

# 2009 年 7 月 22 日日全食期间 VLF 信号的异常变化

张雪峰<sup>†</sup> 杜若吟 顾晟珉 吴 桐 王友宁

(南京市田家炳高级中学 南京 210037)

**摘要** 在 2009 年 7 月 22 日日全食期间, 用美国斯坦福大学太阳中心提供的电离层突扰 (SID) 监测仪对甚低频 (VLF) 信号进行观测时发现: 日全食期间的 VLF 信号强度变化异常, 出现类似日出日落的效应; 信号强度振幅变大, 类似于雷电效应; 而且信号强度在日全食前后一段时间内都有所增强. 在对观测数据的可靠性进行充分讨论的基础上, 对比以往的观测结果, 发现电离层会在日全食发生之前有所变化.

**关键词** 日月食, 地球: 大气层, 方法: 数据分析

**中图分类号:** P 125; **文献标识码:** A

## 1 引言

2009 年 7 月 22 日, 在中国华南北纬  $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$  之间发生了日全食现象, 利用美国斯坦福大学太阳中心提供的 SID 监测仪, 我们在南京地区 (东经  $118^{\circ}46'$ , 北纬  $32^{\circ}03'$ ) 对日全食期间的 VLF 信号进行了监测. 在日全食前后一周内, 仪器工作正常, 外界干扰较小, 而在日全食期间, 观测信号出现了十分明显的变化.

SID 监测仪是一台 VLF 波接收机 (中心频率为 19.8 kHz), VLF 信号广泛应用于无线电通信、导航、授时、标频广播和低电离层探测等系统中<sup>[1]</sup>. 根据地球电离层的波导理论, VLF 无线电波主要是在地球表面与低电离层之间的球壳形空间内传播的<sup>[2]</sup>. VLF 信号除了受地球表面影响外, 主要受到低电离层性质的影响, 而低电离层的变化除了受太阳辐射的影响外<sup>[3]</sup>, 还受地磁场、宇宙射线、流星雨等多种因素的影响<sup>[4]</sup>.

由于日全食发生的概率较小, 在日全食期间对 VLF 信号的研究并不是很多. 在我们能查阅的资料中, 多数发现在日全食期间 VLF 信号会出现日出日落效应, 电离层的等效反射高度会增加等<sup>[5-11]</sup>. 我们对这次日全食期间 VLF 数据的分析除了证实上述变化, 还发现在日全食前后信号强度都有所增加, 尤其在日食发生之前, 这在能够查阅的文献中没有发现相关报导.

2009-10-16 收到原稿, 2009-11-04 收到修改稿

<sup>†</sup> zxf sir@hotmail.com

## 2 空间天气监测计划及 SID 仪器工作原理简介

我们所使用的 SID 监测仪是由斯坦福大学工程学院 VLF 电磁波研究组以及当地的一些老师共同研制成的空间天气监测仪, 它可以探测由太阳活动或其它干扰引起的电离层变化. 目前在斯坦福太阳中心的组织下, 全球各地共有近 100 台 SID 仪器不间断地监测着各地电离层突变情况, 所有的数据均上传到 <http://sid.stanford.edu/database-browser>. SID 监测仪接受从地球电离层反射回来的 VLF 电磁波, 通过记录 VLF 电磁信号的强弱来监测太阳活动对电离层的影响.

太阳通过两种机制影响地球. 第一是辐射. 太阳通常向各方辐射恒定的 X 射线和极紫外 (EUV) 射线. 当太阳发生耀斑时, 它会突然放射出更强的 X 射线和 EUV 射线. 这些射线以光速前进, 只需 8 min 就能抵达地球. 另一种机制是太阳喷射出大量等离子体态的物质, 称为日冕物质抛射. 这些物质流以约  $2 \times 10^6$  km/h 的速度从太阳涌向地球, 大约 72 h 就能到达. SID 监测仪可追踪太阳活动造成的能量变化, 这些来自太阳与宇宙射线的能量, 始终都在影响地球上 60 km 处的电离层. 由于太阳的能量或宇宙射线袭击导致电子从原子核脱离, 从而形成了电离层.

夜晚电离层可分为 E 层和 F 层. 在白天, 太阳的 X 射线和紫外线增加了电离层的电离度, 产生了 D 层, 也加强了 E 层, 并把 F 层分为两部分. 通常 D 层不够稠密, 不能反射无线电波. 所以, VLF 信号可以穿过 D 层, 并在 E 层反射, 然后返回穿过 D 层到达地面. 信号在穿越 D 层的时候损失了部分能量, 因此在白天接收到的信号要弱些. 当太阳耀斑发生时, D 层被更充分地电离, 从而可以反射信号, 因此太阳耀斑发生时信号变强<sup>[12]</sup>.

## 3 SID 监测仪和 VLF 发射点地理位置分析

我们采用的 SID 监测仪的中心频率为 19.8 kHz, 地点位于南京市 (东经  $118^{\circ}46'$ , 北纬  $32^{\circ}03'$ ), 上传到斯坦福大学太阳中心数据库的数据名称为 China-10. 监测仪所接受的 VLF 电磁波来源于澳大利亚 North West Cape (东经  $114^{\circ}02'$ , 南纬  $21^{\circ}08'$ ). 此次日全食带处于我国北纬  $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$  之间的东西方向的狭长地带. 从图 1 可见, 电磁波传播路径与日全食带几乎成  $90^{\circ}$  交叉, 而南京正处于交叉点的北边缘, 日全食期间南京所接受的 VLF 电磁波多数是经过日食带上方的电离层反射回地面的, 可以很好地反映日全食期间的电离层突扰, 其时间应和南京以南地区的日全食发生的时间相当.

## 4 数据确切性分析

由于各种空间天气现象对 VLF 信号均有一定的影响, 我们必须对所得数据的可靠性进行分析, 以确认接收到的信号异常是否由日全食引起.



图 1 日全食带与 VLF 传播路径

Fig. 1 The total solar eclipse region and the propagation path of very low frequency (VLF) signals

图 2 是 7 月 22 日的早 6 点到晚 6 点共 12 h 的信号强度演化曲线, 从图中可看出在日全食发生的近 3 h 内, VLF 信号与其它时间相比具有较大差异. 那么这是否确实是由日全食引起的变化, 还是只是其它干扰信号呢? 为了证明这一点, 我们将从以下几个方面说明.

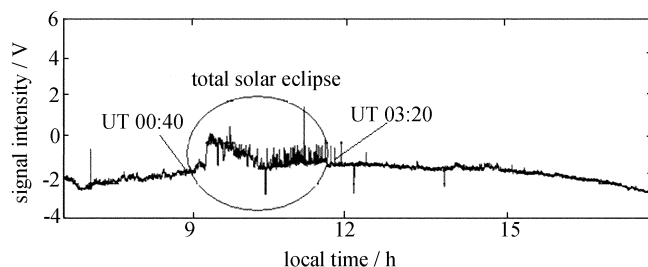


图 2 2009 年 7 月 22 日南京 — North West Cape 路径 VLF 信号强度曲线

Fig. 2 The curve of the VLF signal intensity at the route from North West Cape to Nanjing on Jul. 22nd 2009

我们在图 3 中列出日全食后两天白天的数据 (日食前一天即 21 日南京地区有雷雨天气故未列出). 从图 3 可以看出这两日信号平稳, 两天中对应时间内的信号强度相当, 两曲线的吻合度很高, 也没有长时间的电磁干扰.

然而这两天的信号曲线并不光滑, 仍有一些强度的突变, 那么这些变化是什么原因产生的呢? 通过长时间的观测, 我们发现 SID 信号突变通常有以下几种情况: 不明原因的电磁干扰、日出日落、太阳耀斑、雷电天气等, 这些因素的影响都有其特别的变化特

征. 比如, 电磁干扰通常表现为信号在短时间内变化, 又在短时间内恢复正常 (见图 4). 基于日全食期间的异变明显不同于电磁干扰的特征, 故可排除. 7 月 22 日南京及其以南地区并无雷电现象, 我们从 GOES 数据库中查得, 7 月 22 日没有 M 级以上的太阳耀斑, 再结合信号异常时间恰好与日全食时间吻合, 故判定该信号异常是由日全食引起的.

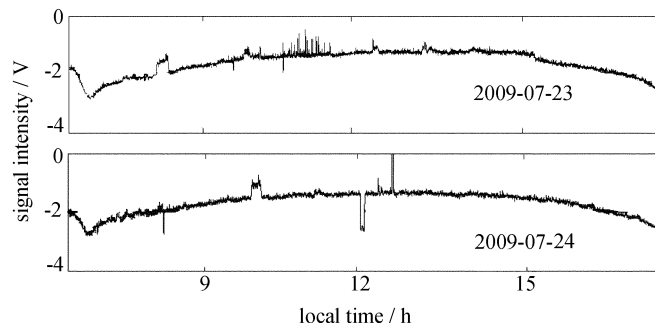


图 3 2009 年 7 月 23 日和 24 日南京 — North West Cape 路径信号强度曲线  
Fig. 3 The curve of the VLF signal intensity at the route from North West Cape to Nanjing  
on Jul. 23rd 2009 and Jul. 24th 2009

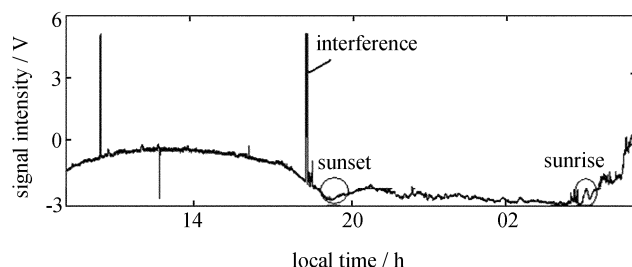


图 4 2009 年 4 月 10 日南京 — North West Cape 路径 VLF 信号强度曲线图  
Fig. 4 The curve of the VLF signal intensity at the route from North West Cape to Nanjing  
on Apr. 10th 2009

## 5 结论

我们将 22 日日全食期间的信号曲线 (图 2) 和前后几天同时间段信号曲线 (图 3) 作比较之后, 可以分析出以下几点结论:

(1) 日全食期间 VLF 信号异常增强, 有类似日出日落的效应

日全食期间信号曲线类似于日落、日出效应, 信号曲线呈现波峰状突起, 与南京地区的日落形状较为相似, 但变化更加剧烈. 在 08:40 (北京时间) 信号开始增强, 从 08:53 到 08:58, 信号快速从  $-1.113\text{ V}$  左右增加到最大值  $0.586\text{ V}$ , 增加幅度为  $1.699\text{ V}$ . 从早上日

出到日食前由于太阳照射信号强度在两个多小时内从  $-2.000\text{ V}$  左右增加到  $-1.113\text{ V}$ , 增幅为  $0.887\text{ V}$ , 日食造成的扰动使信号强度在短时间内的增幅是前两个小时的两倍. 我们再与 23 日同时间相比较, 在 23 日 08:58 信号强度则为  $-1.60\text{ V}$ , 两者相差  $2.15\text{ V}$ , 表明日全食期间 VLF 信号幅度变化十分明显.

### (2) 日全食期间 VLF 信号快速波动, 类似于雷电效应

从 10:07 至 11:19, VLF 信号强度变化剧烈, 类似于噪声, 与雷电期间信号特征相似. 变化范围介于  $-1.25\sim 0.00\text{ V}$  范围, 振动幅度达  $1.25\text{ V}$ , 而在正常情况下 VLF 信号谱线振荡范围只有  $0.05\text{ V}$  左右, 两者相差 25 倍. 图 5 给出的是 2009 年 9 月 25 日凌晨强雷暴雨期间的信号强度曲线, 在整个雷电发生期间的信号噪声也有明显增强.

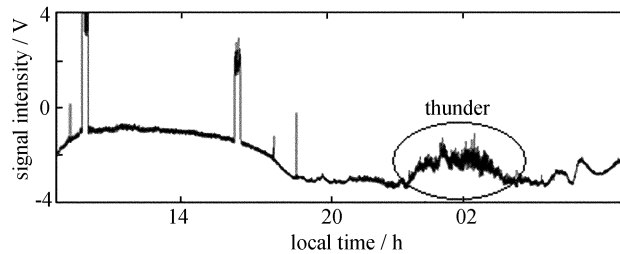


图 5 2009 年 9 月 25 日南京 — North West Cape 路径 VLF 信号强度曲线图

Fig. 5 The curve of the VLF signal intensity at the route from North West Cape to Nanjing on Sep. 25th 2009

### (3) 日全食对电离层的影响有提前和延迟现象

我们将 7 月 22 日和 23 日白天的数据信号叠加起来 (见图 6), 会发现一个有趣的现象. 在日全食发生前几小时 VLF 信号强度明显增大, 一直持续到日全食开始的突变, 到日全食结束后信号增大继续维持约 20 min, 此后两条数据曲线完全吻合, 表明在日全食发生之前电离层可能就已出现异常反应, 并持续到日全食结束之后.

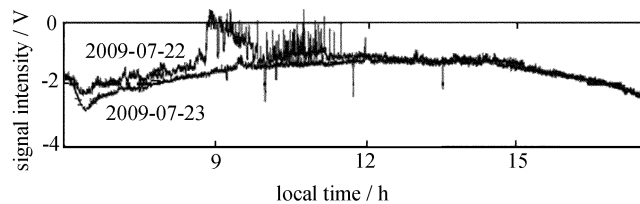


图 6 日全食当天与后一天 VLF 强度曲线叠加

Fig. 6 The curve of the accumulative VLF signal intensities on Jul. 22nd 2009 and Jul. 23rd 2009

为了证实这个想法, 我们找出河南新乡在 1997 年 3 月 9 日全食期间收集的数据<sup>[13]</sup>, 如图 7. 从图 7 中可以看出 3 月 9 日日出后不久发生日全食, 在日全食发生前, 也就是当地日出之前 VLF 信号强度要高于 3 月 8 日同时间强度. 在这两次观测中确实发现共同的现象, 表明电离层可能对一些自然现象的发生提供前兆. 另外, 在印尼海啸后, 有研

究小组发现日落信号被推迟了 9 min<sup>[14]</sup>.

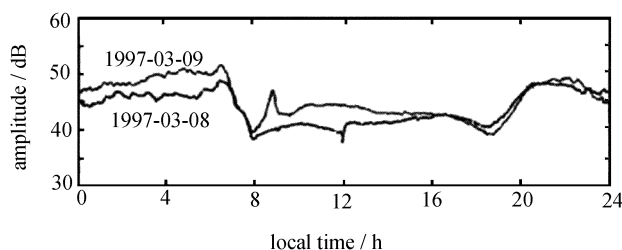


图 7 1997 年 3 月 9 日河南新乡 — Alpha 台 11.9 kHz 幅度曲线

Fig. 7 The amplitude curve at 11.9 kHz band at the Henan Xinxiang-Alpha station route on Mar. 9th 1997

## 6 影响机制设想

根据 VLF 传播的波导理论可知, VLF 电磁波在低电离层下缘和地面之间构成的同心球壳形波导中传播, 并称之为地 - 电离层波导传播. 当电离层下缘突然发生变化时, VLF 信号有明显的反映, 这也是为何日出和日落时 VLF 曲线大幅波动的原因.

当日全食发生时, 射向地面的太阳光被月球遮挡, 低电离层中的离子和电子的复合速度逐渐加快, 在 VLF 信号传播路径上, 低电离层的等效反射高度逐渐增大, 白天形成的 D 层突然减弱, 信号在穿越 D 层时, 衰减较小, 到达地面时信号增强. 在食甚之后的生光阶段, 太阳辐射引起的大气电离又逐渐加强, 使低电离层等效反射高度逐渐降低, D 层也逐渐加强, VLF 信号也会逐渐恢复到正常情况.

对于日全食前 VLF 信号的变化, 我们现在很难找到合适的解释, 但是知道日全食期间, 由于太阳、月球和地球共线, 会对地球产生强大的引力影响, 进而影响到岩石的形变等<sup>[15]</sup>, 那么这会不会对电离层产生影响呢? 现在已经有一些关于地壳运动对电离层影响的研究, 也有一些进展. 对日全食之前的电离层的影响我们还需要更多的实例来进行研究.

**致谢** 感谢审稿专家的宝贵意见, 感谢斯坦福大学 Sharon Murrell 博士和 ZHAO Jun-wei 博士提供 SID 监测仪, 感谢中国科学院紫金山天文台黄光力、刘炎同志对我校师生的指导.

## 参 考 文 献

- [1] 田育庶, 潘威炎, 余运超, 等. 中华人民共和国国家军用标准 (GJB/Z 70-95), 1996
- [2] Wait J R, Spies K P. NBS Tech Note, 1964, 300: 1
- [3] Schoute-Vanneck C A. JATP, 1974, 36: 489
- [4] 牛有田, 郝好贞, 陈建峰, 等. 河南师范大学学报 (自然科学报), 2008, 36: 54
- [5] Rycroft M J, Reeve C D. Natur, 1970, 226: 1126

- [6] Schaal R E, Mendes A M, Ananthakrishnan S, et al. *Natur*, 1970, 226: 1127
- [7] Jain S L, Subrahmanyam C V. *IJRSP*, 1979, 8: 348
- [8] Pant P, Mahra H S. *BASI*, 1985, 13: 80
- [9] de B K, Sarkar S K. *KodOB*, 1997, 13: 205
- [10] Kozlov V I, Karimov R R, Mullayarov V A. *RuPhJ*, 2007, 50: 617
- [11] Karimov R R, Kozlov V I, Mullayarov V A. *Ge&Ae*, 2008, 48: 240
- [12] Deborah S. *Research with Space Weather Monitor Data*. Stanford: Stanford Solar Center, 2007.5-6
- [13] 牛有田, 陈建峰, 郝好贞, 等. *河南师范大学学报 (自然科学版)*, 2009, 37: 2
- [14] Chakrabarti S K, Saha M, Khan R, et al. Unusual Sunset Terminator Behavior of VLF Signals at 17 kHz during the Earthquake Episode of Dec. 2004. *URSI General Assembly*, 2005
- [15] Freund F. *The Economist Newspaper and the Economist Group*, 2005-12-14

## Anomalous Variation of VLF Signals in the Total Solar Eclipse on Jul. 22nd 2009

ZHANG Xue-feng    DU Ruo-yin    GU Sheng-min    WU Tong    WANG You-ning  
(*Nanjing Tian Jia-bing High School, Nanjing 210037*)

**ABSTRACT** Using the sudden ionospheric disturbance (SID) monitor provided by Stanford University, the very low frequency (VLF) signals were observed in Nanjing during the total solar eclipse on Jul. 22nd 2009. It is found that the intensity of the VLF signals evidently increased during the total solar eclipse, similar to the effect of sunrise and sunset. The intensity of the VLF signals strongly fluctuated, similar to the phenomena of thunderbolt. Moreover, this intensity increased during both periods before and after the total eclipse. Based on the discussions of the reliability of the observational data and the comparison with the previous observations, the possible explanation for the variation of ionosphere before the total solar eclipse is proposed.

**Key words** eclipses, earth: atmosphere, methods: data analysis