

月球电离层掩星探测研究

王震^{1,2}, 王娜¹, 平劲松²

(1. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院国家天文台 月球与深空探测重点实验室, 北京 100012)

摘要: 日本 SELENE /KAGUYA 探测任务提供了研究月球电离层的机会。采用无线电掩星探测技术和趋势外推算法, 消除地球电离层和行星际等离子体的干扰影响, 残余的信号相位信息的变化反映了月球电离层的信息, 估算出月球周围附近近似对称分布的稀薄电离层中电子总含量(TEC)约为 每立方米 10^{-14} 个。

关键词: 月球电离层; 电子总含量 (TEC); 无线电掩星

中图分类号: P691

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2014)03-0220-06

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2014.03.010

Introduction of Lunar Ionosphere Research by RO Method

WANG Zhen^{1,2}, WANG Na¹, PING Jinsong²

(1. Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

2. Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, National Astronomical Observatories, CAS, Beijing 100012, China)

Abstract: To measure the thin plasma layer above the surface of the moon, via using radio occultation technique and coherent radio waves of the S/X band, dual-frequency measurements could be acquired at a given Earth-based receiving station. On the line-sight direction, the terrestrial ionosphere, interplanetary plasma and thin lunar ionosphere are mixed together, in order to investigate the relatively pure variation of ionospheric total electron content (TEC) surrounding the moon, Using the trend extrapolation method, the terrestrial ionosphere and interplanetary disturbance error influence could be eliminated, so as to estimate the fitting trend component. The TEC of lunar ionosphere is obtained about $10^{-14}/\text{m}^2$, after subtracting this trend component from the original observation data obtained at the tracking station.

Key words: lunar ionosphere; total electron content; radio occultation

0 引言

地球的大气层存在电磁波频率窗口, 地球的电离层屏蔽来自地球之外低于 20 MHz 的射电频率, 地面设备不能探测捕获到宇宙射线中低于 20 MHz 的频率。月球的背面具有独特的天文观测的优势, 规避了地球电离层的影响, 有利于实施宇宙线中的长波观测。月球的空间环境近似真空状态, 使得在月球表面探测非常低的电波频率成为可能, 月球表面空间富含大量的 1 ~ 10 MHz 电波频率, 此波段的频率揭示宇宙大爆炸后, 宇宙早期阶段的演化形

成过程, 由于在 $z > 130$ 的条件下, HI 21 cm 的谱线转变到 10 MHz 的频率范围内^[1], 可以有效实现宇宙射线的探测和事例的重建。在太阳紫外线辐射的作用下, 月球向日侧的大气产生电离, 在距月球表面 5 ~ 10 km 的高度形成非对称、零星分布的稀薄等离子体称为“月球电离层(lunar ionosphere)”, 或者“月球等离子体云(lunar plasma cloud)”。月球的电离层与地球的电离层相比较, 前者的电离层非常稀薄、稀疏。月球电离层的电子密度预期估计约为每立方厘米 $10^2 \sim 10^4$ 个, 比地球大气密度小约 14 个数量级, 此种情况实施低频技术才能满足观测

条件。月球电离层总的电子含量(total electron content, TEC) 约是 0.01 TECU, 大约为地球电离层的几千分之一或者更少。月球的 TEC 如此之小, 很难被探测到。介于过去对月球电离层观测条件的限制, 其观测数据积累很少, 人们对月球电离层知之甚少, 至今, 月球稀薄的电离层仍然是一个有趣和具有争议的研究。

1 月球电离层研究简史和现状

到目前为止, 人类已经发射了大约百颗月球探测器。Apollo 12、14、15、16、17 和 Luna 16、20、24 实施了载人和不载人的登月采样返回, 共获得了 382 kg 的月球样本和海量的科学数据^[2]。

在近月空间环境的电离层探测方面, 前人已经做了大量的研究工作。20 世纪 40—50 年代, 人们通过地球上的偏振光仪观测到在月球表面日夜交替线附近的气体极化现象, 此证据表明月球表面附近空间存在有稀薄气体层^[3-4]。月球表面 H 的电离能约为 10 eV, Ne 和 Ar 的平均电离能约为 19 eV, 由此猜想稀薄气体层中的离子在太阳风辐射谱段中最大通量约为 37 eV 的紫外线辐射作用下, 光致电离形成月球微弱的电离层。

20 世纪 60 年代, 月球宇航飞船的成功发射和无线电掩星(radio occultation, RO)技术的迅猛发展, 使得人们能够初步研究月球大气的组成和评估月球大气层中的气体成分、等离子体和电子密度等。当遥远的射电源发出的光线经过月球的向日侧边缘附近时, 人们观测到其光线在传播路径方向上发生了较大的角位移^[5-6], 此现象反映了射电源的电波在月球电离层中传播时, 由于受到介质折射的影响, 使得光线发生了弯曲。20 世纪 70 年代, 人们发现月球向日侧光电子壳层, 带有 5~10 V 的正电位。如图 1 所示, 太阳风撞击月球的表面, 月球“浸泡”在太阳风中, 日侧暂态电离层高度约 100 km; 光电子鞘中光电子密度约每立方厘米为 $10^3 \sim 10^5$ 个, 厚度约为 0.1~1 m, 大气离子鞘中离子密度约为每立方厘米 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 个, 厚度约为大于或等于 10 m; 夜侧离子鞘中离子密度约为每立方厘米 0.05 个, 厚度约 250 m。在距离月球向日侧表面高度约几百米处, 存在密度约每立方厘米 10^4 量级的光电子鞘^[7]。

月球表面大气主要由来自太阳风带来的 H、He、Ne 构成, 其中 10% 的 He 由月球的重核放射性衰变及 ^{40}K 放射性衰变所形成的 ^{40}Ar 构成; 在向日

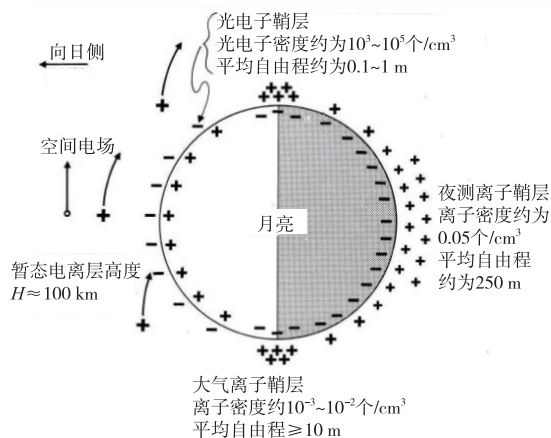


图 1 月球电离层特征(引自 Benson et al, 1975)
Fig. 1 Lunar ionosphere character (Benson et al, 1975)

侧其密度约为每立方厘米 10^5 个。太阳风磁场冲撞月球表面, 感应出与之相应的电场, 从而抑制月表附近积累新出现的离子^[8]。与离子相比较, 光电子产生的电场拥有更高温度和速度, 此电场对等离子体也有排斥的作用^[9]。

月表剩余磁场的平均值约为 50 nT, 光电子鞘内产生的离子, 尽管被太阳风加速, 但是受到月表剩余磁场的约束, 很难大于月球的逃逸速度 2.4 km/s, 逃逸到行星际空间; 在光电子鞘外, 20 km 以下区域, ^4He 、 ^{20}Ne 和 ^{40}Ar 离子的速度分别约为 1.3、0.58 和 0.41 km/s。距离月球表面 5 km 的高度, 剩余磁场的强度约为 13 nT, 在月表剩磁的约束下 ^4He 、 ^{20}Ne 和 ^{40}Ar 离子的回旋半径分别约为 4、9 和 13 km。20 km 以上区域, 离子受到太阳风的直接加速作用。

Luna 19 和 22 在环月轨道上采用双频 RO 技术, 探测到月球日出线(lunar sunrise terminator)附近电子密度很大^[9-12], 如图 2。在球对称的假设条件下, Vyshlov (1976) 解算出距离月表 5~10 km 的高度电子密度取得峰值, 大小约为每立方厘米 500~1 000 个; 标高为 10~30 km, 电子密度随着距离月表高度的增加而逐渐降低; 在标高 5 km 之下, 越逼近月球表面, 电子密度越低。

Russell 等(1976) 研究分析 Apollo 15 获得的月球固有磁偶极矩和感生磁偶极矩的数据, 解析结果给出月球拥有微弱的电离层, 离子密度约为每立方厘米 500 个, 离子的能量约为 0.2 eV。此结果与月球大气的电离率约为 0.2%~0.5%^[13] 相符合。Daily 等^[14] 质疑 Luna 19 和 22 的观测结果, 认为观测量均是在月球向日侧日出线附近观测得到, 极高

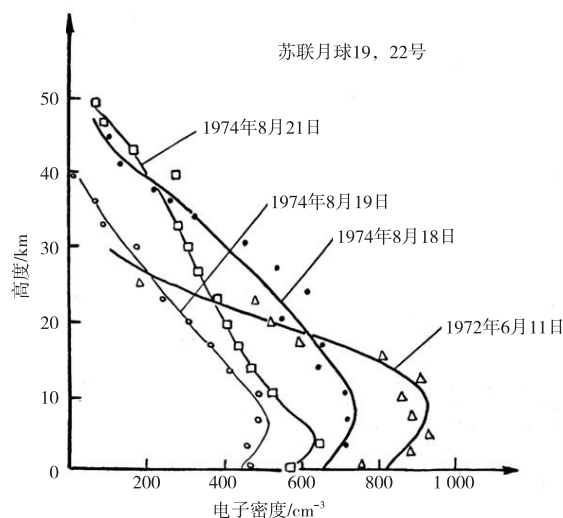


图2 苏联 Luna 19, 22 观测到的月球电离层电子密度轮廓图(引自: Vyshlov, 1976; Vyshlov and Savich, 1978)

Fig. 2 Electron density profiles above the lunar surface obtained through occultation observation conducted by Soviet Luna 19, 22 missions (Credit: Vyshlov, 1976; Vyshlov and Savich, 1978)

的电子密度可能是分析技术的缺陷造成的假象。Vyshlov(1976)^[11]认为剩余磁场能够屏蔽太阳风,月球表面可以积累等离子体;如果粒子镜面反射条件没有满足,粒子被月表附近的本地磁场束缚住,那么,中性粒子密度约为每立方厘米 10^6 个,电离速率约为每秒 10^{-6} 个,离子平均寿命约 400 s,离子平衡密度约为每立方厘米 400 个。

Potter 等(1988)利用光谱分析技术处理 Apollo 的观测数据,解析出月球大气中存在源于 Na 原子和 K 原子的 D2 谱线。Mendillo(1991)等利用立奥日冕仪的观测数据对月球大气中的金属原子进行二维成像,确认月球大气中 Na 原子和 K 原子密度分别约为每立方厘米 67 个和 15 个,原子的标高分别约为 120 km 和 90 km,原子的分布从月球表面一直延伸到 4 个月球半径之外。月球大气中金属原子气体的存在,证明陨石对月球表面的撞击是月球大气形成的原因之一。

Apollo 和“月球勘探者”计划^[15-16]观测到月球表面残余磁场:场强约 300 nT,高度达到 1000 km。月球表面电子密度非常高,归因于光电子鞘的作用^[17]。太阳紫外线辐射、太阳风高速粒子流与月球大气和月球风化层相互作用,使得在距离月表之上 100 km 的区域内,离子密度约为每立方厘米 1 个,这是目前认为月球表面附近存在带电离子的主要原因^[18]。月表局域磁场抑制太阳风,在月表附近形成微磁气圈系统^[19]。Futaana(2003)等利用离子分光

仪探测到可能被微磁气圈系统所反射的质子。2006 年,欧洲发射了 SMART-1 号绕月飞船,通过 RO 技术,收集近月空间不同经度和地方时的月球电离层电子密度总含量数据,以期建立更为准确的月球电离层模型。Stubbs 等^[20-21]认为月表附近可能携带大量电子的尘埃能够被近月空间的电场加速,并向上到达很高的区域,由此能够解释 Apollo 探月飞船着陆器(1966~1977)和宇航员的所携带的仪器观测到的月表带电尘埃云携带大量电子造成的太阳光的散射。

对月球而言,每 29.5 天中,它有 4 天处在地球磁场空间的远磁尾中,地球磁尾屏蔽、减弱了太阳风对月球的撞击力度,导致月表向日侧离子密度变小。

总之,月球表面不存在对称的全球性的电离层;太阳风中的粒子体冲击月球时,在月球的向日侧边缘可能存在电离层;月球电离层电子密度的变化与太阳风、月表剩余磁场、月相和月壤化学组成等有关。

有关探索月球电离层存在的研究和讨论延续至今,月球弱的重力场、微弱的局部磁场和稀薄的大气,导致了独特的月球电离层特性,对研究月球空间环境,建立月球基地,探索太阳系类月星体的电离层具有重要的借鉴意义。2007 年的 SELENE 工程任务中的无线电科学实验为系统研究月球电离层、探究月球电离层的存在并揭示其产生机制提供了机遇^[22-23]。

2 SELENE 观测实验

日本探月工程 SELENE 任务中的探测器由 3 颗卫星组成:一颗三轴稳定的主卫星和两颗飞行在相同轨道面不同的椭圆极轨轨道上的子卫星,其中一颗 VLBI 子卫星“VRAD Sat.”发射同步的 3 个 S-band 和 1 个 X-band 信号;另一颗中继卫星“Relay Sat.”,发射同步的 3 个 S-band 信号,它们的轨道周期分别约为 120、153 和 240 min,轨道高度分别约为 100、129~792、120~2 395 km。如图 3。2007 年 9 月 14 日,在种子岛空间中心^[24-25],利用 H-IIA 火箭成功发射, Vstar 在轨时间为 2007 年 10 月 12 日—2009 年 6 月 29 日, Rstar 在轨时间为 2007 年 10 月 9 日—2009 年 2 月 12 日。该工程的科学目标是利用 SELENE 搭载的科学探测仪器测量月球重力场、磁场、月球地形、月亮、月球环境,并在月球轨道位置处观测日地空间等离子环境^[24-25],

由此研究月球的起源与演化。

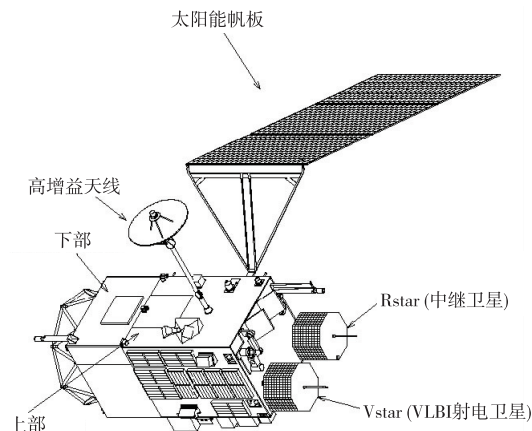


图3 SELENE 卫星
Fig. 3 SELENE satellite

传统的多普勒技术在视线方向上跟踪目标灵敏度较高,甚长基线干涉技术(VLBI)对与视线垂直方向上的目标的轨道变化有较高的灵敏度。美国NASA和欧洲ESA等已把VLBI技术广泛应用于深空探测器的精密定轨。SELENE任务同时实施VLBI、多普勒技术和同波束技术,极大地提高了深空探测器的测定轨精度。SELENE任务在全球分布8个地面跟踪站,日本国内跟踪站4个,分别为Mizusawa(MZ),Iriki(IR),Ishigaki(IS)和Ogasawara(OG),国际跟踪站4个,分别为Urumqi(UR),Shanghai(SH),Wettzell(WZ)和Hobart(HO)^[26],地球上望远镜基线距离变化从796 km(SH-IS)到12 247 km(HO-WZ)。乌鲁木齐站(新疆天文台)位于中国的新疆维吾尔自治区,海拔2 033.18 m,经度 $87^{\circ}10'41''\text{E}$,纬度 $43^{\circ}28'17.4''\text{N}$,特殊的地理位置和优良的射电环境,使之成为国际VLBI网中重要的观测站之一。2008年1月、5月、6月、7月和2009年的2月期间,乌鲁木齐站参与观测238.71 h^[27]。观测模式分为5种,Vstar/Rstar单独观测,Main-sat.单独观测,Vstar/Rstar每间隔2分钟交替观测和Vstar/Rstar同波束观测。

基于SELENE任务,我们使用VLBI观测实现月球电离层的RO观测技术,探索具有争议的月球是否存在电离层的研究课题。地基RO观测模式具有高精度、高分辨率全天候观测的优点,是探测行星大气和电离层的常用技术手段。地面望远镜跟踪目标行星的卫星,卫星被行星周围的电离层遮掩,卫星发出的电波在穿透电离层时,被电离层折射,传播路

径发生改变,根据卫星与跟踪站电波通信链路的几何构型关系,利用跟踪站接收到的电波相移信息,研究行星电离层的特性。Vstar在绕月球的任务轨道上,向位于地球上的接收机发送信号。在地球跟踪站的视线方向,当Vstar飞到月球电离层的后方(下降掩星阶段),被月球电离层遮掩,Vstar向地球发射的电波路径将穿过月球电离层,在电离层的作用下,使得电波信号相移和振幅发生改变。而后,Vstar飞到月球后方,被月球几何球面遮掩,跟踪站接收不到Vstar发出的信号。一段时间过后,Vstar从月球几何球面的另一侧飞出来(上升掩星阶段),依相反的次序重复刚才的过程。跟踪站接收来自Vstar发出的S/X双频信号,在地球-月球间的传播路径几乎一致,受到的地球中性大气层和地面接收设备的干扰因素几乎相同,经过S/X信号相位差分后,相同的误差源被消除,在一次RO事件的入掩前或者出掩后50~100 s期间,地球电离层相比于月球电离层产生相移高出约100倍或者更多。利用外推算法扣除地-月星际介质、地球电离层的干扰影响,凭借卫星发出的电波被月球电离层遮掩时,依赖时间变化的相移序列,反演电波在穿透月球电离层的传播路径上总电子含量的廓线。

3 初步探测结果

利用SELENE工程的子卫星Vstar,具有线性耦合关系的S/X双频波段耦合模式,实施传统的RO技术,以Iriki和Ishigaki观测站,2008年6月28日22:00—22:20发生的入掩事件为算例。两跟踪站望远镜口径均是20 m,地理位置分别为 $\text{N}31^{\circ}4'$, $\text{E}130^{\circ}6'$ 和 $\text{N}24^{\circ}4'$, $\text{E}124^{\circ}0'$ 。Vstar发出的电波途径月表60~30 km和30~0 km,持续时间分别为22:18:00.021—22:18:55.006约55 s和22:18:55.006—22:19:48.745约53 s。在22:19:49.433时刻,Vstar发出的电波被月球本体遮掩。此时间段月球的状态信息为East longitude 62.5° , North latitude 73.4° , Solar Zenith Angle 104° 。

研究月球表面周围附近非对称、零星分布的稀薄电离层的形态学,估计其电子总含量(TEC)。在视线方向上,地球电离层、行星际等离子体和稀薄的月球电离层混合在一起,为了获得较为纯净的月球电离层信息,采用趋势外推算法,排除地球电离层和行星际等离子体的干扰误差影响,估计距离月表30~0 km的误差影响,与实际测量的30~0 km的

观测数据差分,从而获得距离月表高度 $30 \sim 0$ km 的 TEC 约为每平方米 10^{14} el。图 4 中,线条 — 表示 IRIKI 台站观测到的 TEC 随距离月表的高度的变化,线条 - - - 表示估计值;线条 - - - 表示 ISGK 台站观测到的 TEC 随距离月表的高度的变化,线条 表示估计值。分析表明,尽管月球电离层信号很微弱,利用小型 VLBI 天线的掩星观测,仍然可以

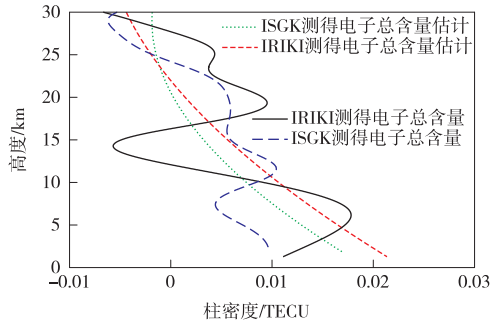


图 4 月表电离层 TEC 分布

Fig. 4 The profile of the ionosphere on the lunar surface

有效地探测到月球电离层的分布特性。

4 结束语

我们已初步具备了星-地掩星观测资料处理的能力。中国的嫦娥探月工程已发射了 CE-1、CE-2、CE-3 和 CE-5 T1,希望在我国探月后续任务中,轨道器和中国 VLBI 网地球跟踪站之间的链路遮掩期间,仅使用轨道器-地面接收站下行链路,轨道器使用恒温高精度晶体振荡器同时转发 S 和 X 波段两路耦合相干载波信号,下行接收站使用原子钟提供时间频率标准。在月球电离层遮掩轨道器-观测者之间的视线时,电离层延迟效应导致穿过它的无线电波被减速,产生电波的多普勒“红移”和相位的增加,与月球电离层分布特性对应。利用观测记录下行转发链路的载波信号的频率、相位,重建月球电离层物理参数剖面。

参 考 文 献

- [1] Carilli C L, Hewitt J N and Loeb A. Low frequency radio astronomy from the moon: cosmic reionization and more[R]. 2007. <http://lanl.arXiv.org/ps/astro-ph/0702070>.
- [2] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005. [Ouyang Z Y. Introduction of lunar science[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005].
- [3] Fessenkov V C. On the mass of the Moon's atmosphere[J]. Astron J Soviet Union, 1943, 20(1).
- [4] Dollfus A. A new investigation of an atmosphere in the neighborhood of the Moon[J]. Compt Rendus, 1952(234): 2046 - 2051.
- [5] Elsmore B. Radio observations of the lunar atmosphere[J]. Phil. Mag., 1957(2): 1040 - 1046.
- [6] Andrew B H, Branson N J B A, Wills D. Radio observations of the Crab nebula during a lunar occultation[J]. Nature, 1964(203): 171 - 173.
- [7] Walbridge E. Lunar photoelectron layer[J]. J. Geophys. Res., 1973(78): 3668 - 3687.
- [8] Hodges R R Jr. Helium and hydrogen in the lunar atmosphere[J]. J Geophys Res., 1973(78): 8055 - 8064.
- [9] Vasilyev M B, Vinodrak V A, Vyshlov A S, et al. Radio transparency of circumlunar space using the luna-19 station [J]. Cosmic Res., 1974(12): 102 - 107.
- [10] Vyshlov A S. Preliminary results of circumlunar plasma research by the lunar 22. Spacecraft [J]. Space Res., 1976(16): 945 - 949.
- [11] Vyshlov A S, Savich N A, Vasilyev M B, et al. Some results of cislunar plasma research[R]. Solar-Wind Interaction with the Planets Mercury, Venus, and Mars, NASA, 1976: 81 - 85.
- [12] Vyshlov A S, Savich N A. Observations of radio source occultations by the moon and the nature of the plasma near the moon[J]. Cosmic Res., 1979(16): 450 - 454.
- [13] Hoffman J H, Hodges R R J, Johnson F S. Lunar atmosphere composition results from Apollo 17 [C] // Procdings of 4th Lunar Sci Conf. Geochim Cosmochim: Acta, Suppl, 1973, 4(3): 2865 - 2875.
- [14] Daily W D, Barker W A, Parkin C W, et al. Ionosphere and atmosphere of the moon in the geomagnetic tail[J]. J. Geophys. Res., 1997(82): 5441 - 5451.
- [15] Lin R P, Anderson K A, Hood L L. Lunar surface magnetic field concentrations antipodal to young large impact basins [J]. Icarus, 1988(74): 529 - 541.
- [16] Lin R R, Mitchell D L, Curtis D W, et al. A. Lunar surface magnetic fields and their interaction with the solar wind: results from lunar prospector [J]. Science, 1998 (281): 1480 - 1484.
- [17] Bauer S J. Limits to a lunar ionosphere [J]. Anzeiger Abteilung II, 1996(133): 17 - 21.
- [18] Stern S A. The Lunar atmosphere: history, status, current problems and context[J]. Rev. Geophys., 1999, 37(4): 453 - 492.
- [19] Harnett E, Winglee R. Two dimensional MHD simulation of the solar wind interaction with magnetic field anomalies on the surface of the Moon[J]. J. Geophys. Res., 2000(105): 24997 - 25007.
- [20] Stubbs T J, Vondrak R R, Farrell W M. A dynamics fountain model for lunar dust[J]. Adv. Space Res., 2006 (37): 59 - 66.
- [21] Stubbs T J, Glenar D A, Farrell W M, et al. On the role of

dust in the lunar ionosphere[J]. Planet. Space Sci., 2011 (59):1659 - 1664.

[22] Oyama K, Nabatov A, Savich N, et al. Cislunar plasma exploration with the Selene radio science system[J]. Adv. Space Res., 2002,30(8):1915 - 1919.

[23] Nabatov A S, Imamura T, Savich N A, et al. Detectability of lunar plasma clouds from Selene radio occultations[J]. Adv. Space Res., 2003,31(11):2369 - 2375.

[24] Namiki N, Hanada H, Tsubokawa T, et al. Selenodetic experiments of SELENE: relay subsatellite, differential VLBI, and laser altimeter[J]. Adv. Space Res., 1999(23): 1817 - 1820.

[25] Kato M, Sasaki S, Tanaka K, et al. The Japanese lunar mission SELENE: science goals and present status[J]. Adv. Space Res., 2008(42):294 - 300.

[26] Kobayashi H, Sasao T, Kawaguchi N, et al. VERA Project,

in New Technologies in VLBI[C]. Edited by Y. C. Minh, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 2003(306):48.

[27] Liu Q, Matsumoto K, Kikuchi F, et al. Same-beam differential VLBI technology using two satellites of the SELENE spacecraft[J]. Radio Science, 2006(4):602 - 617.

作者简介:
王震(1981—),男,助理研究员,博士研究生,主要研究方向:月球行星探测,行星物理。
通信地址:中国科学院新疆天文台,新疆乌鲁木齐市科学一街 150 号(830011)
电话:18209912001
E-mail:wangzh@xao. ac. cn

[责任编辑:高莎]