

“嫦娥4号”中继星开环测速方案设计与试验验证

陈略^{1,2,3}, 谢剑锋¹, 韩松涛¹, 曹建峰¹, 平劲松²

(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)

摘要: 针对深空探测器轨道测量任务高精度测速需求, 提出了一种开环测速方案。首先, 采用窄带模式对深空探测器下行信号进行采集记录, 利用傅里叶变换+线性调频Z变换+本地重构相关联合信号处理方法, 对探测器主载波信号进行处理, 自适应提取探测器主载波频率; 然后, 基于主载波频率获取反映探测器相对于测站速度运动关系的多普勒频率, 并评估多普勒频率的随机噪声水平; 最后, 将基于本文的多普勒频率与深空站测速基带多普勒频率、累积载波相位测速多普勒频率进行比对, 并将3种多普勒频率输入探测器联合定轨程序, 进一步评估本方案获取的多普勒测速绝对精度。基于“嫦娥4号”中继星在轨实测试验数据分析表明: 所获得的多普勒频率提取精度为10 mHz, 优于深空站基带测速多普勒频率与累积载波相位测速多普勒频率精度; 联合定轨表明: 多普勒测速绝对精度为0.2 mm/s, 有效验证了深空开环测速技术, 为后续深空探测器轨道联合测量系统研制奠定了技术基础。

关键词: 深空探测器; 测速; 多普勒; 精度; 嫦娥4号中继星

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2019)03-0236-05

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2019.03.006

引用格式: 陈略, 谢剑锋, 韩松涛, 等. “嫦娥4号”中继星开环测速方案设计与试验验证[J]. 深空探测学报, 2019, 6(3): 236-240.

Reference format: CHEN L, XIE J F, HAN S T, et al. Open loop velocity measurement scheme design and verification of Chang'E-4 relay satellite[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(3): 236-240.

引言

深空探测器轨道测量主要通过无线电测量方式予以实现, 主要包括对深空探测器的测距、测速与测角, 其中主要通过甚长基线干涉测量 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 方式实现对深空探测器的高精度测角。测距、测速对深空探测器视向方向的轨道约束敏感, VLBI对深空探测器运动轨迹切向方向轨道约束敏感。我国深空测控干涉测量系统是基于我国深空网构建的高精度干涉测量系统, 由佳木斯深空站、喀什深空站、南美深空站、纳米比亚站以及北京深空干涉测量任务中心组成, 主要实现对深空探测器的实时与事后高精度干涉测量, 完成对我国深空探测器的轨道测量任务^[1-5], 例如在“嫦娥4号”中继星任务中, 该系统在中继星飞行期间的地月转移段、月球到地月L2点转移段、L2点捕获

段、L2点使命轨道段对中继星进行实时与事后干涉测量。深空测控干涉测量系统一方面除了能给深空探测器定轨提供高精度的时延、时延率观测量支持, 另一方面由于深空测控干涉测量系统具备VSR (VLBI Science Receiver, VLBI科学接收机) 格式窄带采集记录能力, 可为高精度开环测速提供必要条件, 因此本文提出了一种深空高精度开环测速方案, 可为深空探测器精密定轨提供测速观测量支持。

国内外多名学者研究了开环跟踪测量技术^[6-10], 有力促进了深空探测器高精度轨道测量技术发展, 但缺乏针对我国深空探测器开环测速方案与实际试验验证。本文提出了一种针对我国深空探测器的高精度开环测速方案, 依托我国深空测控干涉测量系统, 在“嫦娥4号”-“鹊桥”中继星任务中开展了试验验证与精度比对分析工作, 为后续我国深空探测任务实施提供了一种新的高精度轨道测量手段。

收稿日期: 2019-01-07 修回日期: 2019-01-27

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资助项目“深空高精度微波测量技术”(060401)

1 基于深空测控干涉测量系统的测速方案简要设计

为实现基于深空测控干涉测量系统的开环与闭环测速，这里进行方案设计。方案设计中不包括对深空探测器的引导跟踪，该功能是按照深空干涉测量任务实施流程予以实现。因此，本测速方案中主要涉及窄带干涉测量数据采集记录、探测器主载波多普勒频率高精度提取、测量结果比对3个方面，下文分别进行简要论述。

1.1 窄带干涉测量数据采集记录方案

基于深空测控干涉测量系统的数据采集记录设备，可实现对探测器下行信号的窄带模式记录，满足开环测速需求。窄带数据采集记录方案依据深空探测器下行信号特点，分别在深空探测器的主载波、DOR侧音设置信号采集记录通道与中心频率，采集通道的中心频率依据探测器理论下行频率、多普勒预报频率联合确定。在“嫦娥4号”中继星测速试验任务中，为了兼顾深空干涉测量需求，采用8通道采集记录模式。这里需要说明，如果只进行开环测速，选择1个主载波通道采集记录探测器下行信号即可。采样带宽通常设置为50/100/200 kHz，量化位数为8 bit，这样既满足深空探测器相对深空站运动引起的多普勒动态变化范围需求，确保采集通道包含有效的下行信号特征，同时满足快速信号处理要求，达到测速观测量快速提取目的。

1.2 主载波多普勒频率高精度提取方案

基于采集记录的VSR格式窄带原始数据，开展针对信号强度最突出的主载波进行高精度相位、频率提取，实现对反映探测器速度变化关系的多普勒频率提取，进而生成开环与闭环测速观测量。本文采用了传统傅里叶变换+自适应线性调频Z变换+信号本地重构相关的信号处理方案，实现对探测器主载波频率高精度提取。首先设置合理积分周期，利用传统FFT（Fast Fourier Transformation，傅里叶变换）方式实现对主载波频率粗估计；其次在傅里叶变换获得的主载波频率初始值附近利用CZT（Chirp Z-Transform，线性调频Z变换）方法对信号处理的频谱进行细化，提取更高精度的主载波频率估计值；然后基于CZT获取的主载波频率估计值，构建主载波频率变化模型，进而生成反应探测器运动的时延率、时延模型，结合探测器的天空频率、本地频率，重构探测器主载波信号模型；最后利用重构信号模型与实际采集记录主载波通道信号进行互相关运算，提取频率最大值处的相关相位，依据相关相位随时间变化关系，估计残余频

率值，结合CZT获得的模型频率值，残余频率值+模型频率值即得到对探测器高精度主载波频率估值，进而获得多普勒频率估值。

在此方案中，最重要步骤是构建信号本地重构模型，阐述如下。

利用CZT获取的主载波频率值，并依据信号时标，拟合得到主载波频率相对于时间的表达式，拟合阶数设置为1阶，即获得主载波频率模型。其matlab语言的数学表达式如式（1）所示

$$p = \text{polyfit}(t, -(f_{\text{czt}} - f_{\text{sky}}), 1) \quad (1)$$

其中： p 为获得的1阶拟合系数（即时延率模型系数）； t 为时标； f_{czt} 为CZT获得主载波频率时间序列； f_{sky} 为探测器的天空频率；1为拟合阶数。依据时延率与时延的积分关系，由时延率模型系数 p 获得时延模型系数 p_τ ，其matlab的数学表达式如下

$$p_\tau = \left[\frac{p(1)}{2}, p(2), 0 \right] \quad (2)$$

进而得到时延模型 $t_\tau = \text{polyval}(p_\tau, t)$ 。

依据时延模型系数，在本地重构探测器下行信号模型，其表示如下

$$y_{\text{con}} = \cos(2 \times \pi i \times f_{\text{sky}} \times (t - t_\tau) - 2 \times \pi i \times f_{\text{loc}} \times t) \quad (3)$$

其中： y_{con} 为本地重构信号模型； f_{loc} 为深空站本振频率。

将重构信号与预处理信号进行共轭相关运算，按照与以上相同的积分时间设置进行FFT的频谱分析，找出频谱上幅值最大处频率所对应的相位，即为残余相位，得到残余相位的时间序列，利用残余相位序列即可拟合出残余频率 y_{res} ， y_{res} 加上 f_{czt} 即获得探测器下行主载波频率估计值。

1.3 测量结果比对方案

基于深空测控干涉测量系统获得探测器主载波多普勒频率，代号：IMC（Interferometry Measurement Center），与深空站基带设备获取的多普勒频率测量值，代号：DTE（Data Terminal Equipment）及累积载波相位测速的多普勒频率测量值（代号：Phase）在保证时标一致情况下，直接进行比对，评估相对偏差、随机精度。并将3种多普勒频率输入探测器联合定轨程序，进一步评估多普勒测速绝对精度。

2 试验验证

深空测控干涉测量系统在中继星进入L2点使命轨道之前，北京深空干涉测量任务中心组织佳木斯深空站、喀什深空站，每日均对探测器进行干涉测量，基于以上方案均获取了每日的开环与闭环测速结果。

6月20日，北京深空干涉测量任务中心同时组织了基于佳木斯深空站、喀什深空站的干涉测量与三向测量试验任务，佳木斯深空站为上行主站，喀什深空站为从站，观测弧段为北京时间16:30—20:30，为全面验证本方案提供了条件。佳木斯、喀什深空站采用8通道、50 kHz带宽、8 bit量化模式进行数据采集记录。选用中继星主载波通道，进行傅里叶频谱分析如图1所示。以喀什深空站数据处理分析为例，开环测速设

置积分时间为1 s，利用傅里叶变换+自适应线性调频Z变换+信号本地重构相关的信号处理方案，获得中继星主载波的多普勒频率，同时回放深空站基带获取的DTE与Phase测速多普勒频率值，其结果如图2所示。图3为多普勒频率拟合残差，可以看出3类测速结果均对探测器的速度变化关系敏感。图4为IMC获取的多普勒频率与基带获取的DTE、Phase多普勒频率的比对情况。

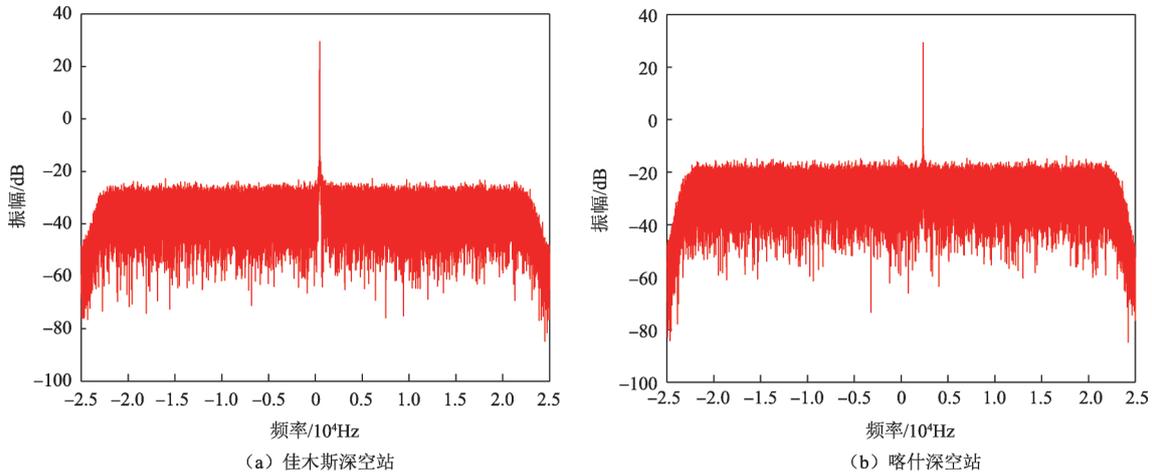


图1 佳木斯、喀什深空站的中继星主载波频谱图
Fig. 1 Relay satellite carrier FFT spectrum of JMS and KSH deep station

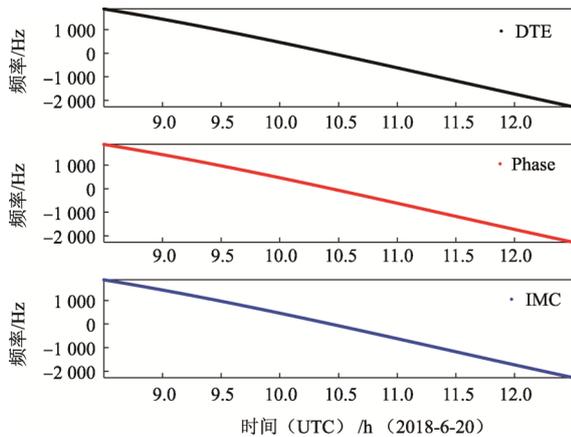


图2 喀什深空站基带(DTE)测速多普勒、累计载波相位(Phase)测速多普勒、深空干涉测量任务中心(IMC)提取的多普勒频率结果
Fig. 2 Doppler frequency results of baseband velocity in KSH station, accumulation phase

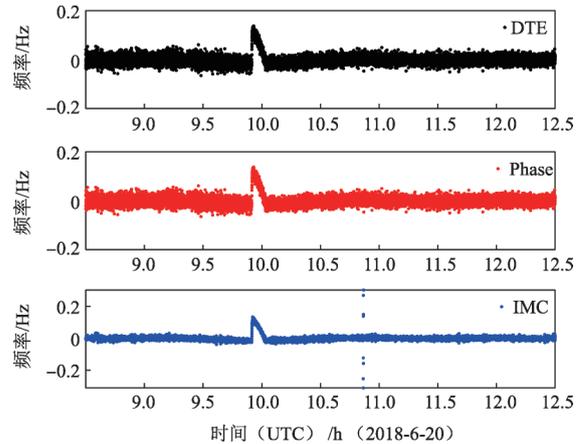


图3 喀什深空站残余多普勒频率
Fig. 3 Residual Doppler frequencies of KSH station

为定量评估DTE、Phase与IMC多普勒频率精度，这里计算并统计出相关结果如表1所示。

图5为中继星联合定轨后的所有佳木斯、喀什、南美深空站的测速残差，里面包含IMC的测速残差。为进一步比对精度，单独画出IMC获取的佳木斯深空站测速残差如图6所示。

从表1及图5~6结果可以看出，佳木斯、喀什深

空站的基带多普勒(DTE)测速、累计载波相位(Phase)测速精度均在0.4 mm/s (1σ)以内，深空干涉测量任务中心(IMC)从干涉测量数据提取的测速精度在0.2 mm/s (1σ)。DTE/Phase/IMC的多普勒测速结果一致性较好，IMC在偏差与随机差方面优于深空站基带的测速结果，由此验证了采用本方案实现对中继星开环与闭环高精度测速的可行性与可靠性。

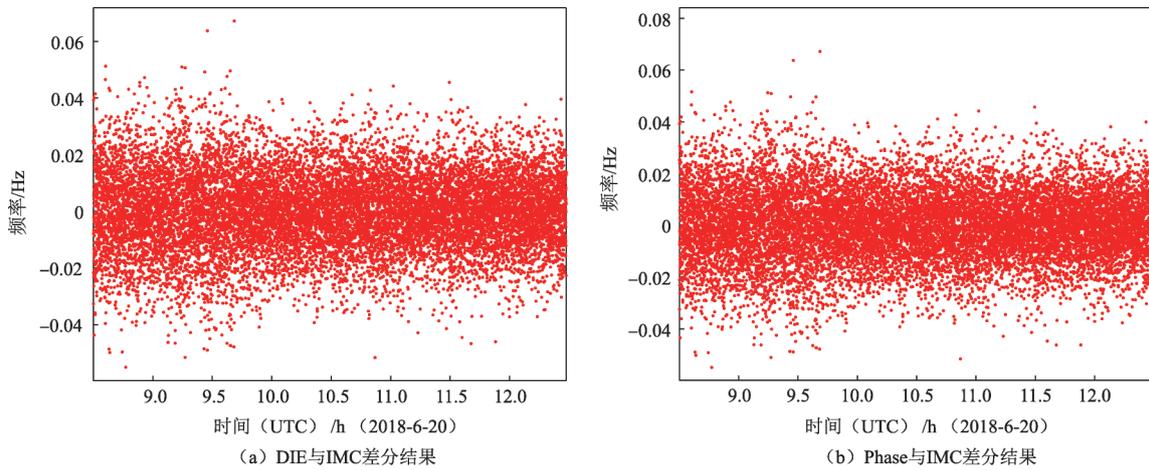


图4 喀什深空站DTE、Phase与IMC多普勒频率两两差分结果

Fig. 4 Differential Doppler frequency results among DTE, Phase and IMC

表1 DTE、Phase与IMC多普勒频率精度定量评估

Table 1 Doppler frequency accuracy quantitative evaluation among DTE, Phase and IMC

佳木斯深空站		喀什深空站	
评估内容	精度评估/Hz	评估内容	精度评估/Hz
DTE多普勒噪声水平	0.014 046	DTE多普勒噪声水平	0.019 296
Phase多普勒噪声水平	0.014 029	Phase多普勒噪声水平	0.019 295
IMC多普勒噪声水平	0.012 466	IMC多普勒噪声水平	0.015 793
IMC-DTE多普勒偏差均值	$7.226\ 9 \times 10^{-5}$	IMC-DTE多普勒偏差均值	$2.173\ 4 \times 10^{-5}$
IMC-DTE多普勒偏差的均方根误差	0.004 673 4	IMC-DTE多普勒偏差的均方根误差	0.014 554
Phase-DTE多普勒偏差均值	$2.271\ 2 \times 10^{-5}$	Phase-DTE多普勒偏差均值	2.984×10^{-5}
Phase-DTE多普勒偏差的均方根误差	0.004 630 3	Phase-DTE多普勒偏差的均方根误差	0.014 555
DTE-Phase多普勒偏差均值	$-4.955\ 7 \times 10^{-5}$	DTE-Phase多普勒偏差均值	$8.106\ 3 \times 10^{-5}$
DTE-Phase多普勒偏差的均方根误差	0.002 316 4	DTE-Phase多普勒偏差的均方根误差	0.000 218 9

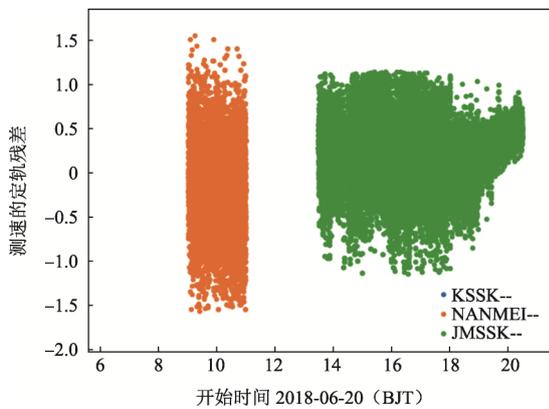


图5 JMS/KSH/NANMEI测速联合定轨残差

Fig. 5 Combination orbit determination residual based on velocity measurement of JMS, KSH, NANMEI stations

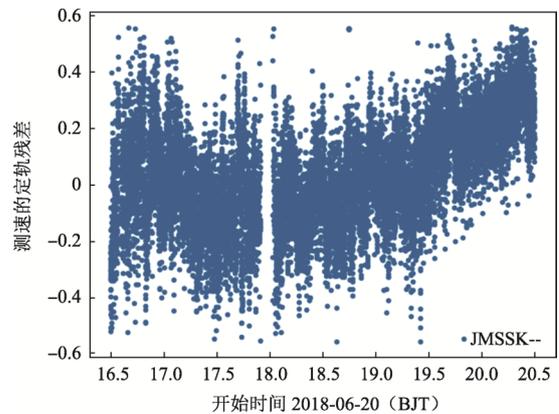


图6 IMC提取的多普勒测速联合定轨残差

Fig. 6 Orbit determination residual based on Doppler velocity measurement by IMC

3 结 论

本文提出了一种高精度测速方案，基于深空测控干涉测量系统，通过“嫦娥4号”中继星测量试验分析表明，基于本方案获取的中继星多普勒频率提取精度为10 mHz水平，联合定轨多普勒测速精度为

0.2 mm/s水平，有效验证了本方案的合理可行性。

参 考 文 献

[1] 唐歌实, 韩松涛, 陈略, 等. 深空网干涉测量技术在“嫦娥3号”任务中应用分析[J]. 深空探测学报, 2014, 1(2): 146-149.
TANG G S, HAN S T, CHEN L, et al. Analysis on interferometric

- tracking technology by China deep space network in the Chang'e-3 mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(2): 146-149.
- [2] 韩松涛, 唐歌实, 陈略, 等. DOR测量自适应模型重构算法与实验验证[J]. 航天器工程, 2014, 23(2): 91-94.
TANG G S, HAN S T, CHEN L, et al. Algorithm and demonstration of DOR tracking model reconstruction[J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(2): 91-94.
- [3] 陈略, 唐歌实, 任天鹏, 等. 再入返回飞行试验深空网干涉测量应用分析[J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(5): 407-413.
CHEN L, TANG G S, REN T P, et al. Application of CDSN interferometric tracking in reentry return flight test missions[J]. Journal of Spacecraft TT & C Technology, 2015, 34(5): 407-413.
- [4] 唐歌实, 韩松涛, 曹建峰, 等. 深空网测控模式 Δ DOR测量建模与精度分析[J]. 力学学报, 2015, 47(1): 24-30.
TANG G S, HAN S T, CAO J F, et al. Model and analysis of Δ DOR tracking by China DSN with tt&c mode[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(1): 24-30.
- [5] 王美, 陈略, 韩松涛, 等. 深空测控网干涉测量系统在“鹊桥”任务中的应用分析[C]/第三十一届全国空间探测学术研讨会. 银川: 第三十一届全国空间探测学术研讨会, 2018.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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): 382-385.
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): 382-385.
- [9] 陈略, 平劲松, 张建辉, 等. 中国深空网成功实施“卡西尼”探测器坠入土星测量试验[J]. 深空探测学报, 2017, 4(5): 491-492.
CHEN L, PING J S, ZHANG J H, et al. China's deep space network tracked Cassini's crashing into Saturn successfully[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(5): 491-492.
- [10] TANG J F, XIA L H, MAHAPATRA R. An open-loop system design for deep space signal processing applications[J]. Acta Astronautica, 2018, 147: 259-272.

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: 北京海淀区5130信箱120号(100094)

电话: (010)66365902

E-mail: chenlue@xao.ac.cn

Open Loop Velocity Measurement Scheme Design and Verification of Chang'E-4 Relay Satellite

CHEN Lue^{1,2,3}, XIE Jianfeng¹, HAN Songtao¹, CAO Jianfeng¹, PING Jinsong²

(1. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China; 2. National Astronomical Observatories, CAS, Beijing 100012, China; 3. Xinjiang Astronomical Observatory, CAS, Urumqi 830011, China)

Abstract: An open loop velocity measurement scheme is proposed for the high accuracy orbit measurement mission of deep space probes. Firstly, deep space probe's downlink signal is sampled and recorded by narrow band model. Then, the probe's carrier signal is processed to extract carrier frequency based on the combining signal processing method, which contains FFT, CZT and local re-construction algorithms. Then, the probe's Doppler frequency is obtained and Doppler frequency's random noise level is estimated. Finally, the Doppler frequency obtained by the proposed method is compared with the Doppler frequency based on the deep space station's baseband velocity measurement and the accumulation carrier phase velocity measurement. The three types of Doppler frequency are utilized for the input observations of orbit determination system to evaluate the absolute accuracy of the three types of Doppler frequency. The real signal processing and analysis of the on-orbit CE-4 relay satellite shows that, the Doppler frequency accuracy in this paper is at the level of 10 mHz, which is better than the Doppler frequency based on the deep space station's baseband velocity measurement and the accumulation carrier phase velocity measurement. The probe high accuracy orbit determination results show that the velocity measurement absolute accuracy in this paper is at the level of 0.2 mm/s. The effectiveness of the open loop measurement technology is successfully evaluated for China's future deep space missions.

Key words: deep space probe; velocity measurement; Doppler frequency; accuracy; CE-4 relay satellite

High lights:

- The high accuracy open loop velocity measurement scheme of deep space probe is designed and implemented.
- High accuracy open loop velocity measurement results of CE-4 relay satellite are obtained and verified by high accuracy orbit determination.
- The open loop velocity measurement accuracy of the deep space probe in this paper is better than that of China's deep space station baseband.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]