

Comparison and Analysis between Solar Flares and Total Solar Eclipse on the VLF Signal Propagation

NIU You-tian, HE Xiao-nian, ZHANG Zhong-yuan, WANG Fang-yu, LI Ning-ning

1.College of Physics and Information Engineering, Henan Normal University,Xinxiang 453007,China

2.Henan Key Laboratory of Photovoltaic Materials,Xinxiang 453007,China

E-mail: niuyt22@sohu.com

Abstract: The solar flare and the total solar eclipse can bring great disturbances to the ionosphere, which could cause a series of geophysical phenomenas and may give influence to the people's producing and living, such as very low frequency signal sudden phase anomaly, short waves communication fadeout, the satellite location and communication abnormities, deathful hurt to astronauts, a great area power-cut accident, traffic safety accident, etc. The influences of the solar flares and the total solar eclipse are particularly compared and analyzed on the VLF signal propagation based on theory and experiment. On March 9, 1997, the peak VLF phase delay that was caused by the total solar eclipse on the VLF signals propagation path from Alpha system's main station to Xinxiang spite is about 16.7 cent cycles(cec), causing a increase of about 7.89km in the low ionosphere effective reflection height. But the solar flare can make the VLF signal phase a sudden advance, bringing a decrease in the low ionosphere effective reflection height. By the wave guide mode calculation, the total solar eclipse's influence on VLF phase is similarly like the anti-variety of VLF phase that is caused by the M4.9-class solar flare which peak flux of 1-8Å X-rays approximately equals to $4.9 \times 10^{-5} \text{W/m}^2$.

Keywords: solar flare; total solar eclipse; very low frequency (VLF); sudden phase anomaly(SPA); ionosphere

太阳耀斑和日全食对甚低频传播特性影响的对比分析

牛有田, 和小念, 张中远, 王方雨, 李宁宁

1.河南师范大学物理与信息工程学院, 新乡, 中国, 453007

2.河南省光伏材料重点实验室, 新乡, 中国, 453007

E-mail: niuyt22@sohu.com

【摘要】 太阳耀斑和日全食均对地球上空的电离层带来很大的扰动, 能引起一系列的地球物理现象, 给人们的生活带来影响, 比如造成甚低频(VLF)信号相位异常、短波通信中断、卫星定位及通信异常、对宇航员造成致命的伤害、可能引起大范围停电事故、可能造成交通安全事故等。本文基于理论和试验两方面详细对比分析了太阳耀斑和日全食对 VLF 信号传播特性的影响。1997 年 3 月 9 日, 在 Alpha 系统主台-新乡接收点的 VLF 信号传播路径上, 日全食引起的 VLF 相位滞后峰值约为 16.7cec(百分周), 造成低电离层有效反射高度比正常情况上升了大约 7.89km。而太阳耀斑则引起 VLF 信号相位超前, 造成低电离层有效反射高度下降。经过波导模计算, 日全食对 VLF 相位的影响类似于 M4.9 级的太阳耀斑(1-8Å X 射线峰值流量为 $4.9 \times 10^{-5} \text{W/m}^2$) 对 VLF 相位的影响的反变化。

【关键词】 太阳耀斑; 日全食; 甚低频; 相位突然异常; 电离层

1. 引言

我们的地球是太阳系中的一个行星, 而月球作为地球的卫星又绕地球运行。太阳、地球和月球三者之间相对位置不同带来许多有意思的天文现象, 如月亮

的阴晴圆缺、太阳的东升西落、海水的潮起潮落。特别是当三者处于同一条直线上且月球在太阳和地球之间时, 就发生了日食现象。除了这些天象之外, 太阳作为地球的能量源泉, 给地球带来光明。太阳发出的 X 射线和 Lyman- α 射线电离大气层形成了电离层, 另外, 宇宙射线也是电离层的电离源。我们知道, 电离

基金项目: 国家自然科学基金(49070217)资助项目

Fund: National Natural Science Foundation(49070217)

层自下向上主要分为 D、E、F1 和 F2 四层。甚低频 (VLF, 10kHz~30kHz) 无线电信号主要用于全球远距离无线电导航、超远距离战略可靠通信、定时、低电离层探测、电离层骚扰预报以及地震预报等领域, 主要在地球表面与低电离层下缘之间形成的波导中传播。其传播特性受地面电特性、电离层特性和电磁场等的影响。由于地球磁场的存在, 电离层是一个各向异性的介质, 并与太阳天顶角、太阳上发生的一些事件有关系, 如受太阳耀斑、太阳高能带电粒子等的影响。因此, VLF 信号的传播十分复杂。文献[1,2,3]研究了 VLF 信号在地-电离层波导中传播的特点, 文献[4]研究了太阳耀斑对 VLF 信号传播的影响, 文献[5,6]研究了日出、日落对 VLF 信号信号传播的影响, 文献[7]探究了 VLF 信号的相位和幅度对日全食的影响。本文基于 VLF 观测数据, 详细比较分析了在发射台和接收点完全一样的情况下, 太阳耀斑和日全食对 VLF 信号传播影响的差异, 并根据波导模理论计算了和日全食影响相反的太阳耀斑的级别。

2. VLF 观测系统

甚低频信号观测系统如图 1 所示。我们在河南省新乡市接收点 (35.31°N, 113.89°E) 用 VLF 信号接收机接收俄罗斯 Alpha 甚低频导航系统三个发射台 (克拉斯诺达尔的西副台、新西伯利亚的主台、哈巴罗夫斯克的东副台) 的信号。Alpha 甚低频信号为频率分别为 11.9kHz、12.6kHz 和 14.9kHz 的连续波。VLF 信号接收机每 3 分钟记录一组 VLF 信号的幅度、相位和信噪比数据, 并存放在硬盘上, 便于以后的处理分析。观测系统的测相精度为 $\pm 1\mu\text{s}$ 。图 2 显示的是 1997 年 3 月 9 日日全食的日食带^[8]及观测试验系统的 VLF 传播路径示意图。我们用计算地球表面上任意两点大圆距

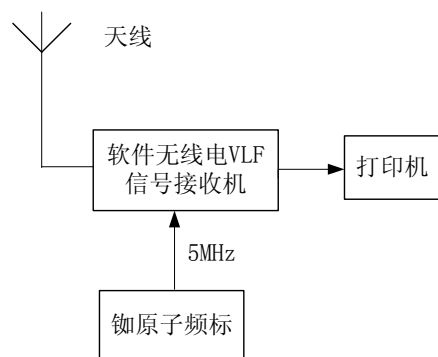


Figure 1. VLF signal observation system scheme

图 1 甚低频信号观测系统示意图

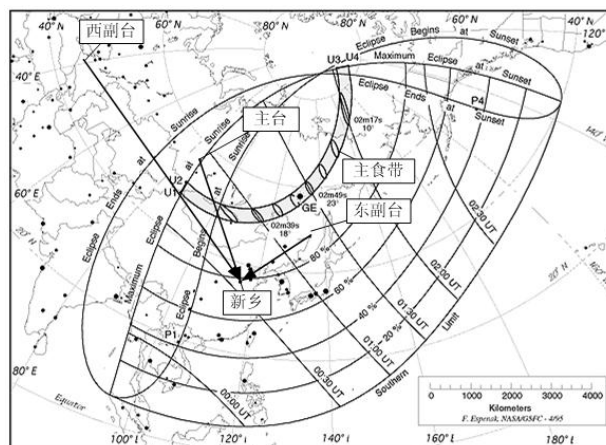


Figure 2. VLF signal propagation path scheme

图 2 VLF 信号传播路径示意图

离的公式求得西副台、主台和东副台到新乡接收点的距离分别约为 6291.2km、3187.7km 和 2462.1km。

3. 试验结果

太阳耀斑按对 VLF 信号相位的影响, 一般情况下可分为急始型和缓变型。急始型太阳耀斑在很短时间内使得 VLF 的相位变化量到达峰值, 而缓变型耀斑则比较缓慢地使得 VLF 相位变化量达到最大。1999-08-04 13:57LT (Local Time) 开始发生了一个急始型太阳耀斑, 1999-08-18 17:36LT 开始发生了一个缓变型太阳耀斑。1997-03-09 7:54LT 开始出现了日全食现象, 其最大日食带正好处于 Alpha 系统主台-新乡的 VLF 传播路径上。我们的 VLF 接收机记录下了这次日全食对 VLF 信号传播的影响。图 3~图 5 中显示了分别在 Alpha 系统主台、西副台和东副台到新乡观测点三条 VLF 传播路径上, 急始型和缓变型太阳耀斑以及日全食对 Alpha 甚低频 11.9kHz 信号的影响。从图中我们可以看出, 太阳耀斑和日全食对 VLF 信号传播的影响在相同发射台和接收点的情况下有着非常明显的不同。

4. 分析和讨论

低电离层的有效反射高度, 白天在夏秋季从地面起约为 72km, 冬春季约为 70km; 夜间约为 90km^[3]。VLF 信号的传播特性多用波导模的理论来解释^[1,2,8]。当太阳活动平静时, VLF 在较远的距离上一阶模占优势, 其他高价模由于衰减很大而可以忽略不及, 因此, VLF 相位和幅度的变化比较平稳, 如图 3~图 5 中 1997-03-08 的情况。

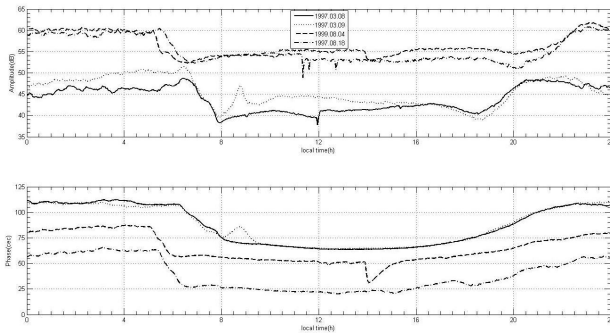


Figure 3. The phase and amplitude measurement curves of the 11.9kHz signals from Alpha main station to Xinxiang

图3 Alpha 主台-新乡 11.9kHz 信号相位和幅度实测曲线图

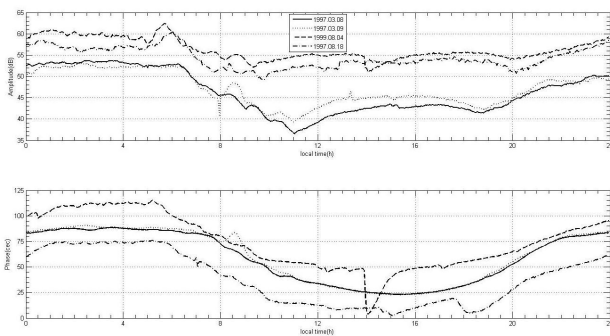


Figure 4. The phase and amplitude measurement curves of the 11.9kHz signals from Alpha west substation to Xinxiang

图4 Alpha 西副台-新乡 11.9kHz 信号相位和幅度实测曲线图

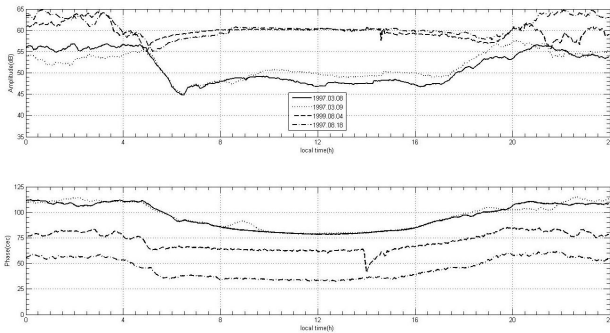


Figure 5. The phase and amplitude measurement curves of the 11.9kHz signals from Alpha east substation to Xinxiang

图5 Alpha 东副台-新乡 11.9kHz 信号相位和幅度实测曲线图

当太阳耀斑爆发时,太阳喷射大量的X射线和高能粒子。X射线以光速在8.3分钟后到达地球,造成电离层的电离度突然增大,电子浓度突然增大,即引起了所谓的电离层突然骚扰(Sudden Ionospheric Disturbance, SID)事件,低电离层的有效反射高度下降,导致在地-电离层波导中传播的VLF信号的相位

突然超前,即发生了SPA(Sudden Phase Anomaly)事件。如图3~图5中,1999-08-04从13:57LT开始和1999-08-18从17:36LT开始的VLF相位变化的情况。

而当日全食发生时,在日食带所扫过的一段VLF传播路径上,在初亏到食既阶段相当于日落,在食既-食甚-生光阶段相当于短暂的夜晚,在生光到复圆阶段类似于日出。当日食发生时,太阳光被月球部分遮挡,太阳光一点点减弱,对电离层的电离效应逐渐减弱,而电离层中电子与离子的复合速度不断加快,电离层的动态平衡被打破,电离层有效反射高度上升,引起VLF信号的相位滞后,当食甚时达到峰值。当日全食生光时,太阳光一点点在加强,对电离层的电离效应逐渐增强,电离层有效反射高度又下降至常态水平,VLF相位又渐渐恢复为原来的样子。

根据VLF波导模传播理论^[1,2,3,7],相速 v_p (单位m/s)可以写为:

$$v_p \approx v_c \left(1 - 0.36 \frac{h_0}{a} + \frac{v_c^2}{32 f^2 h_0^2} \right) \quad (1)$$

式中, v_c 为自由空间的光速,等于 2.997925×10^5 km/s^[9], h_0 为低电离层的有效反射高度, f 为VLF信号的频率, a 为地球的平均半径,约等于6371km。

VLF的相位变化 $\Delta\phi$ (单位s)可由下式给出:

$$\Delta\phi = d \left(\frac{1}{v_p'} - \frac{1}{v_p} \right) \quad (2)$$

式中, d 为发射台和接收点之间的地球大圆距离, v_p 为正常情况下的相速, v_p' 为发生相位异常时的相速。

由式(2),我们根据相位变化 $\Delta\phi$ (单位s),可求得发生相位异常时的相速 v_p' 为:

$$v_p' = \frac{d \cdot v_p}{\Delta\phi \cdot v_p + d} \quad (3)$$

有效反射高度的变化量 Δh_0 与相位的变化量 $\Delta\phi'$ (弧度)有如下关系:

$$\Delta h_0 = \frac{h_0 \lambda}{2\pi \cdot d \left[0.36 \frac{h_0}{a} + \left(\frac{\lambda}{4h_0} \right)^2 \right]} \cdot \Delta\phi' \quad (4)$$

式中, $\Delta\phi' = 2\pi f \cdot \Delta\phi$ 为以弧度来表示的相位差, $\lambda = v_c / f$ 为VLF信号的波长。因此, Δh_0 与相位变化 $\Delta\phi$ (单位s)之间的关系为:

$$\Delta h_0 = \frac{h_0 v_c}{d \left[0.36 \frac{h_0}{a} + \left(\frac{v_c}{4h_0 f} \right)^2 \right]} \cdot \Delta \phi \quad (5)$$

由于 Alpha 主台-新乡接收点的路径处于 100% 日全食带上, 而其他两个台-新乡接收点的路径处于 80% 日全食带上, 即这两条路径上只发生了日偏食, 因而我们计算比较太阳耀斑和日全食对甚低频信号传播影响时以主台-新乡接收点的观测数据为依据。通过计算, 1999-08-04 从 13:57LT 开始的太阳耀斑 VLF 相位超前峰值约为: 8.3cec (百分周), 该太阳耀斑引起的低电离层有效反射高度比正常情况下降大约 3.92km。1999-08-18 从 17:36LT 开始的太阳耀斑 VLF 相位超前峰值约为: 20cec (百分周), 该太阳耀斑引起的低电离层有效反射高度比正常情况下降大约 9.45km。1997-03-09 日全食引起的 VLF 相位偏移峰值约为: 16.7cec (百分周), 造成低电离层有效反射高度比正常情况上升了大约 7.89km。通过反推, 在 Alpha 主台-新乡接收点的路径上, 日全食对 VLF 相位的影响类似于 1-8Å X 射线峰值流量为 M4.9 级 ($4.9 \times 10^{-5} \text{W/m}^2$) 的太阳耀斑对 VLF 相位的影响的反变化。

5. 结束语

太阳耀斑和日全食均对地球上空的电离层带来很大的扰动, 能引起一系列的地球物理现象, 给人们的生活带来影响。特别是太阳耀斑, 除了给甚低频信号传播带来影响, 造成甚低频导航定位精度严重下降、通信受影响外, 还造成短波通信质量严重下降、甚至通信中断; 造成卫星通信质量下降, 卫星无线电定位误差增大。伴随太阳耀斑喷射的高能带电粒子, 能对卫星、宇宙飞船及其上的设备造成损害, 减低使用寿命; 可对出舱活动的宇航员造成致命的伤害; 引起的地磁暴能造成电力网故障和大范围的停电事故; 引起的电离层暴可能带来短波通信中断事件。日全食除了造成低频、甚低频、卫星导航定位误差增大, 引

起短波通信质量下降外, 还可能引起交通安全事故等。日全食和太阳耀斑对 VLF 信号相位的影响变化相反。经过我们的计算, 在 Alpha 系统主台到新乡观测点这条 VLF 信号的传播路径上, 日全食对 VLF 信号相位造成的影响大约与 1-8Å X 射线峰值流量为 M4.9 级的太阳耀斑对 VLF 信号相位带来的影响的反变化相当。

致谢

李建龙和王祥康参加了试验数据的测试, 作者在此表示深深的谢意!

References (参考文献)

- [1] Wait J. R., Spices K. P. Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves[R]. National Bureau of Standards, Technical Note No. 300, 1964.
- [2] Budden K. G. The Waveguide Mode Theory of Wave Propagation[M]. London: Cambridge University Press, 1961.
- [3] TIAN Yu-shu, PAN Wei-yan, YU Yun-chao, *et al.* VLF Radio System Radio Wave Strenth and Phase Calculation Method[R]. The People's Republic of China National Military Standards (GJB/Z 70-95), 1996.
田育庶, 潘威炎, 余运超, 等. 甚低频(VLF)无线电系统电波场强与相位计算方法. 中华人民共和国国家军用标准(GJB/Z 70-95), 1996.
- [4] Wayne M. McRae, Neil R. Thomson. Solar flare induced ionospheric D-region enhancements from VLF phase and amplitude observations[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2004, 66: 77-87.
- [5] Crombie D. D. Further Observations of Sunrise and Sunset Fading of Very-Low-Frequency Signals[J]. Radio Science, 1966, 1(1): 47-51.
- [6] Schoute-vanneck C. A. VLF Radio Transmissions at Sunrise[J]. Journal of Atmosphere and Terrestrial Physics, 1974, 36: 489-499.
- [7] NIU You-tian, CHEN Jian-feng, HAO Hao-zhen, WANG Hai-bo, ZHANG Zhong-yuan. Observation and Analysis of Total Solar Eclipse of 1997 March 9 Using VLF Signal[J]. Journal of Henan Normal University(Nature Science), 2009, 37(2): 64-66.
牛有田, 陈建峰, 郝好贞, 王海波, 张中远. 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.
- [8] NASA. Total Solar Eclipse of 1997 March 9[Z]. NASA RP1369, <http://umbra.nascom.nasa.gov/eclipse/970309/text/maps.html>, 2010-03-18.
- [9] Wait A. D. VLF Radio Engineering[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1973.
沃特 A. D.[美]. 甚低频无线电工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1973.