

基于中国深空站的木星探测器开环测量试验

陈略^{1,2,3}, 平劲松², 李文潇^{2,3}, 韩松涛^{1,2}, 刘庆⁴, 陈永强⁴, 张建辉⁴, 简念川⁵

(1. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094; 2. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 3. 中国科学院 新疆天文台, 乌鲁木齐 830011;
4. 西安卫星测控中心, 西安 710043; 5. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 中国深空网的建立用以支持我国正在实施的探月工程及后续火星、小行星、木星等探测任务。为验证中国深空网的跟踪测量能力, 并获取行星无线电测量数据, 基于中国深空站开展了对木星在轨探测器“朱诺号”(Juno)的跟踪测量试验与数据处理分析。在分析各种观测约束条件的基础上, 首次实现了中国深空站在地—木距离上的深空探测器开环跟踪测量, 通过VLBI数据采集记录终端原始探测器信号, 经信号处理提取“朱诺号”探测器的主载波频率。采用傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)、线性调频Z变化及信号本地重构相关的联合信号处理方法, “朱诺号”探测器主载波频率提取噪声水平在10 μ Hz水平, 有效验证了深空开环测量技术, 为后续我国深空探测任务积累了有益经验。

关键词: 中国深空站; 木星; 朱诺号; 开环测量; 主载波频率

中图分类号: P185.4

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2018)04-0382-05

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2018.04.009

引用格式: 陈略, 平劲松, 李文潇, 等. 基于中国深空站的木星探测器开环测量试验[J]. 深空探测学报, 2018, 5(4): 382-386.

Reference format: CHEN L, PING J S, LI W X, et al. Juno radio open loop measurement experiment based on china's deep space stations[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(4): 382-386.

0 引言

“朱诺号”(Juno)木星探测器是美国国家航空航天局(NASA)“新疆计划”实施的第二个探测项目。“朱诺号”由美国洛克希德·马丁公司(Lockheed Martin Corp)建造, NASA下属喷气推进实验室(JPL)负责整个探测任务的运行, 是整个项目的管理者(Project Manager, PM), 美国西南研究所(SwRI)是整个探测项目的项目负责人(Principal Investigator, PI), 负责相关科学研究^[1]。“朱诺号”探测器通过“大力神5号”运载火箭于2011年8月5日从美国佛罗里达州卡纳维拉尔角发射, 并于2016年7月6日到达木星捕获轨道。“朱诺号”的科学目标是研究并理解木星的起源与进化, 具体包含以下几个方面。①木星系统起源(Origin): 测量O、N、C、S、Ar、Kr、Xe等元素含量。②木星内部结构(Interior): 探测木星引力场分布、测量磁场长期变化以用于测量内核表面流动模式。③木星大气层(Atmosphere): 测量大气层的成分(例如H、O比例)、温度、厚度、气候变化和其他一些特性。④木星磁层(Magnetosphere):

探索和研究木星极地的磁层, 尤其是木星极光, 得出新的关于巨行星巨大的磁场如何影响其大气层的结论^[1-3]。行星无线电科学载荷是“朱诺号”29类科学载荷中的重要一项, 其主要通过一个直径2.5 m的高增益天线与地面进行无线电测量与通信, 从无线电信号特征层面反演木星重力场和大气等。

中国深空网于2012年初步建成, 佳木斯深空站、喀什深空站投入运行, 重点支持了“嫦娥3号”、再入返回飞行试验任务等深空探测任务, 南美深空站、纳米比亚深空天线于2017年正式完成建设, 正在为我国后续的深空探测任务进行相关任务准备。为验证中国深空站的跟踪与测量数据能力, 北京航天飞行控制中心于2016年10月—2017年8月期间联合佳木斯、喀什深空站对木星探测器“朱诺号”进行了开环测量试验, 以便为后续我国更遥远深空探测任务的实施积累经验。

1 深空开环测量试验实施情况

1.1 深空开环测量原理

深空探测器搭载高稳定度原子钟为高精度开环测

收稿日期: 2017-10-20 修回日期: 2018-03-21

基金项目: 装备预研基金资助项目“类木行星低阶重力场探测研究”(61422100110); 载人航天领域预先研究项目“深空高精度微波测量技术”(060401)

量提供了最重要的条件之一。深空开环测量可分为单程开环测量与三程开环测量等。本文试验所指的开环测量为单程开环测量，即深空探测器搭载高稳原子钟后单向下行发送主载波信号，该信号经过星际介质、电离层与对流层传播后，地面深空站接收探测器下行信号，利用信号处理系统检测主载波的相位特征，用以高精度估计深空站相对于探测器的多普勒频率，获取探测器相对于深空站高精度相对速度变化关系。

1.2 下行信号频点

基于中国深空站对“朱诺号”探测器进行跟踪，首先要准确已知“朱诺号”的下行频点分布。从NTRS (NASA Technical Reports Serve) 上查阅到“朱诺号”探测器的无线电测量与通信手册，该文件中准确描述了“朱诺号”的下行频点及功率^[4]。“朱诺号”有X/Ka频段两个下行信号频段，考虑到中国深空站尚不完全具备Ka频段跟踪测量能力，试验采用X频段对“朱诺号”进行跟踪。“朱诺号”X频段主载波理论下行频点为8 404.135 802 MHz，NASA的35 m深空站标称上行频点为7 153.065 586 MHz，星上的转发比为880/749。在下行主载波附近调制两类信号：①25 kHz或者281.5 kHz的遥测信号；②19 MHz的DOR侧音^[5]。

1.3 信号到达地面测站功率

为确保深空站准确捕获“朱诺号”下行信号，需要准确已知下行信号到达地面天线接收机端的功率。“朱诺号”的X频段主载波的有效全向辐射功率 (Effective Isotropic Radiated Power, EIRP) 为87.4 dBm^[4]。深空站天线低噪放输入段功率 = 星上EIRP - 信号自由空间损耗 + 接收天线增益。

“朱诺号”探测器的下行信号自由空间损耗可由式(1)来描述

$$L_f = 32.4 + 20 \lg(d) + 20 \lg(f) \quad (1)$$

其中： L_f 为无线电波自由空间损耗，单位为dB； d 为自由空间的传播距离，单位为km； f 为无线电波的频率，单位为MHz。木星质心距离地球质心的距离为6.3~9.6亿km。因此，以6.3亿km计算的空间链路损耗为-286.88 dB，以9.6亿km计算的空间链路损耗为-290.53 dB。

抛物面测控天线增益的计算公式如下

$$G_r = 10 \lg \left[4.5 \times (D/\lambda_0)^2 \right] \quad (2)$$

其中： G_r 为天线增益，单位为dB； D 为天线的口径，单位为m； λ_0 为接收无线电波的波长，单位为m。

$$\lambda_0 = c/f_0 \quad (3)$$

其中： c 为光速，单位为m/s； f_0 为无线电波频率，单位为Hz。

利用公式(2)可得，佳木斯深空站天线(66 m)的天线增益估计值为71.87 dB，喀什深空站天线(35 m)的天线增益估计值为66.36 dB。

因此，中国深空站按照探测器最远距离地球测站9.6亿km计算，在X频段，到达天线低噪放输入端的信号功率为：佳木斯深空站-131.26 dBm，喀什深空站-136.77 dBm。由于中国深空站天线低噪放输入端接收灵敏度指标在-160 dBm，因此，佳木斯、喀什深空站均具备对“朱诺号”探测器信号有效接收能力。

1.4 跟踪时刻

中国深空站的跟踪时刻取决于“朱诺号”下行发信号的时刻。对“朱诺号”的跟踪，美国NASA采用全球分布的美国深空网 (Deep Space Network) 对其进行跟踪测量。考虑我国佳木斯、喀什深空站介于NASA的澳大利亚堪培拉深空站与西班牙马德里深空站之间，一方面参考该两站的跟踪计划，另一方面在DSN now网站 (<https://eyes.nasa.gov/dsn/dsn.html>) 上可实时查询美国深空网正在跟踪的目标情况，结合两方面情况来确定“朱诺号”发送下行信号的时刻。

1.5 天线跟踪引导星历

基于深空站观测“朱诺号”，对跟踪天线的引导也是关键。这里采用两种引导策略，第一种策略是考虑木星距离地面跟踪站很遥远，当“朱诺号”在近木点附近时，木星质心和探测器均会落到深空站天线的同一波束范围内，因此可用木星星历作为地面天线引导参考；第二种策略是基于“朱诺号”的轨道预报文件，转换为地面测站所需的引导文件。两种策略均通过开发相应的引导程序予以实现，本文试验基于第一种策略进行天线跟踪。

1.6 跟踪与信号采集记录

基于以上观测必备条件，深空站成功开展了多次对“朱诺号”的跟踪与测量。为精细化后处理分析“朱诺号”信号特点与高精度信号处理，通过深空站部署的VLBI中频基带转换与采集记录设备，对“朱诺号”的原始下行信号进行采集记录，采集过程考虑中心频率、采样带宽、采集通道等参数设置。VLBI中频基带转换与采集记录设备利用1个通道进行采样，采样中心频率为8 404.00 MHz，采样带宽为2 MHz，量化位数为2 bit。

2 试验结果分析

中国深空站对“朱诺号”探测器成功进行多次跟踪测量。由于开环测量有其自身特点与优势^[5], 本文采用开环测量方式对“朱诺号”进行测量与数据处理。“朱诺号”的下行原始信号经采集记录后传输至北京航天飞行控制中心进行后处理分析。

本文采用对快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT)、线性调频Z变换与信号本地重构相关的联合处理方法, 对“朱诺号”的下行主载波频率进行高精度提取, 进而获得多普勒频率测速信息。限于篇幅限制, 这里不详细介绍信号处理算法。本文以2017年05月19日喀什深空站对“朱诺号”的跟踪为例, 介绍下行主载波频率的提取结果。图1显示的是基于傅里叶变换方法2017年05月19日11时37分21秒—2017年05月19日12时47分6秒 (UTC时间) 的主载波频率, 积分时间为1 s。图1 (a) 为基于FFT的主载波提取频率, 图1 (b) 为“朱诺号”多普勒频率, 这里假定“朱诺号”的主载波下行频率即为理论下行频率, 利用提取的主载波频率减去主载波理论下行频率得到多普勒频率。可以看出, 跟踪弧段内“朱诺号”的多普勒频率在-130~ -126 kHz范围内变化。

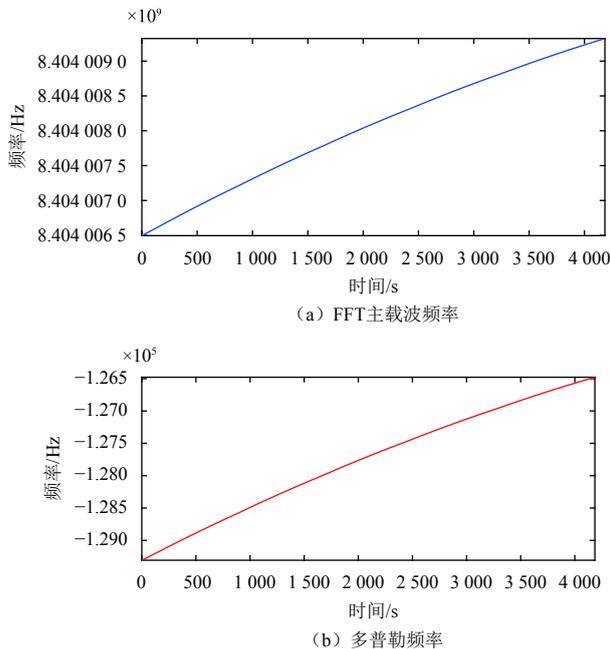


图1 喀什深空站跟踪“朱诺号”的FFT主载波频率与多普勒频率
Fig. 1 Carrier frequency and Doppler frequency of Juno in Kashi deep space station

为评估基于FFT估计主载波频率的噪声水平, 采用多项式拟合的方法, 检测残余主载波频率方法予以

估计。这里需要说明的是, 主载波频率或者多普勒频率的估计精度须通过精密轨道予以评估, 由于尚未获取到该天的精密轨道, 无法对估计频率的精度进行评估, 因此选择评估频率估计的噪声水平。图2显示的是采用10次多项式拟合后的残余主载波频率。从图2中可以明显看出, 残余频率有几个突变时刻点, 如图中的1、2、3、4、5所示, 经确认, 在这些时刻是由于上行频率采用了ramp (斜坡) 多普勒加载方式, 使得接收时刻的信号频率也发生了突变, 即美国深空站的上行频率并非保持不变, 而是采用一种ramp上行方式, 由地面测站向探测器发送频率随时间变化的上行主载波。因此, 估计主载波频率的噪声水平通过分段估计, 即在两个突变点时刻之间评估噪声水平, 结果表明基于FFT的主载波估计噪声水平约为200 m Hz水平。

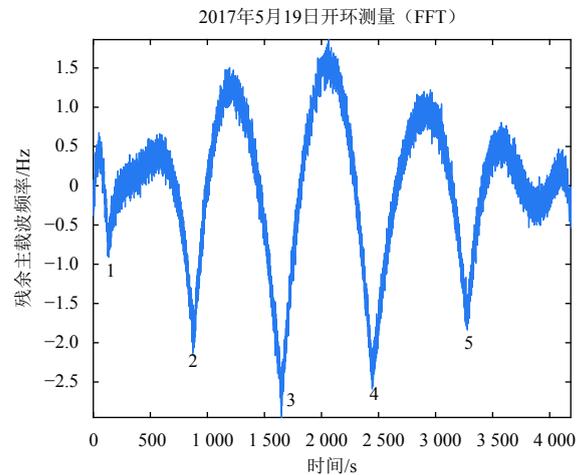


图2 喀什深空站跟踪“朱诺号”的FFT残余主载波频率
Fig. 2 FFT residual carrier frequency of Juno in Kashi deep space station

为进行比对, 采用线性调频Z变换 (Chirp Z Transform, CZT) 的方法^[6]对信号进行频谱细化, 获得更为精确的“朱诺号”主载波频率, 其残余主载波频率如图3所示。同样采用10次多项式, 6段评估主载波估计频率的噪声水平分别为51.858 mHz、55.826 mHz、58.459 mHz、58.584 mHz、57.672 mHz、55.729 mHz, 约为50 m Hz水平。最后, 通过联合FFT、CZT和信号本地重构 (re-CONSTRUCTION, CONS) 相关方法估计“朱诺号”下行主载波频率, 如图4所示, 同样采用10次多项式, 6段评估主载波估计频率的噪声水平分别为5.232 μ Hz、50.958 μ Hz、6.158 μ Hz、4.859 μ Hz、10.446 μ Hz、6.600 μ Hz, 6段平均值为14.04 μ Hz, 即约为10 μ Hz水平。可以看出, 通过联合信号处理的方法获得了一个具有超高精度噪声水平的主载波估计频率。

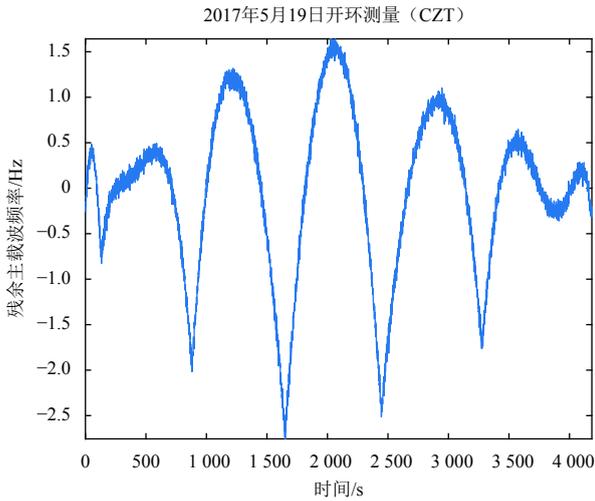


图3 喀什深空站跟踪“朱诺号”的CZT残余主载波频率

Fig. 3 CZT residual carrier frequency of Juno in Kashi deep space station

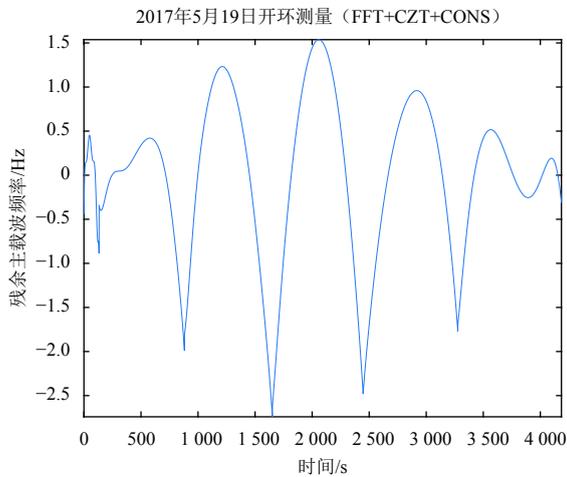


图4 喀什深空站跟踪“朱诺号”的FFT + CZT + CONS残余主载波频率

Fig. 4 FFT + CZT + CONS residual carrier frequency of Juno in Kashi deep space station

3 结论

本文在分析下行频点、信号到达地面测站功率、

跟踪时刻、天线跟踪引导星历和信号采集记录等观测必要条件基础上，成功进行了基于中国深空站的“朱诺号”探测器开环测量试验，“朱诺号”下行信号经后处理分析后，主载波多普勒测量噪声水平在 $10 \mu\text{Hz}$ 水平，这为后续我国更遥远深空探测任务准备与实施积累了有益经验与技术。

参 考 文 献

- [1] MATOUSEK S. The Juno New Frontiers mission[J]. Acta Astronautica, 2007, 61: 932-939.
- [2] SERRAA D, DIMAREB L, TOMMEIA G, et al. Gravimetry, rotation and angular momentum of Jupiter from the Juno Radio Science experiment[J]. Planetary and Space Science, 2016, 134(1): 100-111.
- [3] WILSON H F. Diffusivity of heavy elements in Jupiter and Saturn[J]. Icarus, 2015, 250: 400-404.
- [4] MUKAI R, HANSEN D, MITTSKUS A, et al. Juno telecommunications[R]. California: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2012.
- [5] 平劲松, 尚堃, 钱志瀚, 等. 萤火一号火星轨道器开环追踪技术[J]. 航天器工程, 2009, 18(5): 6-11.
PING J S, SHANG K, QIAN Z H, et al. Open loop tracking for Yinghuo-1 Martian orbiter[J]. Spacecraft Engineering, 2009, 18(5): 6-11.
- [6] 陈略, 唐歌实, 孟桥, 等. 一种卫星信号频率精确估计方法研究及应用[J]. 遥测遥控, 2010, 31(6): 26-30.
CHEN L, TANG G S, MENG Q, et al. Research and application of satellite signal frequency accurate estimation method[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2010, 31(6): 26-30.

作者简介:

陈略(1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 深空无线电测量技术、行星无线电科学与地球定向参数监测预报。

通信地址: 北京市海淀区5130信箱120号(100094)

电话: (010)66365901

E-mail: chenlue@xao.ac.cn

Juno Radio Open Loop Measurement Experiment based on China's Deep Space Stations

CHEN Lue^{1,2,3}, PING Jinsong², LI Wenxiao^{2,3}, HAN Songtao^{1,2}, LIU Qing⁴, CHEN Yongqiang⁴,
ZHANG Jianhui⁴, JIAN Nianchuan⁵

(1. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China; 2. National Astronomical Observatories, CAS, Beijing 100012, China;
3. Xinjiang Astronomical Observatory, CAS, Urumqi 830011, China; 4. Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China;
5. Shanghai Astronomical Observatory, CAS, Shanghai 200030, China)

Abstract: The construction of China's deep space network supports China's deep space missions, such as explorations of Lunar, Mars, Small planets, Jupiter, and etc. To validate China's deep space network performance and obtain the radio measurement raw data, dozens of radio open loop measurement experiments of Juno which is one of Jupiter's probe on orbit were accomplished. These open loop measurement experiments are the first time conducted by the China's deep space stations tracking a in-orbit probe in Earth-Jupiter distance. VLBI terminate sampling and recording facilities were utilized to record Juno's raw carrier signal, which was processed to extract Doppler frequency between Juno and the deep space station. In this paper, the combining method of Fast Fourier transform, Chirp Z transform and signal local reconstruction was utilized to obtain Juno's Doppler frequency. The results show that Juno's open loop Doppler frequency is at the level of 10 μHz , which effectively validated the method of deep space open loop measurement and provide valuable reference for China's future deep space missions.

Key words: China's deep space station; Jupiter; Juno; open loop measurement; carrier frequency

High lights:

- The open loop measurement experiment is the first time for China's deep space stations tracking on orbit probe in Earth-Jupiter distance.
- The condition of radio tracking measurement experiment for JUNO probe based on deep space stations is analyzed.
- High accuracy open loop measurement observations of JUNO probe are obtained.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 朱恬]