

VLBI技术研究进展及在中国探月工程的应用

洪晓瑜^{1,2}, 张秀忠¹, 郑为民^{1,2}, 王广利^{1,2}, 刘庆会^{1,2}, 王娜³,
张洪波⁴, 汪敏⁵, 舒逢春^{1,2}

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 上海市导航定位重点实验室, 上海 200030;
3. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011; 4. 中国科学院国家天文台, 北京 100101; 5. 中国科学院云南天文台, 昆明 650216)

摘要: 我国探月工程将具有测距、测速能力的统一S波段(United S-Band, USB)测控系统和具有高精度测角能力的甚长基线干涉(Very Long Base Interferometry, VLBI)技术系统地结合起来, 承担对月球探测器测轨和定轨任务。简要回顾了VLBI技术的发展, 重点介绍了VLBI技术在我国探月工程的应用, 总结在工程应用中的关键技术, 分析了VLBI在探测任务中的重要作用。VLBI测轨分系统圆满完成了“嫦娥1号”“嫦娥2号”“嫦娥3号”“嫦娥4号”探测器以及“嫦娥5号”试验飞行器的测定轨和定位任务, 也为后续的月球及行星探测奠定了坚实的基础。

关键词: 月球探测; VLBI; 测定轨; 定位

中图分类号: P135, P164

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2020)04-0321-11

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200030

引用格式: 洪晓瑜, 张秀忠, 郑为民, 等. VLBI技术研究进展及在中国探月工程的应用[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(4): 321-331.

Reference format: HONG X Y, ZHANG X Z, ZHENG W M, et al. Research progress of VLBI technology and application to China Lunar exploration project[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(4): 321-331.

引言

甚长基线干涉测量(Very Long Base Interferometry, VLBI)技术是空间分辨率最高的现代天文观测手段, 在天体物理和天体测量的研究有很多重要的成果, 同时在对航天器进行精密测量方面也得到了广泛应用。一个VLBI系统通常由若干个观测站和一个数据相关处理中心组成, 观测站由大口径射电望远镜、低噪声接收机、高速数据采集和高稳定度原子频标系统等组成; 数据相关处理中心由高速大容量相关处理机和高速数据回放等系统组成, 相关处理后的数据提供给用户进行后续数据的科学分析研究。VLBI采用独立本振和数据记录, 使得望远镜间的基线长度理论上不受限制, 地面的VLBI基线达近万千米, 空间VLBI基线达到了35万km, 极大提高了观测空间分辨率和测量精度。

在“嫦娥1号”工程^[1-3]立项时, 当时已有的S频段统一测控系统(Unified S-Band, USB)主要是针对地球轨道卫星设计和建设的^[4], 可实现的最远测控距离约为8万km。“嫦娥1号”卫星进入绕月轨道后, 最远距离达40万km, 需要实现对轨道卫星进行高精度的测定轨。

虽然USB有精准的测距和测速能力, 但对于40万km远的轨道, 其测角精度相当于100多km的空间位置误差, 无法满足工程要求^[5]。另外, 当时主要的测控设施均在境内, 辅以远洋测控船, 并不具备全球跟踪能力, 特别缺乏的是在短弧的高精度测定轨, 即在卫星过境期间进行高精度测定轨及预报能力。而短弧测定轨必须有角度的测量信息, 才能结合距离信息实现对卫星空间位置的精确定位。

VLBI天文观测系统具有非常高的空间角分辨率测量能力, 能够对河外射电源的方位信息实现毫角秒测角精度, 但无法获得空间目标精准的距离信息, 不能独立测定其三维的空间位置^[6]。为了实现突破我国测控能力从8~40万km飞跃, 需要在已有设备基础上进行技术挖潜和创新设计, 来实现对40万km的远距离测控进而完成探月轨道卫星的高精度测轨和定轨等任务。经过充分论证, 将具有测距、测速能力的USB系统和具有高精度测角能力的VLBI系统结合起来共同承担探月任务的测定轨任务。通过USB与VLBI测量数据的融合处理和分析, 实现了对探测器在地月转移段, 月球捕获段的快速定轨和绕月段的高精度定轨等^[5]。

1 VLBI技术发展历程

VLBI技术是在综合孔径射电望远镜基础上,为获得更高的空间分辨率,需要更长的基线而发展起来。20世纪60年代,前苏联科学院列比捷夫物理研究所的天文学家首次正式发表关于“独立本振和磁带记录”长基线干涉仪的VLBI概念^[7]。独立本振早期采用铷钟,随着技术的发展,为了提高精度,现在主要采用高精度的氢原子钟。最初的数据主要是采用磁带记录,后来为了提高记录带宽,降低成本,采用硬盘记录,随着互联网的发展,现在也通过光纤实时传输观测数据。

1967年3月,美国和加拿大的射电天文学家分别在18 cm和49 cm波段,采用铷原子钟作为频率源,成功进行了VLBI试观测。由此,开创了射电天文超高分辨率和超高定位精度的VLBI时代^[8-9],VLBI技术经过半个多世纪的发展,形成了几个常规运行地面的VLBI网,也开展了两个空间VLBI项目,在天文研究领域及深空探测中得到很好的应用。

1.1 国际地面VLBI网

国际上常规运行的VLBI网主要有:欧洲VLBI网络(The European VLBI Network, EVN)、美国长基线阵(Very Long Baseline Array, VLBA)、国际测地学和天体测量VLBI网(International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, IVS)、东亚VLBI网(East Asian VLBI Network, EAVN)、事件视界望远镜(The Event Horizon Telescope, EHT)等。

早在1980年, EVN由欧洲(德国、英国、荷兰、意大利、瑞典)的5台大型射电望远镜组成,后扩展到欧洲大部分地区和亚洲的射电望远镜网络,以及在南非和波多黎各的天线,目前共由28个台站的射电望远镜组成,用于对宇宙射电源进行高空间分辨率的观测,主要从事天体物理研究,工作频率有1.4、1.7、2.3、5、6、8.3、15、22 GHz,数据记录速率最高可达2 Gbit/s。EVN是目前世界上最灵敏的VLBI阵列,也是唯一具有实时天文观测能力的国际VLBI阵列。我国上海佘山25 m射电望远镜和新疆南山25 m射电望远镜在20世纪90年代初加入EVN,上海天马65 m射电望远镜和云南昆明40 m射电望远镜也在2013年加入EVN。中国的射电望远镜对提高EVN在天文观测和研究中的空间分辨率发挥了非常重要的作用。

VLBA是在美国各地专门建设的10个口径25 m的射电望远镜组成的网络,形成了世界上的专用VLBI阵列,主要开展天体物理和天体测量观测研究,观测频率覆盖0.3~96 GHz,最高数据记录速率为2 Gbit/s。

IVS由17个国家32个研究机构的望远镜和7个数据处理中心组成,主要从事空间大地测量和天体测量研究和业务活动。上海和乌鲁木齐射电望远镜是IVS观测网核心站,上海天文台还是IVS的一个数据处理中心,开展相关处理、后处理和分析工作。

EAVN是东亚地区的一个合作项目。目前,由中国、日本和韩国的21个射电望远镜组成,可以灵活采用子阵列方式开展特定目标的科学项目。EAVN在22 GHz频率上可以获得的最高分辨率为0.5 mas,可对活动星系核中的喷流进行精细成像,对脉泽和脉冲星进行高精度的天体测量。

EHT是近几年发展起来的一个国际合作项目,已经形成并继续稳定发展,提高了VLBI在短波长的能力,以追求最高分辨率的目标。EHT由国际上8台具有亚毫米波观测能力的射电望远镜组成,观测频率是230 GHz和345 GHz,数据速率为16 Gbit/s。EHT致力于测量活动星系核发射区域的两个超大质量黑洞最大表观视界银河系的中心SgrA *和一个星系M87中心,并已在M87黑洞观测研究中发挥了巨大作用。

1.2 空间VLBI项目

VSOP^[10]是由日本的空间和航天科学研究所牵头,与日本国家天文台合作的项目。VSOP卫星于1997年2月12日在鹿儿岛航天中心新型ISAS MV火箭上成功发射。卫星在成功发射后更名为通信与天文高级实验室(HALCA),于1997年2月27日和28日成功地地在轨道上部署了直径为8 m的射电望远镜。HALCA是地球椭圆轨道卫星,赤道倾角31°,远地点高度2.1万km,近地点高度560 km,绕地周期6.3 h,卫星上的天线与地面上的天线组成的最长基线可达地球上可观测基线长度的3倍,设置的观测波段有1.6 GHz(18 cm)、5 GHz(6 cm)和22 GHz(1.3 cm)。由于22 GHz的接收机出现了故障,系统噪声温度太高,无法用于天文研究。实际的观测频率只有1.6 GHz和5 GHz,分辨率也无法达到HALCA最初的预期。设计寿命是3年,但实际工作到2003年10月,最后由于无法控制卫星指向,失去了天文观测能力。

RadioAstron^[11]是由俄罗斯位于莫斯科的列别捷夫物理研究所的Astro航天中心领导的国际空间VLBI项目。俄罗斯2011年7月18日在Baykonur发射了卫星(Spektr-R),携带着一个直径为10 m的射电望远镜,绕着地球作椭圆轨道运动,轨道倾角51°,近地点7 000~80 000 km,远地点27~37万km,轨道周期8~9 d。RadioAstron的观测频率300 MHz(92 cm)、1.6 GHz(18 cm)、5 GHz(6.2 cm)和22 GHz(1.19~

1.63 cm), RadioAstron用于空间VLBI在22 GHz上的最长基线分辨率是7 μs 。RadioAstron的预计寿命是5年,由于其良好的性能,持续运转到2019年才结束。上海和乌鲁木齐射电望远镜参加了VSOP和Radioastron的VLBI的大量观测,对其科学目标的实现发挥了重要作用。

1.3 VLBI技术在天文研究领域的应用

VLBI观测的对象为宇宙中具有射电波段辐射的自然天体(如类星体、射电星系和脉冲星等)。在VLBI观测时,各观测站的天线同时跟踪同一目标,将接收到的信号记录在磁盘上,然后送到VLBI数据处理中心,再进行数据回放和互相关计算,获得该VLBI系统各条基线的干涉条纹,进而计算得到VLBI观测值,即干涉条纹的幅度和相位、射电源辐射的电磁波的一波前到达基线两端的时间差(简称时延)及其变化率(简称时延率)等。干涉条纹的幅度和相位提供有关射电源亮度分布的信息,可以开展天体物理领域的研究,如:活动星系核致密结构及其偏振成像^[12-14]、黑洞周边辐射区的直接成像(如第一张黑洞图像)^[15]、银河系脉泽源和河外星系超脉泽源^[16-18]等等。VLBI时延和时延率提供有关基线矢量(长度和方向)和射电源位置(赤经和赤纬)的信息,可以开展测地学和天体测量研究,如:天球参考架^[19-20]和地球自转变化(ΔUT1)^[21-23]等研究。VLBI在天体物理和天体测量领域的研究,对实时性没有要求,有时科学家在观测后数月才能获得相关处理后的干涉数据进行科学研究。

1.4 VLBI技术在深空探测器中的应用

由于VLBI技术具有很高的测角精度,自20世纪70年代起,也逐步应用到深空探测领域中。在美国的“阿波罗”登月计划中,运用同波束VLBI技术确定了月球车相对于登月舱的运动轨迹,其横向位置测量精度达到了数米^[24];在20世纪80年代美国和前苏联分别实施的金星大气风速测量中,均使用了VLBI技术,风速测量精度达到了几十 cm/s ^[25];2011年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)成功发射的“好奇号”(Curiosity)火星车,利用测速测距和 ΔDOR 数据,在2亿 km 远的火星捕获段,其约束能力达到400 m左右,实现了火星探测器高精度的测定轨精度^[26]。日本的“月亮女神”探测器(SELenological and ENgineering Explorer, SELENE)项目中,利用多频点同波束VLBI技术获得了Rstar和Vstar两个小探测器的皮秒量级的差分相延时延数据与测速数据相结合,得到10 m左右的测定轨精度,并改进了月球重力场模型^[27]。

中国科学院上海天文台自20世纪90年代起,也开始了VLBI应用于深空探测的研究,并多次参加了国际合作的深空探测VLBI观测,如:美国“火星环球勘测号”(Mars Global Surveyor, MGS)入轨段的VLBI测量;中-俄合作火星和金星雷达回波的VLBI测量;欧洲航天局(European Space Agency, ESA)“惠更斯”(Huygens)探测器与“卡西尼”(Cassini)宇宙飞船分离后飞向“土卫6”过程的VLBI测量等,这些观测主要是采用事后处理模式。

2 VLBI测轨的关键技术

我国探月工程VLBI测轨与传统的VLBI天文观测研究不同,对测量结果的实时性、可靠性和稳定性,以及测量精度方面有明确的要求,而且观测和数据处理模式也有很大的不同。因此需要建立一个满足航天工程需求的实时VLBI测量系统。

测轨分系统由上海、北京、昆明、乌鲁木齐等4个VLBI测控站组成,分系统的工作流程如图1所示。VLBI分系统接受北京指挥控制中心的指挥(简称“北京中心”)和调度,VLBI中心安排台站观测、数据实时传输、数据实时处理。

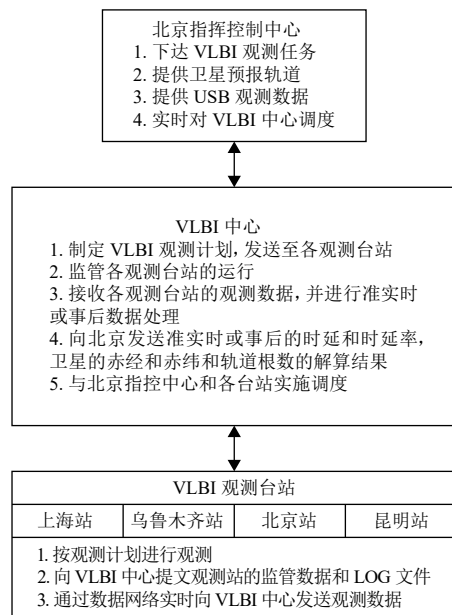


图1 VLBI测轨分系统工作流程

Fig. 1 The working process of track subsystem of VLBI

VLBI中心的数据处理流程,主要包括数据的接收和回放、互相关计算、时延和时延率计算、误差修正,以及卫星轨道参数计算和卫星赤经和赤纬计算等,如图2所示。

VLBI系统任务特点:①可靠性要求高,有连续跟

踪测轨的能力；②实时性要求高，“嫦娥1号”任务要求在准实时工作模式时，从接收到数据，随后进行各项数据处理，到最后送出测量结果的全部时间不超过10 min；③距离近、轨道变化多，目标的角速度大且变化快。因此在执行任务前需要解决一些关键技术，以确保任务的顺利实施。

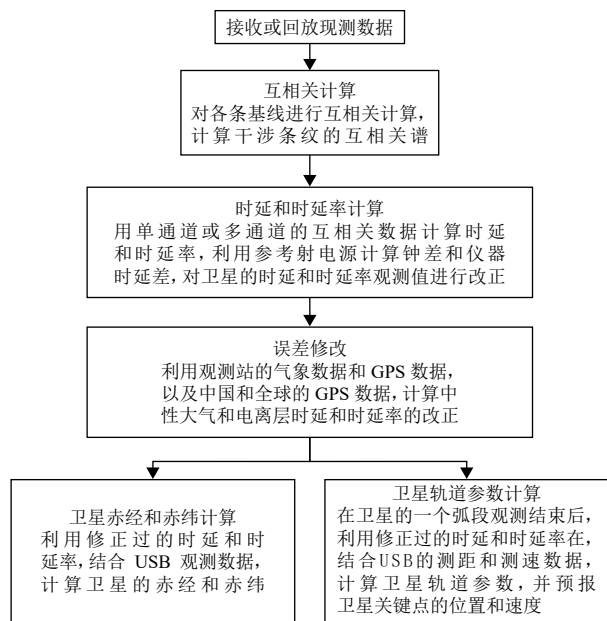


图2 VLBI中心的数据处理流程

Fig. 2 Data processing flow of VLBI center

2.1 实时VLBI技术 (e-VLBI)

随着高性能计算机与高速网络通信等技术的不断发展，电子化VLBI (e-VLBI) 技术也得到不断的发展，VLBI观测数据通过网络传输到数据处理中心进行实时处理，这使得VLBI技术在航天工程的实时应用成为可能。

为满足探月工程实时VLBI测量要求，首先需要建立台站端和数据中心端都具备实时e-VLBI能力。台站VLBI数据终端的作用是将射电望远镜接收机输出的中频信号转换为基带信号，并由数据采集设备按照固定格式进行传输。数据中心端是接收到网络传输来的数据流进行本地存储并复制转发到后续的软件和硬件相关处理机。

自主开发VLBI系统数据收发系统和相关软件，实现了控制采集4个观测站的VLBI原始观测数据并通过网络实时传送至VLBI数据处理中心，然后发给硬件处理机进行相关处理。在“嫦娥1号”任务实时性指标要求为10 min，4个VLBI测站的观测数据通过光缆，以16 Mbps传送到VLBI中心后，传输时间仅用15 s。为了确保可靠性，每个台站都使用两路独立的光缆传输数据，互为备份。

从探月工程二期“嫦娥3号”任务开始，VLBI系统实时性指标提升至1 min。为此进行了全新研发和系统建设，传输时间仅用1 s，并且具备了冗余保护能力，实现不间断的数据流。该系统也在“嫦娥5号”飞行试验器和“嫦娥4号”任务中表现优异。在“嫦娥3号”和“嫦娥4号”任务中，数据的传输速率也分别提高到64 Mbps和128 Mbps。数据传输速率的提高，不仅能够更好地传输卫星信号数据，还可以采用更宽带宽观测校准射电源，以提高观测精度。

2.2 差分测距技术 Δ DOR

VLBI观测探测器发送的宽带信号或多频点信号采用 Δ DOR^[28] (Delta-differential One-Way Ranging) 带宽综合技术，得到高精度时延观测值，并通过与射电源交替观测修正设备及传播介质误差。相对于窄带测量技术，因为 Δ DOR有更宽的信号带宽可以实现更高的测量精度，目前成为航天领域广泛采用的测量技术。

对于X波段观测，现在常用的为在下行的载波信号上用不同频率的两个正弦波信号调制产生两对DOR信号，它们与载波的频率间隔为 ± 3.8 MHz和 ± 19.2 MHz，所以DOR信号的最大频率间隔为38.4 MHz。

对于S波段观测，在下行的载波信号上用不同频率 (2 235 MHz和2 245 MHz) 的两个正弦波信号调制产生两对DOR信号，左右两个侧音与载波的频率间隔为 ± 3.7 MHz。DOR信号的最大频率间隔为7.4 MHz，实现中继星S波段 Δ DOR技术相对于X波段 Δ DOR需要解决3方面的问题：S波段测站环境干扰信号抑制、S波段电离层测量误差修正技术、S波段 Δ DOR算法实现，重点是模糊度消除。

在实时模式工作时，要求探测器观测完成后最快在1 min内提供 Δ DOR观测结果，只能由外推方法得到探测器时延的修正值。所谓修正就是通过射电源观测得到台站设备系统误差、台站氢钟钟差、电离层和中性大气对时延值的综合影响，然后在探测器的时延观测测量中扣除。经过这些修正后，就大大减小了探测器时延观测测量中的系统误差；同时，还利用全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 和水汽辐射计等来改正大气和电离层延迟。至此，经过系统误差修正后的探测器时延观测测量，可以获得更高精度的探测器轨道位置。

2.3 同波束技术

对于多个探测器测定轨，当他们空间的角距离较近时，信号可以同时被地面每个VLBI测站同时接收时，更适用的同波束VLBI技术。同波束VLBI技术可以同时得到两个探测器信号的相关相位，并通过探测器

间差分，消除电离层、中性大气及观测装置的绝大部分影响，最终得到超高精度的差分相对延数据。差分相对延数据能准确反映2个探测器相对位置及其变化，可同时提高2个探测器的绝对和相对定轨定位精度。

在“嫦娥3号”实时任务期间，采用同波束VLBI技术，求取月球车和着陆器间的差分群时延，获得了100 m的相对定位精度。在事后处理阶段，采用1 h左右的月球车和着陆器间的随机误差1 ps的差分相对延数据^[29]，并在定位时对整周模糊度进行解算，将月球车的相对定位精度提高至1 m左右，并以数厘米的灵敏度监测出月球车的移动转弯等动作，利用相位参考成图方法，同样把月球车的相对定位精度提高至1 m左右^[30]。

2.4 宽带VLBI数字基带转换器技术

VLBI数据记录是系统非常重要的专用设备，由基带转换器（Base Band Converter，BBC）和记录介质（磁带或硬盘）组成。对于固有的射电望远镜，其提高的灵敏度往往是通过增加观测带宽以及增加积分时间来实现，而增加带宽需要更高的数据记录速率。基带转换器传统上使用的是模拟的基带转换器，通过分立单元，从宽带中频信号提取所需的窄带信号，转移到基频。

VLBI测轨分系统成功应用于“嫦娥1号”任务后，2007年开始自主研发VLBI数字终端，2009年成功研制第一代VLBI数字终端，CDAS^[31]（Chinese VLBI Data Acquisition System），并配备在VLBI测轨分系统的4个台站，从“嫦娥2号”开始应用VLBI数据采集工作。2017年成功研制了第二代VLBI数字终端（CDAS2-D），其数字终端基于模数转换器（Analog-to-Digital Converter，ADC）+现场可编程门阵列（Field-Programmable Gate Array，FPGA）构架，由信号处理、频率综合、信号采样、数字信号处理和总控制器等几个部分组成，减小了体积，提高了设备的集成度和自动化程度，CDAS2-D在数据记录、通道时延和量化模式上，有了新的突破。在对“嫦娥4号”中继星和探测器进行VLBI实时测定轨任务中，CDAS2-D具备采集、记录、传输一体化和多比特量化功能，提升了性能，替代了进口的Mark5B终端，极大地提高了VLBI测站的系统可靠性。

3 VLBI测轨在探月工程中的应用

3.1 VLBI测站设备

VLBI测站的基本设备包括：大口径射电天线、S/X双频致冷低噪声接收机、VLBI高速数据采集系统（终端和数据记录）、高稳定度氢原子钟及时间和频率比对系统等，设备组成框图如图3所示。

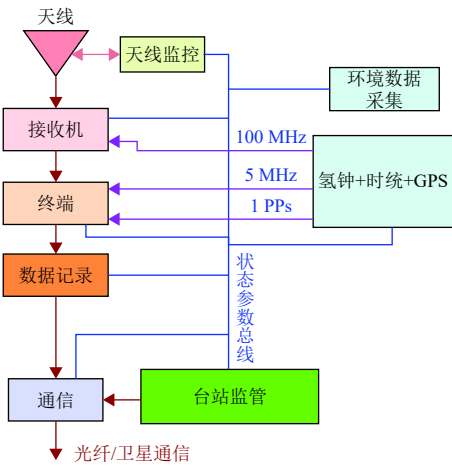


图 3 VLBI台站设备组成框图
Fig. 3 Block diagram of station equipment

大型射电天线是用于射电天文研究和深空探测最重要的关键设备。天线的总体指标为天线系统灵敏度和系统噪声温度，分项关键指标包括天线的口径、效率、工作波段、指向精度、跟踪速度、面形精度等。系统噪声温度主要包含天空大气辐射噪声、天线、馈源、接收机的噪声贡献，以及地面辐射泄漏噪声。天线的口径越大，收集信号的面积就越大，对系统灵敏度的贡献也就越大。工作波段即天线能够接收的频率范围，在探月工程中，主要采用的是S（2.2 GHz）和X（8.4 GHz）波段，今后将会向更高频率的Ka（32 GHz）波段发展。天线的指向精度与天线的波束宽度有关，一般要求指向精度好于1/10波束宽度。天线的面形精度与天线的工作频率和天线效率直接相关，面形精度越高，天线能够工作的频率就越高，天线效率也相应提高，一般要求面形精度好于工作波长1/20。

VLBI测轨分系统5台大型射电望远镜分别是1987年建成的余山25 m射电望远镜、1993年建成的乌鲁木齐25 m射电望远镜、2006年建成的北京密云50 m射电望远镜和昆明40 m射电望远镜，以及2012年建成的上海天马65 m望远镜。它们在S和X波段上的系统灵敏度和系统噪声温度如表1所示。

表 1 VLBI测轨分系统台站的系统灵敏度和系统噪声温度
Table 1 The sensitivities and the system temperatures of the 5 stations of VLBI tracking system

观测站	密云	昆明	南山	天马	余山
波段	S/X	S/X	S/X	S/X	S/X
SEFD/Jy	253/247	395/384	890/373	97/42	1 348/723
Tsys/K	80/60	80/60	70/30	60/30	120/40

高灵敏度致冷接收机是VLBI观测研究的关键设备，主要用于接收月球探测器信标和标校天体射电源

信号，并将其低噪声放大和锁相变频到适合VLBI数字终端接口电平要求的中频信号。致冷接收机的低噪声放大器等核心前级器件工作在15 K温度环境中（约-258℃），等效噪声温度相对比传统常温设备降低一个量级，大幅度提升了接收灵敏度。在“嫦娥1号”工程中，VLBI测轨分系统为在4个测站配备了新的国产S/X双频致冷接收机，并在后续任务中进行升级。自主研发的S/X致冷接收机采用了双频馈源网络、致冷极化器、HEMT（High Electron Mobility Transistor）致冷低噪声放大器、超导滤波器等核心技术，实现了S/X双频信号的同时同目标高灵敏度接收。

VLBI台站采用的独立本振信号，由氢原子钟提供，为采集和接收数据提供高稳定度的频率基准信号，其频率稳定度将直接影响观测的灵敏度和测量精度。而各台站之间的时间频率信号同步性能也直接由氢原子钟的性能决定。上海天文台自20世纪70年代开始研制氢原子钟，其研制的SOHM-3型氢原子钟自1994年开始就配置于我国VLBI网，2010年在北京密云测站、云南昆明测站、新疆乌鲁木齐测站和上海佘山测站安装了升级的SOHM-4型氢原子钟，圆满完成了探月工程的观测任务。目前新型的SOHM-4A型氢原子钟于2020年开始安装在VLBI测站，正在参加火星探测任务，并将参与在2020年年底发射的“嫦娥5号”采样返回任务。VLBI测轨分系统所用的各型号氢原子钟典型性能指标对比如表2所示。新型SOHM-4A型氢钟无论是电性能指标还是可靠性指标，较探月前期使用的SOHM-4型氢钟都有了显著提高，天稳定度由 7×10^{-15} 提高到 2×10^{-15} ，平均无故障时间（Mean Time Between Failure, MTBF）由5 000 h提高到1万h以上。

表2 上海天文台各型号氢原子钟典型性能指标对比				
Table 2 Comparison of typical performance indexes of each type of hydrogen maser of Shanghai Astronomical Observatory				
项目\性能指标	SOHM-3型	SOHM-4型	SOHM-4A型	
频率稳定度/s	1	1×10^{-12}	6×10^{-13}	3×10^{-13}
	10	2×10^{-13}	8×10^{-14}	6×10^{-14}
	100	5×10^{-14}	3×10^{-14}	1×10^{-14}
	1 000	2×10^{-14}	9×10^{-15}	5×10^{-15}
	10 000	1×10^{-14}	7×10^{-15}	2×10^{-15}
	86 400	3×10^{-14}	7×10^{-15}	2×10^{-15}
频率漂移率/d		$\leq 3 \times 10^{-14}$	$\leq 1 \times 10^{-14}$	$\leq 2 \times 10^{-15}$
MTBF/h		$\geq 5\,000$	$\geq 5\,000$	$\geq 10\,000$

3.2 VLBI数据实时处理系统

VLBI系统数据收发系统和相关软件实现了控制采

集4个观测站的VLBI原始观测数据并通过网络实时传送至VLBI数据处理中心。

VLBI数据处理中心由通信接口、相关处理机（包括硬件相关和软件相关）、相关后处理、误差修正、角度计算、轨道计算、观测纲要计算和系统状态监测、管理等部分组成。为了保证可靠性和稳定性，所有软件将在主备互为热备份的硬件系统上运行以增强系统可靠性。VLBI中心除设备机房外，还有指挥控制大厅，用于对分系统的状态监测和指挥调度，VLBI中心具有接受北京中心的调度指挥和与北京中心的数据通信功能，VLBI中心功能如图4所示。

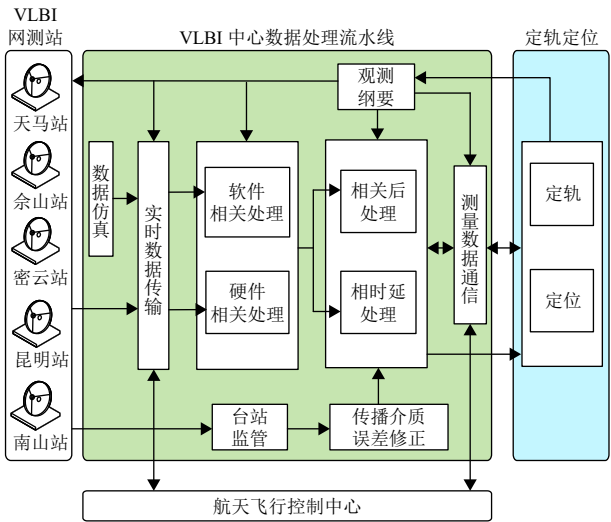


图4 VLBI中心数据处理流程框架

Fig. 4 The data processing process framework in Shanghai VLBI center

3.2.1 数据相关处理

相关处理机系统是VLBI数据处理系统的核心设备，具有数据及计算密集的特点。为了满足对探月工程对实时性、可靠性高要求。为此，分别采用了大规模FPGA技术和先进的软件相关处理技术，研制了互为备份的硬件处理机和软件处理机。自行设计的小型相关处理机结构，显著减少了各部件间的数据传送量。具有独特的全通道相位校正信号提取、卫星条纹快速自动搜索与模型拟合功能。

硬件处理机采用先进的大规模FPGA技术，台站数据回放接口（PlayBack Interface, PBI）和快速傅里叶算法（Fast Fourier Transform, FFT）组成测控站电子学部件。交叉相乘部件（Multiply ACcumulate, MAC）和长期累加部件（Long Term Accumulate, LTA）组成基线电子学部件。台站电子学部件和基线电子学部件在主控制单元控制下工作，主控制单元控制由硬件电路和实时控制计算机及相应的控制软件组

成;基线电子学部件和主控制单元可控制和容纳多个台站的站电子学部件。系统在MAC部件中设置实时条纹搜索部件和相位校正信号提取器,实时地进行条纹搜索和提取相位校正信号。

软件处理机系统采用CPU+GPU混合结构的高性能计算集群及高速硬盘阵列构成,基于实时并行计算技术,获得实时性、可靠性和高性价比。软件处理机平台采用Linux操作系统。集群系统内计算单元采用40 Gb高速InfiniBand和万兆以太网互联,确保内部高速数据和信息的实时传递。件相关处理机为专门编制的VLBI信号处理软件,采用数据驱动、多线程技术、消息传递技术等多种方法提高计算速度和实时性。当探测器预报时延模型精度不够时,软件处理机系统可通过特殊的条纹搜索功能,现场实时自主重构高精度时延模型,引导处理机完成探测器信号相关处理,这一功能在确保探测器轨道机动前后的实时测量及快速定轨方面发挥了十分重要的作用。软件处理机还具备支持探测器VLBI高精度相位参考成图定位功能。

软件和硬件相关处理机均采用FX型结构,具备数据实时接收、解码、相关处理、相位校正信号提取、实时监视等功能。

同时,根据历次工程型号中的新要求,相关处理机也得到了不断的发展。现有处理机可同时完成中国VLBI测控网每站128 Mbps数据实时处理。为适应后续月球与行星探测工程与科研需求,相关处理机将会向着多任务、多目标子网、空间VLBI及其多功能等方向发展。

3.2.2 数据相关后处理

相关后处理对相关处理输出的条纹数据进行条纹拟合,计算得到探测器的VLBI时延和时延率测量值。利用差分射电源观测处理结果修正测量系统设备误差和钟差,并进行中性大气和电离层误差改正,最后将处理结果分别送测角计算和轨道计算数据处理系统。

在“嫦娥1号”和“嫦娥2号”任务中,VLBI测轨分系统采用S波段窄带单通道信号进行测定轨。在“嫦娥2号”进行了 Δ DOR实验,信号处理中采用射电源观测的残余时延对卫星观测的残余时延进行修正,然后与卫星相关处理模型时延相加得到观测总时延。

在“嫦娥3号”和“嫦娥4号”探测器的VLBI测轨中实现了利用X波段 Δ DOR多信号综合处理的测定轨能力。VLBI测轨系统建立了具有自己鲜明特色的测量与数据处理系统,所有算法与软件都立足于自主研发,整个系统具有双路热备运行能力,即可以满足实时性运行需求,也具备事后处理能力。满足了更快的实时性和

更高的测量精度的需求。“嫦娥4号”VLBI测轨中首次自主研制了并使用了S波段 Δ DOR测量技术应用于其中继星的测定轨任务,并根据任务实际需求,实现了VLBI系统分时快速转换观测“嫦娥4号”中继星和探测器。

3.2.3 误差修正

中性大气和电离层延迟是VLBI技术定轨的主要误差源。需要建立中性大气和电离层模型,实现传播介质误差的实时计算。经过多次任务的不断深入研究和不断优化,目前采用基于全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)反演的电离层延迟修正方法,取得了较好的修正效果。针对探月工程高精度需求,在中国区域加密更多测站,构建了新的全球电离层精修正模型(ShangHai Astronomical Observatory-Total Electric Contents, SHAO-TEC)。与欧洲定轨中心发布的全球电离层修正模型(Center for Orbit Determination in Europe-Total Electric Contents, CODE-TEC)相比,在电离层平稳期,采用两种模型计算的VLBI测站上电离层时延RMSE最大值为1.3 ns;当电离层处于活跃期时,基于SHAO-TEC模型的VLBI定轨残差相比CODE-TEC模型在S波段提高了2~3 ns,大大提高了测量精度。

3.2.4 多种测量数据综合定轨技术

从“嫦娥1号”到“嫦娥4号”任务,我国月球探测器就使用地基测距测速和VLBI联合测轨模式,实现对月球探测器的精密测定轨。VLBI测轨分系统参与测定轨的计算,是探月工程三个测定轨中心之一。针对国内深空探测精密定轨软件的空白,自主研发了月球探测器精密定轨软件,该软件已经成功应用于“嫦娥3号”探测器的精密定轨和月面目标定位工作中,以及后续月球和行星探测任务。

“嫦娥3号”是我国首个月球软着陆探测器,新增动力落月段和月面工作段的测定轨定位工作,这也是工程任务实现的关键阶段。针对该任务新增技术要求,提出了运动学统计定轨定位方法,可以提高动力落月段和着陆器巡视器的定轨定位精度。综合分析落月轨迹确定精度优于100 m,着陆器定位结果和月球勘测轨道飞行器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)图像数据差异小于50 m,差分群时延数据巡视器相对定位精度在百米量级,而利用高精度的差分相时延数据,结合一定的数据处理策略,得到精度在米级的着陆器和巡视器相对定位结果。

VLBI测量数据在月球探测的各个阶段轨道计算和预报均能发挥重要作用,可以提高探测器的定轨定位

精度,特别是对控后短弧定轨精度贡献尤其显著。

3.2.5 赤经和赤纬计算及单点定位

测角归算是通过误差修正的卫星VLBI观测量(时延和时延率),以一定的历元间隔序贯完成理论值计算和参数偏导计算、观测量内插、误差方程生成与求解、参数迭代,归算卫星在地心平赤道坐标系中的角位置(赤经、赤纬),并以适当形式实时显示观测量和测角归算结果。

基于VLBI的时延、时延率以及测距测速数据,开发了高精度卫星的实时单点定位和准实时联合统计定位。实时单点定位不受力学约束能够快速准确给出卫星的三维位置信息。在特殊的轨道阶段,如卫星变轨和近月捕获制动等特殊阶段,实时快速给出6个瞬时轨道根数,为工程提供重要参考。

3.3 VLBI技术的应用

3.3.1 “嫦娥1号”测定轨

在“嫦娥1号”探测器VLBI测轨任务中,采用S波段,分别在调相轨道段、地月转移轨道段、月捕获轨道段、环月运行轨道段等进行单通道信号测定轨。VLBI测轨分系统在两站及以上共视、仰角大于 10° ,距离大于2万km时实施跟踪观测;向北京中心提供卫星VLBI观测的时延、时延率、卫星角位置;在准实时观测阶段,提供数据相对于实际测量的滞后时间小于10 min。VLBI测轨分系统参加定轨工作,在每一次跟踪弧段结束后30 min内向北京中心提供定轨后的轨道根数和关键点预报;在每一测量弧段结束后3 h内完成该弧段所有测轨数据的精修正,并送往北京中心。

VLBI测轨数据的精度实际最高可达到时延误差5.0 ns,时延率误差1.0 ps/s,测角误差赤经 $0.05\sim 0.36$ mas,赤纬 $0.07\sim 0.20$ mas,优于任务要求指标。在实时性方面,实际做到滞后时间为好于6 min。同时利用VLBI观测数据与测距、测速数据进行综合定轨(包括实时定轨和事后3 h精密定轨任务),定轨精度显著高于用USB测距测速数据单独定轨的精度,特别是关键变轨的短弧定轨精度有数量级的提高。

3.3.2 “嫦娥2号”测定轨

“嫦娥2号”VLBI测轨任务采用S波段单通道信号测定轨,同时开展X波段 Δ DOR多信号综合处理的测定轨实验。联合USB和VLBI测轨数据进行轨道确定。圆满完成了控前6 h,控前3 h、控后1 h、控后3 h定轨以及每天的常规定轨任务,定轨结果和北京中心以及西安卫星测控中心符合良好,为卫星各个阶段的轨控提供了重要参考依据。特别在第一次轨道修正,近月制动和 100×15 km弧段的测定轨工作中发挥了重要作用,

测量精度优于任务指标要求,保证了任务的顺利进行^[32]。VLBI测轨数据的精度满足任务要求,比“嫦娥1号”有所提高。

VLBI测轨分系统于2012年12月初参加了“嫦娥2号”飞越700万km图塔蒂斯(Toutatis)小行星测定轨工作,进行了连续跟踪观测1周,每次观测弧长8 h。联合USA和VLBI数据进行综合定轨,轨道精度稳定在10 km以内。

3.3.3 “嫦娥3号”测定轨

VLBI测轨分系统在“嫦娥3号”任务中首次采用X波段 Δ DOR技术精确测定探测器的轨道和位置。在可见弧段VLBI进行跟踪测量,地月转移段和环月段利用探测器的DOR(单向差分测距)信号进行 Δ DOR测量,用于“嫦娥3号”轨道确定和预报,时延测量精度要求为4 ns,数据滞后时间为1 min。综合VLBI、测距、测速数据,完成“嫦娥3号”各轨道段测定轨和预报;落月初期,对着陆器进行 Δ DOR测量,并进行月面定位;落月后利用着陆器和巡视器的下行信号进行同波束测量,用于着陆器和巡视器的相对定位;对着陆器定位精度为1 km,对“玉兔号”巡视器进行相对定位,精度为500 m。

为完成“嫦娥3号”高精度和1 min实时任务,上海天马站65 m射电望远镜参加了测轨,工作模式包括实时和事后两种工作模式。实时模式时,各观测站的数据经通讯网络实时送往VLBI中心进行数据处理;事后模式时,各测站先将数据记录在磁盘上,然后送VLBI中心。

从2014年12月2—26日,VLBI的高精度测量数据和定轨结果,极大地支持了“嫦娥3号”探测器两次中途修正、近月制动、环月降轨、动力下降和月面软着陆等关键测控事件的实时观测。VLBI使用了新型 Δ DOR测量技术,通过交替观测探测器及其附近的射电源,修正系统误差。

综合利用VLBI+双程和三向测距(速)数据向北京中心提供控前6 h,控前3 h和控后30 min的定轨结果,实现了着陆器动力落月段轨迹的实时监控。利用运动学统计定轨定位方法,综合分析落月轨迹确定精度优于100 m^[33]。

针对“嫦娥3号”月球车和着陆器的实际信号,提出了利用同波束VLBI技术解算含微小系统差的差分相时延并进行月球车相对定位的方法。在“嫦娥3号”中,利用着陆器和月球车的同波束VLBI数据,把月球车的相对定位精度提高至1 m,并以厘米级的灵敏度监测出月球车的移动、转弯等动作^[29-30]。

3.3.4 “嫦娥4号”测定轨

国际上首次实现S波段 Δ DOR对中继星测轨。针对地面测站S波段电磁干扰强、电离层影响大等难题,创新发展了模糊度消除技术,采用测站信号滤波技术,优化了电离层高精度快速预报模型,实现了时延测量精度优于2 ns、时延率测量精度优于1ps/s。首次实现了在地月拉格朗日L2点Halo轨道S波段的精密定轨预报。针对Halo轨道动力学约束弱、轨道参数相关性强等难题,采用多种类型数据融合、测量系统误差参数约束等技术,实现中继星定轨预报24 h的位置和速度精度(1 σ)分别为1.8 km和17 mm/s。针对地面测轨资源有限,不能对中继星和探测器同时观测的难题,采用两个目标S/X频段的频率快速转换、测量设备快速配置和目标快速跟踪等技术,实现了转换时间小于30 min,实现了VLBI系统分时快速转换观测。

VLBI测轨分系统综合利用了VLBI测量结果、测距测速数据实现对中继星和探测器各可见飞行段的定轨定位和轨道预报。利用S波段 Δ DOR技术开展中继星测轨工作,时延、时延率总体平均精度0.4 ns、0.1 ps/s,定轨后残差0.8 ns、0.7 ps/s。利用X波段 Δ DOR技术开展探测器测轨工作,时延、时延率总体平均精度0.2 ns、0.1 ps/s,定轨后残差0.7 ns、0.5 ps/s。

3.3.5 “嫦娥5号”实验飞行器测定轨

“嫦娥5号”实验飞行器对VLBI测轨分系统完成对试验器地月转移轨道段、月球近旁转向段和月地转移轨道段的干涉测量任务;完成对试验器地月转移轨道段、月球近旁转向段和月地转移轨道段的轨道确定和预报。

VLBI测轨分系统首次在实时任务期间利用试验器X波段VLBI测量信标通过带宽综合处理提供高精度时延观测量,利用完全自主研制的定轨软件圆满完成了对试验器不同测控弧段的测定轨任务要求,成功完成了对“嫦娥5号”试验器舱器分离点的准确预报任务。针对本次任务存在频繁轨道机动,条纹搜索处理全程实时工作,满足了对相关处理时延模型的需求。整个处理过程实时性大部分在1 min之内。经过定轨后的综合评估时延系统测量精度好于2 ns,满足任务要求。

4 结束语

本文主要介绍了VLBI技术的研究进展及其涉及的关键技术,VLBI技术在我国探月工程项目中圆满完成了“嫦娥1号”“嫦娥2号”“嫦娥3号”“嫦娥4号”探测器以及“嫦娥5号”试验飞行器的测轨和定位任务,测量精度不断提高。从“嫦娥1号”~“嫦娥4号”VLBI测量精度提

高了一个量级,实时性也提高了一个量级,为后续的月球及行星探测奠定了坚实的基础。

目前VLBI测控分系统正在执行“天问1号”的测定轨,并将执行“嫦娥5号”的VLBI测定轨。VLBI测轨分系统将通过不断的技术创新,在测控系统支持下,发展新的测量手段,持续改进测量系统软硬件性能指标,增强测量网配置,满足多任务需求,提升系统服务能力。将充分利用我国国土辽阔的优势,在西藏日喀则地区和吉林长白山地区建造两台新的射电望远镜,使VLBI测轨分系统具有6个观测台站,不仅构型更为优化,基线增长,测量精度高,可以同时跟踪不同天区的两个探测器,继续在我国月球与深空探测后续任务中发挥重要的作用。

参 考 文 献

- [1] 欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 355-357.
OUYANG Z Y. Scientific objectives of Chinese lunar exploration project and development strategy[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(3): 355-357.
- [2] 栾恩杰. 中国的探月工程——中国航天第三个里程碑[J]. 中国工程科学, 2007, 8(10): 31-36.
LUAN E J. China's Lunar exploration program—the third mile-stone for China's space industry[J]. Engineering Science, 2007, 8(10): 31-36.
- [3] 吴伟仁, 刘继忠, 唐玉华, 等. 中国探月工程[J]. 深空探测学报, 2019, 6(5): 405-416.
WU W R, LIU J Z, TANG Y H, et al. China Lunar exploration program[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(5): 405-416.
- [4] 刘嘉兴. 载人航天USB测控系统及其关键技术[J]. 宇航学报, 2005, 26(6): 743-747.
LIU J X. Key technologies of the USB TT&C system for manned space flight[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(6): 743-747.
- [5] 董光亮, 李海涛, 郝万宏, 等. 中国深空测控系统建设与技术发展[J]. 深空探测学报, 2018, 5(2): 99-114.
DONG G L, LI H T, HAO W H, et al. Development and future of China's deep space TT&C system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(2): 99-114.
- [6] 钱志瀚, 李金岭. 甚长基线干涉测量技术在深空探测中的应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2012.
QIAN Z H, LI J L. Application of very long baseline interferometry in deep space exploration[M]. Beijing: Science and Technology Press, 2012.
- [7] MATVEENKO L I, KARDASHEV N S, SHOLIMITSHIK II G B. Large base-line radio interferometrys[J]. Radiophysics and Quantum Electronics, 1965, 8(4): 461-463.
- [8] KELLERMANN K I, COHEN M H. The origin and evolution of NRAO- Cornell VLBI system[J]. Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, 1988(82): 248-265.
- [9] MORAN J M. Thirty years of VLBI: early days, successes and future[C]//ASP Conference. USA: NASA, 1998.
- [10] HIRABAYASHI H, HIROSAWA H, VSOP International Team. The

- VSOP mission: A general introduction and current overview[J]. *Advances in Space Research*, 2000, 26(4): 589-595.
- [11] KARDASHEV N, KHARTOV V, ABRAMOV V, et al. Radioastron - a telescope with a size of 300 000 km: main parameters and first observational results[J]. *Astronomy Reports*, 2013, 57(3): 153-194.
- [12] KELLERMANN K, VERMEULEN R C, ZENSUS J, et al. Sub-milliarcsecond imaging of quasars and active galactic nuclei[J]. *The Astronomical Journal*, 1998, 115(4): 1295-1318.
- [13] LISTER M, ALLER M, ALLER H, et al. Mojave. xv. VLBA 15 GHz total intensity and polarization maps of 437 parsec-scale AGN jets from 1996 to 2017[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2018, 234(1): 1-6.
- [14] HELMBOLDT J F, TAYLOR G B, TREMBLAY S, et al. The VLBA imaging and polarimetry survey at 5 GHz[J]. *The Astrophysical Journal*, 2007, 658(1): 203.
- [15] KAZUNORI A, ANTIXON A, WALTER A, et al. First M87 event horizon telescope results. I. the shadow of the supermassive black hole[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, 875(1): 1-17.
- [16] GREENHILL L J, JIANG D R, MORAN J M, et al. Detection of a subparsec diameter disk in the nucleus of NGC 4258[J]. *The Astrophysical Journal*, 1995, 440: 619.
- [17] REID M J, BRAATZ J A, CONDON J J, et al. The megamaser cosmology project. I. very long baseline interferometric observations of UGC 3789[J]. *The Astrophysical Journal*, 2009, 695(1): 287-291.
- [18] BRAATZ J A, REID M J, HUMPHREYS E M L, et al. The megamaser cosmology project. II. the angular-diameter distance to UGC 3789[J]. *The Astrophysical Journal*, 2010, 718(2): 657.
- [19] MA C, ARIAS E F, EUBANKS T M, et al. The international celestial reference frame as realized by very long baseline interferometry[J]. *The Astronomical Journal*, 1998, 116(1): 516.
- [20] GORDON D, CHRISTOPHER JACOBS C, NTHONY BEASLEY A, et al. Second epoch VLBA calibrator survey observations: VCS- II [J]. *The Astronomical Journal*, 2016, 51(6): 154.
- [21] SCHUH H, BEHREND D. VLBI: a fascinating technique for geodesy and astrometry[J]. *Journal of Geodynamics*, 2012, 61: 68-80.
- [22] BACHMANN S, THALLER D, ROGGENBUCK O, et al. IVS contribution to ITRF2014[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(7): 631-654.
- [23] XU M H, ANDERSON J M, HEINKELMANN R, et al. Structure effects for 3417 celestial reference frame radio sources[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2019, 242(1): 5.
- [24] SALZBERG I. Tracking the Apollo lunar rover with interferometry techniques[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1973, 61(9): 1233-1236.
- [25] SMITH J, RAMOS R. Data acquisition for measuring the wind on Venus from Pioneer Venus[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1980, 18(1): 126-130.
- [26] MARTIN-MUR T J, KRUIZINGA G L, BURKHART P D, et al. Mars science laboratory interplanetary navigation[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2014, 51(4): 1014-1028.
- [27] GOOSSENS S, MATSUMOTO K, LIU Q, et al. Lunar gravity field determination using SELENE same-beam differential VLBI tracking data[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(4): 205-228.
- [28] 吴伟仁, 王广利, 节德刚, 等. 基于 Δ DOR信号的高精度VLBI技术[J]. *中国科学D辑: 信息科学*, 2013, 43(2): 185-196.
- WU W R, WANG G L, JIE D G, et al. High-accuracy VLBI technique using Δ DOR signals[J]. *Science Since Information*, 2013, 43(2): 185-196.
- [29] LIU Q H, ZHENG X, HUANG Y, et al. Monitoring motion and measuring relative position of the Chang'E-3 rover[J]. *Radio Science*, 2014, 49(11): 1080-1086.
- [30] ZHENG W M, TONG F X, ZHANG J, et al. Interferometry imaging technique for accurate deep-space probe positioning[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(12): 2847-2854.
- [31] 朱人杰, 项英, 吴亚军, 等. 射电天文高速数据采集与处理平台的设计与应用[J]. *天文学进展*, 2012, 30(2): 236-245.
- ZHU R J, XIANG Y, WU Y J, et al. Design and application of radio astronomy high-speed data acquisition and processing platform[J]. *Progress in Astronomy*, 2012, 30(2): 236-245.
- [32] LI P J, HU X G, HUANG Y, et al. Orbit determination for Chang'E-2 lunar probe and evaluation of lunar gravity models[J]. *Science in China Series G*, 2012, 55(3): 514-522.
- [33] 黄勇, 吕胜骥, 李培佳, 等. 嫦娥三号月球探测器的轨道确定和月面定位[J]. *科学通报*, 2014, 59(23): 2268-2277.
- HUANG Y, CHANG S Q, LI P J, et al. Orbit determination of Chang'E-3 and positioning of the lander and rover[J]. *China Science Bull*, 2014, 59(23): 2268-2277.
- 作者简介:
洪晓瑜(1961-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: VLBI技术在天体物理研究和月球与深空探测的应用。
通讯地址: 上海市南丹路80号上海天文台(200030)
电话: (021)34775587
E-mail: xhong@shao.ac.cn

Research Progress of VLBI Technology and Application to China Lunar Exploration Project

HONG Xiaoyu^{1,2}, ZHANG Xiuzhong¹, ZHENG Weimin^{1,2}, WANG Guangli^{1,2}, LIU Qinghui^{1,2},
WANG Na³, ZHANG Hongbo⁴, WANG Min⁵, SHU Fengchun^{1,2}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China;

3. Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumiq 830011, China;

4. National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

5. Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China)

Abstract: The Unified S-Band (USB) measurement and control system with ranging and velocity measurement capabilities and the VLBI system with high precision angle measurement capabilities are jointly used to undertake the orbit determination for the missions. The measurement accuracy is increasing constantly. The orbit determination for Chang'E-1、Chang'E-2、Chang'E-3、Chang'E-4 and Chang'E-5 test spacecraft missions have been completed successfully. It has made important contributions to CLEP and laid a solid foundation for the subsequent exploration of the Moon and planets.

Keywords: Lunar exploration; VLBI; orbit measurement and determination; positioning

Highlights:

- The research progress of VLBI is reviewed, and the key technologies are summarized.
- ΔDOR technology at X- and S-band for are applied to the CLEP.
- The accuracy of orbit determination technology with VLBI data is improved.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]