

中图法分类号: V556 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2025)09-2943-08

论文引用格式: Sun J, Chen L, Lu W T, Zhang Y J, Kong J and Han S T. 2025. Space-ground coordinated monitoring scheme for near-lunar spacecraft based on radio passive sensing. Journal of Image and Graphics, 30(9):2943-2950(孙军, 陈略, 路伟涛, 张雨佳, 孔静, 韩松涛. 2025. 基于无线电被动感知的近月空间航天器天地基监测方案设计. 中国图象图形学报, 30(9):2943-2950)[DOI:10.11834/jig.250143]

基于无线电被动感知的近月空间航天器 天地基监测方案设计

孙军, 陈略*, 路伟涛, 张雨佳, 孔静, 韩松涛

1. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094; 2. 航天飞行动力学技术国家级重点实验室, 北京 100094

摘要: **目的** 针对地月距离上航天器监测手段地基光学与雷达作用限制, 提出一种基于无线电被动感知技术的近月空间航天器天地基联合监测方案, 无需主动发射无线电信号, 仅利用在轨航天器发送的下行无线电信号实现目标监测。 **方法** 首先, 介绍了无线电被动感知技术的理论方法; 然后, 设计了一种适用于近月空间航天器的天基、地基与天地基协同监测方案, 包括系统架构、工作流程, 分析了传感器布局、目标引导、信号接收、TDOA (time difference of arrival)/FDOA (frequency difference of arrival) 处理、误差修正、目标定轨与预报等关键技术; 最后, 通过近月空间在轨航天器无线电被动感知监测实验进行初步验证。 **结果** 利用所提方案开展了基于地基测站的近月空间在轨航天器监测实验, 有效监测到目标下行信号与多普勒变化运动规律, 初步验证了监测方案可行性。 **结论** 提出的基于无线电被动感知的近月空间航天器天地基监测方案, 可为后续近月空间航天器监测系统设计与实现提供有益的技术参考。

关键词: 近月空间; 航天器; 下行信号; 无线电被动感知; 监测实验

Space-ground coordinated monitoring scheme for near-lunar spacecraft based on radio passive sensing

Sun Jun, Chen Lue*, Lu Weitao, Zhang Yujia, Kong Jing, Han Songtao

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

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

Abstract: **Objective** Aiming at the limitations of ground-based optical and radar systems for spacecraft monitoring at the distance between Earth and the Moon, this study proposes a joint space-ground-based monitoring program for near-lunar spacecraft based on radio passive sensing technology, which does not need to actively transmit radio signals but only utilizes downlinked radio signals sent by the spacecraft in orbit to realize target monitoring. **Method** First, the theoretical method of radio passive sensing technology is introduced, which uses every two sensors to form a measurement baseline to measure the time delay and frequency difference observation of the target by time difference of arrival (TDOA) and frequency difference of arrival (FDOA) methods. Then, three monitoring programs of space-, ground-, and space-ground-based synergy applicable to near-lunar spacecraft are designed. The space-based monitoring scheme mainly realizes passive monitoring of near-lunar spacecraft by deploying multiple space-based sensors at the first cislunar Lagrange point

收稿日期: 2025-03-31; 修回日期: 2025-06-02; 预印本日期: 2025-06-09

* 通信作者: 陈略 chenlue@bao.ac.cn

基金项目: 空间碎片与近地小行星防御科研专项 (KJSP2023020104)

Supported by: Scientific Research Project on Space Debris and Near-Earth Asteroid Defense (KJSP2023020104)

and forming a measurement baseline between two sensors. The structure of the space-based monitoring system is preliminarily designed; it contains five subsystems, namely, parabolic observation antenna subsystem, time and frequency reference subsystem, RF link and downconversion subsystem, signal sampling and recording subsystem, and high-speed communication to Earth subsystem. The workflow of the space-based monitoring system is also preliminarily analyzed and designed as follows: 1) the parabolic antenna of space sensors, in accordance with the guidance file, is aligned with the lunar spacecraft target and receives its downlink RF signals. 2) The downlink RF signal is amplified, filtered, and converted into an intermediate frequency signal by the on-board downconversion system. 3) The intermediate frequency signal is collected and recorded by the on-board signal sampling and recording subsystem and converted into a digital signal. 4) The digital signal of the tracked target is sent to the ground station through the high-speed communication to Earth subsystem. 5) After the digital signals from two or more space sensors are gathered at the ground station, the signal processing center completes the generation of TDOA and FDOA observations of lunar spacecraft targets and the orbit determination of lunar spacecraft. In the workflow design of this space-based monitoring system, the application scenario in which a single space-based sensor completes the radio detection processing for a near-lunar space target is not considered, while the signal processing analysis of the space-based monitoring system is completed through the ground-based signal processing center. The sensors of the ground-based monitoring program are deployed on Earth's surface, and the radio monitoring of near-lunar spacecraft is carried out in a mode similar to that of the traditional joint observation of VLBI stations. In the space-ground-based cooperative monitoring program, the sensors are deployed at the first cislunar space Lagrange point and on Earth's surface, forming a joint space-ground-based measurement baseline to realize the joint tracking of the near-lunar spacecraft. Then, the ground signal processing center obtains the observation quantities of the time delay and frequency difference of the target spacecraft, thus realizing the orbit determination of the target. Subsequently, the key technologies involved in the design of the near-lunar spacecraft monitoring program are analyzed, specifically including the key technologies of sensor layout, target guidance, signal reception, TDOA/FDOA processing, error correction, and target orbiting and forecasting. **Result** Radio passive sensing monitoring test of near-lunar spacecraft in orbit is carried out, and a ground-based deep-space antenna is used to monitor spacecraft. The signal of an unknown lunar spacecraft that randomly enters into the range of the main flap of the deep-space antenna is successfully monitored, and spectrum analysis and frequency monitoring are carried out. The frequency result from signal measurement shows a periodic pattern, which is exactly half a cycle (1 h), during the observation time. This study infers that the Doppler frequency change period generated by the spacecraft's ground motion is 2 h, which corresponds precisely to the Doppler frequency change period of a typical circumlunar probe relative to a ground-based station. Through the above experiments, the Doppler variation motion pattern of the target is grasped, and the feasibility of the monitoring scheme proposed in this paper is preliminarily verified. **Conclusion** Effective radio monitoring of near-lunar spacecraft can be realized through multiple space-ground-based antennas covering the near-lunar range in accordance with the antenna beam range. The commonly used measurement and control frequency coverage of S/X can be set to realize the determination of their orbits and facilitate the safe operation of near-lunar spacecraft. The space-based monitoring program for near-lunar spacecraft based on radio passive sensing proposed in this paper can provide useful technical references for the design and realization of subsequent near-lunar spacecraft monitoring systems.

Key words: near-lunar space; spacecraft; downlink signal; radio passive sensing; monitoring experiment

0 引言

近年来,月球探测日益成为太空探索的焦点,随着中国、美国、印度、日本等国月球探测活动的加速部署,越来越多月球航天器在轨运行工作,近月空间(包含:环月轨道、月球表面,隶属于地月空间)越发拥挤,存在多目标共存、轨道交叠与电磁频谱混叠等

现象,近月空间航天器监测需求日益增强。例如,2022年8月,韩国开始了其首次月球探测任务,发射了韩国探路者月球轨道器(Korean pathfinder lunar orbiter, KPLO)航天器。2022年11月,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射了阿尔忒弥斯I号探测器,作为其新的月球门户计划的先锋。2023年7月,印度也通过在发射其第3次月球探测器月船3号,成功实现月

面软着陆,继续其雄心勃勃的探月计划。与此同时,中国的嫦娥4号、5号、6号月球探测及采样返回活动分别在2018、2020与2024年实施(曹建峰等,2020;陈略等,2023;刘召芹等,2024)。2025年3月,美国隶属于阿尔忒弥斯计划的“蓝色幽灵号”、“雅典娜号”商业月球探测器分别实现月球软着陆,开展月面GNSS(global navigation satellite system)导航定位、月球南极水冰等科学探测活动。近月空间中的航天器操作安全运行(碰撞规避)和规划至关重要(Crum和Gunter,2023)。在国际上,针对近月空间航天器监测是一个重要方向,这是源于月球周围的轨道空间正迅速成为发展热点,准确监测这些航天器可降低未来近月空间碰撞风险。随着环月轨道空间会越来越拥挤,对近月空间航天器轨道进行监测在未来将变得非常重要。然而,传统太空航天器监测系统并未设计用于探测、跟踪和编目在地月空间的太空物体,于是在国际上催生了一个针对地月航天器测定轨的新学科(Furfaro等,2021),其基本目标是基于地基和专用天基平台的协同,建立并维护一个在地月空间中过渡与驻留的太空目标编目。目前,包含近月空间的地月空间中的大多数航天活动都未受到监控,仅靠负责航天器的运管机构进行自我通报。

传统针对近地空间目标监测,通常采用的监测手段主要包含地基雷达与光学测量(Ender等,2011;王程等,2021;Siew和Linares,2022;徐江涛等,2023)。然而,在近月空间中探测与跟踪航天器证明是非常困难的,尤其是对于月球附近目标的光学测量,这是因为近月航天器在光学波长下通常显得非常微弱,且因为近月航天器与月球的角距较近,受到月球表面的眩光和反射的影响,光学观测与识别近月航天器将变得异常困难(Crum和Gunter,2023)。传统地基雷达手段,受到雷达发射功率限制,很难针对近月航天器采用地基雷达方式对其进行有效监测。因此,非常有必要研究新的体制架构予以实现近月航天器监测。

无线电被动传感是一种被动跟踪方式(Peters等,2023),是针对目标航天器发出的下行无线电信号进行检测以实现目标运动监测的技术。无线电被动传感与雷达工作原理不同,无线电被动传感,仅接收来自目标航天器发出的下行无线电信号,不需要地面主动发送射频信号,就能进行对目标航天器的有效观测。基于无线电被动传感方法实现对近月

空间航天器进行监测,具有多种技术优势,表现为:不受天气影响,可全天候观测;天、地基观测的观测覆盖面大;可获得目标高精度的角位置和速度信息,从而实现对目标的精密轨道确定。无线电被动传感技术已被证明为近地空间航天器安全运行提供稳健的态势感知信息(Waggoner等,2023),预计也可在地月空间航天器安全运行监测方面发挥良好的应用效益。无线电被动传感并非是一项全新的技术,多个国家进行了相关的地月监测试验,例如,美国亚利桑那大学(Furfaro等,2021;Joyce等,2023)仅用S频段直径0.6 m的抛物面反射天线就成功监测阿尔忒弥斯1、韩国KPLO(探路者月球轨道器)、中国月球中继星、印度月球2号、中国嫦娥5号等月球探测器,并对这些目标进行有效定轨;又如,法国赛峰数据系统公司利用无线电被动传感技术实现了对美国月球勘察轨道器(lunar reconnaissance orbiter, LRO) 150 m的测定轨精度(Thevenot等,2024)。但目前国际上尚未存在经过体系化设计与运用于月球航天器监测的无线电被动感知系统,且尚未有基于天基平台的月球航天器无线电监测系统。因此,设计基于无线电被动传感的近月空间航天器天地基联合监测方案,以克服传统地基光学与雷达系统使用局限性,与之形成互补,可为未来近月航天器安全运行监控系统建设提供有益参考。

1 无线电被动传感技术原理

针对近月空间航天器,可采用到达时间差(time difference of arrival, TDOA)与到达频率差(frequency difference of arrival, FDOA)技术手段对其进行测量(Waggoner等,2023),进而实现精确轨道确定,对其飞行状态和轨道进行监测。TDOA是一种测量同一发射源信号到达两个或多个彼此分离传感器(也称接收机)的时间差技术。时间差也可称为时间延迟,简称时延。值得说明的是,TDOA技术与甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)技术的测量原理一致,均是时间差的测量,但在所需硬件条件、部署范围、误差影响和应用背景上存在差异。本文采用TDOA技术思路进行方案设计。TDOA传感器既可采用地基模式,又可采用天基模式。采用TDOA技术的时延与信号发射源、传感器的相对位置直接相关,并与无线电信号的传播

速度或光速成反比。假设信号发射源相对于传感器的空间位置矢量为 ρ_i , i 为传感器的计数, 则TDOA观测量函数式(Crum和Gunter, 2023)为

$$G_{\text{TDOA}} = \tau = \frac{1}{c} (|\rho_2| - |\rho_1|) \quad (1)$$

式中, G_{TDOA} 为群时延, c 为光速, τ 为时延。TDOA观测量获取, 可通过信号时域互相关的方式获得, 也可通过VLBI相关处理方式获得(韩松涛等, 2015)。TDOA观测量对应信号发射器相对于传感器的空间角位置信息。

FDOA测量的是从发射源信号到达两个或多个彼此分离传感器的频率差。这种到达频率差是由发射信号对每个接收器的不同多普勒频移引起的。FDOA与每个传感器相对于信号发射器的相对径向速度或距离变化率之间的差异直接相关。FDOA观测量函数式(Crum和Gunter, 2023)为

$$G_{\text{FDOA}} = \Delta f = \frac{f_0}{c} \left(\left(\frac{\rho_2}{|\rho_2|} \right)^T (v_e - v_2) - \left(\frac{\rho_1}{|\rho_1|} \right)^T (v_e - v_1) \right) \quad (2)$$

式中, G_{FDOA} 为到达频率差, Δf 为频差, f_0 为信号发射器的载波频率, v_e 为信号发射器的速度矢量, v_1 为第1个传感器的速度矢量, v_2 为第2个传感器的速度矢量。FDOA观测量获取, 可通过信号开环测量处理方式获得(Chen等, 2021, 2024)。FDOA观测量对应信号发射器相对于传感器的速度信息。

2 近月空间航天器监测方案设计

基于无线电被动传感技术的近月空间航天器监测, 可采用天基监测、地基监测与天地基协同监测方案。相较于传统地基监测方案, 天基监测方案尚未实施, 具有新颖性, 本文予以重点介绍。

2.1 天基监测方案

天基监测方案采用将两个或多个空间传感器送入环绕第一地月空间拉格朗日点(the first Lagrange, L1)的轨道, 其目标是截获来自近月空间目标航天器的下行无线电信号, 用以确定近月空间航天器的位置和速度。地月L1点是地球和月球之间的一个引力平衡点, 在地月L1点附近, 航天器可以保持相对于地球、月球这两个天体的稳定位置, 仅需较小能量来维持这种稳定轨道状态。一方面, L1点为地球

与月球之间的通信提供了一个绝佳的空间位置; 另一方面, 在L1点部署具备信号接收能力的空间传感器, 可有效对来自近月航天器下行信号进行测量, 对近月空间目标航天器进行TDOA与FDOA测量。因此, 地月L1点又称为地球至月球空间的“通信门”。

在讨论地球至月球空间通信门时, 首先需对空间传感器位置的区域进行探讨。两个或多个空间传感器的部署区域, 是垂直于地球与月球之间向量平面上的一个圆盘轨道面, 该轨道面位于地月L1点附近。为了计算这个圆盘轨道面的大小(用半径表示)和位置, 应用以下二维简化方法, 如图1所示(Crum, 2023)。图1为地月“通信门”直径二维可视化示意图。基于这种简化, 通过基本的几何分析, 可以确定以下近似表达式, 来计算地月“通信门”圆盘轨道面的直径, 该直径表示为“ W ”。图1中, L1和L2分别表示地月拉格朗日1点和拉格朗日2点, $a_{\max}$ 为在地月L1点部署无源射频空间传感器时, 能监测到月球空间航天器距离月球质心的最大距离。 θ 为地球质心、月球航天器、地月L1点“通信门”最大直径处空间传感器三者之间的夹角。 D 为地月L1点“通信门”圆盘相对于月球质心的距离。根据测算, $a_{\max}$ 最大取值为14 000 km(Crum和Gunter, 2023)。

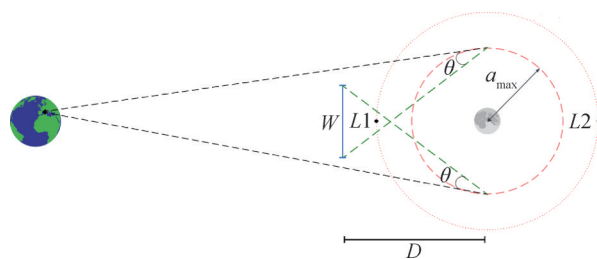


图1 地月通信门直径二维可视化示意图

Fig. 1 Two-dimensional visualization schematic of the diameter of the Earth-Moon communication gate

地月L1点“通信门”圆盘轨道面的最大半径可通过下式实现(Crum和Gunter, 2023), 具体为

$$\frac{W}{2} = \left(D - \left(a_{\max} \tan \left(\pi - \left(\tan^{-1} \frac{a_{\max}}{L_{\text{lunar}}} \right) - \theta \right) \tan \left(\theta + \left(\tan^{-1} \frac{a_{\max}}{L_{\text{lunar}}} \right) \right) \right) \right) \quad (3)$$

式中, L_{lunar} 为地球质心至月球质心距离。

在地月L1点“通信门”圆盘轨道面部署空间传

传感器的示意图如图 2 所示,图中显示了部署 3 个空间传感器的示意图,每一个空间传感器均具备接收来自近月空间航天器下行无线电信号能力。

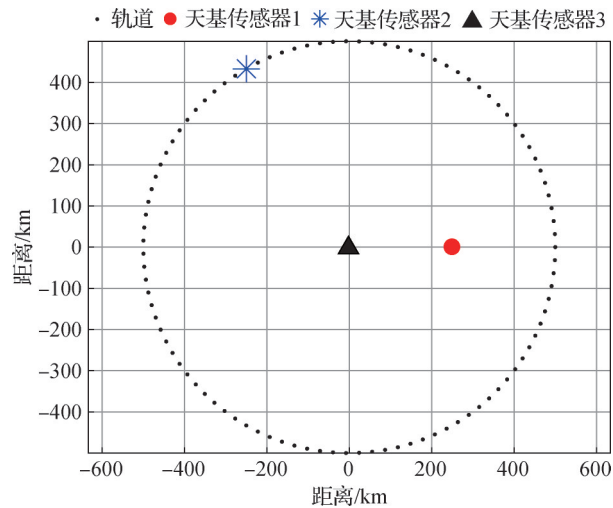


图 2 地月 L1 点“通信门”处的空间传感器位置示意图
Fig. 2 Schematic of the location of space sensors at the “communication gate” at the Earth-Moon L1 point

1) 系统结构设计。对无源射频空间传感器系统,即天基监测系统,进行简要结构设计。空间传感器应部署于在轨航天器平台上,图 3 仅列出空间传感器系统的组成部分,具体包含:(1)抛物线观测天线子系统;(2)时间与频率基准子系统;(3)射频链路与下变频器子系统;(4)信号采集与记录子系统;(5)对地高速通信子系统。根据具体的应用场景,对每个子系统需进行相应的指标体系与接口设计,例如抛物面天线口径、馈源频段、空间原子钟稳定性、下变频频率与带宽、信号采集与记录子系统的通道带宽与量化位数、对地通信速率等。限于篇幅,本文不详细展开论述。

2) 工作流程设计。天基无线电被动传感系统工

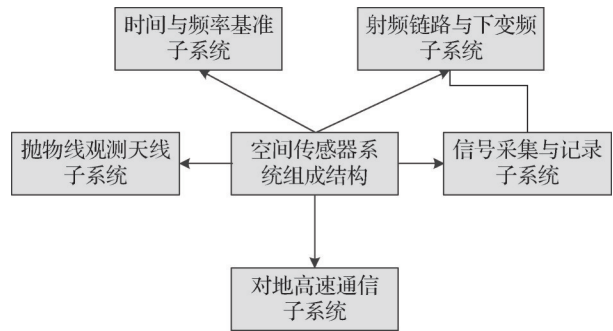


图 3 天基无源射频空间传感器系统结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the structure of a space-based passive radio-frequency space sensor system

作的流程简述如下:首先,位于空间传感器的抛物面天线按照引导文件,对准月球航天器目标,接收其下行射频信号;然后,下行无线电信号经过放大与滤波后,经星载下变频系统进行下变频,将下行射频信号转换为中频信号;接着,利用星载信号采集与记录子系统,对中频信号进行采集与记录,转化为数字信号;接着,通过对地高速通信系统,将跟踪目标的数字信号发送给地面测站;最后,地面测站汇集两个或多个空间传感器的数字信号后,在信号处理中心完成对月球航天器目标的 TDOA 和 FDOA 观测量生成,并对月球空间航天器进行轨道确定。本方案设计中,暂未考虑单个天基传感器完成针对近月空间目标进行无线电侦测处理的应用场景。至此,通过以上天基监测方案概要设计,阐述其结构组成与工作流程,为后续详细化地系统设计与实现提供技术思路。

2.2 地基监测方案

相较于天基监测方案,地基监测方案最大区别点在于无线电被动传感器位于地面测站,且地基传感器的天线口径可扩展从亚米至几十米(Liu 等, 2024),地基无线电被动传感器可全球分布,示意图如图 4 所示,进而实现对近月空间航天器下行信号有效监测,可同样有效获取 TDOA 和 FDOA 观测量,实现对目标的轨道确定。通常认为地基监测方案已较为成熟。

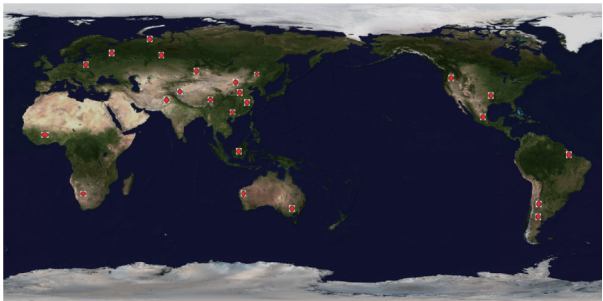


图 4 地基无线电被动传感器位置布设示意图
Fig. 4 Schematic layout of foundation radio passive sensor locations

2.3 天地基协同监测方案

相较于天基、地基监测方案,天地基协同监测方案最大区别点在于无线电被动传感器一端位于地基平台、另一端位于天基平台,协同完成 TDOA/FDOA 观测量获取,其示意图如图 5 所示。

2.4 关键技术分析

为有效实现基于无线电被动传感技术的近月空间航天器测量,以下关键技术需要重点考虑。

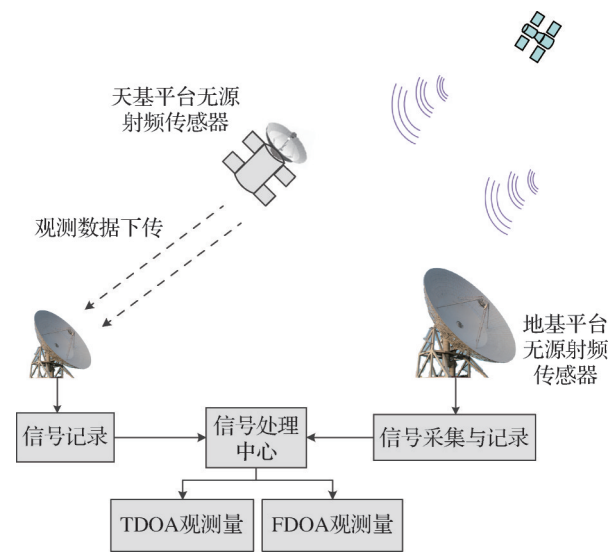


图5 天地基无线电被动传感示意图
Fig. 5 Schematic of space-based radio passive sensing

1)基于几何精度因子(geometric dilution of precision, GDOP)最佳估计的无线电被动传感器布局设计。考虑针对月球空间航天器的无线电被动传感覆盖性、轨道约束性以及传感器数量等限制,基于GDOP最佳估计方法,实现对无线电被动传感器天地基布局优化设计。

2)近月空间航天器初始轨道确定与目标引导。利用轨道先验预报信息,或利用先验观测量对所关注的近月空间航天器进行初始轨道确定与预报,生成天基、地基无线电被动传感器天线的目标跟踪引导文件,为天地基传感器提供初始的目标引导信息。

3)近月空间航天器下行信号接收与频点确认。利用天基、地基无线电被动传感器,对近月空间航天器下行信号进行扫描接收,通过频谱分析方法,实现对目标的下行载波或副载波频点确定。

4)高精度TDOA/FDOA信号处理。采用先进的TDOA/FDOA信号处理与误差修正方法,实现对无线电被动传感器获取的近月空间航天器下行信号进行处理分析,获取TDOA/FDOA观测量。

5)观测量误差修正。经信号处理后获取的观测量需经过误差修正后方能用以对目标定轨。误差修正需要考虑的因素包括:多传感器之间的时间同步误差、信号传播介质误差、各自传感器硬件链路误差以及各传感器位置误差等。经相应误差修正后,获取TDOA/FDOA最终观测量。其中,两传感器组成测量基线的时间同步误差需重点考虑,一方面可通过安装GNSS接收机接收GNSS信号实现时钟钟差

校正,另一方面,如果天基传感器天线口径较大,可通过观测河外射电源方式消除传感器间的时钟钟差,实现时间同步修正。

6)基于TDOA/FDOA的近月空间航天器高精度定轨与预报。基于TDOA/FDOA观测量与动力学模型,采用与之匹配的航天器定轨方法,实现近月空间航天器高精度轨道确定与预报。

3 近月空间在轨航天器无线电监测实验

基于地基深空天线可实现对近月空间航天器的跟踪测量。北京时间2025年3月2日,基于中国深空网喀什深空天线,对月表某着陆器进行例行跟踪测量,并通过深空天线端配备的VLBI采集记录设备,对该着陆器下行信号进行采集记录,采集记录格式为标准的VLBI科学接收机(VLBI science receiver, VSR)格式,信号采样带宽为200 kHz,量化位数为8比特,同时设置多个不同的中心频率通道,对该着陆器附近频点和位置区域的信号进行监测。经处理分析该信号,获得其频谱结构如图6所示,可以看出其信号是一个标准的正交相移键控(quadrature phase shift keying, QPSK)调制信号,用于月地数据通信传输。

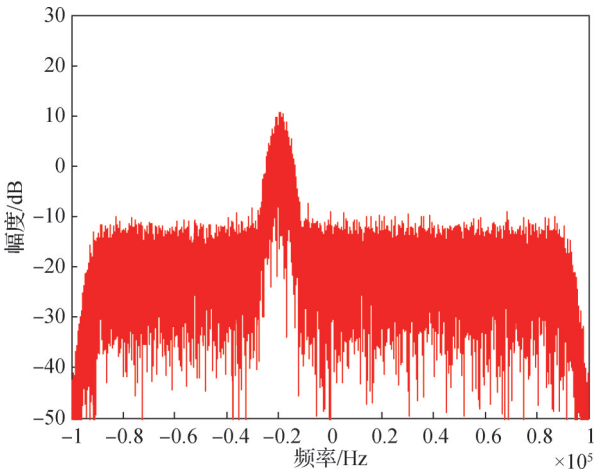


图6 某月球着陆器频谱图
Fig. 6 Frequency spectrum of a lunar lander amplitude

在该次跟踪过程中,在另一通道,却偶然发现了一个明显的航天器下行信号,且持续时间较长,经处理分析其频谱如图7所示,可以看出该信号是一个较明显的载波信号,其载噪比约为25 dB/Hz。因为

在该次跟踪过程中,喀什深空天线始终以月表的某着陆器为目标进行引导与跟踪,于是初步判断某月球非未知航天器的下行信号进入了喀什深空天线的主波束范围内,其下行信号被同步采集记录。

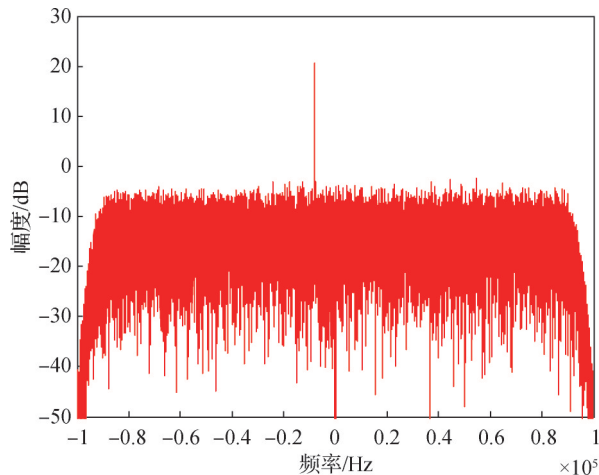


图7 随机进入深空天线主瓣范围内的某月球航天器频谱
Fig. 7 Frequency spectrum of a lunar spacecraft randomly entering the main flap range of a deep space antenna

为了进一步评估分析该异常出现的信号,对该信号进行开环测量处理(Chen等,2021),获取该信号的载波频率结果如图8所示。从开环测量结果可以看出,该信号的中心频率约为2 260.75 MHz,测量频率结果呈现出周期规律,在观测时间内恰为半个周期(1 h),推断该航天器对地运动所产生的多普勒频率变化周期为2 h,这正好对应典型的环月探测器相对于地基测站的多普勒频率变化周期,因此判断

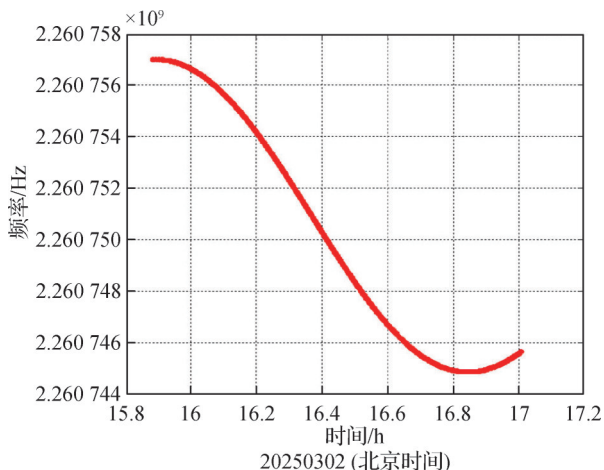


图8 随机进入深空天线主瓣范围内的某月球航天器载波频率测量结果

Fig. 8 Carrier frequency measurements of a lunar spacecraft randomly entering the main flap range of a deep space antenna

通过地基深空天线无意监测到了月球某非未知航天器信号。通过该次近月空间在轨航天器监测实验,结合第2小节所设计的方案,通过多个地基天线按照天线波束范围对近月范围进行覆盖,并设置S/X常用的测控频率覆盖,即可实现对近月空间航天器进行有效的无线电监测,以及TDOA/FDOA观测量获取,进而实现对其轨道进行确定,就能服务于近月空间航天器安全运行,初步验证了本文所设计的监测方案可行性。

4 结 论

针对月球航天器监测需求,基于无线电被动传感方法,初步设计了基于无线电被动传感的近月空间航天器监测方案,分别阐述了天基、地基以及天地基联合监测方案,重点介绍了在地月 L_1 “通信门”布设无线电被动传感器的方案,分析了无线电被动传感的近月空间航天器关键技术,并通过近月空间在轨航天器监测实验验证了方案的可行性。本文研究可为后续月球航天器碰撞规避以及交通管理系统设计与实现,提供可参考的技术方案。

致谢:本文为第27届中国科协年会学术论文,感谢中国科学技术协会的支持。

参考文献(References)

- Cao J F, Zhang Y, Chen L, Duan J F, Ju B and Li X. 2020. Orbit Determination of Chang'E-4 lander using Doppler measurement. *Journal of Astronautics*, 41(7): 920-925 (曹建峰, 张宇, 陈略, 段建峰, 鞠冰, 李颢. 2020. 利用多普勒测量确定嫦娥四号着陆器精密定轨. *宇航学报*, 41(7): 920-925 [DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2020.07.010])
- Chen L, Li H T, Fan F, Man H J, Kong J, Han Q Q, Han S T, Lu W T, Wang M and Ping J S. 2024. Method and application of high-precision open-loop velocity measurement of Tianwen-1 probe. *Space Science and Technology*, 4: #0105 [DOI: 10.34133/space.0105]
- Chen L, Li W X, Li H T, Jin H B, Kong J, Wang M, Lu W T, Yang X F and Xie J F. 2023. High-accuracy open-loop velocity measurement and gravitational redshift verification design analysis based on the Chang'E-5 probe. *Scientia Sinica Physica, Mechanica and Astronomica*, 53(3): #239610 (陈略, 李文潇, 李海涛, 金洪波, 孔静, 王美, 路伟涛, 杨小锋, 谢剑锋. 2023. 嫦娥五号探测器精细开环测速及空间引力红移验证设计分析. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 53(3): #239610 [DOI: 10.1360/SSPMA-

2022-0319]

Chen L, Ping J S, Cao J F, Liu X, Wang N, Wang Z, Zhu P, Wang M, Man H J, Fan F, Lu W T, Sun J and Han S T. 2021. Retrieving Doppler frequency via local correlation method of segmented modeling. *Remote Sensing*, 13 (14) : #2846 [DOI: 10.3390/rs13142846]

Crum S and Gunter B C. 2023. Cislunar orbit determination via intercepted communication signals//Proceedings of ASCEND 2023. Las Vegas, USA: AIAA: #4635 [DOI: 10.2514/6.2023-4635]

Ender J, Leushacke L, Brenner A and Wilden H. 2011. Radar techniques for space situational awareness//12th International Radar Symposium (IRS). Leipzig, Germany: IEEE: 21-26

Furfaro R, Reddy V, Campbell T and Gray B. 2021. Tracking objects in cislunar space: the Chang'E 5 case//Proceedings of 2021 Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Hawaii: Maui Economic Development Board: 1-7

Han S T, Tang G S, Chen L, Ren T P and Wang M. 2015. Development and application of correlator in interferometric tracking center of China DSN. *Journal of Engineering Studies*, 7(1): 45-49 (韩松涛, 唐歌实, 陈略, 任天鹏, 王美. 2015. 中国深空网 VLBI 相关处理 器开发与应用. 工程研究: 跨学科视野中的工程), 7(1): 45-49 [DOI: 10.3724/SP.J.1224.2015.00045]

Joyce T, Phipps R, Jacobson C, Campbell T, Battle A, Estévez D, Furfaro R and Reddy V. 2023. Passive RF observations of cislunar objects//Proceedings of 2023 Advanced Maui Optical and Space Surveillance (AMOS) Technologies Conference. Hawaii: Maui Economic Development Board: 1-6

Liu Q H, Shen Z Q, Hong X Y, Ye Q, Li B, Wang J Q, Zhao R B, Fu L, Zhong W Y, Wang L L, Li J, Yan Z, Jiang W and Xia B. 2024. The Tianma 65 m radio telescope at Shanghai. *Astronomical Techniques and Instruments*, 1(5): 239-246. [DOI: 10.61977/ati2024031]

Liu Z Q, Peng M, Di K C, Wan W H, Liu B, Wang Y X, Xie B, Kou Y K, Wang B, Zhao C X and Zhang Y F. 2024. High-precision visual localization of the Chang'E-6 lander. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(6): 1648-1655 (刘召芹, 彭嫚, 邸凯昌, 万文辉, 刘斌, 王晔昕, 谢彬, 寇玉珂, 王彪, 赵晨旭, 张一凡. 2024. 嫦娥六号着陆点高精度视觉定位. 遥感学报, 28(6): 1648-1655) [DOI: 10.11834/jrs.20244229]

Peters E G W, Bateman T, Saleem R, Lambert A and Brown M. 2023. Space based space surveillance using passive radio frequency observations — A feasibility study//Proceedings of 2023 Advanced Maui Optical and Space Surveillance (AMOS) Technologies Conference.

Hawaii: Maui Economic Development Board: 1-15

Siew P M and Linares R. 2022. Optimal tasking of ground-based sensors for space situational awareness using deep reinforcement learning. *Sensors*, 22(20): #7847 [DOI: 10.3390/s22207847]

Thevenot F, Guillot B and Herbinier S. 2024. Cislunar orbit determination using passive RF sensors//Proceedings of 2024 Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS). Hawaii: Maui Economic Development Board: 1-14

Waggoner K, Curtis D and Little B. 2023. Analysis of TDOA/FDOA state estimation accuracy of cislunar objects for space situational awareness//Proceedings of 2023 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, USA: IEEE: 1-11 [DOI: 10.1109/AERO55745.2023.10115697]

Wang C, Chen F, Wen D S, Lei H, Song Z X and Zhao H F. 2021. Review on imaging and data processing of visual sensing. *Journal of Image and Graphics*, 26(6): 1450-1469 (王程, 陈峰, 汶德胜, 雷浩, 宋宗玺, 赵航芳. 2021. 视觉传感成像技术与数据处理进展. 中国图象图形学报, 26(6): 1450-1469) [DOI: 10.11834/jig.200852]

Xu J T, Wang X Y, Wang T D, Chen X, Song Z X, Lei H, Liu G and Wen D S. 2023. Review on optical visual sensor technology. *Journal of Image and Graphics*, 28(6): 1630-1661 (徐江涛, 王欣洋, 王廷栋, 陈忻, 宋宗玺, 雷浩, 刘罡, 汶德胜. 2023. 光学视觉传感器技术研究进展. 中国图象图形学报, 28(6): 1630-1661) [DOI: 10.11834/jig.230039]

作者简介

孙军,男,正高级工程师,主要研究方向为深空测控通信技术、空间任务规划及操作。E-mail: suncola0609@sina.com

陈略,通信作者,男,高级工程师,主要研究方向为深空无线电测量技术及科学应用、空间目标监测、地球定向参数解算预报及服务。E-mail: chenlue@bao.ac.cn

路伟涛,男,副研究员,主要研究方向为深空无线电测量技术及科学应用、空间目标监测。E-mail: looweitao@126.com

张雨佳,女,助理研究员,主要研究方向为深空无线电测量技术及科学应用、空间目标监测。

E-mail: yjzhang666888@163.com

孔静,女,高级工程师,主要研究方向为航天器精密轨道确定与科学应用。E-mail: 13581877617@163.com

韩松涛,男,高级工程师,主要研究方向为深空无线电测量技术及科学应用、空间目标监测。E-mail: sthan@bao.ac.cn