

基于 VLBI 和 GPS 测量 2009 年 7 月 22 日日全食期间电离层 TEC 变化

舒逢春¹, 郭丽¹, 刘敏², 郑为民¹, 王伟华¹, 叶其欣², 艾力·玉苏甫³, 近藤哲朗⁴, 市川隆一⁴

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030
2. 上海市卫星遥感与测量应用中心, 上海 201100
3. 中国科学院国家天文台乌鲁木齐天文站, 乌鲁木齐 830011
4. 国家信息通信研究院鹿岛空间研究中心, 日本茨城 314-8501

摘要 2009 年 7 月 22 日上午发生的日全食是 21 世纪全食持续时间最长的日全食, 跨越了中国北纬约 30° 的广大地区, 为研究太阳对地球电离层的影响提供了一次难得的机会。上海位于此次日全食带中心线附近, 为此, 上海佘山站、乌鲁木齐南山站和日本鹿岛站开展了 VLBI 联合观测实验。与此同时, TEC 测量还配合使用了 GPS 观测站。本文介绍了此次日全食观测实验的背景、测量方案、观测实验详情和数据处理流程。根据相关处理结果, 利用二维条纹搜索方法在上海-乌鲁木齐基线获得了优质干涉条纹, 预示着 VLBI 测量取得成功。对单站 GPS 数据的初步分析表明, 日全食食甚时刻 TEC 值存在快速下降。此次观测实验预期将首次获得电离层 TEC 变化的 VLBI 实测结果, 并开展 VLBI 与 GPS 测量结果的比较研究。

关键词 甚长基线干涉测量; 全球定位系统; 电离层总电子含量; 日全食

中图分类号 P125

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)15-0019-06

Ionospheric TEC Measurement with VLBI and GPS During the Total Solar Eclipse of 22 July 2009

SHU Fengchun¹, GUO Li¹, LIU Ming²,
ZHENG Weimin¹, WANG Weihua¹, YE Qixin²,
YUSUP Aili³, KONDO Tetsuro⁴, ICHIKAWA Ryuichi⁴

1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China
2. Shanghai Center for Satellite Remote-sensing and Application, Shanghai 201100, China
3. Urumqi Astronomical Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China
4. Kashima Space Research Center, National Institute of Information and Communications Technology, Ibaraki 314-8501, Japan

Abstract The longest total solar eclipse during the 21st century, occurred over China at latitudes of about 30°N in the morning of 22 July 2009, provides a unique opportunity to investigate the influence of the sun on the earth upper ionosphere. For Shanghai is located near the central line of the total eclipse belt, a VLBI experiment for ionospheric Total Electron Content (TEC) measurement has been carried out with participation of Shanghai, Urumqi and Kashima stations. Meanwhile, a number of GPS receiving system are also used in the experiment. The background and methodology for the experiment are briefly described, followed by the introduction of observation details and data processing procedure. Based on the cross correlation results, good fringes have been detected on the Shanghai-Urumqi baseline with the 2 dimensional fringe search technique, which indicate that the VLBI measurement of TEC was performed successfully. The data analysis of a single GPS station led to a preliminary result which shows the sudden decrease in TEC at the time of maximum eclipse. We expect to acquire the first VLBI results for TEC measurement, and compared with the results from GPS observations.

Keywords Very Long Baseline Interferometry (VLBI); Global

收稿日期: 2009-07-30

基金项目: 国家自然科学基金委员会数理学部和中国科学院基础局专项经费资助“2009 年日全食科学观测项目”; 国家自然科学基金项目(10878021); 上海市自然科学基金项目(09ZR1437300); 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放基金项目(08-01-02)

作者简介: 舒逢春, 副研究员, 研究方向为射电干涉测量技术及其在天体测量、大地测量和深空导航等方面的应用, 电子信箱: sfc@shao.ac.cn

Positioning System (GPS); ionospheric total electron content (TEC); total solar eclipse

0 前言

2009年7月22日的日全食是21世纪全食持续时间最长的日全食,这次日食的食分为1.080,全食最长持续时间为6分39秒,亚洲东部、太平洋和夏威夷部分地区可见,其中印度、尼泊尔、中国和太平洋中部部分地区可见全食^[1]。日全食带在中国境内沿北纬30°线分布,长江中下游是最佳观测地带。

日食能给电离层带来复杂的化学和动力学过程,引起电离层形态、结构和动力学行为发生改变。日食的发生类似于快速的日落和日出,在这一短暂过程中,电离层所受光照和电离辐射强度有较大变化,随着日食食分逐渐增大,电子产生率迅速减小,在食甚时达最大,食甚后电子产生率逐渐增加,在复圆时恢复正常。电离层总电子含量(Total Electron Content, TEC)是指电磁波通过电离层时,沿传播路径上单位截面的柱体内的总电子数。TEC是反映电离层变化规律的重要指标,从某种意义上说,探测电离层的手段就是探测TEC的手段。

甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)和全球定位系统(GPS)是近年来新兴的空间测地技术,利用VLBI和GPS技术的双频观测能力可以获得电离层TEC的高精度测量值。VLBI技术通过地理位置相隔遥远的天线阵单元同时接收诸如河外射电源、银河系脉泽、脉冲星或深空探测器等自然或人造目标发射的无线电信号,再将其送往相关处理机系统进行处理,从而获得有价值的科学数据,并进一步开展应用研究。2004年以来,在探月工程的支持下,中国VLBI网(Chinese VLBI Network, CVN)已经建立了4个观测站1个VLBI数据处理中心的体制^[2],即北京密云站、乌鲁木齐南山站、昆明站、上海佘山站和位于上海天文台的VLBI数据处理中心。

目前世界上仅有不足30个用于天体测量与大地测量的VLBI站,经历日全食的机会非常难得。上海VLBI站正好位于2009年日全食带中心线,配合上海地区的高密度GPS观测站,为研究电离层对日全食的响应提供了良好的条件。为此,上海佘山站、乌鲁木齐南山站和日本鹿岛站开展了VLBI联合观测实验,成功实现了日全食期间电离层TEC的测量。预期此次日全食观测实验将首次获得电离层TEC的VLBI实测结果,并给出VLBI与GPS测量结果的比较研究。

1 日全食的电离层效应探测

电离层的探测和研究具有重要的理论意义和实用价值,探测电离层TEC的方法很多,常用的传统方法有直接探测和间接探测两类:

1) 直接探测方法有电离层垂直探测仪和电离层探针。垂测法可测得电离层图,即频高图,只适用于下电离层的探测,而且难以精细探测D层的电离层情况及E层和F层的“谷区”信息;当探测频率大于F₂层的临界频率时,电波将穿过F₂层不再返

回地面,利用该法,已得到大量有关电离层地理分布和大尺度不均匀结构的宝贵资料;而电离层探针则是装在火箭或卫星上用来测量电离层参数的一种装置,它测量电子浓度、温度和离子浓度,空间分辨率高,还可以测量电离层的精细结构。

2) 间接探测方法有利用法拉第旋转效应、多普勒效应测量电离层的电子含量。法拉第旋转效应是指当无线电波通过电离层时,偏振面会发生偏转,偏转角与电波路径上的TEC有关,因此在地面接收人造卫星(或飞行目标)的无线电信号,测量出电波的偏振面旋转角,即可计算从接收点到飞行目标路线上的TEC;当观测目标的天线电波通过电离层时,电波的速度和方向都会受到电离层介质的影响,从而产生附加多普勒频移。对多普勒数据进行相应的数据处理,也可有效测量TEC。

而GPS用于电离层研究始于20世纪90年代中期,与传统的电离层探测方法相比有很多优点。GPS具有其他卫星系统不具备的许多特点,如高时空分辨率、观测站在地球大陆密度很大、数据观测质量好等。比较而言,利用GPS研究电离层具有很好的水平分辨率,能较好地测定整体电离层延迟量,而且,GPS与低轨卫星系统的结合,也能在局部区域提供较好电离层垂直分辨率。所以,将GPS与现有的其他卫星系统和电离层探测手段与设备有效结合,利用合理的数学模型与方法,有望较大推动电离层探测理论与应用研究的发展。

VLBI是一种干涉测量技术,由于VLBI的2个观测台站得到的时延与信号路径上的TEC呈正比关系,并与频率平方呈反比关系,在常规VLBI观测中,通过双频观测可以得到高精度TEC值,其延迟精度通常优于1 cm^[3],对应于S波段的TEC精度约0.3 TECU(1 TECU=1×10¹⁶ 电子/m²)。现今的VLBI各类软件包仅仅考虑了电离层的一阶项影响,Hawarey等在研究VLBI测地观测时考虑了电离层的二阶项效应的影响,其效应为1 ps水平,并预计数年后将会达到该精度^[4]。

VLBI和GPS均可利用双频观测得到电离层中的高精度TEC参量,Sekido等分析了2000年6月18日长度达6 000 km的Algonquin-Wettzell基线观测资料,比较了VLBI和GPS技术得到的电离层TEC差异。其中,相关性最高可达到0.99,平均偏差为57.6 TECU,rms为5.4 TECU,系统偏差起因于VLBI观测中的S/X接收机问题^[5]。Bergstrand等^[6]比较了由VLBI和欧洲定轨中心CODE的GPS得到的电离层的信息,发现两种技术的差异水平为10 TECU。TEC测量值的比较表明了两种技术的高度一致性。对于短弧段和长基线情况下得到的相关系数可达0.6~0.9。Hobiger等于2000年5月15日得到这两种技术下射电信号沿电离层传播路径TEC差值比较,发现两者变化趋势符合得很好,但是存在数十TECU的系统差^[7]。

日食为研究电离层结构和发生在其中的动力学和光化学过程等提供了很好的机会^[8-9]。国外对日食期间的电离层研究主要有基于GPS相位载波观测量得到TEC变化^[10-13]和基于无线电干涉仪得到的电离层变化情况^[14]等,这些结果表明日食

使得电离层结构发生明显变化,可使其覆盖区域的 TEC 降低数 TECU,其 TEC 减少的持续时间可达 0.5 h,利用高时间分辨率如 5 min 得到的二维 TEC 图表明了电离层在日食期间的显著变化,TEC 比平时有 20%~30% 的降低。国内展开日食电离层效应观测研究也有很长的历史^[15],早期的方法精度较低,此外,利用地跨主食带区两侧的电离层台阵的观测资料证实了日食有可能诱发电离层行扰 (Traveling Ionosphere Disturbances, TID) 现象^[16]。

2 电离层 TEC 测量方法

2.1 利用 VLBI 技术检测 TEC 变化

VLBI 技术利用相隔遥远的天线同时接收待测目标的射电辐射,采用 S/X 双频观测模式,原始观测数据在相关处理机中经过时延补偿和条纹旋转,随后两两进行互相关处理,获得每条基线的互相关干涉条纹^[17],再经过条纹搜索、相位校正和带宽综合等相关后处理过程获得每条基线 S 波段与 X 波段的群时延观测量,最后从中分离出每条基线的总电子含量 TEC 之差及其随时间的变化。射电信号通过电离层引起的时延 τ_{ion} 与沿路径方向 TEC 的关系可以近似表示为

$$\tau_{\text{ion}}=1.34\times10^{-7}f^2D$$
 (1)

式中, D 为射电信号沿电离层传播路径的 TEC, TECU; f 为观测频率, Hz。

2.2 利用 GPS 技术检测 TEC 变化

利用日全食中心区域的 IGS(International GPS Service, 国际 GPS 服务机构) 上海和武汉站, 以及乌鲁木齐和日本鹿岛并置 VLBI 技术的 GPS 站, 获取 GPS 卫星的载波相位观测量与精密星历, 计算各站上方的 TEC 随时间的变化。根据单层电离层模型, 利用 GPS 伪距观测量之差即可得到穿刺点上的沿信号方向的 TEC, 本文采用 Kalman 滤波方法, 利用更高精度的载波相位观测量来平滑和改善伪距之差 ΔP_2P_1 (正比于 TEC) 的精度。具体模型如下^[18]。

利用 $L=\Delta P_2P_1-L_4, X=Amb=N_1\lambda_1-N_2\lambda_2$ (L 为观测量, X 为待估参数), 因为这些数据均在一维空间中描述, 构造的标量系统为

$$\begin{cases} X_{k+1}=X_k+\Omega_k \\ L_{k+1}=X_{k+1}+\Delta_{k+1} \end{cases}$$
 (2)

这里, $L_4=\lambda_1\varphi_1-\lambda_2\varphi_2, N_1$ 和 N_2 分别为两载波观测值的整周模糊度, λ_1 和 λ_2 为相应频率载波的波长, φ_1 和 φ_2 为相位观测量, 观测噪声 Δ_{k+1} 和动态噪声 Ω_k 为零均值的白噪声系列。

此外, 通过消除硬件接收机带来的误差, 还可以提高最终的 TEC 测量精度。在建立式 (2) 的标量系统后, 即可通过 Kalman 滤波的方法进行处理, 通过滤波后的 TEC 的精度将明显提高^[19]。

2.3 比较 VLBI 和 GPS 技术所得 TEC 的变化情况

GPS 是通过测量 GPS 卫星到观测台站路径上的 TEC, 而 VLBI 是测量射电源到 2 个观测台站路径上的 TEC 的差值。因此, 比较之前要将 GPS 得到的 TEC 转换到 VLBI 观测方向

上。首先将 GPS 方法得到的 3 个 VLBI 并置站的 TEC 值按照映射函数投影到穿刺点的地心方向, 然后利用映射函数投影到 VLBI 观测方向, 最后将每个基线上 2 个台站的新的 TEC 值作差得到对应的 TEC 差值, 通过将该 TEC 差值与 VLBI 技术各基线的 TEC 值相比较, 可以得到 2 种技术下, 随时间的变化情况, 分析日食对 TEC 的影响。图 1 是利用该方法得到的 2004 年 3 月 9 日上海-乌鲁木齐基线上电离层 TEC 测量比较, 横坐标起算时刻为 1816 (世界时)。可以看出, 由 GPS 和 VLBI 两种技术得到的测量结果具有较好的一致性^[3]。

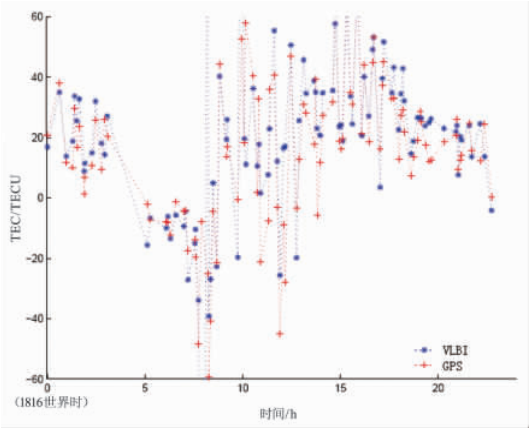


图 1 上海-乌鲁木齐基线 VLBI 与 GPS 电离层 TEC 测量比较

Fig. 1 Comparison of ionospheric TEC measurement with VLBI and GPS on the Shanghai-Urumqi baseline

3 观测实验

3.1 观测设备

参加 VLBI 观测实验的观测站包括: 上海佘山站、乌鲁木齐南山站、日本鹿岛站。这些 VLBI 站都是参加常规天体测量与大地测量国际联测的台站, 与 GPS 进行并置观测。因此可以综合运用 VLBI 和 GPS 技术对日全食期间电离层 TEC 的变化进行分析比较。此外可供利用的数据还包括上海地区的高密度 GPS 站和用做参考的武汉 IGS 站的数据。

VLBI 站与 GPS 站的地理位置分布如图 2 所示, 上海、乌鲁木齐和鹿岛 3 个站参加 VLBI 和 GPS 观测, 武汉站只进行 GPS 观测, 其中上海和武汉位于 2009 年 7 月 22 日日全食中心区域, 预报的日全食发生时间如表 1 所示。

表 1 上海和武汉 2009 年 7 月 22 日日全食时刻表 (北京时间)

Table 1 Predicted solar eclipse time for Shanghai and Wuhan on July 22, 2009 (Beijing time)

测站	初亏	食既	生光	复圆
上海	082326	093648	094148	110138
武汉	081454	092400	092924	104617

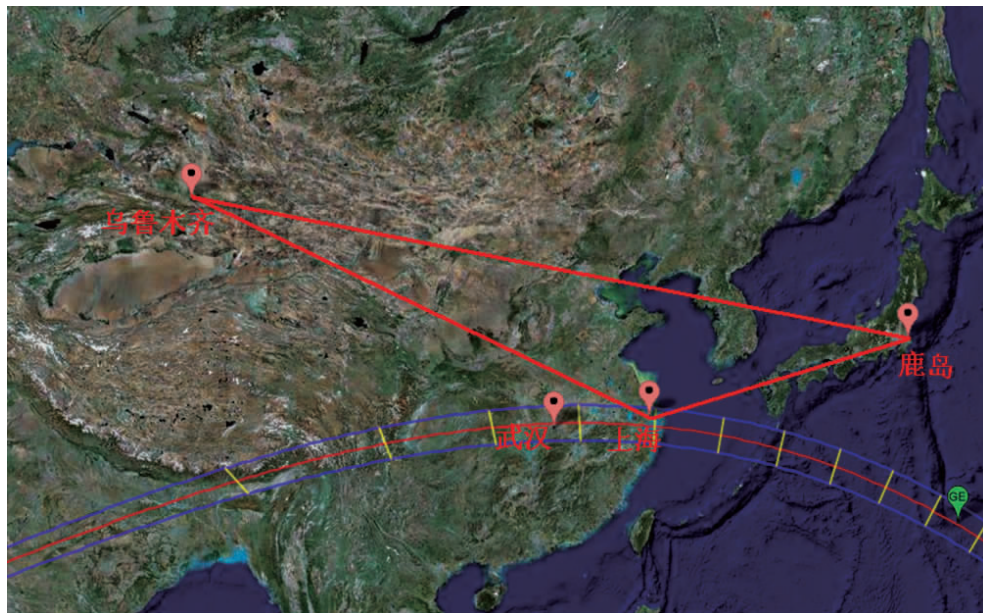


图2 2009年7月22日日全食区域及VLBI与GPS观测站的地理位置

Fig. 2 Map of the total solar eclipse path on July 22, 2009, and distribution of VLBI and GPS sites

3.2 观测资料的获取

VLBI 观测站联合观测从 2009 年 7 月 22 日北京时间 0600 持续到 1500, 共 9 h, 以便监测整个日全食发生过程中电离层 TEC 的变化规律。观测采用 S/X 双频观测模式, 16 个 BBC(基带转换器)通道, 其中 S 波段 6 个, X 波段 10 个, 每个通道带宽为 4 MHz, 尼奎斯采样频率为 8 MHz, 采用 1 bit 量化水平。观测目标为数十颗河外射电源, 取自国际天球参考架(ICRF), 每颗射电源的扫描时间平均约为 2 min, 其中日食期间 VLBI 观测站对太阳附近 25° 左右的具有较强辐射的河外致密射电源 4C39.25 进行连续跟踪观测, 以提高 TEC 测量的时间分辨率和检测大尺度电离层行扰的可能性。日食前后数小时则是对均匀覆盖天空的数十颗河外射电源进行快速交替观测。上海佘山站和乌鲁木齐南山站采用 MK5 数据记录系统进行数据记录, 日本鹿岛站采用 K5 数据记录系统进行数据记录, 每台站总数据速率为 128 Mbps。

对于 GPS 观测而言, 鹿岛站和乌鲁木齐站不在日全食中心区域, 只需要获取日全食当天的 GPS 数据; 上海和武汉位于日全食中心区域, 需要获取日全食前后共 3 天的 GPS 数据, 以便进行比对分析。GPS 数据主要包括 GPS 卫星的载波相位观测量与精密星历。GPS 并置站的数据还将与 VLBI 站的数据进行比对分析。

3.3 数据处理

数据处理工作由上海天文台和日本国家信息通信研究院鹿岛站分别进行, 并开展合作研究。鹿岛 VLBI 站的 K5 数据转换为 MK5 数据后, 与上海、乌鲁木齐 VLBI 站的数据使用上海天文台正在研制的测地 VLBI 软件相关处理机系统进行相关处理和后续数据分析。同时, 国内 VLBI 站记录的 MK5 数据转换

为 K5 格式数据后将采用日本研制的 K5-IPVLBI 软件相关处理机进行处理, 相关处理完成后得到的 S/X 波段双频时延观测量结果, 与本研究处理结果进行比对检验。

对于 VLBI 观测数据, 利用 S/X 波段双频时延观测量结果, 分离出各基线观测到的电离层 TEC 实测值。对于 GPS 观测数据, 利用各站获取的 GPS 卫星载波相位观测量与精密星历, 计算各站上方的 TEC 实测值及其随时间的变化, 并与 VLBI 观测结果进行比对。

综合利用位于日全食带中心区域的上海和武汉 GPS 站获取的共 3 天的 TEC 观测结果, 以及日全食期间的 VLBI 观测结果, 分析日全食对电离层 TEC 的影响。

3.4 初步结果

日全食观测实验过程中, 状态监视信息显示, 3 个 VLBI 站的所有设备运行正常。日前上海和乌鲁木齐站的观测数据已发送到上海天文台, 开始进行相关处理。条纹搜索结果表明, 相关处理机已经获得优质的互相关干涉条纹, 预示日全食期间电离层 TEC 的 VLBI 测量获得成功。图 3 为单通道条纹搜索结果, 显示了上海-乌鲁木齐基线上第 1 个观测目标 DA193 在时延-延迟率二维平面的互相关函数, 数据来自 S 波段的一个 BBC 通道, 带宽 2 MHz, 积分时间为 47 s。

根据准实时 GPS 测量数据及预报的 GPS 星历表, 得到如图 4 所示的 GPS 某测站跟踪编号为 18 卫星的(穿刺点在日食区域内)电离层垂直方向的 TEC 随时间的变化曲线, 其中横坐标为北京时间, 红色和绿色分别是日食前 1 天(7 月 21 日)和日食后 1 天(7 月 23 日)的电离层 TEC 变化情况, 蓝色的是日食当天 7 月 22 日的电离层 TEC 变化, 上海的食甚时间为 0939 左右, 初步结果显示此时 TEC 值快速下降, 接近低谷。

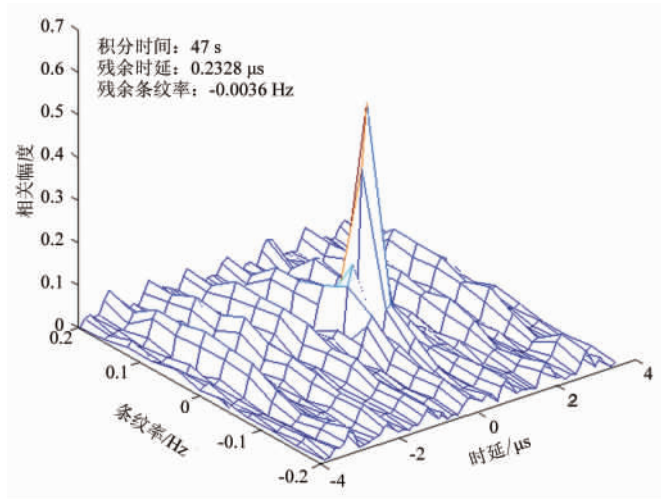


图3 河外射电源 DA193 在时延-延迟率二维平面的互相关函数

Fig. 3 Cross-correlation function of the radio source DA193 on the 2 dimensional delay and fringe rate plane

4 展望

在 VLBI 技术方面, 中国 VLBI 网由于 2006 年新建的北京密云站和云南昆明站的加入, 已经具备 4 台站的规模, 而上海数据处理中心的建立, 开始具备了卫星 VLBI 观测数据的处理能力, 并成功应用于“嫦娥”1 号工程测定轨任务中。目前正在开展相关处理机系统应用于天体测量及大地测量的升级改造工作^[20]。测地 VLBI 相关处理机技术作为 VLBI 的核心技术, 国际上仅有美国、德国和日本等国拥有该技术。此次日全食期间, 上海佘山站、乌鲁木齐南山站和日本鹿岛站开展了 VLBI 联合观测实验, 成功地实现了日全食期间电离层 TEC 的测量, 这是首次利用 VLBI 技术对日食期间的电离层变化进行监测, 并得到高精度的 TEC 信息, 上千公里的基线长度, 也为检测大尺度电离层行扰提供了可能。与日本鹿岛 VLBI 站开展国际联合观测实验和数据处理, 为检验中国独立自主建设的 VLBI 数据处理系统的兼容性和正确性提供了良好的条件, 有助于增强上海 VLBI 相关处理系统的国际影响力。

此次日全食的电离层效应观测还利用了大量的 GPS 观测站。对于参加此次观测的每个 GPS 台站, 采用单站的技术可以得到各台站的周日变化曲线, 将同时可视的多个方向的多个卫星的 GPS 观测量进行加权平均, 并与日食前、后 2 天的电离层周日变化图进行分析比对。此外, 可以利用 GPS 多站技术得到局域网的 TEC 图, 该图是通过平均每 5 min 的 GPS 测量值以每 15 min 间隔产生一张, 它是以日食期间的空间结构上的变化形式给出的。单站方法下每张 TEC 变化图给出了日食期间在时间上的变化趋势, 多站或局域网方法下的 TEC 图给出了日食期间在空间上的分布趋势。

日全食观测实验已经结束, 但本研究的数据处理才刚刚

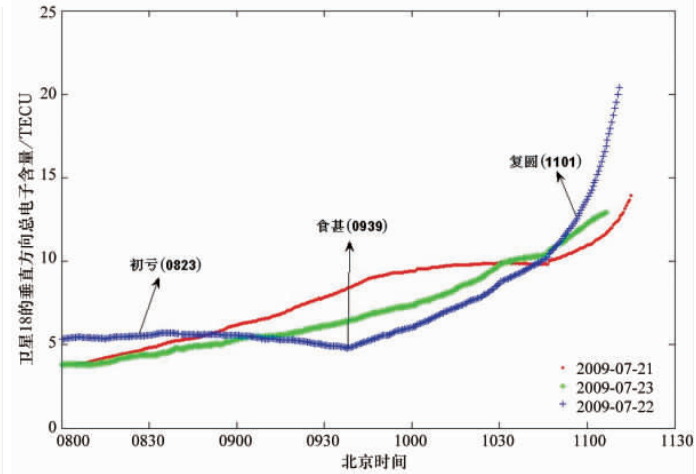


图4 准实时模式下由 GPS 单站观测 18 号卫星在日食前后的 TEC 变化曲线

Fig. 4 TEC variations deduced from the observations of No.18 satellite with a single GPS station in quasi-real time mode during the solar eclipse

开始, 预计将持续相对长的一段时间。基于 VLBI 和 GPS 综合观测结果, 将有望对日食期间电离层 TEC 变化进行高时间分辨率和高空间分辨率研究, 还可以对不同尺度的电离层行扰现象进行检测, 从而有助于揭示电离层对日全食响应的深层物理机制。

参考文献 (References)

- [1] Espenak F, Anderson J. Predictions for the total solar eclipses of 2008, 2009, and 2010 [C]//Solar Activity and its Magnetic Origins. Proceedings of the International Astronomical Union, Cambridge University Press, 2006, 2: 495-502.
- [2] Zheng W, Shu F, Zhang D. CVN software correlator applications in deep-space exploration [C]//Second International Conference on Space Information Technology. Proceedings of SPIE, Bellingham, WA: SPIE, 2007, 6795-4N, doi: 10.1117/12.774880.
- [3] 郭丽. 基于 VLBI 跟踪观测的空间飞行器瞬时状态参量归算[D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2007.
Guo Li. Reduction of the instantaneous state vectors of spacecraft based on VLBI tracking data [D]. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [4] Hawarey M, Hobiger T, Schuh H. Effects of the 2nd order ionospheric terms on VLBI measurements[J]. *Geophysical Research Letter*, 2005, 32: L11304.
- [5] Sekido M, Kondo T, Kawai E, et al. Evaluation of global ionosphere TEC by comparison with VLBI data [C]//International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2004 General Meeting Proceedings. NASA/CP-2004-212255, 2004: 427-436.
- [6] Bergstrand S, Haas R. Comparison of ionospheric activity derived from GPS and different VLBI networks [C]//International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2004 General Meeting Proceedings. NASA/CP-2004-212255, 2004: 447-451.
- [7] Hobiger T, Boehm J, Todorova S, et al. The project "VLBI ionos"—How VLBI contributes to ionospheric research [C]//Proceedings of the 16th

- Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry. Leipzig, Germany, 2003: 291-298.
- [8] Yeh K C, Yu D C, Lin K H, *et al.* Ionospheric response to a solar eclipse in the equatorial anomaly region[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1997, 8(2): 165-178.
- [9] 刘立波, 万卫星, 涂剑南, 等. 一次日食电离层效应模拟研究 [J]. *地球物理学报*, 1999, 42(3): 162-170.
Liu Libo, Wang Weixing, Tu Jiannan, *et al.* *Chinese Journal of Geophysics*, 1999, 42(3): 162-170.
- [10] Afrainmovich E L, Kosogorov E A, Lesyuta O S. Ionospheric effects of the August 11, 1999 total solar eclipse as deduced from European GPS network data [J]. *Advances in Space Research*, 2001: 27 (6-7): 1351-1354.
- [11] Rashid Z A A, Momani M A, Sulaiman S, *et al.* GPS ionospheric TEC measurement during the 23rd November 2003 total solar eclipse at Scott Base Antarctica [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, 68(11): 1219-1236.
- [12] Jakowski N, Stankov SM, Wilken V, *et al.* Ionospheric behavior over Europe during the solar eclipse of 3 October 2005 [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008: 70(6): 836-853.
- [13] Tsai H F, Liu J Y. Ionospheric total electron content response to solar eclipses [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104 (6): 12.657-12.668.
- [14] Afrainmovich E L, Palamartchouk K S, Perevalova N P, *et al.* Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from data from the GPS-radio interferometer at Irkutsk [J]. *Advances in Space Research*, 2000, 26(6): 997-1000.
- [15] 朱岗崑, 何友文. 近半个世纪以来发生在中国境内十次日食的电离层效应分析[J]. *地球物理学报*, 1984: 27(2): 120-130.
Tschu Kang Kun, He Youren. *Chinese Journal of Geophysics*, 1984, 127 (2): 120-130.
- [16] 何友文, 孙宏林. 日食声重波效应[J]. *电波科学学报*, 2001: 16(1): 93-99.
He Youwen, Sun Honglin. *Chinese Journal of Radio Sciences*, 2001, 6 (1): 93-99.
- [17] Shu F, Zhang X, Kondo T. Development of correlator model for differential VLBI observations of satellites [C]. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, ICMMT 2008, IEEE Computer Society, 2008, 1: 443-446.
- [18] 刘经南, 陈俊勇, 张燕平, 等. 广域差分 GPS 原理和方法[M]. 北京: 测绘出版社, 1999.
Liu Jingnan, Chen Junyong, Zhang Yanping, *et al.* Theory and technique of wide area differential GPS[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1999.
- [19] 朱文耀, 章红平, 黄斌. 利用 GPS 检测电离层不均匀结构探讨 [J]. *地球物理学报*, 2004, 47(6): 942-947.
Zhu Wenyao, Zhang Hongping, Huang Cheng, *et al.* *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(6): 941-948.
- [20] Shu F, Zheng W, Zhang X, *et al.* Upgrade of Chinese VLBI network for geodetic application[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Earth Observation for Global Changes. 2009: 1095-1100.
(责任编辑 陈广仁)



2009年9月9-12日 北京

第6届国际数字地球会议

主办: 国际数字地球学会
中国科学院

承办: 国际数字地球学会中国国家委员会
中国科学院对地观测与数字地球科学中心

通信地址: 北京市海淀区中关村北一条9号
科电大厦14层 (100190)

电话: 010-58887297, 58887298
传真: 010-58887406
电子信箱: isde6@ceode.ac.cn
会议网址: www.isde6.org