

利用掩星和地基 GPS 研究日食电离层效应

王泽民^{1,2} 安家春^{1,2} 孙伟^{1,3} 赵莹^{1,4}

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 武汉大学中国南极测绘研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(3 武汉市勘测设计研究院,武汉市江汉区万松园路 209 号,430022)
(4 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘要:21 世纪最长的一次日全食于 2009-07-22 发生,从亚洲东部一直延伸到太平洋地区,同时,日食后期开始伴随着一次中等强度的磁暴。本文利用 COSMIC 掩星 GPS 数据反演了食甚时刻电子密度变化情况,利用武汉 CORS 地基 GPS 数据反演了局部 TEC 时序变化情况,并分析了日食电离层效应的物理机制。
关键词:日食;掩星;电子密度;TEC
中图法分类号:P228.42

日食期间,电离层的变化非常复杂,太阳辐射通量的减少会引起光致电离作用的减弱,从而引起电离层中电子密度的降低。底部电离层主要受光致电离的影响,但 F2 层及顶部电离层还受到等离子体重新分布过程的影响^[1]。同时,来自日冕的具有更短波长的辐射依然对电离层过程有所贡献^[2]。此外,日食期间对流层的温度降低、中性风、成分变化等也会影响电离层的响应^[3]。所以,针对日食期间电离层的响应,国内外诸多学者利用各种电离层探测手段及模拟方法,作了大量的分析工作^[1-5]。

GPS 掩星观测反演电子密度剖面,具有全天候、全球覆盖、高垂直分辨率等其他电离层探测手段所不具备的优点,尤其能够弥补海洋、极地等特殊区域的电离层观测资料的不足^[6]。而地基 GPS 反演电子总含量(total electron content, TEC)是现阶段提取 TEC 值精度最高的方法。本文分别利用 COSMIC 掩星 GPS 数据和地基 CORS 网 GPS 数据来共同分析 2009-07-22 发生在亚洲东部和太平洋西部的日全食,进而分析了日食期间电离层效应的物理过程。

2009-07-22 日食在 00:53 UT 开始于印度,进入中国的时间是 01:15 UT,离开中国的时间为 01:41 UT。然后转向太平洋,于 04:18 UT

离开地球,总共持续时间 3 h 25 min,日全食带长约 15 150 km。07-17~07-27 的时间里,只有日食当天发生了磁暴。这次磁暴开始于 22 日,23 日之后恢复平静,而主相期在 22 日 2 时至 12 时。磁暴的极大时间略滞后于食甚,并在日食结束后的数小时内逐渐消退。

1 掩星数据处理及分析

1.1 电离层掩星反演方法

Abel 积分是目前掩星 GPS 电离层探测中最常用的反演方法。由于 GPS 信号位于 L 波段,即使电离层发生剧烈扰动,所造成的弯曲角仍然很小,可以将传播路径近似为直线。同时,引入局部球对称假设,为了避免外推 LEO 轨道以上的电子密度对掩星观测的影响,利用非掩星段的观测数据来修正掩星段的观测数据^[7]。获得改正 TEC 后,利用 Abel 积分反演技术即可获得不同高度上电离层的电子密度,计算式为:

$$N_e(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{r_{\text{LEO}}} \frac{d(\text{TEC}(p))/dp}{\sqrt{p^2 - r^2}} dp \quad (1)$$

式中, p 为碰撞参数;TEC(p)为随碰撞参数变化的 LEO 轨道高度以下的 TEC。

在式(1)中存在下限奇点,使用 Hϕeg 提出的

变换法^[6],引入变换 $\sqrt{\xi^2-r^2}=-a_{\text{ref}}\ln(\eta)$,可得:

$$N_e(r)=-\frac{1}{\pi}a_{\text{ref}}\int_b^1\frac{d(\text{TEC}(\xi))/d\xi}{\xi\eta}d\eta\quad(2)$$

式中, $a_{\text{ref}}=2\,000\text{ km}$, $b=\exp(-\sqrt{r_{\text{LEO}}^2-r^2}/a_{\text{ref}})$ 。式(1)中的下限奇点成为式(2)中的积分上限,奇异性不再存在。

利用双频 GPS 掩星数据反演电子密度廓线时,因为要计算 TEC 的微分,所以要用到拟合或插值的方法。由于拟合相当于平滑过程,对于电离层不规则现象无法保留,本文使用的是三次样条插值的方法^[6],保留了电离层不规则的信息,反演结果更加接近实际情况。

1.2 结果分析

由于掩星事件不存在严格的时空重现性,很难定量地描述某地上空的日食日和参考日的电离层参数变化,同时,在较小的区域内一天当中的掩星事件还是比较少,这种少体现在空间位置的分布不均和时段的分布不均。本文以日食期间中国区域内的掩星事件为基准,选取日食前后 12 d 的时间里,与其发生时间相差在 1 h 内、经纬度相差在 10°内的掩星事件,结果见表 1,其中所给出的经纬度和时间是获得 F2 层峰值参数时的坐标和时间。

表 1 中国区域内的重复掩星事件

Tab. 1 Repeated Occultation Events in China

掩星事件编号	纬度/(°N)	经度/(°E)	UT	日期
事件一	25.7	102.4	01:14	07-22
事件二	25.0	110.3	01:47	07-17
事件三	26.4	108.5	01:36	07-27
事件四	21.4	105.6	01:52	07-27

在表 1 中,以事件一为日食日的结果,以事件二、三、四为参考日的结果。虽然事件四的经度和事件一最为接近,但其纬度较低,而电离层电子密度分布的纬度效应远大于经度效应,同时,从时间上来看事件四和事件一相差最多,所以,事件二和事件三可以更好地描述参考日的电离层变化。根据事件一所处的坐标,此处发生了日偏食,食分约为 0.9,最大食时刻约为 01:10 UT^[8],可见事件一的发生时刻基本和食甚时刻一致。

图 1 给出了 4 次掩星事件所反演得到的电子密度廓线图,可以看出,4 组电子密度廓线图都较好地反映了电子密度的垂直变化特征,相对于传统的电离层垂测仪,利用掩星的方法可以获得 E 层和 F 层之间谷区的信息,以及 F 层以上的顶部电离层的信息。事件四由于纬度较低,NmF2 较大,但更明显的是事件一与其他三组掩星事件的

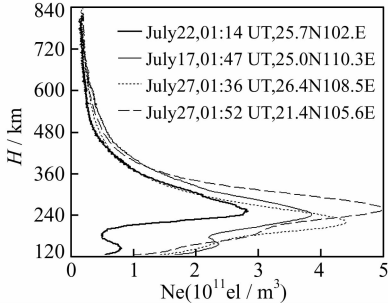


图 1 不同掩星事件的比较

Fig. 1 Comparisons of Different Occultation Events

差别。一般来说,E 层的高度约在 90~150 km,可以看出,从 E 层的峰值高度开始,事件一的电子密度大大低于参考日的其他事件,NmE 相对于参考日下降了 60% 以上,随着高度的增加,电子密度的相对下降幅度逐渐减小,在 F2 层峰值处,NmF2 也下降了 30% 左右,到了质子层,差别就很小了。

Jakowski^[1]利用垂测仪和地基 GPS 分析了欧洲地区 2005 年 10 月 3 日和 1999 年 8 月 11 日的日食,结果显示,底部电离层临界频率最小值和食甚时刻重合,但 foF2 最小值滞后约半小时,TEC 最小值同样也滞后约半小时。Chen^[5]利用武汉的垂测仪以及武汉和苏州的斜向探测资料分析了此次日食期间偶发 E 层(Es)的情况。在 7 月 22 日和 23 日早晨爆发了密集的 Es,不断抬升并四处散播的电离过程几乎遮蔽了整个天空,以至于在 F 层没有收到回波。由于现阶段掩星事件数量依然较少,无法像垂测仪那样给出某一位置上空电离层参数的时序变化,但掩星观测可以给出整个电离层各层的电子密度值,在分析日食期间电离层效应有其独特的优势。不过由于掩星反演的底部电离层精度较低,而 Es 一般出现在 100 km 左右的高度,所以本文没有比较 Es 的变化特征。从图 1 中所示 4 次掩星事件的比较可以看出,日食食甚时刻电离层各层均出现了电子密度的下降,但各层下降的幅度并不相同。电离层的物理过程分为以下两大类:一类过程导致电离物的产生和消失,称为光化学过程;另一类引起电离物的运动,称为运输过程。在底部电离层中,光化学过程起控制作用,而 F 层则处在光化学控制和输运控制的过渡高度。所以,底部电离层受光致电离作用较为明显,在食甚时刻响应速度较顶部电离层快,而 F 层及顶部电离层受到扩散作用所带来的影响需要一定的作用时间。

2 区域 TEC 求解及分析

2.1 单层模型的处理方法

应用地基 GPS 研究电离层时,通常引入单层模型来代替整个电离层,即假设所有的自由电子都集中在某一高度处的一个无限薄球面上,通常在 200 km~400 km 的范围内,电离层中的自由电子密度达到最大,本文单层高度选择在 250 km。由于计算的是穿刺点处的 VTEC 值,投影函数选择 $mf(z')=1/\cos(z')$,其中 z' 是穿刺点处的天顶距。

由于伪距观测值的精度较低,本文采用相位平滑伪距的方法来提高 TEC 求解精度,这里给出第 N 个历元的 TEC 公式:

$$\text{TEC}_N = 9.524\,37 \times \Delta\Phi_N + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 9.524\,37 \times$$
$$(\Delta P_i - \Delta\Phi_i) + 9.52\,437 \times (\Delta B^S + \Delta B^R)$$

(3)

式中, $\Delta\Phi$ 是修复周跳后的双频相位观测值之差; ΔP 是双频伪距观测值之差; ΔB^S 是卫星的硬件延迟; ΔB^R 是接收机的硬件延迟。

有关学者提出了许多基于 GPS 观测值的电离层模型,包括全球模型和区域模型。本文中,测站范围在较小的区域,所以选取低阶球函数模型,其具体表达如下^[9]:

$$\text{VTEC} = \sum_{n=0}^N \sum_{k=0}^n (A_n^k \cos k\lambda' + B_n^k \sin k\lambda') P_n^k(\cos\varphi_m)$$

(4)

式中, N 为低阶球函数的阶数; A_n^k 、 B_n^k 为待估系数; λ' 为过穿刺点的经线与过地心太阳连线的经线之间的夹角; $P_n^k(\cos\varphi_m)$ 为缔合勒让德函数;

表 2 武汉地区的位置和日食基本情况

Tab. 2 General Information of Wuhan and Solar Eclipse

地点	纬度(°N)	经度(°E)	食分	初亏	食既	食甚	生光	复圆
武汉	30.5	114.4	1.029	00:14:57	01:24:08	01:26:47	01:29:28	02:46:27

的日食日和参考日区域 TEC 的差分图,其中参考日 TEC 值为日食日前后两天的 TEC 值取平均。图 3 中的空间范围是 27°N~33°N, 111°E~119°E, 空间分辨率为 1°×1°的网格。时间范围是 00:00 UT~03:45 UT, 时间分辨率是 15 min。

可以看出,在武汉地区可以观察到日食引起的明显变化,且变化和日食发生的时刻相吻合,食甚时刻 TEC 下降达到最大值,为 4~5 TECU。这种一致性主要是由于 E 层和 F1 层中的光致电

φ_m 为地磁纬度。

作为求解 TEC 的最大误差源,硬件延迟必须要在解算前剔除。目前硬件延迟的分离方法很多,都需要借助于比较准确的电离层模型,并用后处理的方法,按单天解的方式进行处理。对于卫星的硬件延迟,本文直接读取各分析中心结果加权处理得到的最终结果,对于各 GPS 站的接收机硬件延迟,本文采用的方法是单层模型与硬件延迟联合解算的方法。综合式(3)和式(4),所求系数为低阶球函数模型系数和接收机硬件延迟。

2.2 结果分析

武汉 CORS 由 8 个基准站组成,再加上武汉地区的 IGS 站 WUHN,所以共有 9 个 GPS 站,位置见图 3。数据为 07-21~07-23 连续 3 d 的 GPS 双频观测值,采样率为 30s。其中 07-21 和 07-23 的结果取平均作为相对于日食日的参考日结果。

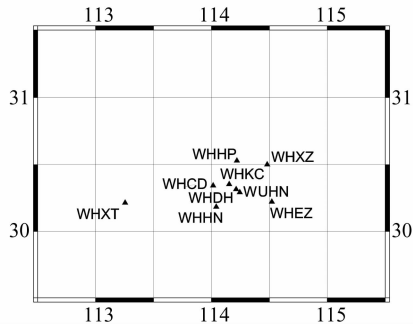


图 2 武汉 CORS 网和 WUHN 站分布
Fig. 2 Distribution of Wuhan CORS and WUHN Station

为了详细观察日食期间武汉地区的电离层响应,表 2 给出了武汉地区的坐标、食分及日食各事件的发生时间^[8]。

图 3 是利用武汉 CORS 网和 WUHN 站计算

离作用减小。但是,从 01:30 UT~02:00 UT 这 3 幅图和 01:00 UT~01:30 这 3 幅图作比较,可以明显看出食甚后 TEC 恢复的速度慢于食甚前 TEC 下降的速度,这主要是由于 F2 层和顶部电离层的作用,因为电离物的输运过程使其电子密度的减小滞后于食甚时刻。由于此次日食伴随着中等强度的磁暴发生,武汉地区在复圆时刻 TEC 值就已经恢复至正常水平,随后 TEC 值进一步增大,此时可能以磁暴造成的影响为主。

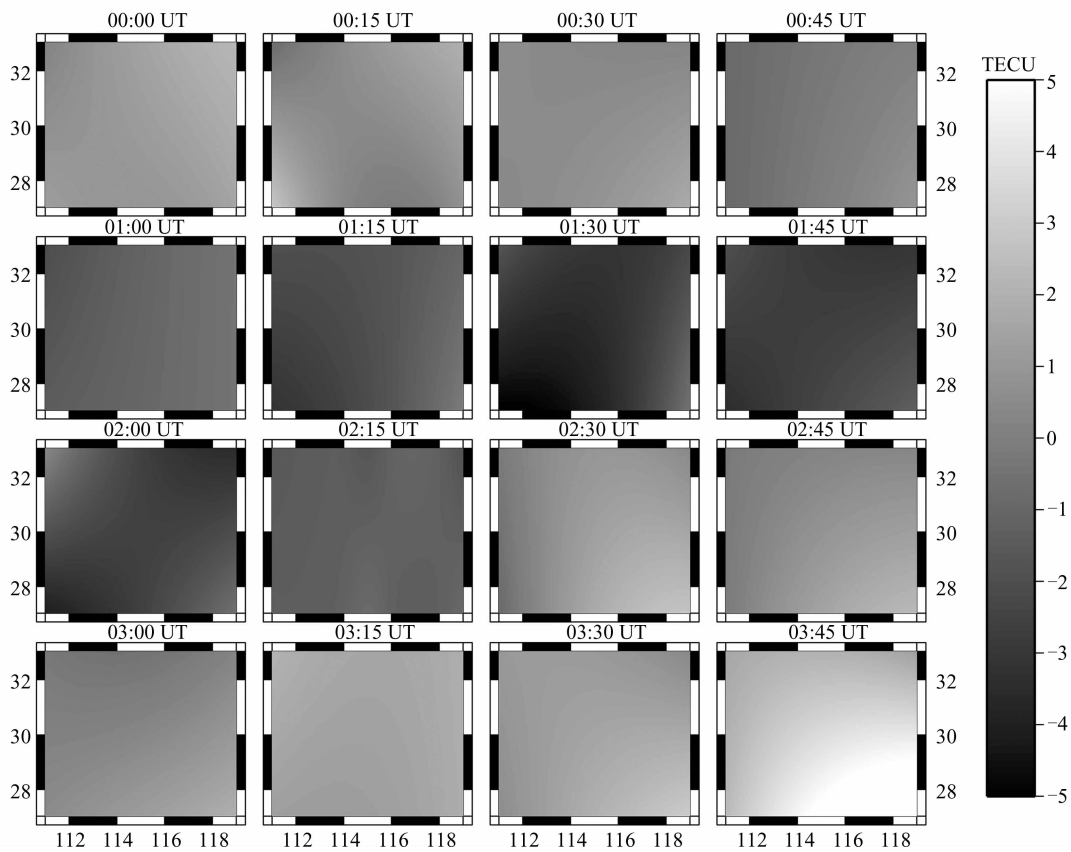


图 3 日食日和参考日 TEC 差分图

Fig. 3 Map of Differential TEC Between Solar Eclipse Day and Reference Day

沿着日食自西向东的运动方向,有较为明显的东西方向梯度变化。同时,在南北方向也有梯度变化,在日食期间,南北方向没有明显的差别,而日食结束后,低纬地区 TEC 上升得更多,说明低纬地区的电离层受到日食以外的因素的影响较大。日食与纬度的相关性也已经得到不少学者的证实,Tsai^[10]在研究 1995-10-24 和 1997-03-09 的日食中发现低纬地区 TEC 最小值滞后食甚时刻长达 2 h,Le^[11]在分析了大量日食分布地区的基础上得出结论,相对于中纬地区,日食在低纬地区电离层的作用较小,因为从赤道向极区的电子输送过程对低纬地区的 F2 层有重要影响,也就是说,在 F2 层,喷泉效应的影响远大于日食的影响。虽然本文所选的武汉地区范围较小,在日食期间没有明显的南北梯度出现,但日食后期磁暴开始,此时南北梯度的出现也从侧面说明了低纬地区受日食影响较小。

3 结 语

针对 2009-07-22 的日全食,本文利用 COSMIC 掩星数据和 CORS 网 GPS 数据分别获得了

日食期间的电子密度廓线图和区域 TEC 图相对于参考日的变化。结果显示,武汉地区(27°N~33°N,111°E~119°E)上空 TEC 值降幅最大达 4~5 TECU,食甚后 TEC 恢复的速度小于食甚前 TEC 下降的速度,因为 F2 层和顶部电离层受到光致电离和运输过程的共同作用,其电子密度最小值滞后于食甚时刻。而且沿着日食前进的方向有相应的东西方向的 TEC 梯度出现,在日食后期,TEC 值完全恢复,但磁暴开始产生,TEC 分布出现了南北方向的梯度,主要是由于低纬电离层相对于日食的影响更受赤道喷泉效应的控制。掩星观测反演的食甚时刻电子密度廓线图也反映了日食期间电离层的变化,NmE 下降最大达 60%,NmF2 也下降了 30%左右,随着高度的增加下降幅度变小,说明食甚时刻底部电离层受光致电离作用更为明显。但是,由于掩星事件没有严格意义的时空分辨率,本文采用较小的时空范围内的所有掩星事件所得结果,给出电子密度廓线图,在尽可能减弱所引入的误差的情况下,侧重于定性分析电离层各层的日食效应。

致谢:感谢 CDDAC 提供 COSMIC 观测数据,感谢武汉市勘测设计研究院提供 CORS 网

数据。

参 考 文 献

[1] Jakowski N, Stankov S M, Wilken V, et al. Ionospheric Behavior over Europe During the Solar Eclipse of 3 October 2005 [J]. J Atmos Sol Terr Phys, 2008, 70(6): 836-853

[2] Davis C J, Clarke E M, Bamford B A, et al. Long Term Changes in EUV and X-ray Emissions from the Solar Corona and Chromosphere as Measured by the Response of the Earth's Ionosphere During Total Solar Eclipses from 1932-1999 [J]. Ann Geophys, 2001, 19: 263-273

[3] Mueller-Wodarg I C F, Aylward A D, Lockwood M. Effects of a Mid-latitude Solar Eclipse on the Thermosphere and Ionosphere: a Modelling Study [J]. Geophys Res Lett, 1998, 25: 3 787-3 790

[4] Ding F, Wan W X, Ning B Q, et al. GPS TEC Response to the 22 July 2009 Total Solar Eclipse in East Asia[J]. J Geophys Res, 2010, 115(A7): 15 113-15 121

[5] Chen G, Zhao Z, Zhou C, et al. Solar Eclipse of 22 July 2009 on Sporadic-E[J]. Ann Geophys, 2010, 28, 353-357

[6] 赵莹, 张小红. COSMIC 掩星观测数据反演电离层电子密度廓线[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(6): 644-648

[7] 吴小成, 胡雄, 张训械, 等. 电离层 GPS 掩星观测改正 TEC 反演方法[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2): 328-334

[8] Espenak F, Anderson J. Total Solar Eclipse of 2009 July 22 [R]. NASA/TP-2008-214169, NASA Technical Publication, 2008

[9] 柳景斌, 王泽民, 章红平, 等. 几种地基 GPS 区域电离层 TEC 建模方法的比较及其一致性研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(5): 479-483

[10] Tsai H F, Liu J Y. Ionospheric Total Electron Content Response to Solar Eclipses[J]. J Geophys Res, 1999, 104(A6): 12 657-12 668

[11] Le H J, Liu L B, Yue X N, et al. Latitudinal Dependence of the Ionospheric Response to Solar Eclipses[J]. J Geophys Res, 2009, 114(A7): 14 072-14 083

第一作者简介:王泽民,教授,博士生导师。现主要从事空间大地测量及地球动力学研究。
E-mail:zmwang@whu.edu.cn

Analysis of Ionospheric Effect During a Solar Eclipse Using
GPS Observation of Occultation and Ground Stations

WANG Zemin^{1,2} AN Jiachun^{1,2} SUN Wei^{1,3} ZHAO Ying^{1,4}

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(2 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(3 Wuhan Geotechnical Engineering and Surveying Institute, 209 Wansongyuan Road, Wuhan 430022, China)
(4 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: A total solar eclipse on 22 July 2009, the longest one of this century, occurred in East Asia and Pacific. Meanwhile, a medium magnetic storm arise in the late eclipse. The electron density profiles in maximum eclipse time were obtained from COSMIC radio occultation, and time series of TEC in local area was obtained from ground GPS stations of Wuhan CORS. And some physical mechanism of ionospheric effects during in the eclipse were analyzed.

Key words: solar eclipse; occultation; electron density; total electron content

About the first author: WANG Zemin, professor, Ph.D supervisor, majors in space geodesy and geodynamics.
E-mail: zmwang@whu.edu.cn