天问一号VLBI测定轨技术

刘庆会^{*}, 黄勇, 舒逢春, 王广利, 张娟, 陈中, 李培佳, 马茂莉, 洪晓瑜

中国科学院上海天文台, 上海 200030

*联系人, E-mail: liuqh@shao.ac.cn

收稿日期: 2021-07-19; 接受日期: 2021-09-03; 网络出版日期: 2022-01-27

国家自然科学基金(编号: 11973074, 11773060, U1931119, U1931135)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2018YFA0404702)、上海市导航与定位重点实验室(编号: 3912DZ227330001)、中国科学院射电天文重点实验室、国家基础科学公共科学数据中心(编号: NBSDC-DB-11)资助项目

摘要 自2020年7月23日天问一号探测器发射开始, 我国VLBI网一直对天问一号环绕器进行测定轨, 并对祝融号火星车进行了测定轨。为了满足天问一号高精度测定轨要求, 完成了40多台套的软件和硬件的研发、测试和安装, 并综合采用了多项技术。截至2021年6月18日, 共进行了198次VLBI观测。VLBI时延平均测量误差为0.11 ns, 时延率平均测量误差为0.33 ps/s。利用测距测速和VLBI数据, 地火转移段和火星捕获段, 天问一号测定轨误差约为2 km, 环火段测定轨误差约为1 km, 火星车定位精度为km级。VLBI为天问一号环绕器的轨道修正、深空机动、火星捕获、远火机动、离轨着陆等各个测控弧段的精密测定轨均做出了重要贡献, 并为今后其他深空探测器精密测定轨打下了良好基础。本文对天问一号VLBI网的技术升级、VLBI测定轨技术分析、VLBI测定轨实施情况予以介绍。

关键词 天问一号, 火星探测器, VLBI, 测定轨, 测定位

PACS: 95.55.Pe, 95.55.Jz, 95.55.Br

1 引言

我国于2020年7月23日首次发射由环绕器和着陆巡视器(火星车)组成的火星探测器天问一号, 一次发射实现了环绕、着陆、巡视三个探测目标^[1]。火星探测器经过约6.5个月巡航飞行, 于2021年2月10日进入火星捕获, 5月15日火星车成功在火星表面软着陆, 开展火星表面的巡视探测。

精密测定轨是完成深空探测任务的基础。天问一

号环绕器测定轨的主要手段是测速测距和甚长基线干涉测量VLBI (Very Long Baseline Interferometry), 前者在视线方向敏感, 后者在与视线垂直的方向敏感。二者结合, 可对探测器在空间的三维位置和速度予以约束, 从而实现高精度的测定轨^[2,3]。天问一号的测速测距主要由佳木斯66米、喀什35米和阿根廷35米深空站执行, VLBI测量由上海65米(SH)、北京密云50米(BJ)、昆明40米(KM)和乌鲁木齐26米(UR)射电望远镜和上海佘山VLBI中心组成的VLBI网完成^[4-6]。

引用格式: 刘庆会, 黄勇, 舒逢春, 等. 天问一号VLBI测定轨技术. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 239507

Liu Q H, Huang Y, Shu F C, et al. VLBI technique for the orbit determination of Tianwen-1 (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 239507, doi: [10.1360/SSPMA-2021-0204](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0204)

为了满足天问一号的VLBI精密测定轨要求, VLBI网完成了40多台套的软件和硬件的研发、测试和安装. 持续开展了火星探测VLBI高精度测定轨技术研究和测试验证. 详尽制作了VLBI测定轨实施方案, 最终大幅提高了VLBI测定轨精度.

自天问一号探测器发射至今, VLBI网一直参加天问一号的测定轨. 2020年7月23日–8月6日的发射初期、2021年2月3–28日的火星捕获段、2021年5月7–30日的火星着陆段为重要测控段, 每天均进行VLBI观测, 且是4站参加观测. 其他时间段, 大约每2–4 d进行1次VLBI观测, 一般3站参加观测.

截至2021年6月18日, 共进行了198次VLBI观测. 4个测站6条基线VLBI时延平均测量精度为0.11 ns, 比技术要求提高一个量级. 时延率平均测量精度为0.33 ps/s, 比技术要求提高3倍. 利用测速测距和VLBI数据, 在地火转移段和火星捕获段, 天问一号测定轨精度为2 km, 环火段测定轨精度为1 km, 均比技术指标要求提高一个量级. VLBI为天问一号探测器的轨道修正、深空机动、火星捕获、远火机动、离轨着陆等各测控弧段的精密测定轨以及火星车定位均做出了重要贡献.

本文对天问一号VLBI网的技术升级、VLBI测定

轨技术分析、VLBI测定轨实施情况予以介绍. 本文不仅是天问一号VLBI测定轨的技术总结, 更为我国后续的小行星采样返回、火星采样返回、木星探测、太阳系边际探测器的VLBI精密测定轨提供重要参考.

2 天问一号VLBI测定轨网的升级

与探月任务的嫦娥系列探测器相比, 我国首次火星探测天问一号VLBI测定轨的主要技术状态变化为: 星地距离远、延时长、对VLBI测量精度要求更高, 在我国首次开展火星探测器的精密测定轨等.

在火星探测中, 当星地距离4亿千米时, 单向光行时为22.2 min. VLBI观测时, 在计算测站望远镜的方位角和俯仰角时, 充分考虑了光行时的影响并予以补偿, 对单向接收的VLBI射电望远镜, 其影响可消除.

针对天问一号VLBI测定轨需求, 特别是提高VLBI测量精度以及完成火星探测器测定轨, 我们对上海VLBI中心和4个测站进行了技术升级. 如图1所示, 测站上新研制了前置型多比特数据采集终端、基准信号锁相传输系统、水汽辐射计、致冷接收机、变频和标校系统、GNSS接收机、气象系统、配电系统等. VLBI中心升级了VLBI数据处理系统、大

图1 (网络版彩图)天问一号VLBI观测系统, 黄色部分为天问一号新研发装置

Figure 1 (Color online) The VLBI system of Tianwen-1. The yellow part is the new development facility for Tianwen-1.

气和电离层时延改正软件, 研发了火星环绕器定轨软件和火星车定位软件. 提高VLBI测量精度的主要措施如下.

更新了上海和乌鲁木齐测站的致冷接收机, 接收机的噪声温度为15 K, 能更灵敏地接收天问一号信号和标校射电源信号^[7]. 更新了上海、乌鲁木齐、北京和昆明4个测站的变频和标校系统, 更换了4个测站的馈源仓和观测室之间的电缆以及其他电缆, 使得接收系统性能更稳定, 克服了嫦娥四号VLBI观测时的接收信号不稳定和偶发的相位跳变现象^[8].

开发了新的数据采集终端, 并把采集终端安装于射电望远镜的馈源舱内, 在致冷放大和变频后快速数字化. 与原来在观测室进行数据采集相比, 传送模拟信号的中频电缆长度由数百米降为数米, 避免了长电缆温度效应、内部应力、弯曲扭转等引起的相位变化, 有利于提高VLBI测量精度.

研发了基准信号锁相传输系统并安装于上海、乌鲁木齐、昆明测站. 采用闭环锁相控制方式, 自动补偿环境温度等引起的传输电缆的相位变化, 进而把观测室内氢钟的信号稳定地传输到望远镜的馈源舱内, 供馈源仓内的接收机变频装置和数据采集终端使用^[9]. 基准信号锁相传输系统的相位稳定性优于秒稳 3×10^{-3} . 在密云测站和乌鲁木齐测站各安装了一台新的氢钟, 并更换了时频系统电缆, 使时频系统相位更稳定.

4个测站均安装了新的GNSS接收机, 可同时接收GNSS四系统导航卫星, 即GPS, GLONASS, Galileo和BeiDou的信号, 提高了大气和电离层时延解算精度. 4个测站均配置了水汽辐射计, 天顶方向大气湿时延测量精度优于15 mm. 升级了大气和电离层时延解算软件, 更新了映射函数模型和大气时延预报模型, 采用每小时更新的电离层球谐函数模型, 提高了大气和电离层时延修正精度^[10].

研发了火星探测VLBI数据处理软件. 把每个通道的记录带宽由探月时的2/4 MHz提高至4/8 MHz, 标校射电源的测量精度提高1.4或2倍. 探测器信号处理时的FFT (Fast Fourier Transform)点数由探月时的1024提高到8192, 大幅提高了天问一号信号的检出能力和信噪比. 探测器信号积分时间由探月时的5 s延长到30 s, 接收系统热噪声的影响降低了2.4倍.

天问一号环绕器用大口径定向天线发送VLBI测

定轨需要的DOR (Differential One way Ranging)信号和测速测距用的信号, 探测器上的多路径效应大幅减小^[11], 相位稳定, 有利于提高VLBI和测速测距的测量精度. 以上各种措施的综合利用, 大幅提高了天问一号VLBI测量精度和测定轨精度.

3 天问一号VLBI测定轨分析

VLBI网参加了天问一号地火转移段、火星捕获段、火星停泊段、离轨着陆段、火星中继段等各测控段的VLBI测定轨以及着陆后火星车的测定轨. 各测控弧段及主要测控事件如表1和图2所示. 星箭分离后, 天问一号环绕器和火星车连接在一起, 在地火转移轨道经历约6.5个月的飞行, 期间实施4次中途修正和1次深空机动, 于2021年2月10日到达火星并进行第一次火星捕获, 近火点捕获高度为398.2 km. 进入周期约为10.16 d的环火大椭圆轨道. 探测器在捕获轨道上运行到远火点时进行变轨, 将捕获轨道倾角调整为约87.4°, 同时将近火点高度降低到258.4 km.

火星环绕段主要有火星停泊段、离轨着陆段和科学探测段. 在火星停泊段, 环绕器运行到近火点时进行第二次火星捕获, 环绕器进入第一圈停泊轨道, 将停泊轨道的近火点段调整到从着陆区上空飞过. 环绕器在第一圈停泊轨道上运行到近火点时, 进行第三次近火

表 1 各测控弧段及主要测控事件

Table 1 Main measurement and control events in each controlling arc

飞行阶段	轨控名称	历元时刻(北京时间)
发射段	起飞	2020-07-23 12:41
	星箭分离	2020-07-23 13:18
	第一次中途修正	2020-08-02 07:00
	第二次中途修正	2020-09-20 23:00
地火转移轨道	深空机动	2020-10-09 23:00
	第三次中途修正	2020-10-28 22:00
	第四次中途修正	2021-02-05 20:00
	第一次火星捕获	2021-02-10 19:52
捕获轨道	远火点平面机动	2021-02-15 17:00
	第二次火星捕获	2021-02-20 20:00
停泊轨道	第三次火星捕获	2021-02-24 06:29
	火星车着陆	2021-05-15 07:18
中继轨道	第四次火星捕获	2021-05-17 08:00

图 2 (网络版彩图)天问一号轨道示意图

Figure 2 (Color online) Orbit diagram of Tianwen-1.

点制动, 使得停泊轨道周期变为2个火星日, 对着陆区进行详查. 停泊轨道运行约3个月, 然后进入2021年5月15日开始的离轨着陆段.

在离轨着陆段, 在经过着陆点的当圈近火点前5 h 进行降轨机动, 122 m后着陆巡视器(火星车)与环绕器分离. 分离后34 m, 环绕器进行抬轨机动, 将轨道拉起返回到停泊轨道. 着陆巡视器进行火星大气进入段的飞行.

环绕器在拉起后的停泊轨道上运行1圈后到达近火点, 进行第四次火星捕获, 将轨道调整为周期8.2 h的中继通信轨道, 执行与火星车的中继任务. 中继任务结束后, 再调整环绕器进入使命轨道, 开始火星科学

探测.

图3给出了天问一号与地球的距离即星地距离. 图3(a)为地火转移段, 横轴为2020年的年积日, 时间段为2020年7月23日的发射至2021年2月10日的火星捕获. 星地距离从零开始, 在第一次火星捕获时达到1.92亿千米. 图3(b)为环火探测段的星地距离, 横轴为2021年的年积日. 在2021年9月20日达到星地最远距离3.95亿千米.

图4给出了地火转移段和环火探测段, VLBI网任意三个测站共视的开始及结束时刻(北京时间). 由图可知, VLBI观测开始时刻由刚发射时的凌晨开始, 逐渐前移, 在火星捕获时的开始时刻为下午1点左右. 结

图 3 天问一号星地距离. (a) 地火转移段; (b) 环火探测段

Figure 3 The distance between the Earth and Tianwen-1. (a) The interplanetary cruise; (b) the exploration orbit around Mars.

图 4 (网络版彩图)天问一号每天的三站可视开始和结束时刻. (a) 地火转移段; (b) 环火探测段

Figure 4 (Color online) Daily three-station visual start and end times of Tianwen-1. (a) The interplanetary cruise; (b) the exploration orbit around Mars.

束时刻同样迁移, 由刚发射时的次日上午11点前移至火星捕获时的当日晚上12点. 环火探测段开始和结束时刻继续前移, 5月15日火星车着陆后, 基本上以白天观测为主.

图5给出了VLBI网每天的任意三个测站共视的时间长度. 由图可知, 在地火转移段, 每天的可视时间在10–11.1 h之间变化. 在环火探测段, 每天的三站可视时间由最大的11.6 h逐渐减小为7.3 h左右. 无论是地火转移段还是环火探测段, 每天的可视时间长度都能满足VLBI测定轨需求.

图6给出了天问一号的赤经与赤纬. 由图可知, 在发射当天的2020年7月23日, 赤经和赤纬的变化较快. 在后续的地火转移段, 赤经在0–3.2 h、赤纬在6.7°–19.1°之间缓慢变化. 在环火探测段, 赤经在3.2–16.7 h、赤纬在–22.5°–24.9°之间缓慢变化.

天问一号VLBI观测模式为差分VLBI, 即在标校射电源和探测器间交替观测, 利用射电源的相关相位

修正探测器的相关相位, 从而大幅减小地球大气、电离层和太阳等离子体等共有误差的影响, 提高天问一号VLBI的测量精度. 射电源的选取原则为流量大于0.6 Jy以保证足够的信噪比, 在此前提下选取与探测器的角距离最小的标校射电源以更好地去除共有误差. 图7给出了天问一号与标校射电源的角距离. 由图可知, 在地火转移段, 角距离在0.5°–11.1°之间变化. 在环火探测段, 角距离在0.5°–15°之间变化.

4 天问一号VLBI测定轨实施

用于VLBI观测的天问一号环绕器信标的主要技术指标: 主载波下行频率为8431 MHz、遥测信号频率为65 kHz、测距主音频率为500 kHz. DOR信号与下行载波频率相干, 2组DOR频率分别为下行载波频率的1/2200(3.8 MHz)和1/440(19.2 MHz), 调制指数为0.4 rad. 在利用环绕器上的星载高增益天线发送时, 信

图 5 天问一号每天的三站可视时间长度. (a) 地火转移段; (b) 环火探测段

Figure 5 Daily three-station visual time of Tianwen-1. (a) The interplanetary cruise; (b) the exploration orbit around Mars.

图 6 (网络版彩图)天问一号的赤经和赤纬. (a) 地火转移段; (b) 环火探测段

Figure 6 (Color online) Right ascension and declination of Tianwen-1. (a) The interplanetary cruise; (b) the exploration orbit around Mars.

图 7 天问一号与标校射电源的角距离. (a) 地火转移段; (b) 环火探测段

Figure 7 Angular distance between Tianwen-1 and calibration radio source. (a) The interplanetary cruise; (b) the exploration orbit around Mars.

号的EIRP (Effective Isotropic Radiated Power)为 57.4 dB W. 着陆巡视器对地测控数传信标下行频率为 8400 MHz, EIRP为29 dB W, 数传码速率为32–4096 bps可调.

图8(a)给出了上海65米射电望远镜接收的地火转移段的天问一号环绕器的信号频谱. 主载波 f_c 附近有遥测和测距主音等信号. 利用这些信号的相关相位求取单通道VLBI时延, 用以解算VLBI带宽综合时延的模糊度. 同时利用主载波的相关相位求取VLBI时延率. 另外可以清晰看到4个DOR信号. 利用主载波和4个DOR信号的相关相位, 减去对应频点的标校射电源的相关相位后进行带宽综合处理, 即可得到环绕器DOR信号的带宽综合群时延, 即环绕器VLBI时延这个核心观测量. 我们也可看到 $f_c \pm 38.4$ MHz的谐波分量, 但与DOR相比, 其功率弱20 dB, VLBI观测时并未记录这些信号.

图8(b)给出了环火探测段上海65米射电望远镜接

收的火星探测器的信号频谱, 包括天问一号环绕器, MEX, MRO, TGO, HOPE等火星探测器. 由图可知, 在8411.8 MHz的天问一号-DOR2信号附近, 有时存在TGO的数传信号. 但天问一号的-DOR2信号比TGO数传信号强25 dB, TGO信号对天问一号VLBI测量精度几乎没有影响. MRO在发送带宽更宽的数传信号时, 可以影响到天问一号的DOR1信号, 但其强度比DOR1信号弱25 dB, 几乎不影响天问一号VLBI时延测量精度. 其他火星探测器如MEX和HOPE等的信号和天问一号信号频率间隔较大, 互不影响. 总之, 虽然在环火探测段, 多个探测器的信号被VLBI射电望远镜同时接收, 但相互之间几乎没有影响.

VLBI基本观测模式为, 先进行30 min的标校射电源观测, 然后是5 min探测器和5 min标校射电源的交替观测, 直至观测结束. 数据记录模式有两种, 模式一为信道带宽8 MHz、量化位数2 bits、信道数量4个、输出数据速率128 Mbps. 本模式的每个信道的带宽更

图 8 (网络版彩图)上海65米射电望远镜接收到的地火转移段天问一号环绕器信号的频谱(a)和环火探测段天问一号环绕器及其他火星探测器信号的频谱(b)

Figure 8 (Color online) Spectra of Tianwen-1 signals during interplanetary cruise (a) and Mars spacecraft signals during the period around Mars (b) by using Shanghai 65 m radio telescope.

宽, 有利于提高标校射电源的测量精度. 模式二为信道带宽4 MHz、量化位数2 bits、信道数量8个、输出数据速率128 Mbps. 本模式可以同时记录环绕器和火星车的信号, 能够进行同波束VLBI观测, 兼顾环绕器的测定轨和火星车的测定轨^[12,13]. 在2021年5月15日火星车着陆后使用该模式进行VLBI观测.

作为例子, 图9(a)和(b)分别给出了2020年7月29日发射初期、2021年2月7日火星捕获附近的上海、北京、昆明和乌鲁木齐测站的仰角. 2020年7月29日, 任意三测站仰角大于10°时即进行VLBI观测, 当天的探测器观测时间约为11 h. 昆明测站纬度低, 仰角最高可达81.7°. 2021年2月7日, 选取仰角较高时进行VLBI观测, 观测时间为8 h.

图9(c)和(d)分别给出了2020年7月29日和2021年2

月7日定轨后的6条基线的时延残差. 这里的时延残差包含随机误差和系统误差. 由图9(c)可知, 夏季的2020年7月29日, 观测开始的前2 h和结束的后1 h低仰角时, VLBI时延残差最大可达0.3 ns, 个别点达到了0.5 ns. 产生这个现象的主要原因是地球大气和电离层时延修正误差的影响. 观测开始的前2 h, 昆明测站和乌鲁木齐测站从10°仰角开始观测. 观测结束的后1 h, 上海和北京测站仰角 EL 又降至10°. 以最简单的大气和电离层映射函数 $1/\sin(EL)$ 进行估算, 假设天顶方向的地球大气和电离层时延估算误差为0.1 ns, 则10°仰角时误差放大到0.58 ns. 在中间的高仰角时, 地球大气和电离层时延修正误差较小, VLBI时延残差也较小, 为0.1 ns左右. 把本次观测的6条基线的时延残差进行均方根(Root Mean Square, RMS)综合计算, 残差为

图 9 (网络版彩图)两次观测的各测站仰角、各基线时延和时延率残差。(a), (b) 上海、北京、昆明和乌鲁木齐测站的仰角; (c), (d) 定轨后6条基线的时延残差; (e), (f) 定轨后的6条基线的时延率残差。横轴为北京时间, 负值意味着前一日

Figure 9 (Color online) The elevation angle of each station, the delay and delay rate residuals of each baseline for two observations. (a), (b) The elevation angles of Shanghai, Beijing, Kunming and Urumqi station; (c), (d) the time delay residual of the six baselines after orbit determination; (e), (f) the time delay rate residual of the six baselines after orbit determination. Horizontal axis is in China standard time, negative means before dawn.

0.23 ns RMS, 体现了本次VLBI观测的综合误差。2021年2月7日, 由于只选取了中间仰角较高时的8 h进行观测, 且处于冬季, VLBI时延误差较小, 均在0.1 ns以内, 把本日的6条基线的时延残差进行RMS综合计算, 残差为0.05 ns RMS, 优于2020年7月29日的观测。

图9(e)和(f)分别给出了2020年7月29日和2021年2月7日定轨后的6条基线的时延率残差。时延率残差既包含随机误差, 也包含系统误差。由图9(e)和(f)可知, 无论是夏季的2020年7月29日还是冬季的2021年2月7日, 时延率残差基本都在 ± 0.35 ps/s以内变化, 且不同

于时延残差, 仰角变低时并没有显著变大。

自天问一号探测器发射的2020年7月23日–2021年6月18日约11个月的时间段内, 共进行了198次VLBI观测。每次观测的定轨后的时延残差如图10(a)所示。发射初期的2020年7月23日–8月6日, 以及火星着陆测控段的2021年5月7–30日, 每天的VLBI观测从 10° 仰角开始, 再加上夏季观测, 可以看到时延残差较大。发射初期的时延残差, 比如2020年7月24日达到0.64 ns, 7月26日达到0.84 ns, 误差较大, 前者主要是由于天问一号环绕器用低增益天线发射信号引起, 后者主要是天问

图 10 (网络版彩图)定轨后的VLBI时延残差(a)和时延率残差(b)

Figure 10 (Color online) VLBI time delay (a) and time delay rate residuals (b) after orbit determination.

一号有姿态机动使得定轨后拟合残差较大. 着陆后的2021年5月30日, 时延残差为0.56 ns, 是因为本次观测只在 10° – 25° 左右的低仰角观测, 大气和电离层时延改正误差较大.

其他绝大部分的观测, 定轨后的时延残差小于0.2 ns甚至0.1 ns. 这些观测的时间长度一般为4 h, 2021年2月3–28日火星捕获测控段时为8 h. 在安排观测时尽量选取仰角 20° 以上的时间段, 从而大幅降低了大气和电离层时延改正误差. 另外, 时延残差并没有表现出随着距离的增加而增大, 是因为环绕器57.5 dB W

的发射功率足够强, 热噪声引起的随机误差并非主导因素. 时延残差的主导因素是低仰角时的大气和电离层时延改正误差, 以及天气情况如风、雨、雪、冰的影响等. 198次的VLBI时延残差平均值为0.11 ns, 在 25° 以上的高仰角观测弧段一般为0.05 ns左右, 与美国NASA的VLBI时延残差0.04 ns接近^{[14]1)}.

图10(b)给出了每次观测定轨后的VLBI时延率残差. 所有观测的时延率残差比较一致, 198次观测的平均值为0.33 ps/s. 时延率由30 s间隔的相关相位求出, 其残差主要来源于热噪声、大气和电离层及观测装置

1) Yang P, Huang Y, Li P J, et al. Orbit determination of China's first Mars probe Tianwen-1 during interplanetary cruise. Adv Space Res, 2021, 评审中

的数十秒以内的短周期相位变化. 同样, 时延率残差也没有随着星地距离的增大而显著增大, 说明热噪声引起的随机误差不是主导因素.

利用测速测距和VLBI数据, 在地火转移段和火星捕获段, 天问一号测定轨误差约为 2 km^2 , 环火探测段测定轨误差约为 1 km . 其中, 对定轨起决定作用的观测量为VLBI时延和测距, 测速和VLBI时延率对地火转移段的定轨贡献不大.

2021年5月27日、5月28日、6月1日、6月4日, 开展了火星车和环绕器同波束VLBI观测试验, 获得了4段各约20 min的火星车和环绕器间的差分相时延有效数据^[6]. 利用同波束VLBI差分相时延数据对火星车进行了定位, 定轨后的同波束VLBI差分相时延数据随机误差约为 1 ps , 系统误差为数ns. 系统误差为数ns的原因如下: 火星车只发送带宽为 1 kHz 以内的窄带信号, 无法精确得到群时延数据, 而相时延的系统误差由群时延决定. 环绕器DOR信号带宽为 38.4 MHz , 可以得到误差约为 0.1 ns 的群时延, 相时延的系统误差也可控制到 0.1 ns . 基于同波束VLBI的火星车定位结果为经度 109.908° 、纬度 25.136° 、高程 -4099.4 m , 定位结果与视觉定位结果的差异为 4 km 左右^[15].

5 结论和讨论

VLBI观测为我国首次火星探测天问一号的精密测定轨和测定位做出了贡献. 198次观测的VLBI时延平均测量误差为 0.11 ns , 时延率平均测量误差为 0.33 ps/s . 利用测距测速和VLBI数据, 地火转移段和火星捕获段, 天问一号测定轨误差约为 2 km , 环火探测段测定轨误差约为 1 km , 祝融号火星车定位精度为 km 级.

天问一号VLBI测定轨技术, 不仅完成了天问一号VLBI测定轨任务, 更为我国后续的小行星采样返回、火星采样返回、木星探测、太阳系边际探测器的精密测定轨等打下了基础. 在后续的探测任务特别是太阳系边际探测中, 需要进一步提高VLBI测量精度. 有效的途径主要有: (1) 建设更大型的如口径 65 m 量级的射电望远镜, 提高整个VLBI网的观测灵密度. 大望远镜既可提高探测器和标校射电源本身的观测精度, 更有机会选取更靠近探测器的标校射电源以更好地去除大气、电离层和太阳等离子体时延的影响. (2) 利用Ka波段代替目前的X频段. 频率的升高即可减小电离层和太阳等离子体时延的影响, 更能利用更大的带宽, 即由X频段的 38.4 MHz 提高到Ka波段的 200 MHz 以上, 从而进一步提高VLBI时延测量精度.

参考文献

- Geng Y, Zhou J S, Li S, et al. A brief introduction of the first Mars exploration mission in China (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2018, 5: 399–405 [耿言, 周继时, 李莎, 等. 我国首次火星探测任务. 深空探测学报, 2018, 5: 399–405]
- Thornton C L, James S. *Border, Radiometric Tracking Techniques for Deep-Space Navigation*. Hoboken: John Wiley & Sons. Inc., 2000. 47–62
- Li Q H, He Q B, Zheng X, et al. Analysis of VLBI observation for Tianma radio telescope in Chang'E-3 orbit determination (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2015, 45: 039501 [刘庆会, 贺庆宝, 郑鑫, 等. 天马望远镜在嫦娥三号测定轨VLBI观测中的应用分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 039501]
- Hong X Y, Zhang X Z, Zheng W M, et al. Research progress of VLBI technology and application to China lunar exploration project (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2020, 4: 321–331 [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. 深空探测学报, 2020, 4: 321–331]
- Liu Q H, Zhao R B, Shu F C, et al. Tracking technology of Mars spacecraft for large radio telescope (in Chinese). *Sci Sin-Inf*, 2019, 49: 775–782 [刘庆会, 赵融冰, 舒逢春, 等. 大型射电望远镜的火星探测器跟踪技术. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 775–782]
- Liu Q H, Wu Y J, Huang Y, et al. Mars rover positioning technology based on Same-Beam VLBI (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2015, 45: 099502 [刘庆会, 吴亚军, 黄勇, 等. 基于同波束VLBI的火星车测定位技术. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 099502]
- Li B, Zhong W Y, Wang S W, et al. S/X cryogenic receiver technology for VLBI satellite tracking (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2020, 4: 347–353 [李斌, 仲伟业, 王生旺, 等. VLBI测轨的S/X接收机技术. 深空探测学报, 2020, 4: 347–353]
- Jiang J H, Liu Q H, Zheng X. The study on the group delay jumping of CE-4 VLBI system. *Chin Astron Astrophys*, 2021, 45: 1–15

2) 同脚注1)

- 9 Jiang Y C, Wang J Q, Gou W, et al. Design and test of a 1.5 GHz phase stabilization system based on optical fiber transmission (in Chinese). *J Time Freq*, 2017, 40: 137–145 [江永琛, 王锦清, 苟伟, 等. 基于光纤传输的1.5 GHz信号的稳相系统设计与测试. *时间频率学报*, 2017, 40: 137–145]
- 10 Zhou W L, Song S L, Li P J, et al. Ionospheric TEC correction for VLBI based on GNSS density network (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2020, 7: 362–370 [周伟莉, 宋淑丽, 李培佳, 等. 基于GNSS加密网的VLBI电离层时延修正方法. *深空探测学报*, 2020, 7: 362–370]
- 11 He Q, Liu Q, Zheng X. Chang'E-3 spacecraft surface reflection causes turbulence on VLBI delay. *Radio Sci*, 2017, 52: 235–247
- 12 Liu Q H, Zheng X, Huang Y, et al. Monitoring motion and measuring relative position of the Chang'E-3 rover. *Radio Sci*, 2014, 49: 1–7
- 13 Li P J, Huang Y, Chang S Q, et al. Positioning for the Chang'E-3 lander and rover using Earth-based observations (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 3162–3173 [李培佳, 黄勇, 吕胜骐, 等. 基于地基观测的嫦娥三号着陆器与巡视器高精度定位. *科学通报*, 2014, 59: 3162–3173]
- 14 Martin-Mur T J, Kruizinga G L, Burkhart P D, et al. Mars science laboratory interplanetary navigation. *J Spacecr Rockets*, 2014, 51: 1014–1028
- 15 Wan W, Yu T, Di K, et al. Visual localization of the Tianwen-1 lander using orbital, descent and rover images. *Remote Sens*, 2021, 13: 3439

VLBI technique for the orbit determination of Tianwen-1

LIU QingHui^{*}, HUANG Yong, SHU FengChun, WANG GuangLi, ZHANG Juan,
CHEN Zhong, LI PeiJia, MA MaoLi & HONG XiaoYu

Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

Since the launch of the Tianwen-1 probe on July 23, 2020, the orbit of this probe has been determined using very long baseline interferometry (VLBI) together with Doppler and ranging, and the Zhurong Mars rover has been located. More than 40 software and hardware sets have been developed, tested, and installed for VLBI to meet the Tianwen-1 high-precision orbit determination requirements. Until June 18, 2021, 198 VLBI observations have been performed. The measurement errors in VLBI time delay and time delay rate are 0.11 ns and 0.33 ps/s, respectively. The orbit error of Tianwen-1 during the interplanetary cruise is ~2 km, and it is ~1 km around Mars. Additionally, the positioning accuracy of the Mars rover is several km. VLBI has made important contributions to trajectory correction, deep-space, near Mars capture, and far Mars maneuvers, Mars landing, etc. It has laid a good foundation for future deep-space probe precision orbit determination. Therefore, this paper introduces the technical upgrade of the VLBI network and presents the analysis and implementation of VLBI measurement and orbit determination.

Tianwen-1, Mars spacecraft, VLBI, orbit determination, positioning

PACS: 95.55.Pe, 95.55.Jz, 95.55.Br

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0204](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0204)