



大型射电望远镜的火星探测器跟踪技术

刘庆会*, 赵融冰, 舒逢春, 贺庆宝, 郑鑫, 马茂莉, 付丽, 吴亚军, 虞林峰

中国科学院上海天文台, 上海 200030

* 通信作者. E-mail: liuqh@shao.ac.cn

收稿日期: 2017-05-27; 接受日期: 2018-01-27; 网络出版日期: 2019-06-06

国家自然科学基金 (批准号: 11473059, 11773060)、天文专项 (高精度测量和控制系统研究) 和上海市导航与定位重点实验室 (批准号: 3912DZ227330001) 资助项目

摘要 我国将于 2020 年发射由环绕器和着陆巡视器组成的火星探测器, 需要利用大型射电望远镜进行跟踪. 本文对大型射电望远镜的火星探测器跟踪技术进行了分析, 并实际利用上海 65 m 射电望远镜跟踪火星探测器进行了测试验证. 分析和测试结果表明, 大型射电望远镜跟踪火星探测器时需要考虑和改正座架热变形、大气折射、光行时等引起的指向偏差. 不考虑下行单程光行时的接收功率比考虑时降低约 0.8 dB. 在俯仰指向偏差为 36'' 和 72'' 时接收能力分别降低约 0.8 和 3.5 dB. 这些研究成果对我国的首次火星探测任务的顺利实施有重要的应用价值.

关键词 射电望远镜, 火星探测器, 跟踪, 光行时, 指向偏差

1 引言

我国将于 2020 年首次发射由环绕器和着陆巡视器组成的火星探测器, 一次发射实现环绕、着陆、巡视 3 个探测目标. 火星探测器经过约 7 个月巡航飞行进入近火制动, 此后环绕器环绕火星飞行探测, 巡视器在火星表面着陆后进行巡视探测^[1,2]. 火星探测器由于距离遥远、空衰大导致接收到的信号微弱, 无论是科学数据的接收还是遥测遥控, 均需利用大型射电望远镜进行跟踪. 大型射电望远镜波束窄, 需要较高的指向精度才能充分发挥其接收能力^[3]. 但指向精度又受到望远镜结构形变、大气折射、光行时等影响^[4,5]. 为了更好地完成我国火星探测的数据接收、遥测遥控、跟踪测量、甚长基线干涉 (very long baseline interferometry, VLBI) 等任务, 本文对大型射电望远镜的火星探测器跟踪技术进行了分析, 并利用上海 65 m 射电望远镜 (天马望远镜) 实际跟踪火星探测器进行了测试验证, 包括单天线的跟踪测试和 VLBI 观测验证. 这些研究成果对我国的首次火星探测任务的顺利实施有重要的应用价值.

引用格式: 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, doi: 10.1360/N112017-00120
Liu Q H, Zhao R B, Shu F C, et al. Tracking technology of Mars spacecraft for large radio telescope (in Chinese). Sci Sin Inform, 2019, 49: 775-782, doi: 10.1360/N112017-00120

2 大型射电望远镜的火星探测器跟踪误差分析

利用大型射电望远镜对火星等深空探测器进行跟踪时, 需要考虑 3 个方面的误差因素, 即射电望远镜的结构变形引起的指向偏差、大气折射改正误差、光行时引起的指向偏差.

大型射电望远镜结构在重力、风、雪、温度等负荷作用下会发生变形, 从而影响天线主反射面面型精度和指向精度, 导致天线增益下降. 为了解决此问题, 作为我国 VLBI 网主力测站的天马望远镜设置了主反射面调整系统和副反射面六连杆调整机构. 利用安装于主反射面上的 1104 个促动器及预先建立的模型可以改正各观测仰角的主反射面重力变形, 同时利用预先建立的模型和副面六连杆机构调整各观测仰角的副反射面的位置. 在主反射面面形和副面位置同时调整的情况下, 实测结果表明, 在 $10^\circ \sim 85^\circ$ 的仰角范围内主反射面面形均方根误差均小于 0.3 mm, L 至 Q 波段 (43 GHz) 的接收效率均达到了 50% 以上, 在夜晚和微风 (风速小于 4 m/s) 的情况下指向精度达到了 $4.5''$ [6~8]. 但当环境温度变化较大时, 温度变化引起的天线座架结构变形会引起较大的指向偏差. 为此, 我们在俯仰轴承两端的轴承座上各安装了 1 台 Leica Nivel 220 型电子倾斜仪, 用于实时测量和补偿天线座架热变形引起的指向偏差. 本倾斜仪具有相互垂直的 x, y 两个传感器, 其测角分辨率为 $0.2''$, 零点稳定度 $< 0.97''/\circ$, 采样速度最小为 0.3 s. 倾斜仪 x 轴垂直于俯仰轴, 当天线方位角为 0° 、俯仰角为 90° 时, x 轴在水平面内, 且指北为正向. y 轴正向指向西方.

图 1(a) 给出了 2017 年 3 月 28 日 0.4–11:00 UTC 期间的天线座架热变形引起的倾斜仪的 x 轴方向的读数变化. 本台倾斜仪安装于靠近电梯的俯仰轴承座上, 此处的环境温度变化较小有利于更好地保证倾斜仪的测量精度. 在此期间, 倾斜仪读数从约 $-20''$ 变化到 $20''$, 基本上反映了天马望远镜在俯仰方向上的指向偏差. 其测量结果在进行滤波等处理后能够用于天线座架热变形引起的俯仰指向偏差的准实时改正. 倾斜仪测量数据包含方位旋转过程中轨道不平引起的变化以及座架热变形引起的俯仰指向变化. 首先利用模型消除轨道不平的影响, 然后, 座架热变形引起的俯仰指向变化作为一个独立项叠加到指向模型中, 需要修正时, 勾选此项, 即可准实时地改正天线座架热变形引起的俯仰指向偏差, 目前的改正精度约 $10''$. 后续将继续通过对倾斜仪本体进行恒温控制等手段进一步提高改正精度.

图 1(b) 给出了 2017 年 3 月 28 日 0.4–12:00 UTC 观测期间的火星探测器的观测仰角 $EL = 90^\circ - \varsigma$ 和大气折射改正量 $\Delta\varsigma$, 其中 EL 为仰角, ς 为天顶距. 大气折射改正量 $\Delta\varsigma$ 由下式给出 [5,9]:

$$\Delta\varsigma = a \tan \varsigma + b \tan^3 \varsigma, \quad (1)$$

a, b 是两个常量, 单位是角秒. a, b 的值与测站附近的温度、湿度、气压和观测频率有关. 在温度 15° 、湿度 70%、气压 101325 Pa 和观测频率 8 GHz 时, $a = 58.329570606460187$, $b = -0.067033983372775843$.

图 1(b) 可知, 在观测仰角 EL 为 10° 时, 大气折射改正量可达约 $300''$. 又由于 a, b 的值与测站附近的温度、湿度、气压相关, 而这些参数是变化的, 故大气折射的改正误差一般为改正值的 3%~5%, 即改正误差最大可达 $15''$. 当仰角升高至 75° 时, 大气折射改正值本身只有约 $13''$, 其改正误差约 $1''$, 可以忽略不计.

图 1(c) 给出了光行时 Δt 引起的跟踪指向偏差的示意图. 地面射电望远镜在 t_0 时刻接收到的信号, 实际上是 $t_0 - \Delta t$ 时刻探测器发射的信号. 所以, 在波束较窄的大型射电望远镜接收火星探测器的信号时, 应该让望远镜指向 $t_0 - \Delta t$ 时刻探测器的位置而不是 t_0 时刻探测器的位置. 作为一个例子, 我们分析了 2020 年 7 月发射的火星探测器在深空机动、近火制动、平面机动、降轨前等各测控弧段的与探测器跟踪有关的参数. 在近火制动、平面机动、降轨前等测控弧段, 由于星地距离达到 1.9 ~ 2.9 亿千米, 光行时 Δt 为 641.5 ~ 975.5 s, 探测器的横向移动距离对应的角度为 $15.0'' \sim 25.0''$. 所以, 如

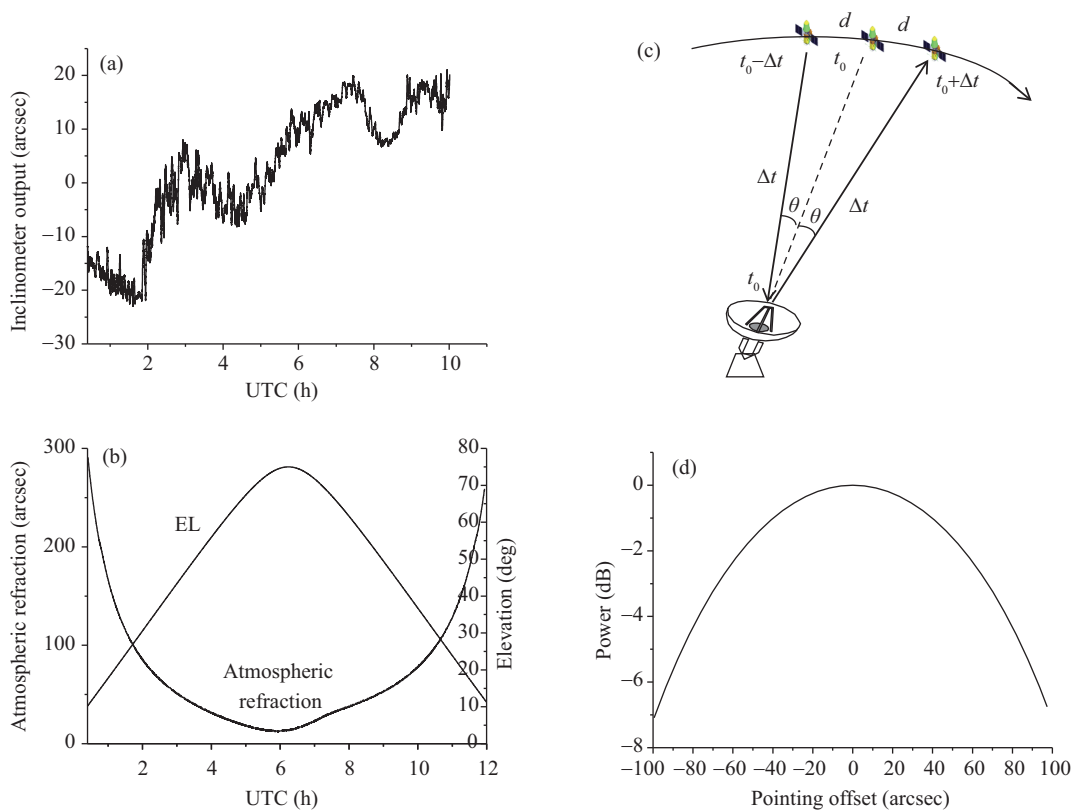


图 1 (网络版彩图) (a) 天线座架热变形引起的倾斜仪 x 轴方向的读数变化; (b) 观测仰角和大气折射改正量; (c) 光行时引起的指向偏差示意图; (d) 天马望远镜指向偏差和接收功率衰减的理论关系

Figure 1 (Color online) (a) Measurement result in the x -axis direction of the inclinometer caused by thermal deformation of antenna body; (b) observation elevation and correction value of atmospheric refraction; (c) pointing error caused by light time; (d) relation of receiving power and pointing offset of Tianma telescope

果不考虑下行单程光行时可引起 $15.0'' \sim 25.0''$ 的指向偏差. 而在测速测距等上下行双程测控时, 对指向偏差的影响倍增, 达到 $30.0'' \sim 50.0''$ [2].

射电望远镜的波束宽度 η 与接收信号的波长 λ 及天线口径 D 有关, $\eta = \alpha \cdot \frac{\lambda}{D}$, 其中, α 在 1 至 1.22 之间. 按照 $\alpha = 1.17$ 计算, 在 X 频段的 8500 MHz 观测时, 天马望远镜的波束宽度为 $131''$. 图 1(d) 给出了天马望远镜指向偏差和接收功率衰减的理论关系. 由图可知, 在指向偏差为 $20''$, $40''$, $60''$ 时, 分别对应着 0.3, 1.1, 2.3 dB 的衰减. 所以, 在利用大型射电望远镜跟踪火星探测器时, 应根据天线实际形变等各种因素引起的指向偏差模型, 精确改正结构变形、大气折射和光行时引起的指向偏差.

3 大型射电望远镜的火星探测器跟踪测试

为了验证火星探测器跟踪技术, 利用天马望远镜跟踪观测了在轨运行的火星探测器. 接收到的信号经放大和变频后分成两路, 一路信号利用频谱仪直接测量接收信号功率的变化, 另一路信号由终端设备记录用于事后处理分析.

2017 年 3 月 28 日, 我们根据火星探测器 MEX (Mars express, 火星快车) 和 MRO (Mars reconnaissance orbit, 火星勘测轨道器) 的精密轨道星历, 进行了跟踪测试. 图 2 给出了 3 月 28 日火星探

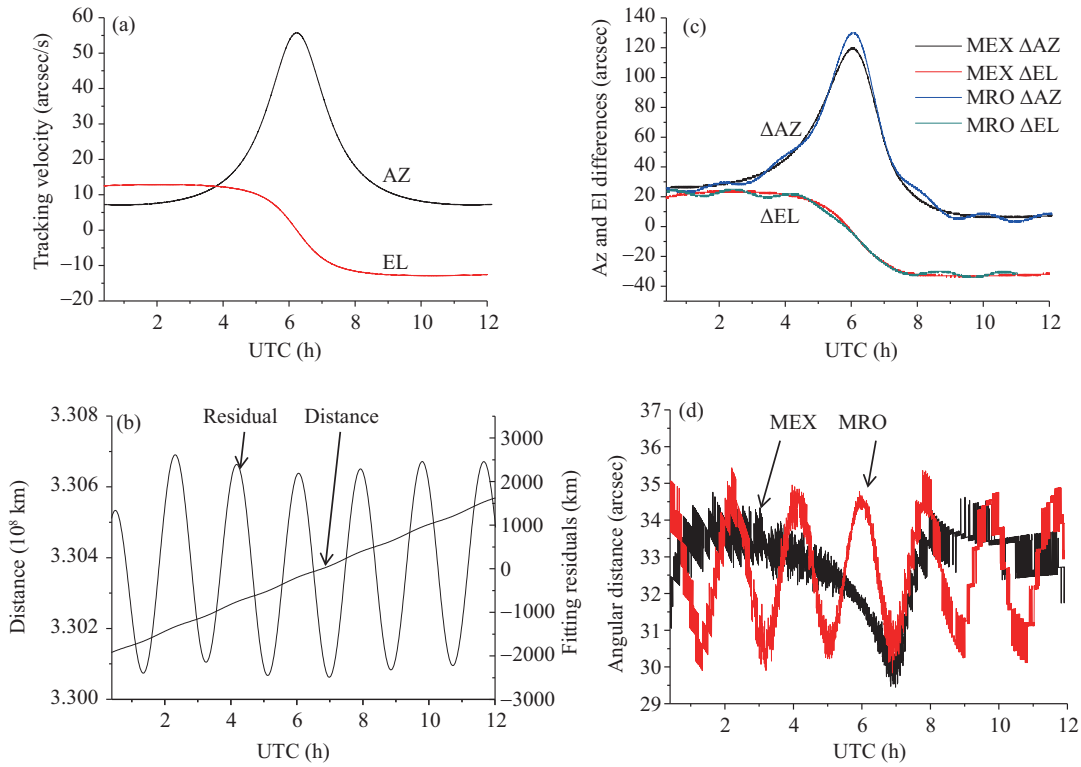


图 2 (网络版彩图) (a) 火星探测器 MEX 方位和俯仰方向的跟踪速度; (b) 探测器 MRO 与地球的距离及其拟合残差; (c) 考虑光行时和不考虑光行时的方位差和俯仰差; (d) 考虑光行时和不考虑光行时的角距离

Figure 2 (Color online) (a) Tracking velocity at azimuth and elevation direction; (b) distance between MRO and the earth and its fitting residuals; (c) differences of azimuth and elevation between considering the light time effect or not; (d) angular distance between considering the light time effect or not

探测器跟踪有关的参数. 图 2(a) 为 0.4–12:00 UTC 期间的方位和俯仰方向的跟踪速度, 方位方向最大为 60"/s, 俯仰方向最大为 15"/s, 都在天马望远镜的跟踪能力之内, 天马望远镜的最快跟踪速度为, 方位方向 1°/s, 俯仰方向 0.5°/s.

图 2(b) 给出了探测器 MRO 与地球的距离及其拟合残差. 在 0.4–12:00 UTC 期间, 星地距离由 3.301 变化至 3.306 亿千米. 图 2(b) 同时给出了星地距离的 5 次多项式的拟合残差, 周期约 1.85 h, 幅度约 ±2400 km, 主要体现了 MRO 的轨道周期和轨道变化.

图 2(c) 为考虑光行时和不考虑光行时的方位差 ΔAZ 和俯仰差 ΔEL . 可知, 由于地火距离遥远, MEX 和 MRO 的 ΔAZ 和 ΔEL 近似. ΔAZ 最大为 120", ΔEL 最大为 30".

图 2(d) 给出了 MEX 和 MRO 的考虑光行时和不考虑光行时的角距离 θ ,

$$\theta = \sqrt{(\Delta AZ \cdot \cos EL)^2 + \Delta EL^2}.$$

由图 2(d) 可知, θ 在 30" 至 35" 间变化. MRO 的角距离的变化存在 1.85 h 的周期项, MEX 的角距离的缓慢且周期较长, 这些变化特点是由 MRO 的低轨和 MEX 的高椭圆轨道特性引起的.

图 3 给出了天马望远镜 2017 年 3 月 28 日接收到的在轨火星探测器信号的频谱图. 频谱仪参数 RBW (resolution bandwidth) 设置为 30 Hz, VBW (video bandwidth) 为 20 Hz. 共接收到了 4 个火星探测器的信号, 分别为 Mars Odyssey, EXOMars (exobiology on Mars), MEX 和 MRO. Mars Odyssey

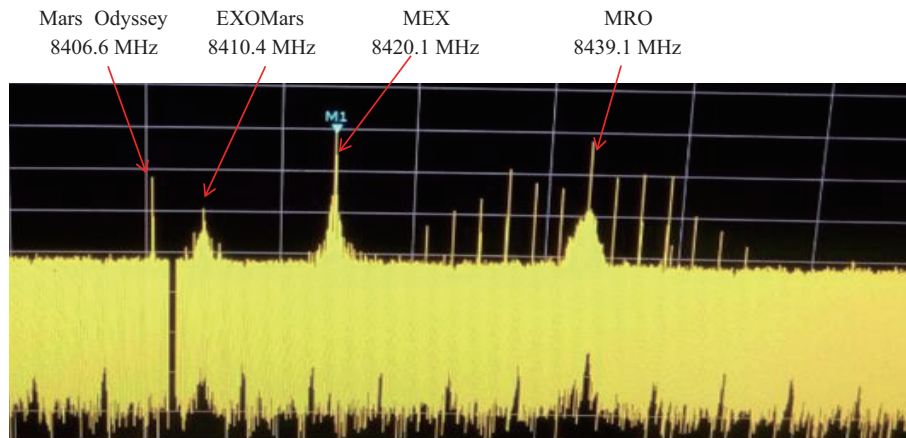


图 3 (网络版彩图) 天马望远镜接收到的在轨火星探测器信号的频谱图

Figure 3 (Color online) Spectra of Mars in-orbit spacecraft signals received by using TianMa telescope

信号的中频频率为 8406.6 MHz, 带宽很窄, 信噪比约 20 dB. EXOMars 信号的中频频率为 8410.4 MHz, 带宽约 2.0 MHz, 信噪比约 12 dB. MEX 信号的中频频率为 8420.1 MHz, 带宽约 2.5 MHz, 信噪比约 32 dB. MRO 信号的中频频率为 8439.1 MHz, 带宽约 2.5 MHz, 信噪比约 30 dB. MRO 的信号从约 8428 至约 8452 MHz 间有频率间隔约 2 MHz 的 13 个谐波分量, 信噪比也达到了 10 ~ 22 dB. 由于火星距离遥远, 几乎所有的火星探测器都会被射电望远镜的主波束同时观测到. 所以, 在设计我国的火星探测器的测控和数传频率时, 要充分考虑到现有和将要发射的所有火星探测器的兼容性, 以免相互干扰.

我们利用 MEX 和 MRO 的精密星历, 分别在考虑光行时和不考虑光行时两种状态下进行了跟踪, 并测试比较了两种情况下的接收信号的强度. 结果表明, 在不考虑光行时的接收信号的电平比考虑光行时低 0.8 dB 左右, 证明了在观测火星探测器时, 对于大口径望远镜跟踪, 下行单程光行时引起的指向偏差是必须考虑并改正的.

我们在改正了结构变形引起的指向偏差、大气折射、光行时引起的指向偏差后跟踪 MEX, 并通过扫描找到接收信号最强的位置并改正残余的指向偏差. 在此基础上, 再人为地在俯仰方向上给予偏差, 测量接收信号功率的变化和俯仰偏差的关系. 图 4 给出了测试结果. 由图 4 可知, 在俯仰偏差为 $\pm 36''$ 时, 接收能力降低约 0.8 dB. 在俯仰偏差为 $\pm 72''$ 时, 接收能力降低约 3.5 dB.

为了进一步验证大型射电望远镜跟踪火星探测器的能力, 2017 年 3 月 29 日, 天马 65 m 和昆明 40 m 射电望远镜对火星探测器 MEX 和临近射电源进行了 VLBI 观测. 观测频段为 X 波段, 数据采集和记录终端的采样率为 4 MHz, 带宽 2 MHz, 量化 2 bit. 上海 VLBI 数据处理中心对天马和昆明测站的 VLBI 原始观测数据进行了相关处理. 相关处理时使用了 MEX 的精密轨道进行时延预测值计算.

图 5(a) 和 (b) 分别给出了天马和昆明望远镜接收到的 MEX 信号的频谱, 谱分辨率为 1955 Hz (即 2 MHz/1023). 可以看到 KM 测站信号的信噪比约为 10 dB, 天马测站为 19 dB. 另外, 从天马测站接收的信号中, 可清晰看出 MEX 信号的频谱特征, 充分证明了在改正各种跟踪误差后, 可以利用口径 65 m 的天马望远镜等大型射电望远镜有效地跟踪火星探测器.

图 5(c) 给出了 KM-TM 基线上的 MEX 信号的 VLBI 时延率. 时延率是利用 MEX 的 8420.1 MHz 主载波的相关相位得出的^[10,11], 积分时间为 1 s. 时延率的随机误差约为 1 ps/s, 平均值约 -1.5 ps/s, 说明基于 MEX 精密轨道的时延预测值精度较高, 可以很好地进行 VLBI 相关处理. 图 5(d) 给出了

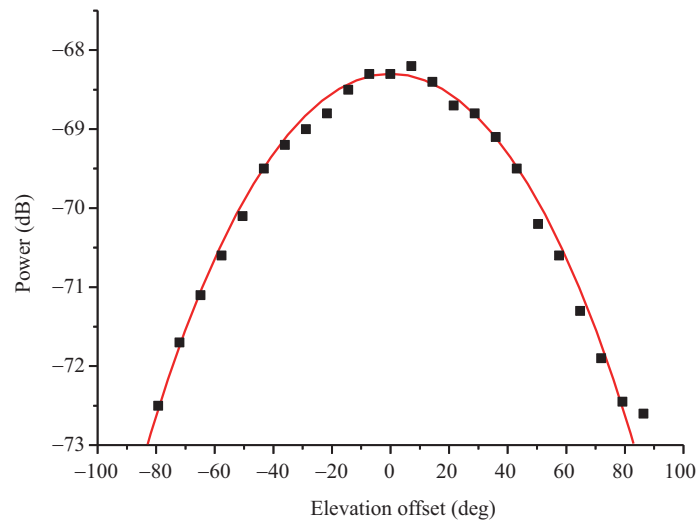


图 4 (网络版彩图) 人为施加俯仰偏差情况下的接收功率的衰减 (黑点), $\alpha = 1.17$ 时的理论曲线 (红线)

Figure 4 (Color online) Power reduction of the received signal with elevation offset (black spots), theoretical curve (red line) when $\alpha = 1.17$

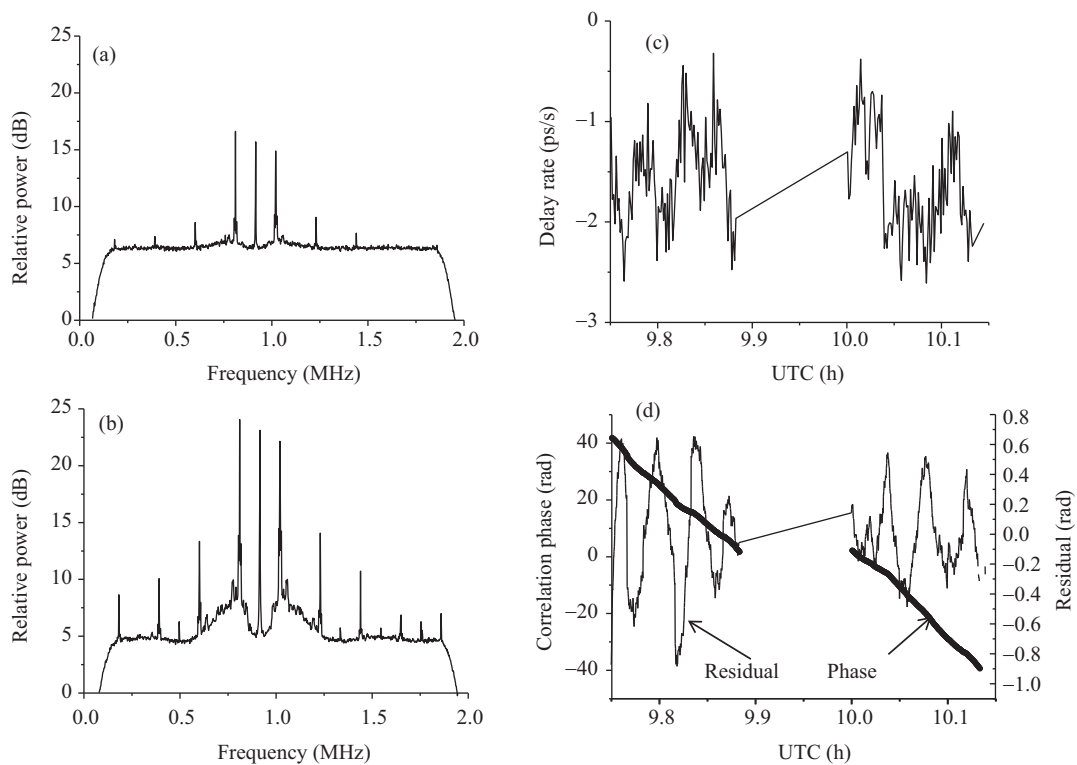


图 5 (a) 昆明 KM, (b) 天马 TM 望远镜接收到的 MEX 信号的频谱; (c) KM-TM 基线上的 VLBI 时延率; (d) KM-TM 基线上的相关相位及拟合残差

Figure 5 Spectra of MEX signals received by using (a) KunMing (KM), (b) TianMa (TM) telescopes; (c) the delay rate on the KM-TM baseline; (d) the correlation phase and the fitting residuals on the KM-TM baseline

KM-TM 基线上的 MEX 探测器的相关相位及拟合残差. 在 0.4 h 的时间内, 相关相位由 40 rad 变化至 -40 rad. 拟合残差是对相关相位进行 5 次多项式拟合得到的. 拟合残差有明显的周期项, 幅度约为 ± 0.5 rad, 周期约为 2 min, 应该主要由 MEX 的轨道变化引起.

4 结论

本文对大型射电望远镜的火星探测器跟踪技术进行了分析, 并实际利用天马和昆明射电望远镜跟踪火星探测器进行了测试验证. 天马望远镜单天线测试和天马-昆明 VLBI 观测结果表明, 大型射电望远镜跟踪火星探测器时需要考虑和改正座架热变形、大气折射、光行时等引起的指向偏差. 不考虑下行单程光行时的接收功率比考虑时降低约 0.8 dB. 在俯仰指向偏差为 $36''$ (对应着单程光行时的影响) 和 $72''$ (对应着双程光行时的影响) 时天马望远镜接收火星探测器的能力分别降低约 0.8 和 3.5 dB. 在改正上述指向误差后, 能够利用大型射电望远镜有效地跟踪火星探测器.

参考文献

- 1 Liu Q H, Wu Y J, Huang Y, et al. Mars rover positioning technology based on same-beam VLBI. *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]
- 2 Liu Q H, Chang S Q, Huang Y, et al. Mars spacecraft tracking and analysis of VLBI orbit determination. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2017, 47: 099504 [刘庆会, 昌胜骐, 黄勇, 等. 火星探测器跟踪及 VLBI 测定轨分析. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47: 099504]
- 3 Liu Q H, He Q B, Zheng X, et al. Analysis of VLBI observation for Tianma radio telescope in Chang'E-3 orbit determination. *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]
- 4 Fu L, Ling Q B, Geng X G, et al. The alidade temperature behavior of TM65m antenna and its effects on pointing accuracy. *Spie Astron Telesc Instrum*, 2016, 9912: 1-7
- 5 Crane R K, Meeks M L. *Refraction Effects in the Neutral Atmosphere, Methods of Experimental Physics: Astrophysics 12B*. Cambridge: Academic Press, 1976
- 6 Wang J Q, Zhao R B, Yu L F, et al. Antenna performance measurements at L, S, C, and X bands for the TM65m radio telescope. *Chin Astron Astrophys*, 2016, 40: 108-128
- 7 Fu L, Liu G X, Jin C, et al. Surface accuracy analysis of single panels for the Shanghai 65-M radio telescope. *Wseas Trans Appl Theor Mech*, 2015, 10: 54-61
- 8 Yu L F, Wang J Q, Zhao R B, et al. Pointing model establishment of TM65m radio telescope. *Acta Astron Sin*, 2015, 56: 165-177 [虞林峰, 王锦清, 赵融冰, 等. TM65m 射电望远镜指向模型的建立. *天文学报*, 2015, 56: 165-177]
- 9 Rüeger J M. *Refractive Index Formulae for Electronic Distance Measurement with Radio and Millimetre Waves*. Unisurv Report S-68. 2002
- 10 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: 1080-1086
- 11 Zheng X, Liu Q H, Wu Y J, et al. Motion monitoring and analysis of Chang'E-3 rover based on same-beam VLBI differential phase delay. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 872-878 [郑鑫, 刘庆会, 吴亚军, 等. 基于同波束 VLBI 差分相时延的“玉兔”月球车动作监视分析. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, 44: 872-878]

Tracking technology of Mars spacecraft for large radio telescope

Qinghui LIU*, Rongbing ZHAO, Fengchun SHU, Qingbao HE, Xin ZHENG, Maoli MA,
Li FU, Yajun WU & Linfeng YU

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

* Corresponding author. E-mail: liuqh@shao.ac.cn

Abstract In 2020, China will launch a Mars spacecraft composed of an orbiter and lander/rover. In this paper, the tracking techniques of the Mars spacecraft for a large radio telescope are analyzed and verified using the Shanghai 65 m radio telescope (Tianma telescope). The measurement results indicate that the pointing error caused by thermal deformation of the antenna body, atmospheric refraction, and the light-time effect should be considered when a large radio telescope is used to track the Mars spacecraft. When the light-time effect is not taken into account, the receiving power is reduced by approximately 0.8 dB. When the elevation offset is 36 and 72 arcsec, the reception capacity of the Tianma telescope is reduced by approximately 0.8 and 3.5 dB, respectively. The results of this study thus have important implications for the Mars exploration.

Keywords radio telescope, Mars spacecraft, tracking, light time, pointing offset



Qinghui LIU was born in 1966. He received a Ph.D. degree in information system from Kagoshima University, Kagoshima, Japan, in 2003. He is currently a professor at the Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences. His research interests include VLBI and deep space exploration. Dr. Liu is a member of IAU and the Chinese Astronomical Society.