 铷原子频率标准输出的 5 MHz 正弦信号作为本地频标, 经分频等电路后为 VLF 方法预报地磁暴系统提供采样脉冲基准信号. 系统测相精度为  $\pm 1 \mu\text{s}$ . 全数字式 VLF 监测预报地磁暴接收机接收俄罗斯 Alpha 甚低频导航系统 3 个发射台 (位于格拉斯那达尔的西副台、新西伯利亚的主台和哈巴罗夫斯克的东副台) 的 VLF 信号, 每 3 min 测量一组数据, 测量的数据存储在接收机的硬盘中, 数据和曲线显示在显示器屏幕上. 图 2 是我们在山东省青岛市接收 3 个发射台到接收点 ( $36.073 5^{\circ}\text{N}$ ,  $120.423 8^{\circ}\text{E}$ ) 传播路径示意图. 根据地球大圆距离公式, 计算求得 Alpha 系统西副台、主台和东副台到青岛接收点的距离分别约为 6 720.0 km、3 481.5 km 和 2 029.6 km.

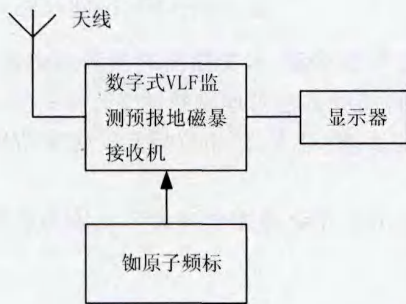


图 1 全数字式 VLF 监测预报地磁暴系统框图



图 2 VLF 信号传播路径示意图

图 3 至图 5 为 1998-05-22 山东青岛用甚低频接收机监测了 3 个发射台的 Alpha 系统频率为 11.9 kHz 信号的幅度(上图)和相位(下图).

根据 VLF 信号相位变化对太阳活动现象比较敏感, 着重研究 VLF 信号的相位变化情况. 由图 3 可知在 21:42LT(Local Time)或者 13:42UT(Universal Time)有相位超前发生, 并且相位变化的最大值为  $22 \mu\text{s}$ . 由此可以推测此时发生了非常大的太阳耀斑. 该耀斑对 VLF 信号的影响大约持续了 2 h. 在图 4 和图 5 中, 相位曲线变化平缓, 无超前现象, 因为主台和东副台, 此时在这两条大圆路径上, 太阳已经处于地平线以下, 即为夜晚.

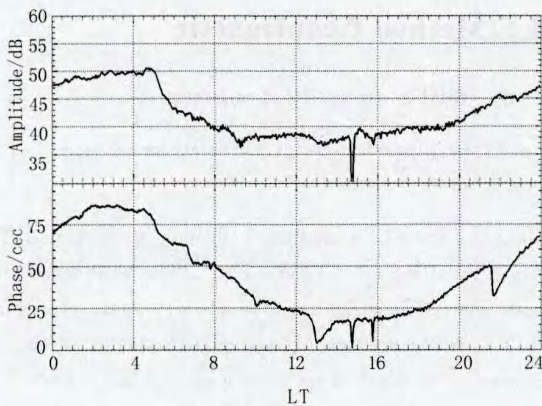


图 3 西副台-青岛 11.9 kHz 信号

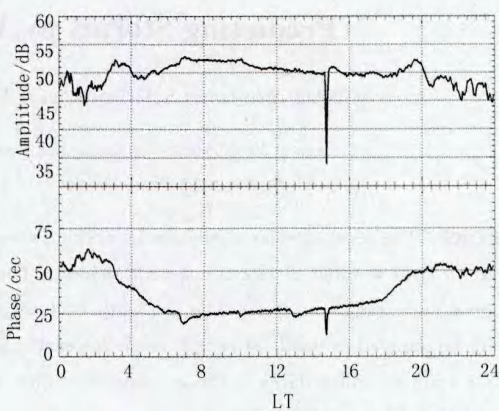


图 4 主台-青岛 11.9 kHz 信号

由最大变化量, 根据波导模理论<sup>[5-7]</sup>, 可以反演出<sup>[3]</sup>这次太阳大耀斑的级别约为 X1.0 级. 而事后, 美国 NGDC 公布的太阳耀斑级别为 X1.1 级<sup>[9]</sup>. 通过预测和实测的数据对比发现, 用 VLF 预测太阳耀斑级别的可行性. 太阳耀斑爆发时, 太阳表面首先会发出大量电磁辐射外 (主要是 X 射线), VLF 能很好地感应到此辐射

射;其次还喷射出大量带电低能粒子流,会引起地磁暴,且通常在耀斑爆发1~2 d后到达地球.

在这次太阳耀斑爆发后,北京地磁台站观测到,从5月4日01:43LT(5月3日17:43UT)起发生了K8级的强烈地磁暴<sup>[8]</sup>.这次太阳耀斑的爆发到地磁暴的发生,两者相隔约28 h.平均日地距离,即太阳和地球之间的平均距离为149 597 870 km.由此计算出这次强烈太阳爆发后的太阳风速约为1 484.1 km/s.

### 3 结束语

地磁暴的发生,不但给电力系统带来很大的影响,危害电力设备,引起电网运行不稳定,甚至造成大面积的停电事故,而且也会给对地磁暴敏感的行业产生影响.比如,地磁暴发生期间,高分辨率显示器的废品率明显上升.人类的载人航天发射和卫星发射等也要尽量避开地磁暴发生的时段.本文提出的预测地磁暴方法,预警时间长,不仅对提高电网运行安全有特别重要的意义,而且可以指导其他对地磁暴敏感行业的生产以及确保载人航天发射和卫星发射的安全.太阳活动是一个非常复杂的活动,对VLF相位异常变化量与地磁暴级别之间的相关性还需要开展进一步的研究工作.

致谢:作者非常感谢李建龙和王祥康在实验方面所做的工作!还要感谢中国国家测绘局提供的世界地图,以及参考文献中的每一位作者!

### 参 考 文 献

- [1] Herzog D C. 地磁暴的危害[J]. 世界地震译丛, 1994(5): 80-82.
- [2] 刘连光, 刘春明, 张冰, 等. 中国广东电网的几次强磁暴影响事件[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 976-981.
- [3] 赵协中, 王小京. 太阳耀斑期间X射线流量与VLF传播相位偏移相关性研究[J]. 电波科学学报, 1990, 5(2): 35-43.
- [4] 牛有田, 陈建峰, 郝好贞, 等. 1997-03-09日全食的甚低频观测与分析[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2009, 37(2): 64-66.
- [5] 田育庶, 潘威炎, 余运超, 等. GJB/Z70-95甚低频(VLF)无线电系统电波场强与相位计算方法[S]. 1995.
- [6] Wait J R. Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves[M]. NBS Tech Note, 1964, 300.
- [7] Coffey H E. "Solar-Geophysical Data comprehensive reports (Data for May 1998)," NOVEMBER 1998 NUMBER 651-Part II [R]. Boulder: National Geophysical Data Center, 1998, 43-44.
- [8] 王宜文, 冯学尚. 1998年5月空间天气大事件的地磁场响应[J]. 空间科学学报, 2001, 21(2): 159-164.

## Predicting Storms by VLF Method Geomagnetic

NIU Youtian, LI Dandan, LI Ling, WEI Shujun, BI Yongxing

(College of Physics and Electronic Engineering, Henan Normal University; Laboratory for Electromagnetic Wave Detection of Henan Province, Xinxiang 453007, China)

**Abstract:** The level of solar flares can be predicted by observing the VLF signal phase changes in this paper. The solar surface emits a large number of electromagnetic radiation (mainly X rays) when solar flares burst. The VLF signal can induce this electromagnetic radiation well. Then, plenty of low energy charged particle flow, which may cause the geomagnetic storms, will be sprayed as well. They will reach the earth in 1-2 d. An example of forecasting geomagnetic storms is shown. It takes 28 h from the solar flares to the geomagnetic storm occurred. The speed of the solar wind is 1 484.1 km/s.

**Keywords:** geomagnetic storm; solar flare; VLF

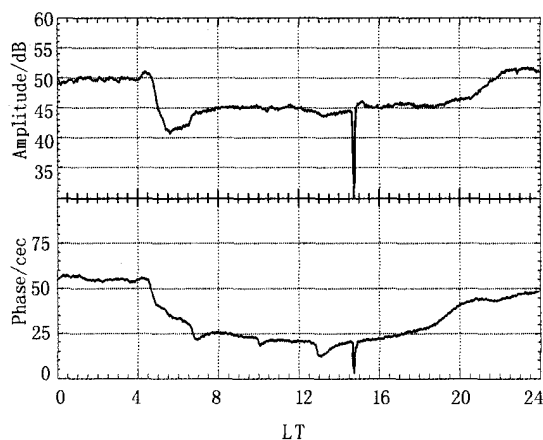


图5 东副台-青岛11.9 kHz信号