

开环多普勒技术用于火星快车的观测验证^{*}

尚 堃[†] 简念川 张素君 平劲松

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘要 利用中国甚长基线干涉(very long baseline interferometry, 缩写为 VLBI)网天线资源以及“嫦娥一号”(Chang'e-1, 缩写为 CE-1)卫星观测试验, 首次实现了中国深空任务的开环多普勒测量. 这一新的测量技术应用于欧洲航天局(European Space Agency, 缩写为 ESA)的“火星快车”(Mars Express, 缩写为 MEX)探测器的观测实验中. 实验结果显示, 在 1s 积分情况下, 开环多普勒(三程)测量精度随机误差达到 1mm/s, 这一精度与通常的闭环多普勒(双程)水平相当. 开环多普勒(三程)数据已经开始尝试用于卫星的定轨, 今后有关开环多普勒数据的科学应用也在准备中.

关键词 天体测量学, 开环多普勒测量, 观测实验, “火星快车”, “嫦娥一号”

Open loop Doppler technology for the Mars Express tracking experiment

SHANG Kun[†] JIAN Nian-Chuan ZHANG Su-Jun PING Jin-Song

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

Abstract Using the radio telescopes in the Chinese very long baseline interferometry network (CVN) and sampling board, we have developed algorithms that extract open loop Doppler information from the radio tracking data of Chang'e-1 and Mars Express. Our latest results indicate that the Doppler residuals are about 1mm/s in 1s integration time, relative to an 8.4GHz carrier. Open loop Doppler data have been used in the orbit determination of Mars Express.

Keywords astrometry, open loop Doppler measurement, observation experiment, Mars Express, Chang'e-1

1 引言

对空间探测器的观测和跟踪主要依赖于无线电波段. 深空无线电跟踪基本上是依赖于多普勒和测距系统. 2000 年以后, 在不断追求高精度和低成本的基础上, 更加强调了稳定性和实时性, 快速修正、随时响应的跟踪模式对光学和无线电手段都提出了需求^[1]. 其中无线电通信系统可以实现两类典型的科学目的: 一是导航, 通过测距和测速(多普勒测量)等来决定探测器的位置和速度; 二是将无线电科学应用在导航中得到的无线电信号特性——振幅、相位、极化等, 来反演处理许多科学课题, 包括行星质量估计和质量分布, 行星电离层、大气层和行星环的测量^[2], 行星形状和表面的研究, 太阳风的观测以及检验广义相对论^[3].

我国的统一 S 波段(Unified S-Band, 缩写为 USB)测量系统使用了闭环测量系统, 这类测量系统用于首次月球深空探测——“嫦娥一号”探月工程. 我国目前正在大力推动深空探测, 提出并实施着中俄合作火星探测计划. 在火星探测计划中, 探测器使用了星载接收机与发射机的独立通信体制, 没有采用转发设备. 对火星探测器的测量和控制只能采用开环模式. 卫星无线电发射机和地面接收机的参考信标互相独立, 对测量技术和后处理技术都提出了较高的要求.

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10973031)资助项目;中国科学院重要方向项目(批准号:KJ CX2-YW-T13-2)

2009-08-10 收到初稿, 2009-10-12 收到修改稿

[†] 通讯联系人. Email: shangkun@shao.ac.cn

为了进一步推进深空探测的地面测量技术(特别是开环测量技术)的研究开发和应用,我们在上海佘山的甚长基线干涉(very long baseline interferometry, 缩写为 VLBI)站、乌鲁木齐南山 VLBI 站和云南昆明 VLBI 站安装了 K5 IP-VLBI 数据采集记录设备^[4]. 它可远程控制 K5 设备对天线终端的基带转换器输出的 4 路基带信号直接进行 A/D 采样,把“嫦娥一号”观测得到的 VLBI 原始电压信号记录到硬盘中,并通过 TCP-IP 协议传回到用户端,然后进行事后数据处理,最后提取出多普勒信息.

在这套系统实验成功以后,在 2008 年底将其应用于火星快车卫星的跟踪测量实验中.“火星快车”(Mars Express, 缩写为 MEX)是欧洲航天局(European Space Agency, 缩写为 ESA)的一颗正在在轨运行的火星探测器. 2003 年 6 月 2 日发射,同年 12 月 25 日进入环火星轨道. 目前,“火星快车”大约停留在近火点 300km、远火点 10000km、倾角 86°的大椭圆轨道上. 本次中国 VLBI 网对 MEX 的观测时间为 2008 年 11 月 6 日到 7 日. 本文介绍了深空飞行器开环多普勒系统的原理和算法,以及利用该系统对“嫦娥一号”和“火星快车”进行的实验观测.

2 深空飞行器开环多普勒系统的测量原理

信号发射的位置和接收的位置决定了跟踪模式的选择. 常用的多普勒和测距跟踪模式共有三种:单程、双程和三程跟踪模式,如图 1 所示^[1].

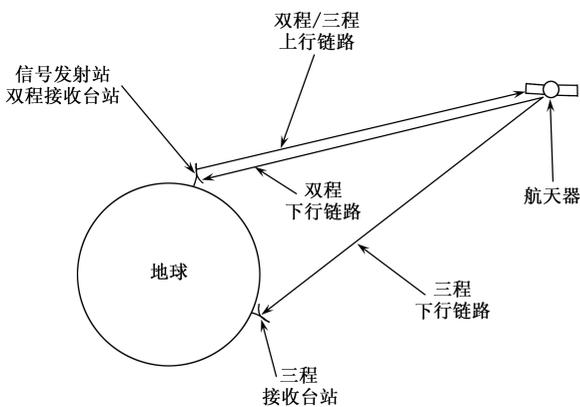


图 1 双程或三程数据发射、接收模式示意图^[5]

(1) 单程跟踪模式:由航天器携带的晶体振荡器产生下行信号,由地面台站接收并跟踪信号.这种模式没有上行链路,并且是一种开环跟踪模式.考虑到真空中电磁波的速度始终是光速,如果

忽略引力场的变化,只考虑狭义相对论效应,在一阶近似情况下,单程多普勒的表达式可以近似表示为^[5]:

$$f_R \approx \left(1 - \frac{v}{c}\right) f_T, \quad (1)$$

其中 f_T 表示电磁波的发射频率, f_R 表示接收频率. v 表示发射器和接收器的相对速度.定义发射器和接收器相对远离时速度为正,此时接收到的频率与发射的频率相比,频率变低了(即红移).在这种近似下,电磁波的多普勒计算公式和介质波的多普勒计算公式是一致的.如果不考虑这种近似,那么严格的电磁波多普勒计算公式如下^[3]:

$$f_R = \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \theta}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} f_T, \quad (2)$$

其中 θ 为电磁波波矢和台站与卫星相对速度的夹角.

(2) 双程跟踪模式:由地面站向航天器发射上行信号,航天器跟踪上行信号并产生一个相干的下行信号,再由同一个地面站接收这个信号,并与上行信号相同的参考频率相比较.这是一种闭环的跟踪模式.

(3) 三程跟踪模式:同样由地面站向航天器发射上行信号,而航天器同时被两个地面站跟踪,同一个接收站对应双程模式,另一个接收站对应三程模式,它将接收的信号和本地产生的频率标准相比较.这同样也是一种开环的跟踪模式.

在这三种基本的跟踪模式中,双程测量是一种闭环跟踪模式,依靠一个台站同时完成信号发射和接收,这样的通讯链路是闭合的.而单程和三程为开环跟踪模式,其通讯链路两端开放.开环模式与闭环模式在深空探测器测控控制方面的最根本区别在于,开环测量模式要求信号发射源(台站或卫星)和接收源(另一个台站)采用相互独立的频率标准源,在获取多普勒时,增加了测量中的不稳定性 and 频率源带来的误差.开环测量方法对测量技术和数据处理方法都提出了更高的要求.早期的深空探测导航系统多以闭环测量为主,如美国的阿波罗号、海盗号、旅行者号等,到后来发展为完善的 USB 测量系统.上世纪 80 年代后期,星上晶体振荡器稳定度有较大提高,使得单程开环测量模式变为可能.开环测量包括单程/三程多普勒、差分单程/三程多普勒和差分单程/三程测距等测量模式.相对于传统闭环测量,开环测量模式优势主要在于以下几点:对于单程开环测量,其优势主要在于不需要上行链路,只需要卫星

发射下行信号,这样可以节省资源消耗,更容易在遥远距离的深空测量中实现.而对于三程开环测量,虽然与双程相比仍然需要上行信号,但在某些深空任务中,由于飞行器距离非常遥远,当信号从卫星转发回地球时发射站已经不在视线范围内了,这时无法做到双程闭环跟踪,只能由另外一个测站来接收信号,即必须采用开环三程的跟踪模式;同时这种类似VLBI的开环三程测量方式可使卫星横向速度的分辨率得到明显的改进;另外如果上行台站和下行台站沿东西方向分布,还可以有效地延长可视时间.近年来美国DSN深空网对伽利略号、火星勘测者号等深空探测器都应用了开环测量模式,开环测量在美国深空网的应用中得到了长足的发展,特别是三程测速模式和VLBI测量模式,在其主导的深空测控任务中发挥了巨大的作用.

另外,地球到航天器和航天器到地球之间的通信是在国际上统一划分的频段上进行的.表1是国际电信联盟(International Telecommunication Union,缩写为ITU)划分的用于深空和近地研究的频率范围^[6].当测量双程或三程多普勒的时候,航天器必须发射一个同上行信号相干的下行信号,即对上行信号乘上一个转发比.

表1 深空通信的上行和下行频率

| 频段 | 深空频段 (距离地球大于20000km) | | 深空频段 (距离地球小于20000km) | |
|----|-------------------------|---------------|-------------------------|--------------|
| | 上行频率 /MHz | 下行频率 /MHz | 上行频率 /MHz | 下行频率 /MHz |
| S | 2110—2120 | 2290—2300 | 2025—2110 | 2200—2290 |
| X | 7145—7190 | 8400—8450 | 7190—7235 | 8450—8500 |
| Ka | 34,200—34,700 | 31,800—32,300 | | |

3 设备与算法

利用中国VLBI网的射电天线资源(见图2),我们分别在上海佘山站、乌鲁木齐南山站和昆明站安装了从日本国立信息通信技术研究所(NICT)引进的K5 IP-VLBI数据采集记录设备.

目前K5 IP-VLBI数据采集设备(以下简称K5系统)共有两个版本^[4],对应两种不同的板卡:K5/VSSP和K5/VSSP32(见图3).这是由日本NICT开发的一套VLBI系统的采集设备.实验结果表明,两种板卡都可以正常地进行数据采集,能够满足实验要求.目前采用的是新版本的K5/VSSP32板卡.



图2 中国VLBI网网站的地理分布

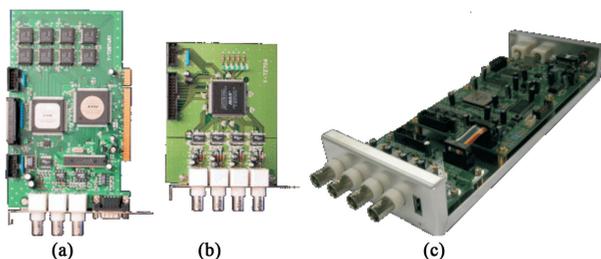


图3 (a)和(b)为K5/VSSP数据采集板卡;(c)为K5/VSSP32数据采集板卡

该板卡可以通过USB接口直接与个人计算机(PC)相连,共有4个采样通道,每个通道采样频率最大可设定为64MHz,这样最大可支持16通道1024Mbps的数据率;并且在Linux系统下安装简单,数据文件可直接由硬盘存储,数据处理可以和记录同时进行,可远程控制数据采集和网络数据传输.

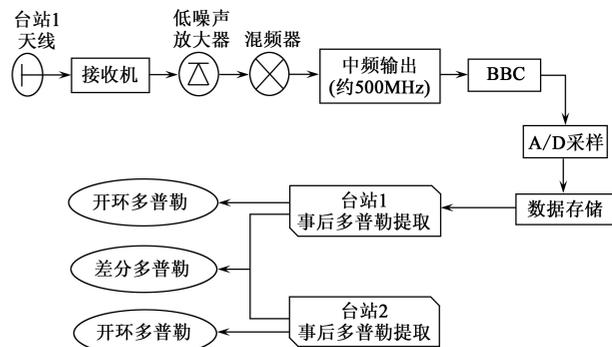


图4 开环多普勒数据采集流程示意图

数据采集过程如图4所示.航天器发射的信号首先经天线终端接收得到射频(RF)信号,然后降频到中频(IF)信号,最后输入基带转换器(BBC)得到基带信号.接着就可远程控制K5 IP-VLBI设备,对1至4路BBC输出的基带信号进行A/D采样,

把数据记录到硬盘中。这样，就可针对记录的数据进行事后处理，提取信号中的多普勒信息。

与通常射电源的天文观测不同，射电望远镜观测到的卫星信号通常是有清晰结构的人造信号。利用 K5 设备记录到的“嫦娥一号”下行基带信号结构如图 5 所示，其中(a)图为直接记录的原始数据，(b)图是原始 1s 数据的快速傅里叶变换(FFT)频谱。这里采样频率设为 4MHz，记录带宽为 2MHz。对于多普勒提取算法而言，提取的只是主载波的精确频点，对于主载波周围的其他载波信号都是当作噪声，用时间域的窗函数滤波方法将其滤掉，得到“干净的”单点频的正弦信号，从而用多普勒计数的方法得到精确的多普勒频点的变化^[7,8]。

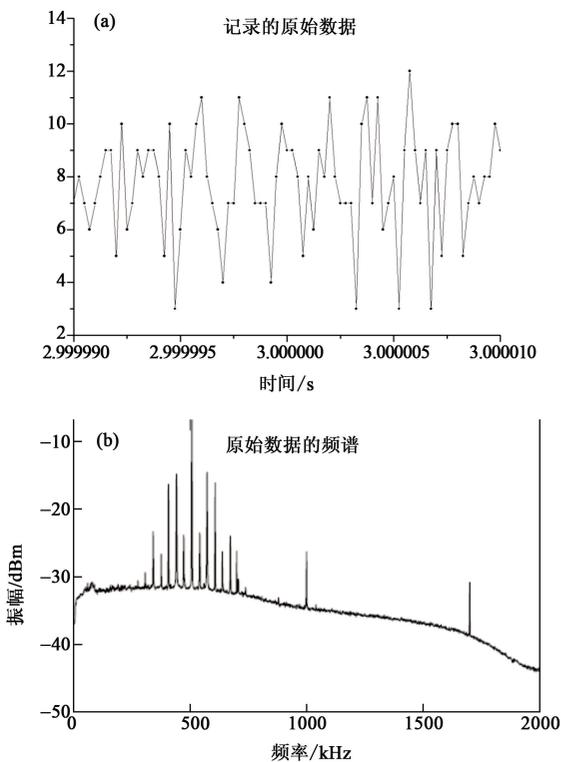


图 5 K5 记录的“嫦娥一号”三程多普勒信号结构 (a)直接记录的原始数据(纵坐标为量化值,无单位);(b)原始 1s 数据的快速傅里叶变换(FFT)频谱

4 “嫦娥一号”开环多普勒测量结果

针对“嫦娥一号”卫星的开环三程多普勒的观测从 2008 年 5 月展开,整个系统在“嫦娥一号”卫星任务期间对其进行了多次观测。这里以 2008 年 12 月 18 日的“嫦娥一号”卫星观测为例,说明开环三程多普勒的数据情况。该天“嫦娥一号”卫星高度近月点约为 17km,远月点约为 100km。观测接收台站为上

海余山站,上行站为喀什站和青岛站。开环三程多普勒的有效观测大约持续 9 个小时,中间更换过上行站。2008 年 12 月 18 日的余山站三程多普勒观测是目前为止持续时间最长的一次开环多普勒实验。任务期间 USB 测控网同时提供闭环双程多普勒数据。

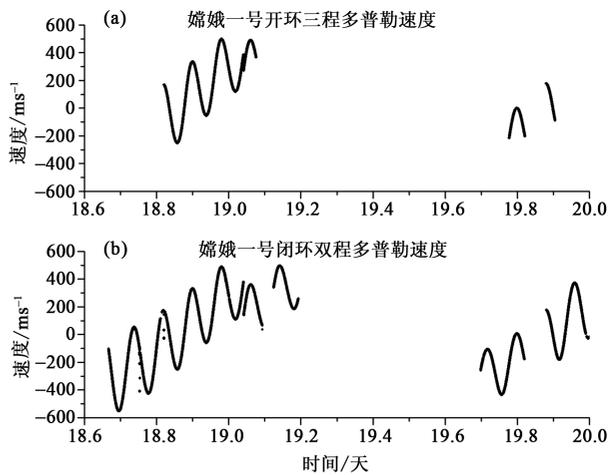


图 6 “嫦娥一号”卫星多普勒速度观测结果 (a) 开环三程;(b) 闭环双程

图 6(a)给出了大约从协调世界时(UTC) 18 日 18 时到 19 日 24 时,上海余山站观测到的开环三程多普勒速度观测结果,单位为 m/s,这里已剔除一些明显的粗数据。图中大约 19.05 日处出现的数据错位现象是由于上行站更换的原因。图 6(b)给出了相同时间范围内的 USB 双程多普勒观测结果作为对比。三程多普勒观测的有效数据大约有 9 个小时,双程多普勒的有效数据大约有 13 个小时。

对上述数据直接做分段多项式拟合,用拟合后残差的均方根(RMS)值表示数据的记录精度。结果表面大部分数据的残差都比较小,在 $\pm 1\text{cm/s}$ 以内。统计表明,得到的开环三程多普勒速度残差的 RMS (1σ) 约为 0.263cm/s ,闭环双程多普勒速度残差的 RMS (1σ) 约为 0.365cm/s ,三程多普勒速度的精度略高于双程多普勒。

5 “火星快车”飞行器观测结果

2008 年 11 月 6 日到 7 日,中国 VLBI 网首次对环火星飞行器进行了观测。观测目标是欧洲航天局的“火星快车”飞行器。此次三程多普勒的上行发射台站是欧洲航天局设在澳大利亚的新诺舍(New Norcia)站。国内余山、南山和昆明站作为接收站参加了三程多普勒的观测。与“嫦娥一号”卫星观测只有 S 波段不同,对“火星快车”的观测在 S 和 X 波段

两个频段上都有记录, K5 系统也相应地由 1 通道记录模式改为 4 通道记录模式。

但由于火星距离地球距离较远, 信号到达接受天线已经非常微弱, 针对“嫦娥一号”卫星强信号开发的多普勒提取算法在信号较弱的 S 波段无法正常运行, 只能针对信号较强的 X 波段处理。另外, 云南站的数据由于增益调整问题导致信号较弱, 也无法处理。到目前为止, 处理的数据只有佘山站的 4 个弧段和南山站的 5 个弧段, 如图 7 所示, 图中显示了两站的三程多普勒速度的结果。

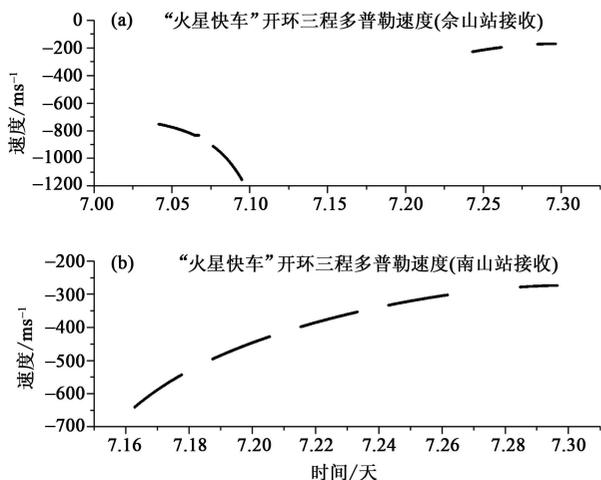


图 7 “火星快车”三程多普勒速度观测结果(a)佘山站;(b)南山站

接着将上述结果带入定轨。由于尚未修正测量的系统差, 只能用这种方法估计测量的随机差, 即把系统差吸收到先验的轨道初值中, 通过迭代调整轨道初值, 使得调整后的理论值和观测值的残差最小。这样定轨后的残差值如图 8 所示。由于“火星快车”信号稳定度较好, 定轨残差值基本呈现正态分布, 因此可以直接统计其均方根值反映数据精度。在剔除部分野值点后, 1s 积分情况下, 定轨后残差 RMS 值达到 1mm/s 的精度。可见“火星快车”信号的稳定度要好于“嫦娥一号”。

6 讨论

提取开环多普勒的最关键的问题是提高观测精度。因此, 进一步研究针对火星距离的更低信噪比、更低幅度的微弱信号的探测器, 改进软件算法和效率, 改进接收机的性能以及地面信号发射器的稳定度, 提高多普勒计算的精度等, 是下一步要继续开展的工作。

本文利用中国 VLBI 网的卫星跟踪数据, 开发了针对深空探测器开环多普勒提取的算法。目前的开环三程多普勒的数据精度: 对于“嫦娥一号”卫星的三程多普勒

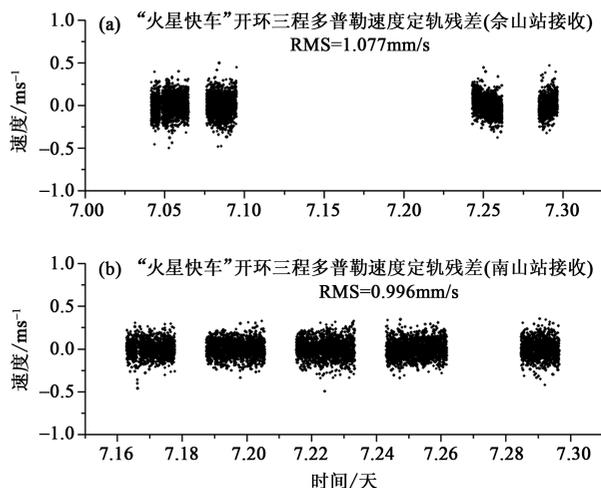


图 8 “火星快车”三程多普勒速度定轨残差(a)佘山站;(b)南山站。RMS 值为 3mm/s;对于“火星快车”三程多普勒 RMS 值为 1mm/s, 这是 1s 积分的结果。如果推算到 300s 积分, RMS 值可以达到 0.0577mm/s。2002 年, Cassini 飞行器的单程多普勒 300s 积分的 RMS 值为 0.0022mm/s, 要远高于我们目前的精度。这其中既有 Cassini 飞行器星上晶体振荡器的稳定度的问题, 也和 Cassini 当时巡航段所处的引力场环境有关。如果多普勒的测量能够达到这个精度, 就可以在太阳系的环境中验证引力理论, 比如检验后牛顿(PPN)参数等。这也是深空探测中高精度多普勒数据的用途之一^[3]。

开环三程多普勒数据提取后的定轨只是数据应用的第一步。多普勒数据的相位信息可以进行行星大气反演的工作, 借助于双频的多普勒观测, 可以进行行星电离层、对流层、行星环以及磁场等的探测。

参考文献

- [1] Catherine L T, James S B. Radiometric Tracking Techniques for Deep-Space Navigation, JPL: Deep Space Communication and Navigation Series, 2002. 9-16
- [2] Asmar S W, Renzetti N A. The Deep Space Network as an instrument for radio science research. Pasadena Calif.: JPL Pub., 1993. 80-93
- [3] Armstrong J W. Living Rev. Relativity, 2006, (9):1
- [4] <http://www2.nict.go.jp/w/w114/stsi/K5/VSSP/>
- [5] Yuen J H. Deep Space Telecommunications Systems Engineering. New York: Plenum Press, 1983. 123-168
- [6] Kinman P W. DSMS Telecommunications Link Design Handbook. Pasadena, California, USA: Jet Propulsion Laboratory, 2002. 7-10
- [7] Ping J S, Frank W, Yusuke K *et al.* Journal of Planetary Geodesy, 2001, 36(1):15
- [8] Ping J S, Yusuke K, Frank W *et al.* Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2000, 36(1):769