

引文格式:曹建峰,孔静,满海钧,等.天问一号星载USO的长期漂移标定[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(12):2181-2186.DOI:10.13203/j.whugis20220082



Citation: CAO Jianfeng, KONG Jing, MAN Haijun, et al. Onboard Ultra-Stable Oscillator Long-Term Drift Calibration for Tianwen-1 Mission[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(12): 2181-2186. DOI: 10.13203/j.whugis20220082

# 天问一号星载USO的长期漂移标定

曹建峰<sup>1,2</sup> 孔静<sup>1,2</sup> 满海钧<sup>1,2</sup> 鞠冰<sup>1,2</sup> 张宇<sup>1,2</sup> 刘荟萃<sup>1,2</sup>

1 航天飞行动力学技术重点实验室,北京,100094

2 北京航天飞行控制中心,北京,100094

**摘要:**星载超稳晶体振荡器(ultra-stable oscillator, USO)为发射机提供频率源,其稳定性直接影响单程多普勒测量精度,利用单程多普勒数据开展定轨计算需一并解算下行频率与标称频率的偏差。推导了单程多普勒观测模型及观测偏导数,分析了影响测量精度的主要误差源;对天问一号单程多普勒数据进行处理,在轨道解算的同时估计了频率偏差,并构建了USO长期漂移预报模型;给出了下行频率解算精度的影响因素,理论分析了频率解算精度。结果表明,天问一号星载USO长期漂移率为 $0.075\ 75\pm 0.006\ 20\ \text{Hz/d}$ 。因此,所提星载USO漂移标定方法构建了天问一号星载USO下行频率的先验模型。

**关键词:**超稳晶体振荡器;单程多普勒;天问一号;精密定轨;漂移标定

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2023-02-21

DOI:10.13203/j.whugis20220082

文章编号:1671-8860(2024)12-2181-06

## Onboard Ultra-Stable Oscillator Long-Term Drift Calibration for Tianwen-1 Mission

CAO Jianfeng<sup>1,2</sup> KONG Jing<sup>1,2</sup> MAN Haijun<sup>1,2</sup> JU Bing<sup>1,2</sup> ZHANG Yu<sup>1,2</sup> LIU Huicui<sup>1,2</sup>

1 Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics Laboratory, Beijing 100094, China

2 Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China

**Abstract: Objectives:** The stability of ultra-stable oscillator (USO) which provides frequency standard and transmits downlink signal affects the accuracy of one-way Doppler measurements directly. It is a necessity to estimate the frequency bias during orbit determination with one-way Doppler measurements. **Methods:** First, the one-way Doppler observation model and observation partial derivative are deduced theoretically, and the main error sources affecting the accuracy are analyzed. Then, the frequency deviation is estimated and the USO long-term drift prediction model is constructed during the execution of Tianwen-1 precise orbit determination using the one-way Doppler measurements. Finally, the accuracy of frequency bias resolution is analyzed theoretically based on its key factors. **Results:** The USO drift rate is  $0.075\ 75\pm 0.006\ 20\ \text{Hz/d}$ . **Conclusions:** This paper provides a feasible frequency drift calibration method for space-borne USO, and it constructs a priori frequency model for space-borne USO of Tianwen-1.

**Key words:** ultra-stable oscillator (USO); one-way Doppler; Tianwen-1; precision orbit determination; drift calibration

超稳晶体振荡器(ultra-stable oscillator, USO)具有短期稳定度高的特点,在航天任务的跟踪测量、通信导航等方面得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。高精度K频段星间测距系统(K-band ranging,

KBR)以USO作为系统间的时间基准,实现高精度的星间测距。GRACE(gravity recovery and climate experiment)卫星携带的USO稳定度达到了 $2\times 10^{-13}\ \text{s}^{-1}$ (阿伦方差),其KBR精度在微米量

基金项目:国家自然科学基金(11973015)。

第一作者:曹建峰,博士,副研究员,主要从事航天器精密定轨及其科学研究。jfc@foxmail.com

级, GRAIL (gravity recovery and interior laboratory) 还实现了  $0.03\sim 0.06 \mu\text{m/s}$  的星间测速<sup>[2]</sup>。利用星载 USO 还可实现地面测站的单程多普勒测量, 尤其是对于遥远的深空探测任务, 单程测量仅使用下行链路, 节约了测控资源, 具备更长弧段的跟踪覆盖能力, 而且单程测量由于无需发射上行信号, 单个测站可以同时完成对多个航天器的跟踪测量, 实现一站多用, 降低测控成本。因此, 单程多普勒测量具有广阔的应用前景<sup>[3-5]</sup>。早在 1976 年, 美国深空网对行星探测器先驱者 11 号进行了单程多普勒跟踪试验, 通过双站共视的多普勒差分数据验证了单程测量的可行性<sup>[6]</sup>。

星载 USO 受制造工艺以及在轨环境变化的影响, 输出频率并非恒定不变, 该变化直接影响高精度设备的使用。GRAIL 项目初期, 科研人员计划采用单程、双程多普勒数据进行重力场反演, 但由于太阳活动的干扰影响了 USO 的稳定性, 重力场模型 GRGM660PRIM 的构建并未采用单程多普勒<sup>[2]</sup>。萤火一号 (Yinghuo-1, YH-1) 火星探测器最初设计的通信和跟踪计划采用 X 频段, 跟踪测量主要采用甚长基线干涉测量 (very long base interferometry, VLBI)、DOR/DOD (differenced one-way range / differenced one-way Doppler) 与单程多普勒测量实现开环跟踪, 使命轨道阶段的测轨主要依赖于单程多普勒。由于发射失利, YH-1 未能脱离地球轨道。文献[7]对 YH-1 星载 USO 的频率稳定性进行测试与分析, 预期可实现  $0.3 \text{ mm/s}$  的单程测速精度, 但是对于典型 8 h 跟踪弧段测速会出现大约  $3 \text{ mm/s}$  的线性漂移。文献[8]对 YH-1 的单程多普勒数据在测定轨方面的应用做了仿真分析, 指出 USO 的不稳定性导致下行基频的频偏会显著影响测量精度, 轨道计算中需对下行频率一并解算以提升轨道精度。

天问一号是中国首个自主火星探测器, 跟踪测量采用深空网统一 X 频段与 VLBI 联合模式, 获取的观测数据包括双程测距、双程测速、时延和时延率。任务周期内, 深空站还会接收下行的频率数据, 转换为多普勒测量后可作为轨道计算的一类辅助数据源, 用于科学数据的分析<sup>[9]</sup>。本文以天问一号单程多普勒应用为背景, 推导了其观测模型, 分析了观测误差影响源、下行频率的解算不确定度与单程测速误差的理论映射关系, 并基于精密定轨计算, 通过天问一号单程多普勒数据分析星载 USO 的稳定性能, 确定其长期漂移率。

## 1 单程多普勒建模与误差分析

单程多普勒测量属于非相干测量, 采用 USO 作为系统的频率基准, 理想条件下以标称频率发射下行信号, 地面测控站接收该下行信号并完成频率测量, 通过收、发频率的比对得到航天器的单程测速。地面系统开展单程多普勒测量, 仅需要完成信号的接收与频率测量, 无需发射上行信号, 一定程度上降低了地面设备的需求。

受搭载条件限制, 星载 USO 无论是体积、还是功耗都相对较小, 因此单程多普勒的测量精度很大程度上受 USO 稳定性的影响, 一般较双程测量的精度低  $1\sim 2$  个量级<sup>[10]</sup>。

### 1.1 观测模型

单程多普勒测量本质上是测量下行信号的接收频率相对于星载下行频率的偏移量, 并以 1 个积分周期内的周计数描述, 接收频率的偏移量计算式如下:

$$f_D = \frac{N_c}{\Delta T} + \delta_f + \epsilon \quad (1)$$

式中,  $N_c$  表示 1 个积分周期内的周计数;  $\Delta T$  为积分周期;  $\delta_f$  表示观测系统偏差;  $\epsilon$  为随机误差。

文献[11]详细推导了单程多普勒接收信号频率与收发时间关系, 但未显式给出观测模型的表述。对文献[11]中的公式进行改写, 频率偏移量计算式如下:

$$\frac{f_D}{f_s} = -\frac{l_e - l_b}{\Delta T} + \frac{(\text{TDB}_{3,e} - \text{UTC}_{3,e}) - (\text{TDB}_{3,b} - \text{UTC}_{3,b})}{\Delta T} - \frac{I_{2,c}(\text{TDB}_{2,e} - \text{TDB}_{2,b})}{\Delta T} \quad (2)$$

式中, 下标 2 对应信号发射时刻; 下标 3 对应信号接收时刻; 下标  $b, c, e$  分别表示积分开始、积分中间与积分结束;  $f_s$  表示下行频率;  $l_b$  和  $l_e$  分别表示积分开始和积分结束时的信号传输的几何距离;  $\text{UTC}_{3,b}$  和  $\text{UTC}_{3,e}$  分别表示积分开始和积分结束时信号接收时刻的协调世界时;  $\text{TDB}_{2,e}$  和  $\text{TDB}_{3,e}$  分别表示积分结束后信号发射时刻和信号接收时刻的质心动力学时;  $\text{TDB}_{2,b}$  和  $\text{TDB}_{3,b}$  表示积分开始时信号发射时刻和信号接收时刻的质心动力学时;  $\Delta T$  为积分周期;  $I_{2,c}$  表示原时随坐标时变化的函数, 计算式为:

$$I_{2,c} = \frac{1}{c^2} \left( \frac{GM}{r} + \frac{1}{2} v^2 \right) - L_B \quad (3)$$

$$L_B = \left\langle \frac{GM}{r} + \frac{1}{2}v^2 \right\rangle \quad (4)$$

式中,  $\langle \rangle$  表示长期平均;  $\frac{GM}{r}$  表示天体引力势;  $L_B = 1.550\ 519\ 767\ 72 \times 10^{-8}$ <sup>[12]</sup>;  $c$  表示光速;  $v$  表示航天器质心天球参考系速度的模。文献[11]指出, 考虑  $10^{-4}$  mm/s 量级的测量精度,  $I_{2,c}$  的计算需要考虑太阳、木星及中心天体的引力势。

单程测速计算式为<sup>[13]</sup>:

$$\dot{\rho} = -\frac{f_D}{f_s} \cdot c \quad (5)$$

相应的接收频率可以用单程测速  $\dot{\rho}$  表示为:

$$f_r = f_s + f_D + h + \varepsilon = \left(1 - \frac{\dot{\rho}}{c}\right) f_s + h + \varepsilon \quad (6)$$

式中,  $h$  表示测量系统差。

如果测站的下行接收频率存在零值偏差, 则需要估计该零值偏差, 其接收频率的零值偏差导数为:

$$\frac{\partial f_r}{\partial h} = 1 \quad (7)$$

在下行频偏未知条件下, 频率偏移量由接收频率与下行标称频率差计算得到, 考虑到 USO 的不稳定与长期漂移, 需要一并估计下行频率的偏差, 接收频率对下行频率  $f_s$  的偏导数为:

$$\frac{\partial f_r}{\partial f_s} = 1 - \frac{\dot{\rho}}{c} \quad (8)$$

由式(8)可知, 接收频率与单程测速  $\dot{\rho}$ 、下行频率  $f_s$  成正比。若下行频率存在零值偏差, 则接收频率存在的偏差与单程测速相关, 呈轨道周期特性。

## 1.2 单程测速误差源及影响

由多普勒观测模型可知, 下行频率的稳定性是影响多普勒测量精度的重要因素, 包括测量系统差与随机误差, 其中随机误差主要由热噪声与频率源稳定性两部分引起。热噪声引起的测速随机误差  $\sigma_s$  的计算式为<sup>[14]</sup>:

$$\sigma_s = \frac{c}{2\pi f_s \Delta T \sqrt{\gamma}} \quad (9)$$

式中,  $\gamma$  表示信噪比, 对于 X 频段 1 s 积分周期的多普勒测速, 考虑  $\gamma = 20$  dB, 热噪声引起的随机误差为 0.6 mm/s。

频率源短期稳定度引起的测速随机误差  $\sigma_\rho$  的计算式为<sup>[12]</sup>:

$$\sigma_\rho = c \cdot S_s \quad (10)$$

式中,  $S_s$  表示频率源短期稳定度。若考虑星载 USO 短期稳定性为  $1 \times 10^{-13}$ , 引入的噪声为 0.03 mm/s。

星载晶振的长期漂移导致频率源的下行频率偏离标称频率, 该偏差引起的接收频率变化与单程测速相关, 呈非常值系统性偏差。考虑 X 频段测量的长期稳定性为  $1 \times 10^{-10}/d$ , 1 a 频率源偏差达到 321 Hz, 该偏移引起的测速误差为 11 m/s。

上述误差中热噪声与频率短期稳定度引起的随机抖动反映在观测数据上是随机噪声, 而长期漂移引起的是非常值系统性偏差, 随着时间的推移, 该偏差逐渐增大, 因此在数据处理中必须考虑长期漂移的估计问题。

## 2 数据处理

### 2.1 数据概况

2021-05-17, 天问一号实施第 4 次近火制动, 进入 8.3 h 周期的中继轨道, 随后 7 d 内共计实施了 3 次中继轨道维持。在中继轨道阶段, 天问一号为火星车提供中继通信, 并适时开展科学探测试验。中继通信时, 天问一号的定向天线分别指向火星与地球; 在其他弧段, 卫星则采用 Z 轴对日定向姿态。天问一号采用动量轮维持姿态稳定, 由于光压及重力梯度的影响, 天问一号大概每天会存在 2~3 次的动量轮卸载。

本文选取飞行轨道相对稳定的跟踪数据进行处理, 时间跨度为 2021-05-25—2021-11-30, 选取分析的数据包括双程测速和单程测速两类观测数据。

### 2.2 定轨计算

数据处理采用 1 d 滑动窗口, 每天定轨 1 次, 定轨弧段为  $[T, T+80 \text{ h}]$ ,  $T$  表示处理弧段的首日 0 时。相隔 3 d 的定轨结果使用重叠弧段比较评估精度, 重叠弧段为 8 h (约 1 个轨道周期)。由于存在频繁的动量轮卸载, 使用 80 h 数据定轨计算, 必须同时解算卸载加速度, 星历积分在卸载开始、结束时间分别进行中断与重起步。在近 5 个月弧段, 天问一号实施了 5 次轨道维持, 对维持当天的数据进行截断, 对维持前后的数据分别处理。表 1 为定轨计算的基本策略, 处理软件为航天飞行动力学实验室研发的太阳系多星精密定轨及数据分析软件, 该软件面向太阳系范畴航天器精密定轨需求, 已使用地球、月球、火星、金星、木星等探测器的实测数据进行了功能、性能的验证。

图 1 为双程跟踪弧段统计图, 起始时间为 2021-05-25。其中, 天问一号于 9 月份进入日凌, 无双程跟踪数据, 该弧段跟踪数据为单程多普勒。

表1 精密轨道解算策略

Tab. 1 Orbit Determination Strategy

项目	类型	说明
力学模型	中心天体引力	火星
	非球形引力摄动	JGMRO120D <sup>[15]</sup>
	第三体引力摄动	太阳,大行星(JPL DE436) <sup>[16]</sup> , PHOBOS, DEIMOS
	太阳光压摄动	球模型
	大气阻尼力	指数模型,固定面质比
	动量轮卸载	匀加速度模型,RTN坐标系
数据使用	双程测速/(mm·s <sup>-1</sup> )	0.1
	单程测速/(mm·s <sup>-1</sup> )	5
参数解算	位置、速度	解算
	光压系数	20 h解算1组光压系数,先验约束为0.1
	大气阻尼系数	20 h解算1组大气阻尼系数,先验约束为0.1
	测量数据系统差	下行频率偏差
	动量轮卸载加速度	RTN坐标系常值,考虑1 mm/s <sup>2</sup> 的先验约束

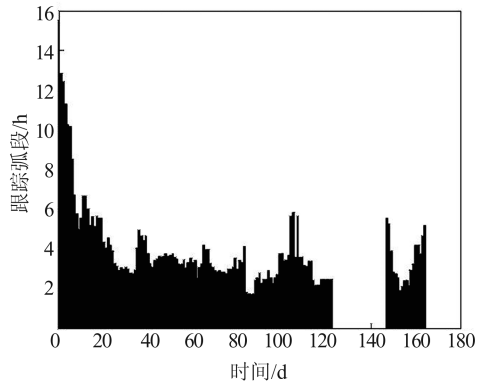


图1 天问一号跟踪弧段覆盖信息

Fig. 1 Observation Coverage of Tianwen-1

对上述策略解算轨道进行重叠弧段轨道比较(图2),6月3日前,由于跟踪覆盖较好,重叠弧段最大轨道偏差小于150 m,之后由于观测弧段的减小,重叠弧段轨道比较的结果欠稳定,但最大位置偏差不超过700 m。统计6个月的单程多普勒残差,其噪声水平为55~65 mHz,对应的径向速度约为1.87~2.22 mm/s。

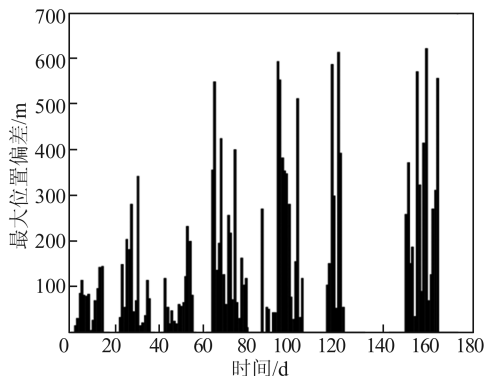


图2 重叠弧段轨道比较

Fig. 2 Comparison of Orbital Overlap

### 2.3 下行频率解算

选取分析弧段内所有测速数据进行轨道计算,一并解算了141组频率偏差值(图3)。环火轨道初期,USO稳定性稍差,解算值弥散度较大。对解算值做一阶线性拟合,拟合结果为:

$$y = -462.84 + 0.05792 \times T \quad (11)$$

拟合残差的均方根(root mean square, RMS)为0.55 Hz。式(11)中, $T$ 的单位为d,本文设置起点为2021-05-25T11:00:00。

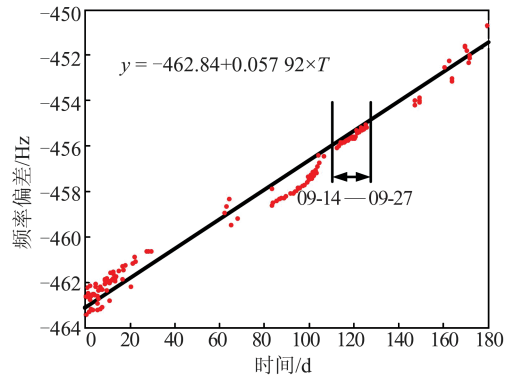


图3 下行频率解算统计

Fig. 3 Statistics of Downlink Frequency Estimation

2021-09-14—2021-09-27期间,佳木斯站与喀什站交替接收下行频率获取了单程多普勒数据,图4为定轨数据频率残差。得益于USO频率偏差的估计,佳木斯站与喀什站测量数据残差RMS分别为42.2 mHz与57.5 mHz,全弧段解算的残差平稳,不存在明显趋势项。

图4中前2个弧段仅有佳木斯站跟踪,后续的3~26弧段为佳木斯站与喀什站交替跟踪。以佳木斯站解算偏差作为基准,比较佳木斯站、喀

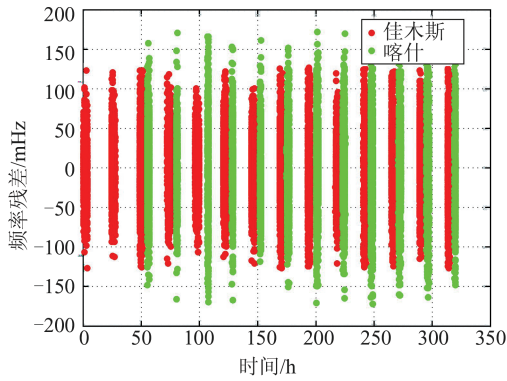


图 4 单程多普勒定轨计算残差图

Fig. 4 Post-Fit Residuals of One-Way Doppler

什站下行频率解算差异,并计算频率解算不确定度,公式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta f_i}{n}} \quad (12)$$

得到  $\sigma = 0.0632$  Hz,由  $\sigma$  计算等效单程测速大约为 2.2 mm/s。式(12)中,  $\Delta f_i = f_{KS,i} - f_{JMS,i}$ ,其中  $f_{KS,i}$  和  $f_{JMS,i}$  分别表示喀什站和佳木斯站跟踪弧段的下行频率; $i$  为解算序号; $n$  为解算组数。

#### 2.4 频率偏差预报

考虑到环火初期,卫星平台在轨操作较多,USO 频率稳定性不佳,选取 2021-07-01—2021-09-27 解算的频率偏差进行线性拟合(图 5),并利用拟合公式预报至 11 月份,评估预报频率偏差与解算频率偏差之间的差异。拟合后的预报公式为:

$$\begin{cases} y = -465.13 + kT \\ k = 0.07575 \pm 0.00620 \text{ Hz/d} \end{cases} \quad (13)$$

预报频率偏差与解算偏差的统计 RMS = 0.227 Hz,转换为单程测速的影响约为 7.7 mm/s。

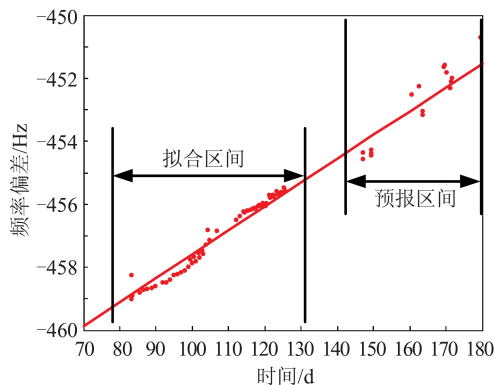


图 5 长期漂移预报模型

Fig. 5 Long-Term Drift Prediction Model

#### 2.5 理论分析

由式(6)可知,USO 下行频率  $f_s$  的解算与下行接收频率  $f_r$  和单程测速  $\dot{\rho}$  相关,对这两个因素

的影响分别进行推导分析。

在 1 个跟踪弧段内,若仅考虑单程测速引起的频率计算误差,根据统计理论,接收频率的标准偏差在速度域积分可得:

$$\sigma_{f_s} = \frac{c^2}{(c - \dot{\rho}_-)(c - \dot{\rho}_+)} \sigma_{f_r} \quad (14)$$

式中,  $\sigma_{f_s}$  为接收频率的标准差;  $\dot{\rho}_-$  和  $\dot{\rho}_+$  分别表示单程测速的最小值和最大值。对速度值域分别取值  $\dot{\rho}_- = -10$ ,  $\dot{\rho}_+ = 10$  (单位: km/s), 则可得解算频率标准差为:

$$\sigma_{f_s} = (1 + 1.11265 \times 10^{-9}) \sigma_{f_r} \quad (15)$$

即下行频率的解算误差与接收频率的标准差几乎一致。

考虑测速偏差对频率解算的影响,由式(6)可得:

$$\sigma_{f_s} = \frac{cf_r}{(c - \dot{\rho})^2} \sigma_{\dot{\rho}} \quad (16)$$

结合天问一号当前轨道解算精度,考虑单程测速为 10 km/s,测站接收下行频率为 8 GHz,若同时存在双程多普勒的约束,单程测速的不确定度取定轨双程多普勒残差,单程测速的标准差为  $\sigma_{\dot{\rho}} = 0.5$  mm/s,则  $\sigma_{f_s} = 1.5$  mHz;若不存在多普勒约束,考虑定轨结果的速度误差大约为 5 cm/s,假设该误差全部在视向,则  $\sigma_{f_s} = 1.3$  Hz。

综上,使用单程多普勒数据解算星载 USO 的精度与轨道速度在视向投影及测站接收下行频率的噪声水平相关,其中单程测速的误差是主要影响量。

### 3 结 语

本文对单程多普勒数据的应用进行了讨论,推导了单程多普勒的观测模型及观测偏导数,从理论上分析了影响单程多普勒精度的主要误差源。对天问一号中继轨道阶段的多普勒测量数据进行定轨分析,解算了星载 USO 频率偏差和长期漂移率。基本结论如下:

1) 星载 USO 的频率稳定度是影响多普勒测量精度的重要误差源,其长期漂移量转换为单程测速表现为周期性偏差,精密定轨计算需要进行频率偏差的解算。

2) 利用单程多普勒解算星载 USO 的频率偏差,其解算精度与解算轨道的速度,以及测站接收下行频率的噪声水平相关,考虑到当前定轨能力及双程多普勒测量的贡献,频率解算的不确定

与下行频率的噪声水平量级相当。

3)利用自2021年5月底开始,近6个月在轨数据的处理分析,天问一号的星载USO下行频率的长期漂移率为 $0.075\ 75\pm 0.006\ 20\ \text{Hz/d}$ 。

### 参 考 文 献

- [1] Shapira A, Stern A, Prazot S, et al. An Ultra Stable Oscillator for the 3GM Experiment of the JUICE Mission[C]//European Frequency and Time Forum (EFTF), York, United Kingdom, 2016.
- [2] Lemoine F G, Goossens S, Sabaka T J, et al. High-Degree Gravity Models from GRAIL Primary Mission Data [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, 118(8): 1676-1698.
- [3] Yang Peng, Huang Yong, Li Peijia, et al. Positioning and Accuracy Analysis of Tianwen-1 Mars Rover Based on Same-Beam VLBI Measurement[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(1): 84-91. (杨鹏, 黄勇, 李培佳, 等. 同波束VLBI测量下的天问一号火星车定位及精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 84-91.)
- [4] Wang Bo, Yan Jianguo, Gao Wutong, et al. Impact Analysis of EOP Prediction Errors on Orbit Determination of Deep-Space Spacecraft[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(9): 1538-1545. (王波, 鄢建国, 高梧桐, 等. EOP预报误差对深空探测器精密定轨结果影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(9): 1538-1545.)
- [5] Huang Jing, Zhao Weiwei, Chen Xuehua, et al. Passive Positioning Algorithm Based on Single Satellite Frequency Measurement [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2019, 39(4): 11-17. (黄静, 赵薇薇, 陈雪华, 等. 单星测频静态目标无源定位研究[J]. 中国空间科学技术, 2019, 39(4): 11-17.)
- [6] Chao C C, Ondrasik V J, Siegel H L. A Demonstration of Differenced Dual-Station One-Way Doppler Conducted with Pioneer 11[J]. *Deep Space Network Progress Report*, 1978, 45: 104-110.
- [7] Wang Zhen, Jian Nianchuan, Zhang Sujun, et al. Test and Analysis of Frequency Stability of USO in YH-1[J]. *Annals of Shanghai Astronomical Observatory Chinese Academy of Sciences*, 2011, 32: 69-74. (王震, 简念川, 张素君, 等. YH-1星载超稳定晶振的频率稳定性的测试与分析[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2011, 32: 69-74.)
- [8] Hu Songjie. Simulation Analysis of Orbit Determination of YH-1[J]. *Deep Space Exploration*, 2010, 8(3): 7-13. (胡松杰. 萤火一号探测器定轨仿真分析[J]. 深空探测研究, 2010, 8(3): 7-13.)
- [9] Liu Shan hong, Yan Jianguo, Yang Xuan, et al. Potential Contribution of Tianwen-1 Extended Mission to Mars Low-Order Gravity Field [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(1): 58-64. (刘山洪, 鄢建国, 杨轩, 等. 天问一号拓展任务对火星低阶重力场解算的潜在贡献分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 58-64.)
- [10] Wu Yiwei, Yang Bin, Xiao Shenghong, et al. Atomic Clock Models and Frequency Stability Analyses [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(8): 1226-1232. (伍贻威, 杨斌, 肖胜红, 等. 原子钟模型和频率稳定度分析方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(8): 1226-1232.)
- [11] Cao Jianfeng, Huang Yong, Hu Xiaogong, et al. Modeling and Application of Doppler Data in Deep Space Exploration [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(7): 1583-1589. (曹建峰, 黄勇, 胡小工, 等. 深空探测中多普勒的建模与应用[J]. 宇航学报, 2011, 32(7): 1583-1589.)
- [12] Petit G, Luzum B. IERS Conventions (2010), IERS Technical Note No. 36[R]. Paderborn: Bonifatius GMBH, 2010.
- [13] Moyer T D. Formulation for Observed and Computed Values of Deep Space Network Data Types for Navigation[M]. New York: Wiley, 2003.
- [14] Bures K J, Smith G L. Theoretical Error Analysis of a Doppler Range-Rate and Phase-Modulated Range Tracking System, NASA-TN-D-4267 [R]. San Francisco, CA, USA, 1967.
- [15] Konopliv A S, Park R S, Folkner W M. An Improved JPL Mars Gravity Field and Orientation from Mars Orbiter and Lander Tracking Data[J]. *Icarus*, 2016, 274: 253-260.
- [16] Folkner W M, Park R S, Jacobson R A. Planetary Ephemeris DE435, IOM 392R-16-003 [R]. San Francisco, CA, USA, 2016.