



## “嫦娥五号”深空干涉测量性能分析

任天鹏, 路伟涛, 孔 静, 谢剑锋, 韩松涛, 王 美, 满海钧, 牛东文, 刘河山, 周之金

### Performance Analysis of Deep-Space Interferometry in Chang'E-5 Mission

REN Tianpeng, LU Weitao, KONG Jing, XIE Jianfeng, HAN Songtao, WANG Mei, MAN Haijun, NIU Dongwen, LIU Heshan, and ZHOU Zhijin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210055>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于轨道任务几何的“嫦娥五号”采样区选择

Sampling Area Selection for Chang' E-5 Mission Using the Orbital Geometry

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(3): 227-236

#### “嫦娥五号”轨道器供配电系统高比能设计

High Specific Energy Design of Power Supply and Distribution System for Chang' E-5 Orbiter

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(3): 237-243

#### “嫦娥五号”任务总体方案权衡设计

Overall Scheme Trade-off Design of Chang' E-5 Mission

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(3): 215-226

#### “嫦娥五号”探测器有效载荷分系统设计

Design of the Payload Subsystem of Chang' E-5 Lunar Explorer

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(3): 290-298

#### “嫦娥五号”探测器GNC应用软件高可信研制技术

High Confidence Development Technology of Application Software for GNC Subsystem of Chang' E-5

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(3): 244-251

#### 深空测控网干涉测量系统在“鹊桥”任务中的应用分析

Application of Deep Space VLBI System in Queqiao Mission

深空探测学报(中英文) . 2018, 5(6): 539-543



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

# “嫦娥五号”深空干涉测量性能分析

任天鹏<sup>1,2</sup>, 路伟涛<sup>1,2</sup>, 孔静<sup>1,2</sup>, 谢剑锋<sup>1,2</sup>, 韩松涛<sup>1,2</sup>, 王美<sup>1,2</sup>, 满海钧<sup>1,2</sup>,  
牛东文<sup>1,2</sup>, 刘河山<sup>1,2</sup>, 周之金<sup>1,2</sup>

(1. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094; 2. 航天飞行动力学技术重点实验室, 北京 100094)

**摘要:** 在“嫦娥五号”任务中, 深空干涉测量系统正式参加轨道测量, 提供了高精度的角位置信息。采用对流层时延混合建模技术, 确保了实时干涉测量精度; 利用分时跟踪技术, 在链路带宽受限条件下首次开展了快速洲际干涉测量; 通过对“嫦娥五号”探测器轨道测定结果分析, 表明干涉测量误差修正、定轨精度符合给定的要求, 验证了深空干涉测量在深空导航中探测器快速轨道确定的有效性。

**关键词:** 甚长基线干涉测量; 深空干涉测量; 嫦娥五号; 轨道测定

**中图分类号:** P228.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2021)06-0572-10

**DOI:**10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210055

**引用格式:** 任天鹏, 路伟涛, 孔静, 等. “嫦娥五号”深空干涉测量性能分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(6): 572-581.

**Reference format:** REN T P, LU W T, KONG J, et al. Performance analysis of deep-space interferometry in Chang'E-5 mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(6): 572-581.

## 引言

探月工程从“嫦娥一号”开始确立了统一S波段(Unified S-Band, USB)/统一X波段(Unified X-Band, UXB)测距测速加甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)测角的深空飞行器测定轨技术配置<sup>[1-3]</sup>。VLBI测轨主要基于中国VLBI观测网(China VLBI Network, CVN)和中国深空测控网(China Deep-space TT&C Network, CDSN)的国内深空站<sup>[4-8]</sup>, 均采用 $\Delta$ VLBI技术开展“嫦娥”探测器角位置测定。

随着探月工程“绕”“落”“回”三步走的战略步伐, 中国深空测控网络逐步建设和发展起来。在探月二期工程中, 建设了佳木斯、喀什两个国内深空站; 在探月三期工程中, 建设了位于阿根廷的第3个深空站, 并为纳米比亚站配置了干涉测量相关设备<sup>[11-9]</sup>。深空干涉测量系统具备了境内和洲际干涉测量能力, 使得覆盖弧段显著增加。

“喀什-纳米比亚-阿根廷”干涉基线为洲际干涉基线, 弥补了国土外干涉测量弧段空白。受通信链路带宽限制, 阿根廷深空站与纳米比亚站连续采集的干涉测量原始数据难以实时传输至干涉处理中心。因此,

探索利用分时跟踪技术, 提高洲际干涉测量对探测器轨道测定支撑作用的时效性。

$\Delta$ VLBI技术可以消除站间钟差、链路时延等大部分测量误差, 然而受深空干涉测量空间跨度、时间跨度限制, 对流层时延误差影响较大<sup>[10]</sup>。因此, 需对高精度对流层时延建模技术展开研究与验证应用。通常对流层天顶时延与映射函数独立建模<sup>[11-17]</sup>, 存在仰角越低误差越大的风险。文献<sup>[18]</sup>研究的对流层时延混合模型精度和稳定性有待提高。

本文针对“嫦娥五号”探测器轨道干涉测角需求, 开展了分时跟踪技术探索和对流层时延混合建模技术研究。利用轨道测定结果, 分析了深空干涉测量误差修正、定轨精度等性能, 验证深空干涉测量高精度轨道确定技术。

## 1 深空干涉测量技术

干涉测量技术指的是两测站接收同一射电源或深空探测器信号, 根据几何关系, 解算信号传播时延差, 信号到达两测站的几何时延为

$$\tau = \frac{B \cos \theta}{c} \quad (1)$$

其中： $B$ 为两个测站的距离（干涉基线长度）； $\theta$ 为方向夹角； $c$ 为光速。干涉测量技术应用于深空导航领域时，干涉基线较长，称为VLBI。VLBI的测量精度可以表示为

$$\delta\theta = \frac{c\delta\tau}{B\sin\theta} \quad (2)$$

增加两测站之间的距离（基线长度），能够提高测角精度。也是开展洲际干涉测量的目的。 $\Delta$ VLBI指的是通过深空探测器与射电源的切换观测，以期修正测量系统设备误差、钟差以及器地空间信号传输路径上的介质误差，其原理如图1所示。

在“嫦娥五号”任务中，参与 $\Delta$ VLBI的干涉测站包括北京（BJ）、天马（TM）、昆明（KM）、乌鲁木齐（UR）等CVN测站和佳木斯（JM）、喀什（KS）、阿根廷（AG）、纳米比亚（NM）等中国深空测控网测站。干涉测量基线组合如图2所示，相关干

涉基线的长度和共视时长（以2020年11月27日“嫦娥五号”探测器为例）如图3所示。可以看出，深空测控网的洲际干涉基线具有较长的基线长度，可以带来更高精度的测角水平。

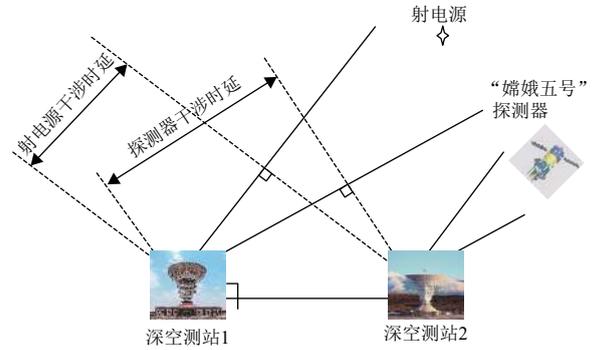


图 1  $\Delta$ VLBI原理示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of  $\Delta$ VLBI

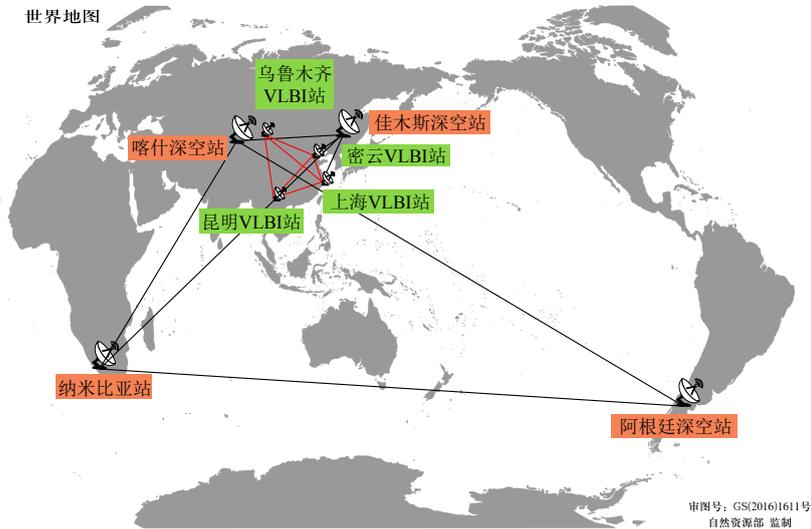


图 2 深空探测干涉测量基线组合<sup>[1]</sup>  
Fig. 2 Interferometry baselines formed for China's deep-space exploration<sup>[1]</sup>

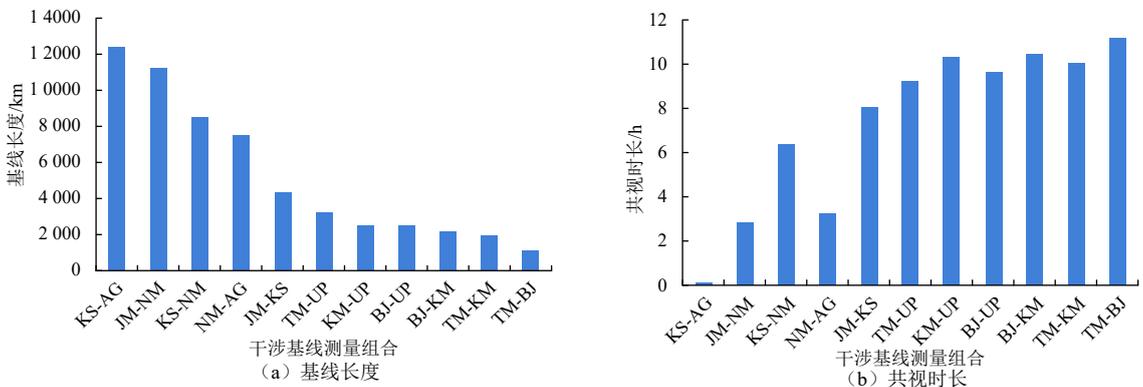


图 3 深空干涉测量基线长度与共视时长  
Fig. 3 Baseline length and common-view time span of the interferometry for China's deep-space exploration

## 2 分时跟踪干涉测量技术

受通信链路带宽限制, 阿根廷深空站与纳米比亚站连续采集的干涉测量原始数据难以实时或准实时传输至干涉处理中心。为保证测量结果的时效性, 采用分时跟踪, 可大幅降低干涉测量原始数据量, 在工程中实现洲际干涉测量对探测器轨道测定的有效支撑。不同于传统的连续采集模式, 需要对分时跟踪这一新的模式性能进行分析与仿真。

首先利用“嫦娥四号”任务期间“佳木斯-喀什”基线干涉测量数据, 分析了测定轨精度约束下的干涉测量分时跟踪策略, 然后以UXB数据与CVN数据解算的轨道为基准, 利用UXB数据与深空干涉测量数据得到测量轨道, 评估不同情况下测量轨道与基准轨道的差异。

“嫦娥四号”探测器在近月制动前无显著轨道控制, 因此将该弧段的“佳木斯-喀什”基线共视弧段作为分析评估对象。

### 2.1 总时长固定下分时跟踪与连续采集分析

令连续采集模式为共视弧段内连续30 min、分时跟踪模式为共视弧段内均匀分布15个2 min弧段, 则两种模式的定轨精度如图4和图5所示。对比图4和图5可

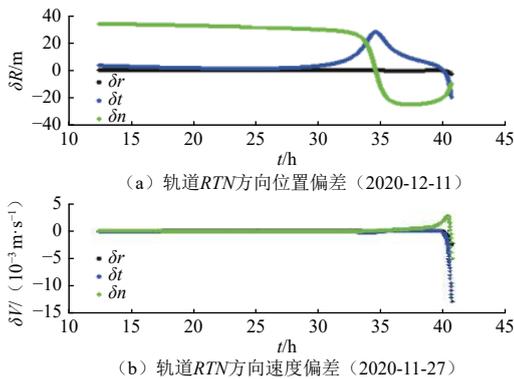


图4 连续采集模式下探测器定轨精度

Fig. 4 Accuracy of orbit determination with continuous tracking

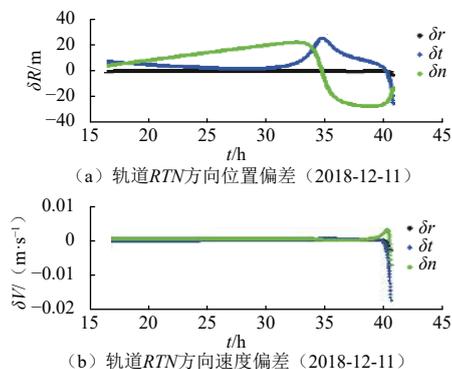


图5 分时跟踪模式下探测器定轨精度

Fig. 5 Accuracy of orbit determination with noncontinuous tracking

以看出, 总时长固定时, 分时跟踪模式的定轨精度要优于连续采集模式。

### 2.2 总时长固定情况下分时跟踪单次时长分析

在总时长固定的情况下, 分时跟踪的单次时长将生成不同数目的分时弧段。令总时长为30 min, 分别按照单次时长为1、5、10、15、30 min, 由此带来30、6、3、2、1个的干涉跟踪弧段均匀分布在共视弧段内、其它测量输入保持不变, 定轨精度结果如图6所示。

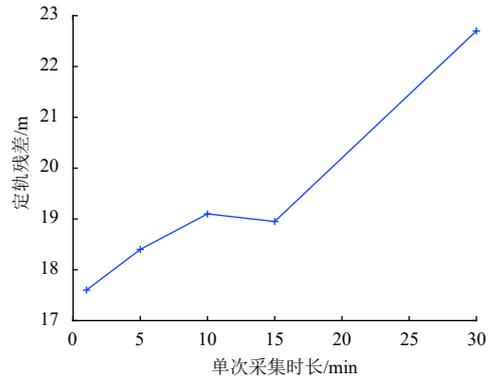


图6 分时跟踪模式单次时长与定轨精度关系

Fig. 6 Relationship between accuracy of orbit determination and time span for a non-continuous tracking

可以看出, 在总时长固定的情况下, 深空干涉测量分时跟踪的时长较短、跟踪弧段较多时, 定轨精度较优。需要说明的是, 虽然观测弧段均匀化有利于定轨精度的提高, 但跟踪弧段较多也提高了参数求解难度。

### 2.3 “嫦娥五号”分时跟踪干涉测量验证

“嫦娥五号”探测器第二次中途修正陀螺标定后, 仅有纳米比亚站与阿根廷深空站可以跟踪观测。为了及时解算探测器新的轨道根数、确定地月转移第三次中途修正策略, 纳米比亚站与阿根廷深空站组成的洲际基线对探测器进行了分时干涉跟踪。考虑数据传输时效性等因素, 跟踪计划如表1所示。

表1 “纳米比亚-阿根廷”洲际基线跟踪计划  
Table 1 Tracking plan of NM-AG baseline

跟踪目标	跟踪弧段(北京时间)
射电源	2020-11-27T02:25:00 - 02:30:00
	2020-11-27T08:15:00 - 08:25:00
探测器	2020-11-27T09:15:00 - 09:25:00
	2020-11-27T10:15:00 - 10:25:00

准实时干涉处理原始测量数据, 纳米比亚站、阿根廷深空站信号频谱及干涉相关谱如图7所示。解算干涉残余时延, 并利用前射电源修正钟差、设备链路延

迟等，如图8所示（Scan1-Q表示射电源弧段干涉时延，Scan2-Sat表示探测器弧段干涉时延，Scan2-equipment表示探测器弧段干涉时延修正值）。可以看

出，该次测控模式 $\Delta$ VLBI中射电源与探测器弧段最大间隔约8.0 h；将探测器干涉测量修正后结果用于轨道解算，支撑了探测器轨道的快速确定。

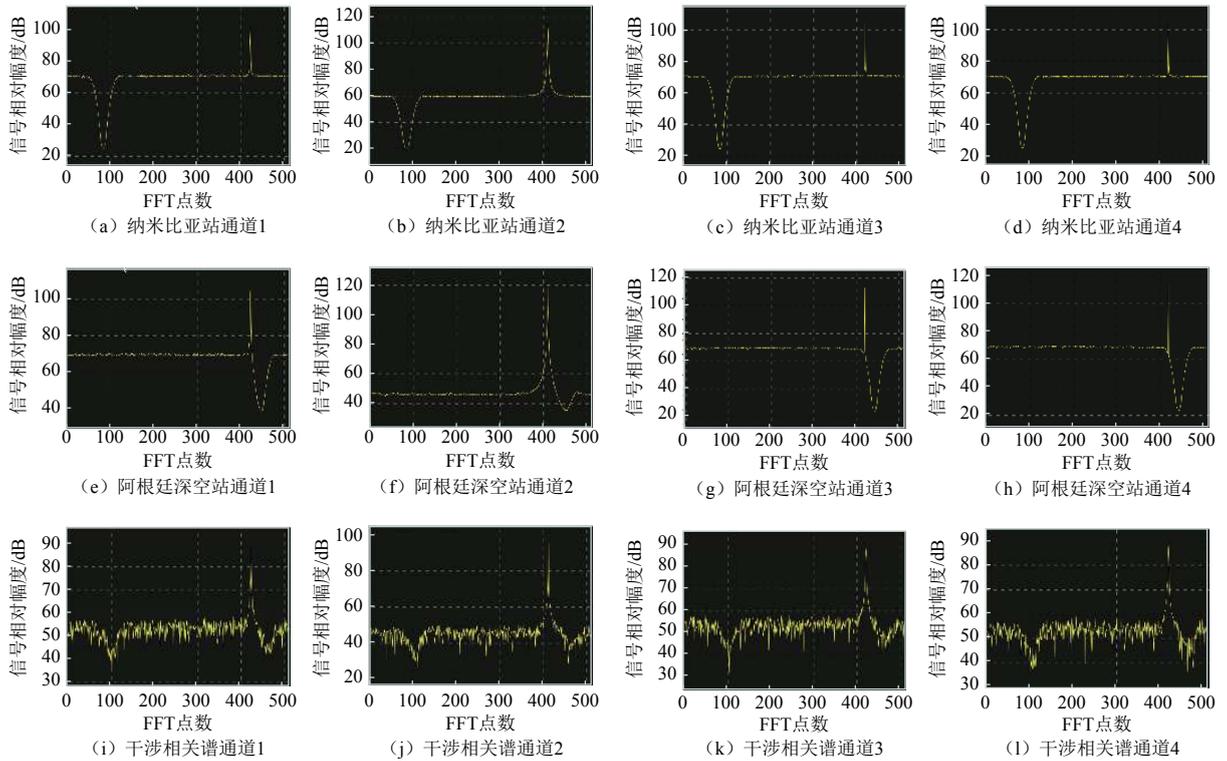


图 7 “嫦娥五号”探测器信号频谱与干涉相关谱

Fig. 7 Spectra of DOR signals of Chang'E-5 probe

### 3 对流层时延混合建模技术

利用射电源观测消除系统性误差后， $\Delta$ VLBI测量提供了探测器高精度角位置信息。因此 $\Delta$ VLBI单个测量单位可以表示为“前射电源-探测器-后射电源”。

“嫦娥五号”任务中 $\Delta$ VLBI具有两种差分模式：短时交替模式 $\Delta$ VLBI、测控模式 $\Delta$ VLBI。CVN通常采用短时交替模式进行差分标校<sup>[7]</sup>，如图9所示。然而受限于测控任务连续跟踪需求，深空干涉测量系统无法采用短时交替模式，需采用测控模式，即第一个测站进站前，对射电源进行观测，以标定钟差、设备链路延迟等；两个测站均进站后，开始共视跟踪探测器、干涉处理原始测量数据；第2个测站出站后，再次跟踪观测射电源，如图10所示。深空干涉测量系统射电源和探测器观测时间域和空间域区分度较大，因此X频段实时干涉测量中，对流层延迟误差是其测量误差主要来源之一<sup>[10]</sup>。

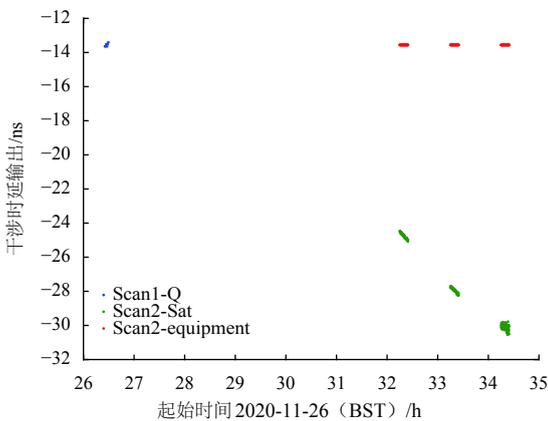


图 8 射电源与探测器干涉残余时延及外推修正

Fig. 8 Interferometric delay residuals of quasar and probe including its corrections



图 9 CVN短时交替模式<sup>[7]</sup>

Fig. 9 Quick task-switching of observation of China VLBI network<sup>[7]</sup>

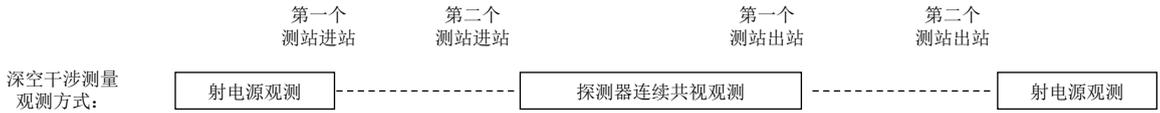


图 10 深空干涉测量系统测控模式

Fig. 10 Long-time task-switching of observation of China deep-space TT&C network

### 3.1 对流层时延误差分析

对流层时延可以用天顶时延和映射函数表示为

$$D = df(\theta) \tag{3}$$

其中： $D$ 为对流层视线时延； $d$ 为对流层天顶时延； $f(\theta)$ 为对流层时延映射函数； $\theta$ 为视向俯仰角。

可以看出，对流层时延误差包括天顶时延误差和映射函数误差。通常，天顶时延<sup>[11-13]</sup>和映射函数<sup>[14-16]</sup>独立建模研究。此时，对流层时延误差可以表示为

$$\delta D = f(\theta)\delta d + d\delta f(\theta) \tag{4}$$

对流层时延映射函数随着俯仰角减小而增大。譬如一个简单的对流层时延映射函数是 $f(\theta) = 1/\sin\theta$ 。因此，即使仅考虑天顶时延误差，对流层时延误差也将随着俯仰角减少而增加。这对低仰角观测非常不利。

### 3.2 对流层时延混合建模

文献[18]提出了一种 $N$ 阶对流层时延混合模型

$$D = \frac{d}{\sin\theta + \sum_{n=0}^N a_n \theta^n} \tag{5}$$

其中：参数 $a_n$ 和 $d$ 联合建模。由于引入了高阶多项式，使得模型参数 $d$ 不再严格表示对流层天顶时延。因此属于天顶时延和映射函数混合建模。考虑系统性测量误差及模型稳定性，“嫦娥五号”改进了对流层时延混合模型为

$$D = \frac{d}{\sin\theta + a} + b \tag{6}$$

### 3.3 对流层时延混合模型验证

“嫦娥五号”地月转移阶段，对佳木斯深空站(JM)和喀什深空站(KS)分别建立对流层时延混合模型。实时干涉测量中利用对流层时延混合模型修正误差。模型值与实测值(事后获取)、模型精度(实测值-模型值)如图11所示。

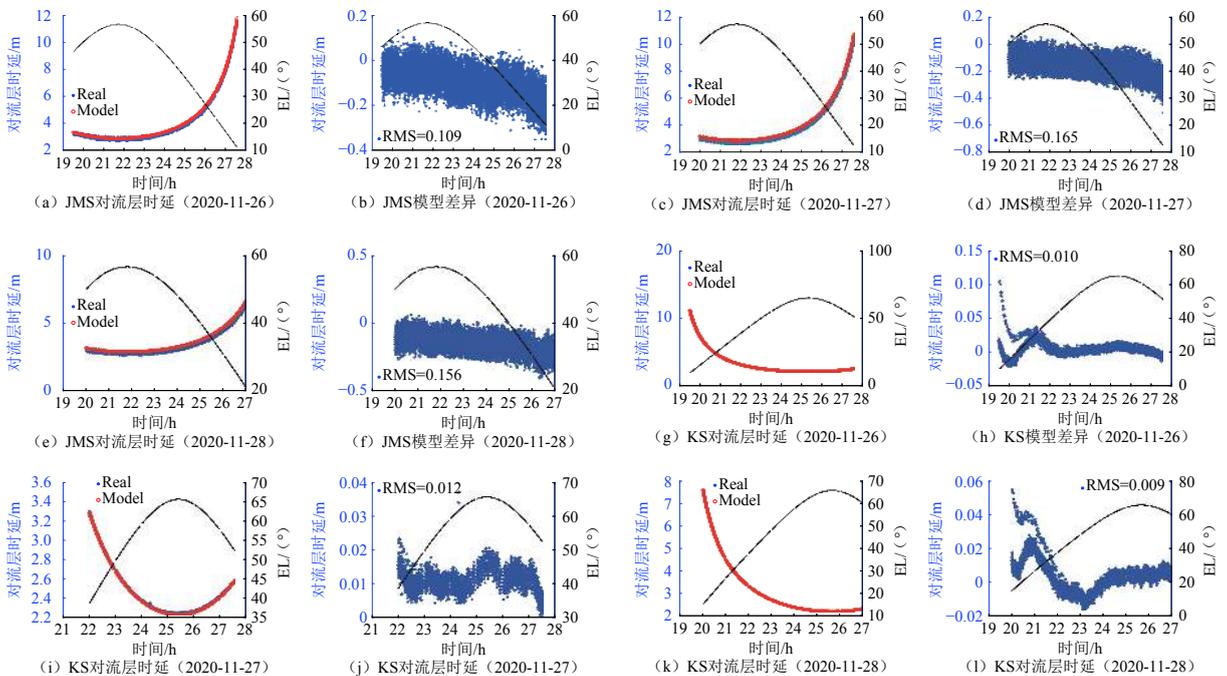


图 11 佳木斯深空站 (JM) 和喀什深空站 (KS) 对流层时延及模型精度

Fig. 11 Tropospheric delay and model accuracy of JM and KS deep space stations

可以看出，对流层时延混合模型破除了仰角越低误差越大的规律，使得建模误差在整个观测弧段均衡分布，提高了低仰角弧段对流层时延模型精度；佳木斯深空站、喀什深空站模型值与实测值差异（含实测设备误差）最大为0.165 m、0.012 m（RMS），远小于实时干涉测量整体误差要求。

### 4 深空干涉测量定轨性能仿真分析

“嫦娥五号”地月转移飞行阶段，计划实施3次中途修正，再进行近月制动。针对第2次中途修正至近月制动弧段进行干涉测量定轨性能仿真。

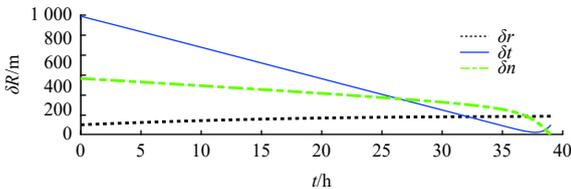
### 4.1 境内深空干涉测量

针对境内“佳木斯-喀什”干涉基线进行仿真。考虑该基线约4 h共视时长，基于蒙特卡洛的轨道计算分析中，仅解算航天器位置、速度等6个参数。飞行力模型如表2所示，考虑±10%的太阳光压摄动误差，基于UXB和CVN测量数据的事后精密轨道为基准轨道。在没有深空干涉测量数据参与定轨时，位置偏差为1 059.2 m、速度偏差为0.009 3 m/s，如图12所示；深空干涉测量数据参与定轨后，位置偏差和速度偏差仿真结果如表3所示。深空干涉测量数据参与定轨后，轨道解算精度较单UXB数据轨道解算精度明显提高。

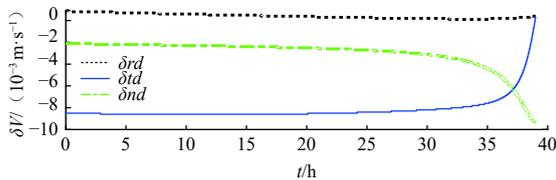
表 2 深空干涉测量定轨性能仿真飞行力模型

Table 2 Flight dynamics models for orbit determination performance simulation of deep space interferometry

弧段	模型项	描述
地月转移飞行	中心天体质点引力	以地球为中心天体
	非球形引力摄动	地球：JGM3（8×8）月球：GL0660B（4×4）
	第三体引力摄动	太阳，月球与大行星（JPL DE431）
	太阳光压摄动	球模型
	姿轨控制	匀加速度模型（RTN坐标系）
	环月飞行	中心天体质点引力
非球形引力摄动		GL0660B（100×100）
第三体引力摄动		太阳，大行星（JPL DE421）
太阳光压摄动		球模型
姿轨控制		匀加速度模型（RTN坐标系）



(a) 轨道RTN方向位置偏差 (2020-11-27)



(b) 轨道RTN方向速度偏差 (2020-11-27)

图 12 第2次中途修正至近月制动弧段UXB数据定轨精度

Fig. 12 Accuracy of orbit determination with UXB data between the second orbital correction and the near-moon braking

### 4.2 洲际深空干涉测量

第2次中途修正陀螺标定后、第3次中途修正前的

表 3 第2次中途修正至近月制动弧段UXB+国内深空干涉测量定轨残差

Table 3 Accuracy of orbit determination with UXB + domestic deep-space interferometric data between the second orbital correction and the near-moon braking

系统差/ns	随机差/ns	位置偏差/m	速度偏差/(m·s <sup>-1</sup> )
1	1	673.11	0.006 5
1	2	707.93	0.006 8
2	1	815.88	0.007 5
2	2	827.39	0.007 6
3	1	959.56	0.009
3	2	982.85	0.009

弧段位于境外测控区，缺少CVN的跟踪支持。观测弧段和跟踪数据极大制约了定轨计算精度。因此本节针对无CVN跟踪支持工况，仿真分析深空测控网洲际干涉测量基线对该弧段轨道解算的支持能力。

仿真考虑2条基线:“喀什-纳米比亚”基线(基线1)、“纳米比亚-阿根廷”基线(基线2)。考虑5°的高度截止角,该弧段基线1可持续跟踪时间约0.5 h,基线2可持续跟踪弧长约3 h。基于蒙特卡洛的轨道计算分析中,仅解算航天器位置、速度等6个参数,动力学模型考虑 $\pm 10\%$ 的太阳光压摄动误差。融合地基UXB数据与上述干涉基线数据,不同干涉时延仿真误差条件下定轨位置、速度偏差如表4所示。

由表4可以看出:①该弧段干涉测量数据对定轨解算的贡献非常显著。与单独UXB数据定轨结果相

比,基线1约0.5 h干涉测量+UXB可以将定轨精度提升近30%,基线2~3 h干涉测量+UXB可以将定轨精度提升近60%,基线1约0.5 h干涉测量+基线2约3 h干涉测量+UXB融合可以将定轨精度提升80%;②1 ns的系统误差对应的位置偏差大约仅为30~40 m,体现了超长基线干涉测量对测量精度的容忍性;③干涉随机误差对轨道偏差影响较小。因此,深空测控网洲际干涉测量预期能够显著提升探测器定轨精度,支持探测器轨道快速解算。

表4 不同测量误差条件下的轨道解算精度

Table 4 Accuracy of orbit determination with different measurement errors

干涉时延仿真误差		基线1		基线2		基线1+基线2	
系统差/ns	随机差/ms	位置偏差/m	速度偏差/(m·s <sup>-1</sup> )	位置偏差/m	速度偏差/(m·s <sup>-1</sup> )	位置偏差/m	速度偏差/(m·s <sup>-1</sup> )
1	1	1 262.9	0.061 0	601.39	0.018 8	176.35	0.006 0
1	2	1 288.2	0.061 5	601.84	0.018 3	194.01	0.006 6
2	1	1 282.5	0.061 8	624.23	0.019 1	229.46	0.007 6
2	2	1 220.1	0.059 5	624.21	0.021 2	250.10	0.008 4
3	1	1 301.9	0.063 4	647.90	0.021 4	275.25	0.009 9
3	2	1 338.6	0.061 4	648.08	0.023 1	299.97	0.009 9

## 5 深空干涉测量定轨性能验证

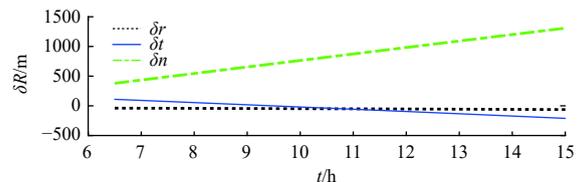
“嫦娥五号”探测器第2次中途修正陀螺标定后、第3次中途修正前,国内测站均已出站,探测器测量数据仅有阿根廷深空站UXB数据和“纳米比亚-阿根廷”干涉测量数据。为评估洲际干涉测量定轨性能,以事后精密轨道为基准轨道,采用两种方式解算探测器轨道根数并给出定轨残差。

方式1:“纳米比亚-阿根廷”基线干涉测量数据配合阿根廷深空站UXB数据联合定轨;

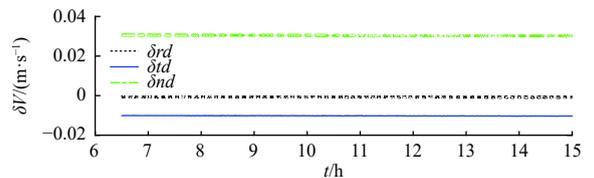
方式2:“纳米比亚-阿根廷”基线干涉测量数据配合阿根廷深空站UXB数据+CVN数据(陀螺标定结束前数据,需解陀螺标定的经验力模型)。

### 5.1 深空干涉测量+UXB

对第2次中途修正陀螺标定后弧段进行轨道解算。如果仅利用该弧段阿根廷深空站UXB数据,轨道无法收敛;如果联合利用阿根廷深空站UXB数据和“纳米比亚-阿根廷”基线干涉测量数据,轨道收敛。由此表明该弧段干涉测量数据对探测器轨道快速解算具有支撑性作用。而且轨道解算结果显示,能够实现位置1.5 km、速度0.03 m/s的定轨精度,如图13所示。



(a) 轨道RTN方向位置偏差(2020-11-27)



(b) 轨道RTN方向速度偏差(2020-11-27)

图13 联合阿根廷深空站UXB数据和“纳米比亚-阿根廷”干涉测量数据的定轨精度

Fig. 13 Accuracy of orbit determination with AG UXB data and “NM-AG” interferometric data

### 5.2 深空干涉测量+UXB+CVN

通过对陀螺标定进行经验力建模,陀螺标定结束前的测量数据依然可以参与定轨。因此本节分析阿根廷深空站UXB数据、“纳米比亚-阿根廷”基线干涉测量数据、陀螺标定结束前的CVN数据等参与轨道解算的性能。

#### 5.2.1 无“纳米比亚-阿根廷”基线干涉测量数据

利用阿根廷深空站UXB数据和CVN数据进行轨道解算。与基准轨道比较，定轨残差如图14所示。

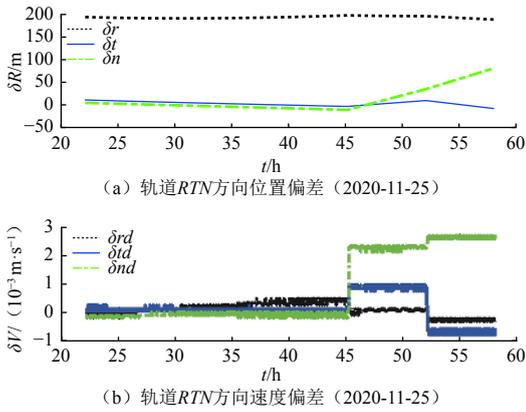


图 14 利用阿根廷深空站UXB数据和CVN数据的定轨残差  
Fig. 14 Accuracy of orbit determination with AG UXB data and CVN interferometric data

5.2.2 利用“纳米比亚-阿根廷”基线干涉测量数据

联合利用阿根廷深空站UXB数据、“纳米比亚-阿根廷”基线干涉测量数据、陀螺标定结束前的CVN数据，对探测器轨道进行解算。与基准轨道比较，定轨残差如图15所示。

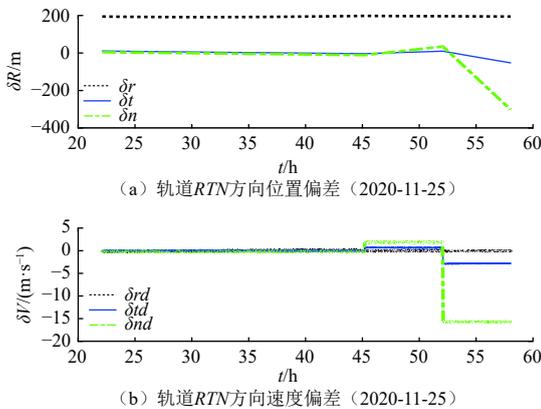


图 15 联合“纳米比亚-阿根廷”干涉测量数据、阿根廷深空站UXB数据和CVN数据的定轨残差  
Fig. 15 Accuracy of orbit determination with “NM-AG” interferometric data, AG UXB data and “NM-AG” interferometric data

对有无“纳米比亚-阿根廷”基线干涉测量数据参加的定轨结果进行统计，如表5所示。可以看出，“纳米比亚-阿根廷”基线参与定轨后，探测器轨道的T和N方向位置速度精度得到明显提高。根据地月转移第3次修正前轨道计算内符合结果显示，T和N方向位置精度分别优化79%、73%。

表 5 三修前“纳米比亚-阿根廷”干涉数据定轨残差对比

Table 5 Comparison of orbit determination with/without NM-AG interferometric data before the third orbital correction

干涉	dR	dT	dN	dPos	dVr	dVt	dVn	dVel
无	198.16	52.45	301.90	362.88	0.0003	0.003	0.016	0.016
有	197.99	10.94	80.62	205.51	0.0004	0.0008	0.002	0.002

6 结论

深空测控网干涉测量具有干涉基线长、测角约束强等特点，对深空探测器轨道测定具有重要作用。其洲际干涉测量与CVN具有弧段互补等特点，对探测器国土外弧段轨道解算具有支撑作用。基于数值仿真与“嫦娥五号”任务实测，实现了分时跟踪干涉测量，开展了对流层时延混合建模研究与应用，验证了深空测控网洲际干涉测量对“嫦娥五号”探测器轨道快速解算具有重要应用价值。后续将进一步提升测量精度、挖掘潜能譬如跨太平洋干涉测量能力，对未来探月任务、更远距离的深空探测任务中轨道测定提供重要的支撑作用。

参 考 文 献

[1] 董光亮,李海涛,郝万宏,等. 中国深空测控系统建设与技术发展[J]. 深空探测学报(中英文),2018,5(2):99-114.  
DONG G L, LI H T, HAO W H, et al. Development and future of China's deep space TT&C system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(2): 99-114.

[2] 洪晓瑜. VLBI技术的发展和“嫦娥工程”中的应用[J]. 自然杂志, 2007, 29(5): 297-299.  
HONG X Y. VLBI techniques and application in the Chang'e lunar orbiter[J]. Chinese Journal of Nature, 2007, 29(5): 297-299.

[3] 蒋栋荣,洪晓瑜. 甚长基线干涉测量技术在深空导航中的应用[J]. 科学, 2008, 60(1): 10-14.  
JIANG D R, HONG X Y. VLBI for deep-space navigation[J]. Science, 2008, 60(1): 10-14.

[4] 王宏,董光亮,胡小工,等. USB-VLBI综合快速确定环月飞行器短弧轨道[J]. 测绘科学技术学报, 2007, 24(2): 100-103.  
WANG H, DONG G L, HU X G, et al. Joint short arc orbit determination of lunar satellite with USB-VLBI[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2007, 24(2): 100-103.

[5] 钱志瀚,李金岭. 甚长基线干涉测量技术在深空探测中的应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2012.

[6] 刘庆会,吴亚军. 高精度VLBI技术在深空探测中的应用[J]. 深空探测学报(中英文), 2015, 2(3): 208-212.  
LIU Q H, WU Y J. Application of high precision VLBI technology in deep space exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2015, 2(3): 208-212.

[7] 王广利,洪晓瑜,刘庆会,等. “嫦娥4号”高精度VLBI测轨技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(4): 332-339.  
WANG G L, HONG X Y, LIU Q H, et al. High-precision VLBI orbit measurement technology in the Chang'E-4 mission[J]. Journal of Deep

- Space Exploration, 2020, 7(4): 332-339.
- [8] 郑为民, 张娟, 徐志骏, 等. 实时VLBI处理机技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(4): 354-361.  
ZHENG W M, ZHANG J, XU Z J, et al. Real-time correlator technologies of VLBI[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(4): 354-361.
- [9] 吴伟仁, 李海涛, 李赞, 等. 中国深空测控网现状与展望[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 87-108.  
WU W R, LI H T, LI Z, et al. Status and prospect of China's deep space TT&C network[J]. Scientia Sinica(Informationis), 2020, 50: 87-108.
- [10] 任天鹏, 唐歌实, 曹建峰, 等. 实时干涉测量中对流层延迟与钟差精修正建模[J]. 载人航天, 2016, 22(4): 483-487, 493.  
REN T P, TANG G S, CAO J F, et al. Correction modeling of tropospheric delay and clock error in real-time interferometry[J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(4): 483-487, 493.
- [11] HOPFIELD H S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1969, 74(18): 4487-4499.
- [12] SAASTAMOINEN J H. Atmospheric correction for the troposphere and the stratosphere in radio ranging satellites[J]. Use of Artificial Satellites for Geodesy, 1972, 1: 15.
- [13] PENNA N, DODSON A, CHEN W. Assessment of EGNOS tropospheric correction model[J]. Journal of Navigation, 2001, 54(1): 37-55.
- [14] NIELL A E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1996, 101(B2): 3227-3246.
- [15] BOEHM J, KOUBA J, SCHUH H. Forecast vienna mapping functions 1 for real-time analysis of space geodetic observations[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(5): 397-401.
- [16] BOEHM J, NIELL A, TREGONING P, et al. Global Mapping Function (GMF): a new empirical mapping function based on numerical weather model data[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(7): L37304, 1-4.
- [17] 路伟涛, 谢剑锋, 韩松涛, 等. 深空站区域对流层延迟模型构建及在嫦娥四号中的应用[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(11): 1286-1294  
LU W T, XIE J F, HAN S T, et al. Construction of regional tropospheric delay model in deep space station and its application in Chang'E-4 mission[J]. Scientia Sinica Technologica. 2019, 49(11): 1286-1294.
- [18] 任天鹏, 唐歌实, 史珍威, 等. 一种高精度区域对流层延迟模型及验证[J]. 遥测遥控, 2016, 37(2): 29-35.  
REN T P, TANG G S, SHI Z W, et al. A high-accuracy regional tropospheric delay model and its verification[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2016, 37(2): 29-35.

作者简介:

**任天鹏**(1982-), 男, 助理研究员, 主要研究方向: 无线电干涉测量数据处理与误差建模。

通讯地址: 北京市海淀区北清路26号(100094)

电话: (010)66365901

E-mail: tpren@nudt.edu.cn

**谢剑锋**(1972-), 男, 研究员, 主要研究方向: 航天测控总体、轨道控制。**本文通讯作者。**

通讯地址: 北京市海淀区北清路26号(100094)

电话: (010)66363006

E-mail: xiejianfeng@bacc.org.cn

## Performance Analysis of Deep-Space Interferometry in Chang'E-5 Mission

REN Tianpeng<sup>1,2</sup>, LU Weitao<sup>1,2</sup>, KONG Jing<sup>1,2</sup>, XIE Jianfeng<sup>1,2</sup>, HAN Songtao<sup>1,2</sup>, WANG Mei<sup>1,2</sup>,  
MAN Haijun<sup>1,2</sup>, NIU Dongwen<sup>1,2</sup>, LIU Heshan<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhijin<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China;

2. Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics, Beijing 100094, China)

**Abstract:** China's deep space interferometry system has participated in orbit measurement for the Chang'E-5 mission officially, which has provided high-precision angular position information. The tropospheric delay hybrid model was proposed to ensure the accuracy of real-time interferometry. Using the non-continuous tracking technology, fast intercontinental interferometry was carried out for the first time, which provided high-precision angular position with the advantage of baseline length. The performance was evaluated based on the orbit measurement results of Chang'E-5 probe. These results show that the deep-space interferometry system has played an important role in the fast orbit determination.

**Keywords:** VLBI; China deep-space interferometry; Chang'E-5; orbit measurement

### Highlights:

- The intercontinental interferometry baselines of the deep-space TT&C network make up for the blank of the original interferometry.
- In Chang'E-5 mission, deep-space interferometry system is applied to the orbit measurement officially.
- The non-continuous tracking technology can be applied to the fast intercontinental interferometry.
- The tropospheric delay hybrid model is a new method to improve the accuracy with a low elevation angle greatly, which has been used in the real-time interferometry.
- Results show that deep-space interferometry system has played an important role in the fast orbit determination.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]