

利用中国 VLBI 网实现对“火星快车”的测定轨

曹建峰^{①②③}, 黄勇^{①*}, 胡小工^①, 马茂莉^①, 郑为民^①

① 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049;

③ 北京航天飞行控制中心, 北京 100094

* 联系人, E-mail: yongh@shao.ac.cn

2010-03-31 收稿, 2010-05-28 接受

国家自然科学基金(10703011, 10878021)、国家高技术研究发展计划(2008AA12A209, 2008AA12A210)和上海市科学技术委员会(06DZ22101)资助项目

摘要 为满足我国深空探测发展的需要, 上海天文台组织中国 VLBI 网对欧空局在轨火星探测器“火星快车”进行了测定轨实验. 利用自主研发的具有频谱高分辨率的 VLBI 软件相关处理机及高精度多普勒测量系统, 在国内第一次获取到了距离最远至 3.6 亿千米的火星探测器 VLBI 和多普勒测轨数据, 并利用自主研发的定轨软件系统对测轨数据进行了分析处理. 分析结果表明, 国内已经初步具备对火星探测器的测定轨能力, 5 s 积分三程多普勒测量噪声约 0.3 mm/s, 与欧空局水平相当. 利用约一个圈次 8 h 三程多普勒数据定轨, 定轨结果与欧空局重建轨道位置差约几百米. 分析结果还表明在当前测量精度水平下, 定轨精度主要取决于多普勒数据. 由于“火星快车”目前的下行信号为窄带信号, 所以 VLBI 的时延测量精度限于纳秒量级. 要提高 VLBI 数据对千米量级定轨精度的贡献, 其测量精度需提高一个量级.

关键词

VLBI
火星快车(MEX)
测定轨

火星是距离地球最近的行星之一, 它与地球有着许多相似之处, 是地球以外人类最感兴趣、探测活动最为频繁的行星. 火星的探测活动始于 20 世纪 60 年代, 前苏联、美国、日本、俄罗斯和欧洲等国先后发起了近 40 次的火星探测计划, 1971 年美国发射的“水手 9 号”(Mariner 9)成为第一颗环绕火星的人造卫星. 20 世纪末至 21 世纪初, 火星仍然是美俄等世界航天大国探测的热点对象, 多颗探测器成功到达火星并进行探测^[1]. 而在未来几年, 美国、欧洲和俄罗斯还将有数个探测器飞往火星, 美国更是计划在 2037 年实现人类火星登陆.

根据我国 2006 年公布的《航天白皮书》以及国家“十一五”规划, 深空探测将会作为我国近 20 年来航天事业发展的主要内容. 在成功实施月球探测的同时, 适时开展火星探测将是我国未来深空探测的发展方向. “萤火 1 号”(YH-1)是我国首个火星探测计

划, 该计划是中国与俄罗斯的太空合作项目之一, 原计划 2009 年 9 月发射, 因故推迟到 2011 年^[2]. 而我国的自主火星探测计划也在推进当中.

火星距离地球最远达到近 4 亿千米, 是地月距离的近千倍, 距离上的增加使得火星探测器的测控技术面临挑战, 如何对于数亿千米的火星探测器进行测控, 是火星探测的关键技术之一. 在美国的深空探测计划中, 深空网(deep space network, DSN)发挥了至关重要的作用^[3]. 对火星探测器的测轨主要依赖于多普勒测速和测距技术, 双向多普勒测速因为是同频源测量可得到高精度的视向速度测量, 但需要发射较强的上行信号以保证一定信噪比的回波. 随着航天器星载高精度频标的使用, 不需要发射上行的单程多普勒测速跟踪技术也具有重要价值^[3]. Mariner 9 和 Viking 1-2 的测轨数据主要为 S 波段双程多普勒, 60 s 积分双程多普勒测量的噪声水平约为 1 mm/s^[4,5].

英文版见: Cao J F, Huang Y, Hu X G, et al. Mars Express tracking and orbit determination trials with Chinese VLBI network. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-4170-8

而在后续火星探测任务中 X 波段测控技术得到了应用,随着工作频段不断升高和其他相关技术的发展,测量精度不断提高,X波段 10 s 积分双程和三程多普勒噪声水平约为 0.03 mm/s,单程多普勒噪声水平约为 1.0 mm/s,而测距精度也可以达到 3 m^[6,7].

测轨精度的提高也推动了火星探测器定轨精度和火星重力场精度的提高.早期的火星探测计划如 Mariner 9,由于测量和火星重力场精度的限制,定轨精度只能达到数千米的水平,而 MGS 等后期火星探测器的定轨精度可以达到米级,相应的火星重力场也从粗糙的低阶次模型发展到高精度的 95 阶次 MGS95J 模型^[7-9].

直到 20 世纪 80 年代,深空探测器的测量手段主要依赖于多普勒和测距设备,但传统技术的固有不足,促进了对甚长基线干涉测量技术(very long baseline interferometry, VLBI)的开发和利用,VLBI 可以提供高精度的航天器角度测量,且不需要高功率的信号上行^[3,10].目前由于我国深空网尚未建立,VLBI 是可对火星探测器进行跟踪的测轨技术之一.由于 VLBI 可以精确测量航天器的横向位置和速度差,所以对于多普勒和测距的视向测量是很好的补充,两种技术结合起来,可以实现更精确或更短时间的轨道测定,特别是在某些关键弧段,如航天器在进入行星轨道期间,VLBI 测量发挥了至关重要的作用^[11].

中国 VLBI 网(Chinese VLBI network, CVN)包括上海(25 m)、北京(50 m)、昆明(40 m)和乌鲁木齐(25 m)四架射电天线,一直活跃在国际 VLBI 研究领域,已成功地完成了“嫦娥一号”月球探测工程测轨任务,并参与了日本 SELENE-1 月球探测的国际联合观测^[12].

“火星快车”(Mars Express, MEX)是欧空局(ESA)的首颗火星探测器^[13],2003 年 6 月成功发射,同年 12 月到达火星.ESA 利用位于澳大利亚的新诺舍 35 m 天线,在 DSN 的协助下,应用 S 和 X 波段对 MEX 进行测量,主要测量数据为双程和三程多普勒, S 和 X 波段多普勒测量噪声分别约为 1.2 和 0.2 mm/s (1 s 积分)^[13],定轨精度约在数百米水平.

我国在地球卫星的测定轨工作方面已经取得了相当的进展,对低轨地球卫星的测定轨精度可以达到厘米级^[14],对地球同步卫星,综合多种测量资料进行联合定轨,定轨精度可达米级^[15,16].但对火星如此遥远距离卫星测轨资料的处理还比较少,几乎是空白.基于与 ESA 的良好合作关系,MEX 为我国的

火星探测器测定轨工作提供了一个非常好的实验目标.通过在实验中积累经验,有助于更好地分析技术状态.中国科学院上海天文台组织中国 VLBI 网对 MEX 进行了 3 次观测实验,利用自主研发的具有频谱高分辨的 VLBI 软件相关处理机和高精度多普勒测量系统第一次得到了国内 VLBI 测站对火星探测器的测轨数据.测轨数据主要包括 VLBI 时延、时延率和三程多普勒.三程与双程跟踪模式类似,双程跟踪模式由地面台站发射上行信号,经星上转发器产生一个下行信号,并由同一个测站接收,三程跟踪模式的区别是接收下行信号的不是同一个测站.为了处理这些数据,上海天文台开发了火星探测器综合定轨软件 MarsODP^[17].本文对中国 VLBI 网对 MEX 的测轨数据进行了分析,并对 VLBI 和多普勒数据对火星探测器的定轨能力进行了初步探讨.本文研究结果对 YH-1 计划和我国自主火星探测计划具有一定的参考意义.

1 观测实验概况

在 ESA 的大力支持下,截至 2009 年 8 月,上海天文台根据 YH-1 工程需要,共组织了 3 次对 MEX 的 VLBI 观测实验,并对其中两次的的数据提取了高精度多普勒频率.2007 年 5 月 30 日,上海天文台组织 CVN 对 MEX 进行了第 1 次观测实验,上海、北京和乌鲁木齐 3 个 VLBI 测站参与了此次实验,对 MEX 进行了约 4 h 的跟踪,在国内首次获得了火星探测器的 VLBI 时延、时延率测轨数据.基于该观测弧段内 MEX 下行信号的特点,此次实验采用 X 波段进行观测,实验的大部分时间用于观测 MEX,仅在实验开始、中间和结束时插入少量的河外射电源观测.用作参考的河外射电源位置精确已知,可以精确校正 VLBI 站的系统误差.

在第 1 次成功观测 MEX 后,上海天文台于 2008 年 11 月 7 日组织了第 2 次对 MEX 的 VLBI 观测实验.上海和乌鲁木齐测站参与了此次实验,在 X 波段上获取了单基线的时延和时延率数据.该观测时间内,ESA 的新诺舍站在 X 频段上发射上行信号,星上转发比为 880/749.在观测后的数据处理时,除了进行互相关处理、提取 VLBI 观测值外,还利用 VLBI 观测数据提取了 X 频段的新诺舍-上海,新诺舍-乌鲁木齐的三程多普勒测量数据.

2009 年 8 月 7 日 20:00 至次日 08:04(UTC 时间),

上海天文台组织第 3 次 MEX 观测实验, 此次实验跟踪弧段长达 8 h. 国内参与测站为上海、昆明、乌鲁木齐 3 个 VLBI 站, 这 3 个站组成的 3 条基线获取了 VLBI 时延、时延率数据. 新诺舍站在 X 频段发射上行信号, 经星上转发器转发后, 分为 S 和 X 两个频段的下行信号, 由国内 3 个 VLBI 测站接收其下行信号. 由于星上转发比的不同, 此次实验分别在 S 频段和 X 频段上获取了三程多普勒数据.

考虑到前 2 次的观测时间和观测资料偏少, 本文将重点分析第 3 次 MEX 观测实验的测轨数据.

2 MEX 的测量信号处理及定轨分析软件

2.1 MEX 测量信号处理

VLBI 的观测数据经过互相关处理后, 得到干涉条纹的幅度和相位, 通过对条纹拟合获取到 VLBI 的时延和时延率观测量. 为处理火星快车观测数据, 上海天文台 VLBI 中心使用软件相关处理机^[18-20], 针对 MEX 的 X 波段窄带遥测(带宽约 200 kHz)和数传信号(带宽约 1.0 MHz)以及 S 波段的点频信号, 采取高分辨率的特殊处理模式以提高信噪比, 获得基线间的互功率谱与各台站自功率谱. 相关后处理将 X 波段窄带遥测信号的基线相位变化在时间域和频率域进行最小二乘拟合, 得到时延、时延率的时间序列, 并利用射电源的时延、时延率观测数据校正卫星时延、时延率, 消除钟差、观测仪器和信号传播介质引入的误差. 观测实验后处理获得的卫星时延噪声为几纳秒, 时延率优于 1 ps/s.

针对 MEX 发射的窄带点频信号, 利用相关方法对 X 波段和 S 波段的频率进行精确测量^[18], 通过分析参考信号与真实信号间的残余相位, 从而获得卫星发射的多普勒频率. 图 1 为 2009 年 8 月 7 日昆明站 X 波段和 S 波段在 2 MHz 带通内的频谱图, 分辨率约为 15 Hz.

在 2009 年 8 月 7 日观测中, 计算多普勒频率时, 积分时间为 5 s, 获得 X/S 波段的多普勒数据的噪声水平以及有效数据见表 1.

由表 1 可知, S 波段台站观测的有效数据比高于 80%, X 波段高于 95%. S 频段约在 2.9 GHz, X 频段约在 8.4 GHz, 按照频率与多普勒的转换关系将表 1 中 S 频段的噪声换算到 X 频段, 分别为 7.685, 4.721, 5.092 mHz, 大于 X 频段的残差, 主要原因是 S 波段下行信号的功率低于 X 频段.

2.2 定轨软件实现

空间飞行器的轨道确定是深空探测的关键技术之一^[21,22], 精密定轨不仅保证空间飞行器的正常飞行, 也是分析研究有效载荷数据进行各种科学研究的必要前提. 随着各种观测技术精度的提高, 卫星轨道已经成为空间技术科学应用的关键之一, 对定轨精度也提出了更高的要求.

表 1 台站多普勒测量噪声水平及有效数据统计

波段	上海/mHz	昆明/mHz	乌鲁木齐/mHz
S	2.653 (81.05%)	1.630 (81.66%)	1.758 (84.48%)
X	6.571 (96.05%)	3.186 (96.57%)	2.673 (97.93%)

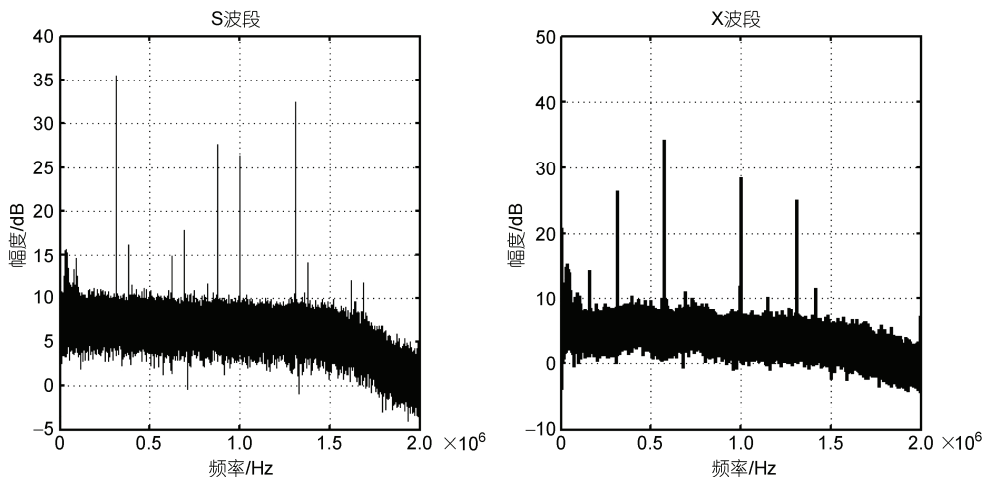


图 1 MEX 观测频谱

上海天文台自主开发了火星探测器定轨软件 MarsODP, 其基本目标是满足我国火星探测工程的定轨需求, 该软件采用动力学统计定轨方法^[17], 主要分为3个模块: (1) 轨道和状态转移矩阵数值积分; (2) 测量量理论值及其对待估参数偏导数计算; (3) 观测误差方程组平差解算。

这3个模块之间互相独立, 后一个模块的输入为前一模块的输出文件。这样整个软件的代码结构非常简单, 便于修改程序和查找错误。该软件采用标准 Fortran77/90 语法, 运行平台为 UNIX/LINUX。在软件开发过程中还注重计算效率, 以节省计算时间。

软件已经完成了基本的动力学模型和测量模型编写, 可以处理的测量类型包括双程距离、三程距离、单程多普勒、双程多普勒以及 VLBI 时延和时延率^[17]。

3 数据分析和讨论

MEX 的半长轴约为 8700 km(火星半径 3397 km), 轨道周期约为 6.8 h, 偏心率 e 约为 0.57, 是一颗大偏心率轨道卫星, 近火点高度约 300 km, 远火点高度超过 1 万千米^[13]。

ESA 提供了这几次观测实验期间的重建轨道和部分预报轨道, 重建轨道与预报轨道之间的差异最大在千米量级。历次观测的弧段都比较短, 最短的观测弧段为 4 h, 最长的观测弧段也仅有 8 h。对数据的处理分析我们分成两步完成, 首先利用 ESA 的重建轨道计算理论观测值, 与实测数据进行比较以评估数据的精度(包括系统误差和随机误差), 然后再利用观测数据进行定轨计算, 比较定轨星历与 ESA 提供的重建轨道的差异。这样可以利用现有数据检验定轨软件处理数据的能力, 以及实现对实测数据的分析处理。轨道计算所涉及的参数见表 2。

表 2 提到的火星 J2000 天球坐标系是以火星质心为原点, J2000 历元地球平赤道为基本平面, 历元平春分点为基本方向的坐标系。需要说明的是, JPL 提

表 2 数据计算参数设置

项目	模型
坐标系	火星 J2000 天球坐标系
火星重力场模型	GMM-2B
N 体摄动	太阳及大行星
行星历表	JPL DE414
太阳辐射压	固定面质比
相对论影响	Schwarzschild

供的行星历表 DE414 相对于先前的 405 版本对火星历表有了很大改善, 我们处理中也发现使用 405、414 两个版本的行星历表分别进行计算, 火星位置的差别在千米量级, 对测距的影响可达数百米, 多普勒的差异也达到每秒毫米量级。考虑到与 ESA 计算规范的一致性, 本文在数据处理中选择了 414 版本的行星历表。

VLBI 测量技术在 2007 年已成功应用于“嫦娥一号”绕月探月工程, 对火星探测器的 VLBI 资料建模必须在太阳系质心参考架中实现^[22], 具体建立步骤参见文献[17]。VLBI 时延率观测可以通过对 VLBI 时延差分进行建模。根据广义相对论, 引力场导致电磁信号传播路径的弯曲和传播速度的减慢, 其效应在高精度的资料分析中是不容忽略的^[22,23]。

我们利用 ESA 提供的重建轨道计算 VLBI 理论观测值, 并与实际观测值比较。图 2 以 2008 年 11 月 7 日为例, 给出了 VLBI 数据的 o-c 残差图。从图中可以看到整个观测弧段共分成 5 段, 中间观测空缺部分为射电源观测, 用以校正 VLBI 站的系统误差。全弧段数据的残差均很平直, 最后一段稍有偏差可能是因为低仰角大气介质修正误差的原因。VLBI 时延数据的噪声水平为 8 ns, 时延率数据的噪声水平为 0.6 ps/s, 与“嫦娥一号”卫星的 VLBI 测量噪声相当。VLBI 数据残差情况比对正常, 说明 CVN 对 MEX 卫星成功进行了观测, 得到了正确可靠的观测数据, 同时也检验了定轨软件对 VLBI 数据的处理能力。

频率与多普勒的转换关系见文献[22,23]:

$$\dot{\rho} = \left(1 - \frac{f_o}{f_s}\right)c, \quad (1)$$

其中 f_s 为发射频率, f_o 为接收频率, c 为光速。对单程多普勒:

$$\begin{aligned} \frac{f_o}{f_s} = & 1 + \frac{1}{c}(\vec{v}_s - \vec{v}_o) \cdot \vec{n} - \frac{1}{c^2}(\vec{v}_o \cdot \vec{n})(\vec{v}_s \cdot \vec{n}) \\ & + \frac{1}{c^2}(\vec{v}_s \cdot \vec{n})^2 + \sum_i \frac{GM_i}{c^2} \left(\frac{1}{r_{o,i}} - \frac{1}{r_{s,i}} \right) \\ & + \frac{1}{2c^2}(v_o^2 - v_s^2) + O(c^{-3}), \end{aligned} \quad (2)$$

$\vec{v}_s$ 表示探测器在太阳系质心坐标系下的速度矢量, $\vec{v}_o$ 表示测站在太阳系质心坐标系下的速度矢量, $\vec{n}$ 为测站到探测器的方向矢量, $r_{s,i}$ 为天体质心到探测器的几何距离, $r_{o,i}$ 为天体质心到测站的几何距离, 下

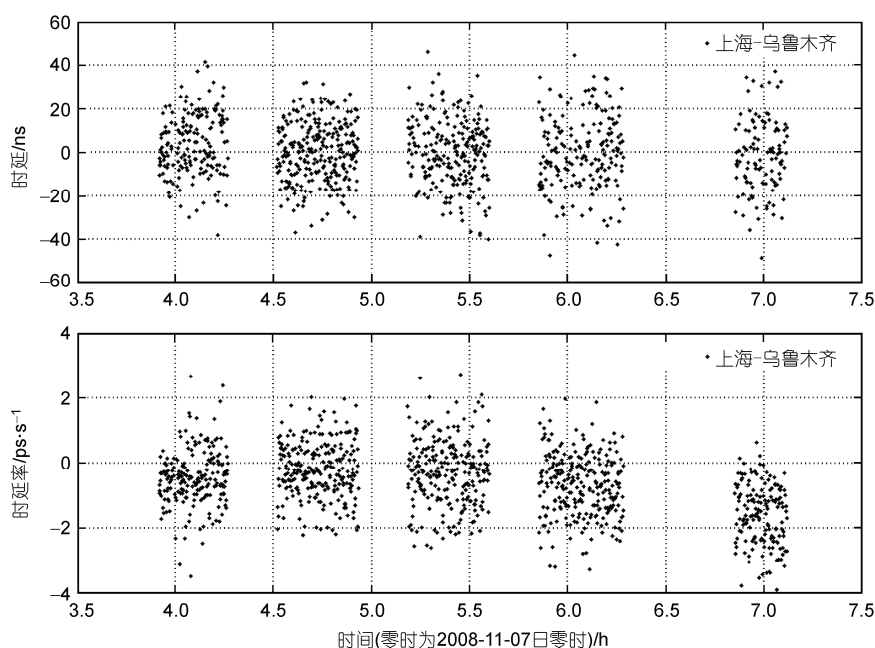


图2 2008年11月7日VLBI测量数据残差

标 i 表示需考虑引力影响的各个天体。

对于三程多普勒数据,在实际工作中使用测距进行差分建模,即采用积分多普勒模型。与VLBI数据的处理方法相同,我们仍然以ESA的重建轨道为基准,考查多普勒观测量的 $o-c$ 残差。这里给出了2009年8月7~8日X频段三程多普勒数据(5 s积分)的残差图,见图3(a),(c),(e)。图3中23 h处为近火点,除近火点附近无观测数据外(此时火星位于地平以下),其余观测空缺部分为射电源校正,一般约为20 min。我们发现三程多普勒数据相对于ESA基准轨道有偏差,其量级大小约为几 mm/s,但是数据的随机噪声水平较小,大概为0.3 mm/s,与ESA的测量精度大致相当^[13]。S频段上的三程多普勒与X频段上的基本情况一致,只是噪声水平稍大。

引起图3(a),(c),(e)的测量量与理论计算量差别的原因包括轨道误差、介质改正误差和测量系统误差等。我们认为误差来自于轨道误差,本文尝试利用X波段多普勒数据进行定轨。定轨后数据残差见图3(b),(d),(f)。比较图3左右两列的残差可以发现,进行轨道解算后残差拟合情况明显变好,虽然只求解了轨道参数和光压参数,并没有求解多普勒的系统偏差,但在残差图上看到,系统偏差大大减小,定轨后三程多普勒残差 rms 值约为0.37 mm/s。

对轨道解算的星历与ESA重建轨道进行比较,结果见图4。图中R, T, N分别表示径向、横向和法向位置差异, V_r , V_t , V_n 表示3个方向的速度差异。两组轨道偏差的位置rms约为500 m,速度rms约为0.1 m/s。两组轨道的位置偏差最大达600 m,由此引起的多普勒残差变化可达4 mm/s,这说明三程多普勒数据对百米量级的轨道误差非常敏感。考查解算参数的协方差可以发现,解算参数之间的相关性很强,这主要是因为测量弧段相对太短的缘故。

VLBI测量数据作为一种站间差分观测测量,同等精度的测量对轨道的约束能力和探测器的距离大致成反比,即在测角精度不变的情况下,距离越远位置误差越大。在MEX的定轨计算中,也尝试加入VLBI数据进行轨道解算,计算结果表明,对于高精度(千米量级或者更高)的轨道计算,当前精度的VLBI数据(VLBI时延噪声几 ns,时延率约1 ps/s)的贡献不明显。进一步做观测数据对轨道变化的灵敏度分析,当轨道变化约数千米时,VLBI时延变化不到0.1 ns,时延率变化不到0.1 ps/s,而三程多普勒的变化可达几 cm/s。ESA提供的预报轨道和重建轨道位置误差约数千米,但是VLBI数据的残差却没有明显变化。

在“萤火一号”(YH-1)火星探测工程中,主要测轨数据为VLBI观测量和单程多普勒观测量。为进一

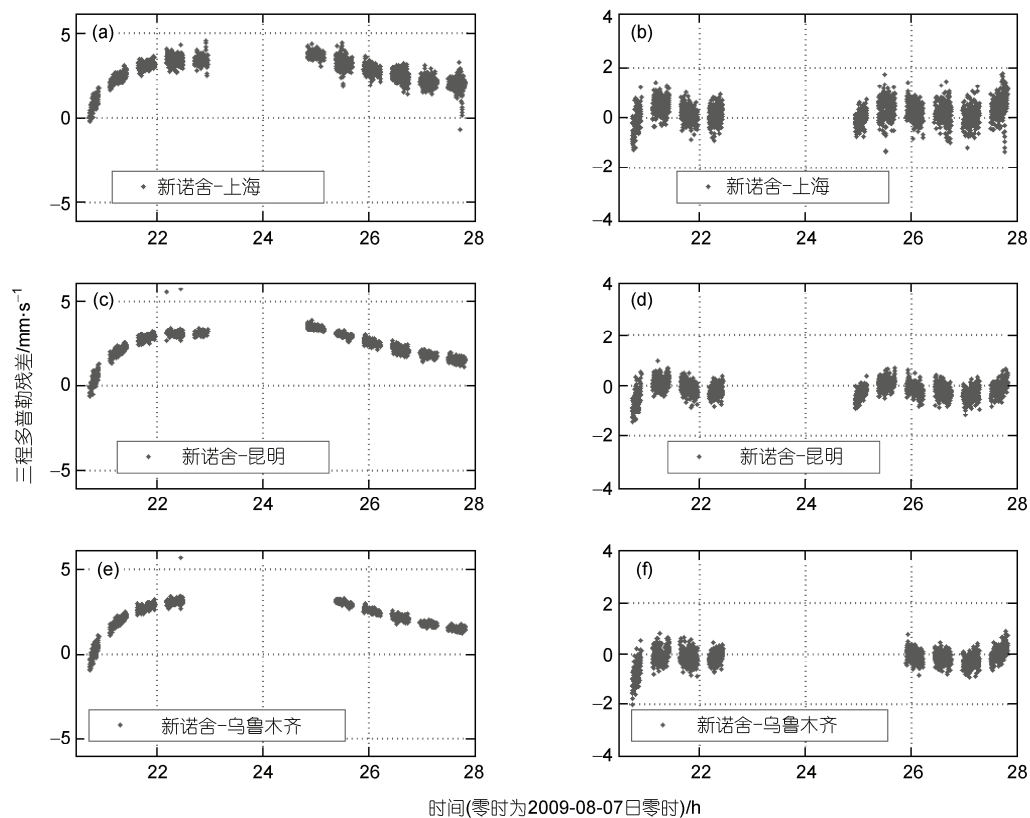


图3 定轨前相对于ESA重建轨道残差及定轨残差

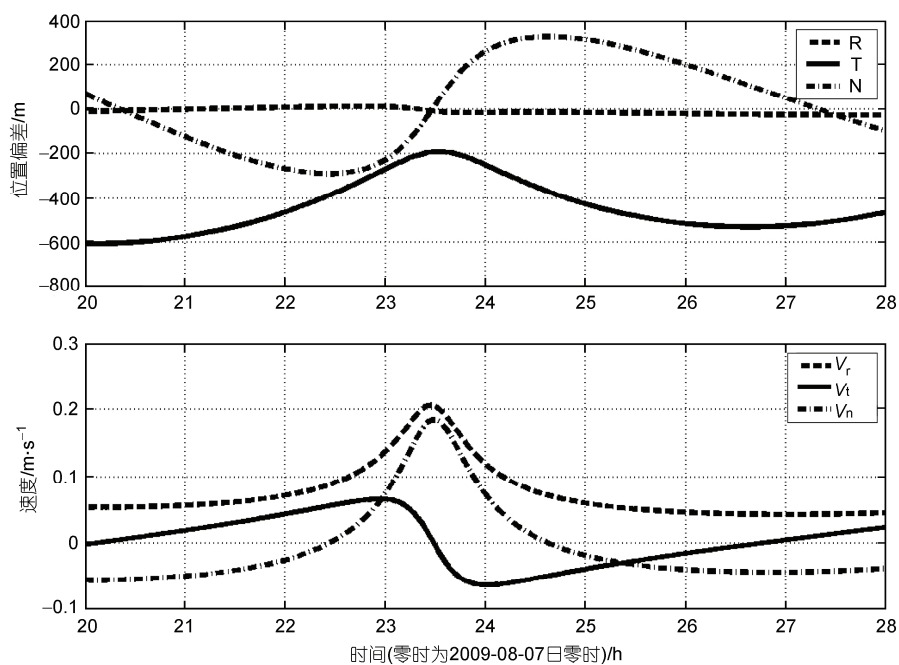


图4 轨道解算轨道与重建轨道比较

步分析 VLBI 与多普勒数据在轨道计算中的作用,我们还采用仿真数据进行了定轨的误差协方差分析,仅考虑测量类型、测量噪声对轨道计算的影响,分析不同 VLBI 测量精度条件下的单独和联合多普勒的定轨精度.按照“萤火一号”的轨道参数,模拟中国 VLBI 网 4 个台站的 VLBI 和多普勒测量资料,多普勒测量噪声为 0.5 mm/s, VLBI 时延、时延率噪声水平分别按 2 ns, 1 ps/s 和 0.2 ns, 0.1 ps/s 模拟,进行协方差分析.在 YH 工程任务中,考虑到星载频标的稳定度为 1×10^{-11} /s; 漂移为 3×10^{-10} /d, 处理单程多普勒数据时还需要同时估计每个测轨弧段的频率漂移参数,我们在仿真分析中也实现了该项功能,并在协方差分析中考虑了该项的影响.

考察探测器两圈弧段(约 6 d)下的 VLBI 和多普勒单独和联合定轨精度.仿真结果见表 3, 2 ns, 1 ps/s 精度的 VLBI 测量数据在仅有测量噪声的情况下能够达到 5 km 精度,实际考虑到其他各种误差的影响,定轨精度会更差,当 VLBI 测量精度提高到 0.2 ns, 0.1 ps/s 时,除了和多普勒联合定轨时定轨精度有一定提高,对轨道的约束能力也大大增强,在多普勒数据较少的情况下可有效提高定轨精度.

计算表明,在高精度的定轨计算中多普勒数据起主要作用,但是 VLBI 数据的加入有助于提高定轨可靠性、减弱先验约束、加快轨道快速收敛,在精度要求不高(如工程轨道确定)时,几十千米精度即可满足要求,VLBI 数据也可单独或者联合少量多普勒数据完成定轨任务.另外,当 YH-1 与俄罗斯 Phobos-Grunt 探测器构成同波束观测条件时,还可进行同波束 VLBI 观测,获得更高精度的 VLBI 测量资料^[12].

根据经验,仿真分析的精度指标都会显著高于实际测轨工作能达到的指标,其原因在于一些具体

因素(如动力学模型的细致误差、有效测量数据的分布以及未被模制的系统误差等)难以在仿真中实现.为了大致了解仿真精度指标与实测指标的差异,我们对 MEX 的轨道也作了协方差分析,结果表明在其测轨精度水平下可达到的精度为位置 90 m, 速度 1 cm/s.结合 MEX 协方差分析和实际定轨精度(位置 500 m、速度 0.1 m/s)比较,我们推论 YH-1 的实际定轨精度可能会比协方差分析结果差约 1~2 数量级,达到千米量级.

4 结论

上海台天文台组织 CVN 对 ESA 首颗火星探测器 MEX 进行了观测实验,首次获得了国内测站对火星探测器的测轨数据,测量数据包括 S 频段和 X 频段的 VLBI 时延、时延率和三程多普勒数据.利用上海天文台自主开发的火星探测器综合定轨软件,本文对 CVN 对 MEX 的测量数据进行了分析,并对 VLBI 和多普勒数据对火星探测器的定轨能力进行了初步探讨.

分析结果表明,国内测站的三程多普勒数据测量噪声可达 0.3 mm/s(5 s 积分),与 ESA 的测量精度相当. VLBI 时延和时延率精度约在 ns 和 ps/s 水平.分析表明,在目前测量精度水平下,多普勒数据在定轨计算中起主导作用,要提高 VLBI 数据在千米精度火星探测器定轨中的贡献,VLBI 测量精度需要提高一个量级以上.

数据分析表明,行星历表的选择对火星探测器数据计算影响很大,DE405 和 414 中火星质心位置的差别在千米量级,对测距的影响可达数百米,多普勒的差异也达到 0.1 mm/s 量级.

对三程多普勒数据进行了定轨分析,利用 MEX 约一个轨道圈次 8 h 的多普勒数据进行定轨,定轨结果与 ESA 重建轨道的位置差约几百米.定轨计算验证了软件的定轨能力,更为细致的定轨精度分析除了仿真计算外,还需要增加观测弧段长度,有利于开展实测数据定轨分析.

表 3 不同测量精度 VLBI 和多普勒定轨仿真分析

	多普勒单独 定轨	VLBI 单独 定轨	多普勒+VLBI 联合定轨
2 ns, 1 ps/s	90 m	5321 m	90 m
0.2 ns, 0.1 ps/s	90 m	540 m	76 m

致谢 感谢 ESA 提供了 MEX 的相关数据,使得观测和数据处理能够顺利实施.本文工作得到上海天文台 VLBI 测轨分系统的大力支持,文中的实测数据由 VLBI 中心提供.感谢钱志瀚、蒋栋荣、张秀忠、王广利、舒逢春、洪晓瑜、平劲松、李金岭等老师的帮助.

参考文献

- 1 黄秉利. 欧空局“火星登陆器”和“火星电离层和测地实验”计划. 天文学进展, 2007, 25: 114—131
- 2 吴季, 朱光武, 赵华, 等. 萤火一号火星探测计划的科学目标. 空间科学学报, 2009, 29: 449—455
- 3 李平, 张纪生. NASA 深空网(DSN)的现状与发展趋势. 飞行器测控学报, 2003, 22: 10—17
- 4 Born G H, Christensen E J, Ferrari A J, et al. The determination of the satellite orbit of Mariner 9. Celest Mech, 1974, 9: 395—414
- 5 Lemoine F G R. Mars: The dynamics of orbiting satellites and gravity model development. Dissertation for the Doctoral Degree. Boulder: University of Colorado at Boulder, 1992
- 6 Smith D E, Sjogren W L, Tyler G L, et al. The gravity field of Mars: Results from Mars global surveyor. Science, 1999, 286: 94—97
- 7 Yuan D N, Sjogren W L, Konopliv A S, et al. Gravity field of Mars: A 75th degree and order model. J Geophys Res, 2001, 106: 23377—23401
- 8 Konopliv A S, Yoder C F, Standish E M, et al. A global solution for the Mars static and seasonal gravity, Mars orientation, Phobos and Deimos masses, and Mars ephemeris. Icarus, 2006, 182: 23—50
- 9 鄯建国, 平劲松. 火星重力场研究现状及发展趋势. 物理, 2009, 38: 707—711
- 10 叶叔华, 黄城. 天文地球动力学. 济南: 山东科技出版社, 1981
- 11 Antreasian P G, Baird D T, Border J S, et al. 2001 Mars Odyssey orbit determination during interplanetary cruise. J Spacecraft Rockets, 2005, 42: 394—405
- 12 刘庆会, 史弦, 菊池冬彦, 等. 上海和乌鲁木齐射电望远镜的超高精度同波束 VLBI 观测. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2009, 39: 1410—1418
- 13 Fletcher K. Mars Express: The scientific investigations, ESA SP-1291, ESA Communication production office, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2009
- 14 彭冬菊, 吴斌. Jason-1 卫星厘米级星载 GPS 精密定轨. 科学通报, 2008, 53: 2569—2575
- 15 黄勇, 胡小工, 黄城, 等. 利用 CAPS 测距数据确定 GEO 卫星变轨期间的轨道. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38: 1750—1758
- 16 郭睿, 胡小工, 唐波, 等. 多种测量技术条件下的 GEO 卫星定轨研究. 科学通报, 2010, 55: 428—434
- 17 黄勇, 胡小工, 曹建峰, 等. 上海天文台火星卫星定轨软件系统. 飞行器测控学报, 2009, 28: 83—89
- 18 杨艳, 郑为民. VLBI 相位校正信号提取的软件实现方法. 中国科学院上海天文台年刊, 2006, 27: 107—117
- 19 Zheng W M, Chen Z. Parallel software correlator based on multi-core PC servers and computer cluster. Proceedings of IEEE ICISE2009, 2009
- 20 郑为民, 舒逢春, 张冬. 应用于深空跟踪测量的 VLBI 软件相关处理技术. 宇航学报, 2008, 29: 18—23
- 21 李济生. 人造卫星精密轨道确定. 北京: 解放军出版社, 1995
- 22 中国西安卫星测控中心, 译. 深空导航数据测量模型和计算. 北京: 国防工业出版社, 2005
- 23 夏一飞, 黄天衣. 球面天文学. 南京: 南京大学出版社, 1995