



“天问一号”无线电掩星观测试验及特征分析

陈 略, 王 美, 简念川, 满海钧, 韩松涛, 孔 静, 郭 鹏, 平劲松

Tianwen-1 Radio Occultation Observation Experiment and Feature Analysis

CHEN Lue, WANG Mei, JIAN Nianchuan, MAN Haijun, HAN Songtao, KONG Jing, GUO Peng, and PING Jinsong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20220006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

“天问一号”降落伞材料性能分析与试验研究

Performance Analysis and Experimental Study of Tianwen-1 Parachute Material

深空探测学报(中英文). 2021, 8(5): 478-485

“天问一号”太阳等离子体延迟误差分析与修正

Analysis of Delay Error Correction of Solar Plasma Region on Tianwen-1

深空探测学报(中英文). 2021, 8(6): 592-599

“天问一号”着陆缓冲机构吸能材料设计分析与试验验证

Design and Test Verification of Energy Absorption Material in the Soft Landing Gear for Tianwen-1 Mars Probe

深空探测学报(中英文). 2021, 8(5): 472-477

一种新型多普勒噪声抑制技术对BepiColombo任务无线电科学实验的性能提升

Improvement of BepiColombo's Radio Science Experiment Through an Innovative Doppler Noise Reduction Technique

深空探测学报(中英文). 2018, 5(2): 115-123

一种基于小波相关滤波的无线电干涉测量处理方法

A Radio Interferometry Processing Method Based on Wavelet Correlation Filter

深空探测学报(中英文). 2019, 6(1): 82-87

一种基于探测器下行信号融合处理的无线电干涉测量方法

A Novel Method of Radio Interferometry Based on Fusion Processing of Explorer Downlink Signal

深空探测学报(中英文). 2019, 6(3): 225-231



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

“天问一号”无线电掩星观测试验及特征分析

陈略^{1,2,3}, 王美^{1,2}, 简念川⁴, 满海钧^{1,2}, 韩松涛^{1,2}, 孔静^{1,2}, 郭鹏⁴, 平劲松³

(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;
3. 中国科学院国家天文台, 北京 100012; 4. 中国科学院上海天文台, 上海 200030)

摘要: 中国“天问一号”探测器环火飞行为星-地火星无线电掩星观测提供了必要条件, 可有效支持火星大气、电离层反演探测。重点介绍国内首次基于“天问一号”的火星无线电掩星观测试验。利用“天问一号”预报轨道, 预报地面深空站掩星观测弧段; 组织深空站, 对“天问一号”进行火星入掩全过程观测, 采集与记录探测器原始下行信号; 利用自研深空开环测量软件, 对“天问一号”下行信号进行处理分析, 提取火星无线电掩星特征。结果表明: 信号中幅度衍射斑纹与频率翘尾特征被成功提取, 印证了此次星-地火星无线电掩星事件被有效观测, 为后续基于“天问一号”的火星大气探测科学研究, 积累了重要技术经验与测量数据。

关键词: 天问一号; 无线电掩星; 火星大气; 大气反演; 特征分析

中图分类号: V11, P14

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)01-0080-08

DOI:10.15982/j.issn.2096-9287.202220006

引用格式: 陈略, 王美, 简念川, 等. “天问一号”无线电掩星观测试验及特征分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(1): 80-87.

Reference format: CHEN L, WANG M, JIAN N C, et al. Tianwen-1 radio occultation observation experiment and feature analysis[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(1): 80-87.

引言

无线电掩星技术是进行火星等地外行星大气反演探测的重要手段, 对于地外行星科学探测具有重要意义。无线电掩星技术主要用于地外行星低层大气探测, 可有效反演地外行星中性大气密度、温度与压力特性^[1], 亦可有效反演地外行星电离层特性^[2]。

火星是人类深空探测任务中最为关注的地外行星。基于无线电掩星技术, 探测火星大气与电离层, 一直是国际上行星无线电科学领域的研究热点。早在20世纪70年代, 美国“海盗号”(Viking)轨道器^[3]、“水手9号”(Mariner 9)轨道器^[4]均通过无线电掩星方式, 对火星大气进行了探测。20世纪90年代, 美国“火星全球勘测者”(Mars Global Surveyor, MGS)轨道器相比“海盗号”和“水手9号”, 在火星大气无线电掩星性能方面有了很大提高, 因MGS轨道器搭载了高稳晶振, 提高了测量精度, 高精度反演了火星中性大气特性^[5]。欧洲航天局(European Space Agency, ESA)的“火星快车”(Mars EXpress, MEX)探测器自2004年环火飞行至今, 期间, ESA利用MEX星上无线电科学实验载荷(Mars express Radio Science experiment,

MaRS)与地面测控通信系统, 开展了大量火星无线电掩星试验, 成功反演了火星大气温度与压力垂直剖面、中性大气数值密度、火星电离层结构等, 取得了丰硕的科学研究成果^[6-7]。

国内学者在基于无线电掩星技术开展火星大气与电离层探测方面, 也进行了卓有成效的研究工作。早在2009年, 中国在准备“萤火一号”火星探测任务之时, 基于无线电掩星方式的火星大气、电离层探测就被确定为“萤火一号”的重要科学目标之一^[8]。中国科学院相关科研单位陆续开展了多项火星无线电掩星前期预研工作, 为“萤火一号”火星探测任务科学研究进行了技术储备。中国科学院上海天文台张素君等^[9-11]利用MEX的公开观测数据, 验证了行星无线电掩星观测资料处理系统反演火星大气与电离层的可靠性。中国科学院空间科学与应用研究中心胡雄等^[12-13]开展了火星大气/电离层无线电掩星仿真研究, 孙越强等^[14]开展了火星电离层星-星掩星研究工作。此外, 国内学者基于国际公开的火星无线电掩星观测数据, 也开展了诸如火星电离层结构^[15]、火星高层大气特性等科学研究工作^[16]。但从以上分析来看, 中国尚缺乏有效的火星无线电掩

收稿日期: 2022-01-19 修回日期: 2022-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42005099); 部委级试验技术研究项目(1800050381)

星自主观测数据。

中国已成功实施了首次火星探测“天问一号”任务, 正式开启了地外行星探测之旅^[17]。2021年2月, “天问一号”正式进入环火轨道飞行。目前, 中国已建立了全球分布、功能完备的深空测控网, 具备优良的地外行星探测器跟踪测量能力^[18], 具备自主获取火星无线电掩星观测数据能力。“天问一号”探测器与地面测站天地测控资源, 为火星无线电科学研究提供了重要条件保障。在“天问一号”探测器环火飞行的特定弧段, 探测器下行无线电信号恰好穿越火星大气, 经火星大气折射后, 可被地面测站接收, 这为开展火星无线电掩星观测试验提供了必要条件^[19]。在掩星过程中, 无线电信号的频率与幅度变化可被检测, 因其反映了火星大气、电离层对探测器下行无线电信号的影响, 我们通过大气与电离层反演理论方法, 可望实现火星中性大气与电离层反演^[19]。

本文基于“天问一号”探测器与地面测控资源, 开展火星无线电掩星观测试验, 验证相关跟踪观测与信号处理技术, 提取无线电掩星特征, 获取火星无线电掩星观测数据, 建立自主的火星掩星观测系统, 将有助于火星大气与电离层反演探测研究。

1 火星无线电掩星观测试验实施简介

“天问一号”探测器环火飞行, 为星-地无线电掩星试验提供了观测条件。北京航天飞行控制中心在前期试观测试验基础上, 通过轨道预报与测站计划安排, 组织中国佳木斯深空站(JM01)与喀什深空站(KS01), 于2021年8月23日, 成功开展了基于“天问一号”的火星无线电掩星观测试验。此时, “天问一号”探测器正处于中继通信环火飞行阶段, 轨道周期约为8 h, 近火点高度约为300 km, 远火点高度约为12 500 km, “天问一号”探测器距地约3.9亿km。

进行有效的星-地无线电掩星观测试验, 需要两方面必备条件: 一是跟踪观测条件, 二是信号接收与处理条件。

1) 跟踪观测条件。火星无线电掩星观测条件: 探测器轨道平面相对于地面测站处于侧向, 即探测器处于侧向轨道面, 如图1(a)所示, 此时探测器下行信号路径将完整穿越火星各介质层。如果轨道平面面向地面测站, 即探测器处于正向轨道面, 如图1(b)所示, 此时信号路径穿越火星介质层较少, 这种情况下不太适合进行无线电掩星观测。由于火星、地球的相对运动和探测器轨道面的进动影响, 火星无线电掩星侧向观测条件会周期出现, 一般称之为掩星季。“天问

一号”的掩星季长度约为48个地球日。依照火星遮挡无线电信号的顺序, 掩星观测可分为入掩(ingress)和出掩(outgress)两种情况。入掩为信号路径由不被遮挡状态过渡到被遮掩状态, 出掩情况则相反。基于“天问一号”的火星无线电掩星观测试验的示意图如图2所示。构成火星无线电掩星观测的约束条件为: “天问一号”探测器轨道、火星本体与地面测站, 三者特定弧段内满足特定的位置关系。火星本体恰好逐步遮挡探测器下行信号, 下行信号恰好穿越火星大气与电离层, 并可被地面测站接收, 这就是星-地火星无线电掩星试验的跟踪观测条件。

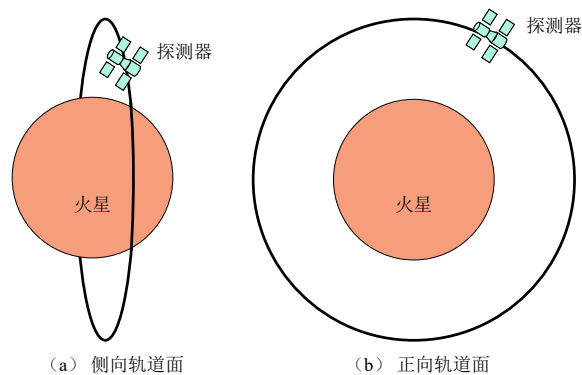
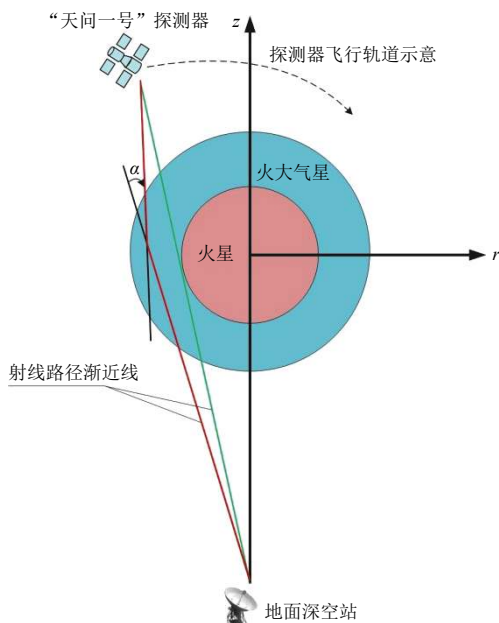


图1 火星探测器相对于地面测站的观测构型
Fig. 1 Observation configuration between Mars probe and ground station



注: α 为火星大气折射角。

图2 火星无线电掩星观测示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Mars radio occultation observation

2) 信号接收与处理条件。火星无线电掩星信号接收与处理条件: 地面测站能有效接收掩星过程的探测

器下行信号（其蕴含了火星大气对信号相位、频率与幅度的影响特征），能通过专用设备对探测器下行信号进行数字化采集与记录，并能通过信号处理手段，精确且灵敏地提取掩星特征，获取有效的观测数据，这就是星-地火星无线电掩星试验的信号接收与处理条件。判断是否成功实施星-地火星无线电掩星观测试验，最直接有效的判据为：能否从探测器下行信号中有效检测到明显的无线电掩星特征。

根据“天问一号”的预报轨道，通过轨道预报软件，本文首先预报了2021年8月23日“天问一号”相对于JM01、KS01深空站的火星入掩、出掩预报时刻，具体如表1、表2所示，当天有2段火星掩星可观测弧段。北京航天飞行控制中心结合深空网跟踪计划，组织JM01、KS01深空站，在第2个可观测弧段，开展了火星无线电掩星观测试验。

表1 JM01深空站的火星掩星预报时刻（北京时）

Table 1 Predicted time of Mars occultation on JM01 station

| JM01深空站 | | |
|---------|-------------|-------------|
| 编号 | 入掩时刻（时:分:秒） | 出掩时刻（时:分:秒） |
| 1 | 09:17:17.27 | 09:58:32.03 |
| 2 | 17:31:48.09 | 18:09:19.18 |

表2 KS01深空站的火星掩星预报时刻（北京时）

Table 2 Predicted time of Mars occultation on KS01 station

| KS01深空站 | | |
|---------|-------------|-------------|
| 编号 | 入掩时刻（时:分:秒） | 出掩时刻（时:分:秒） |
| 1 | 09:17:17.43 | 09:58:31.94 |
| 2 | 17:31:48.28 | 18:09:19.14 |

此次火星无线电掩星观测试验的具体时间为：北京时间8月23日16:30—17:50。试验利用JM01/KS01深空站配备的基带转换与记录设备，分2个观测弧段，采集与记录“天问一号”下行原始信号。2个观测弧段的时间分别是16:30—17:25与17:30—17:50。依据“天问一号”的火星无线电掩星事件预报，发生入掩的具体时间在17:31—17:35之间，即处于第2个可观测弧段。在此观测弧段中，KS01深空站按照双向测量模式进行跟踪与测量，即KS01深空站作为上行站对“天问一号”上行发送信号，经探测器锁相转发后，JM01/KS01深空站同时接收、采集与记录“天问一号”下行信号。

深空站采集与记录的“天问一号”原始信号，经专用数据传输通信网络，传输至位于北京航天飞行控制中心的深空干涉测量任务中心，由该中心自研的深空

开环测量软件^[20-21]，完成对“天问一号”的开环测量处理。与此同时，KS01深空站在本地完成基带测速。此次试验过程中，深空站信号采集与记录参数设置如下：采样中心频率 = “天问一号”标称下行频率 + 多普勒预报频率；采样带宽为500 kHz；量化位数为8 bit；数据记录格式为VLBI科学接收机（VSR）格式。

此次基于“天问一号”的火星无线电掩星观测试验最大技术特点在于：试验完全基于中国自主的火星探测器与地面测站资源，结合自研的高精度信号处理软件，实现自主的火星无线电掩星高精度观测数据获取，可为火星大气与电离层反演研究提供最直接有效的自主观测数据支持。

2 掩星现象发生前信号处理与分析

JM01、KS01深空站分2个观测弧段进行“天问一号”原始下行信号的采集与记录，第1个观测弧段为未发生火星无线电掩星现象的正常跟踪弧段，第2个观测弧段为发生火星无线电掩星过程的跟踪弧段。未发生掩星现象时，KS01深空站接收到的下行信号频谱如图3所示。可以看出，“天问一号”下行信号中主载波特征明显，信号功率较强。

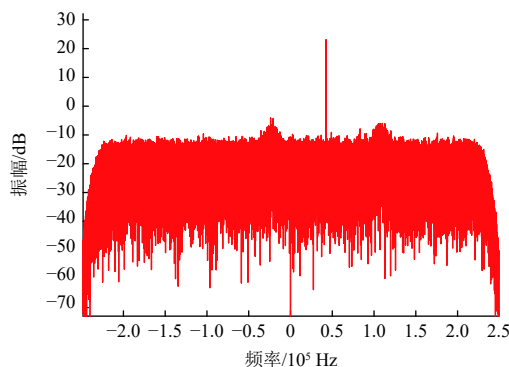


图3 “天问一号”未发生掩星时下行信号频谱
Fig. 3 Downlink signal FFT spectrum of Tianwen-1 under normal conditions

按照开环测量信号处理算法^[21-22]，利用深空开环测量软件，对“天问一号”KS01记录的原始信号进行处理，获取第1个观测弧段的“天问一号”主载波频率。与此同时，KS01基带测速设备同步获取“天问一号”的下行主载波频率。开环测速与基带测速获取的主载波频率结果如图4所示。通过拟合主载波频率，获得主载波拟合残差结果如图5所示，用以评估测量噪声水平。此时KS01开环测速的噪声水平为13.5 mHz（1 s积分），基带测速的噪声水平为19.1 mHz（1 s积分），开环测速精度优于基带测速精度。图6为KS01深空站的开环

测速与基带测速的主载波一致性比对, 两类测速按照相同时标进行比对, 即开环测速主载波频率与基带测速主载波频率直接进行相减运算。图6显示开环测速与

基带测速偏差的统计平均值为0.14 mHz, 可见开环测速与基带测速结果一致性较好; 开环测速与基带测速偏差的标准差 (1σ) 为14.5 mHz。

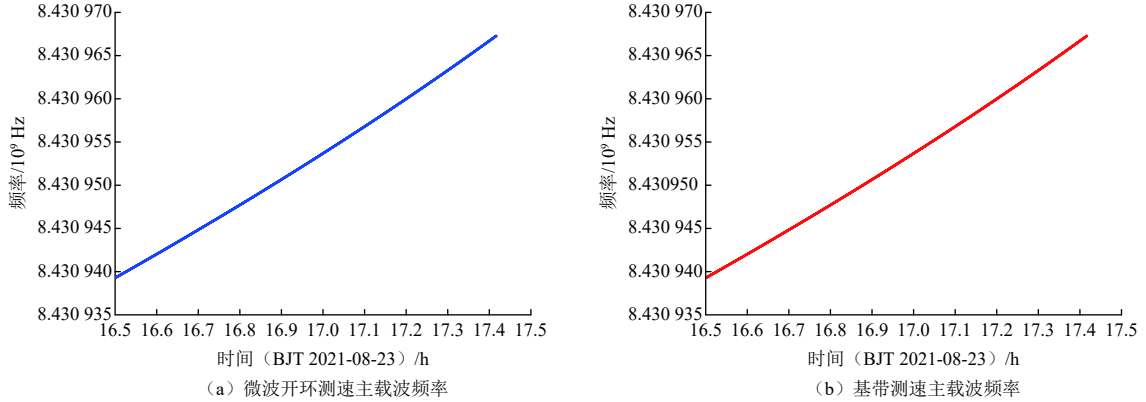


图4 KS01“天问一号”开环测速与基带测速主载波频率

Fig. 4 Carrier frequencies of open-loop and baseband velocity on KS01 station

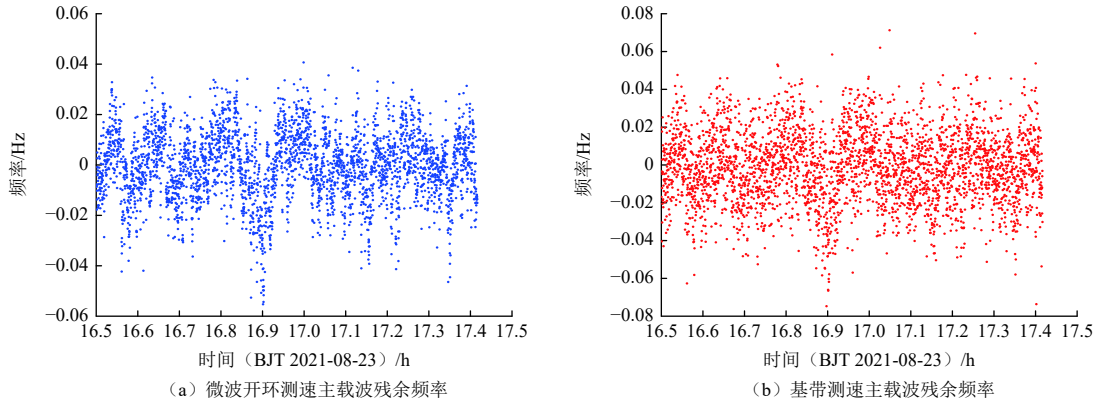


图5 KS01的“天问一号”开环测速与基带测速主载波频率残差

Fig. 5 Carrier frequency residuals of open-loop and baseband velocity on KS01 station

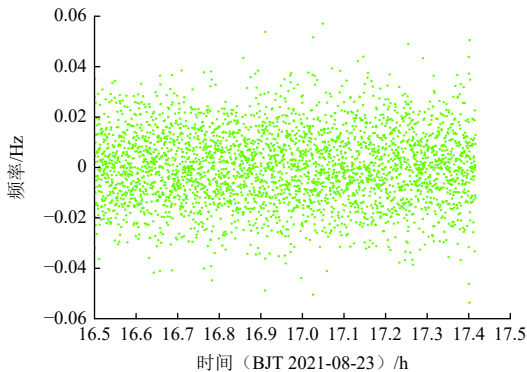


图6 开环测速与及基带测速主载波频率一致性比对

Fig. 6 Carrier frequency comparison of open-loop and baseband velocity

本文详细分析了8月23日“天问一号”主载波拟合残差结果, 不难发现, 在拟合残差中可以明显观察到一些短周期趋势的变化特征, 推测其可能的原因为探测器姿态或信号存在未知扰动, 这些扰动可能与太阳风影响有关。8月23日, “天问一号”接近日凌飞行期, 此

时太阳方向和观测方向的角度 SEP (Sun Earth Probe) 较小 ($SEP = 15.07^\circ$), 推测观测期间太阳风对此次观测影响较大, 可能引起了测量残差呈现波动趋势。拟合残差中存在短周期特征, 造成了相对于正常工况下的测量噪声变大。在正常工况下, “天问一号”开环测速主载波频率提取精度小于5 mHz (1 s积分)^[21]。

3 掩星过程信号处理与特征分析

本文利用开环测量软件, 对第2个观测弧段的下行信号进行处理, 分别估计主载波频率与幅值。掩星过程的下行信号频谱如图7所示。图7为“天问一号”下行主载波信号即将被火星本体完全遮挡时的信号频谱。对比图3所示的未发生掩星时的信号频谱, 可以看出, 在掩星过程中, 地面深空站接收到的“天问一号”下行主载波信号, 在幅度上发生了明显的变化, 图3中的主载波信号幅度约为23 dB, 图7主载波信号幅度约为

-7 dB。在火星无线电掩星过程中,“天问一号”下行主载波信号逐步淹没在背景噪声中。

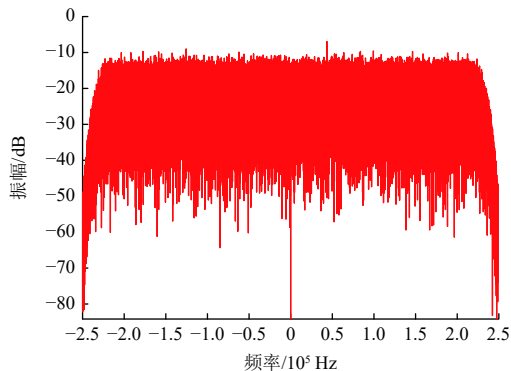


图7 “天问一号”掩星过程中下行信号频谱
Fig. 7 Downlink signal FFT spectrum of Tianwen-1 in occultation procedure

本文通过计算“天问一号”下行主载波信号载噪比方式,来定量评估“天问一号”下行主载波信号幅度变化。JM01掩星阶段的信号主载波频率拟合残差结果如图8所示, JM01深空站接收信号自功率谱如图9所示, JM01深空站接收信号幅度变化结果如图10所示。同理, KS01深空站掩星阶段的信号主载波频率拟合残差结果如图11所示, KS01深空站接收信号自功率谱如图12所示。仔细分析以上结果不难发现,在掩星过程中, JM01/KS01深空站接收到的“天问一号”下行主载波信号幅度逐步降低。

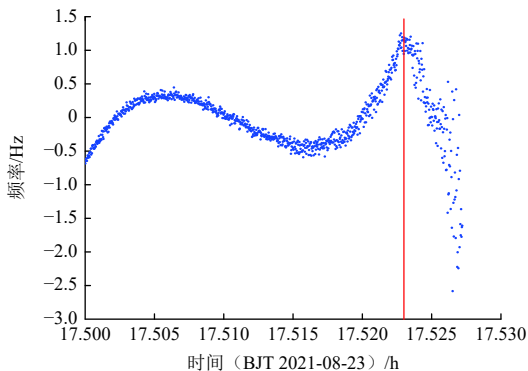


图8 JM01掩星阶段的信号主载波频率拟合残差
Fig. 8 Carrier frequency residuals of JM01 station in occultation procedure

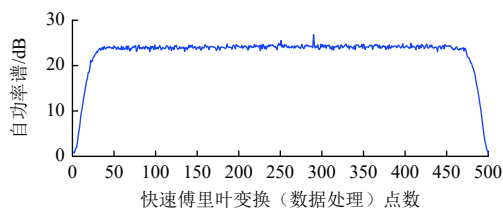


图9 JM01掩星最后阶段的信号自功率谱
Fig. 9 Signal power spectrum of JM01 station in final occultation procedure

这里重点分析图10与图13的图形结果特征, 如图10中红色圆圈标注部分, 地面深空站接收到的信号幅度, 出现了明显的振荡现象, 随后, 信号幅度急速下降, 直到信号完全淹没在噪声中, 即火星本体对“天问一号”的下行信号实现了完全遮挡。根据无线电波衍射原理^[23], 图10与图13中信号幅度的周期振荡现象, 即为“天问一号”下行无线电信号被火星本体逐步遮挡时, 产生了明显的无线电波衍射斑纹。此时, 衍射斑纹表现为下行接收信号幅度上的类似正弦波周期振荡特征。这一特征源于在无线电掩星现象发生过程中, 火星本体对于无线电波逐步遮挡, 产生了无线电波衍射, 致使地面测站不同时刻接收到的信号, 在幅度上呈现周期上下振荡。

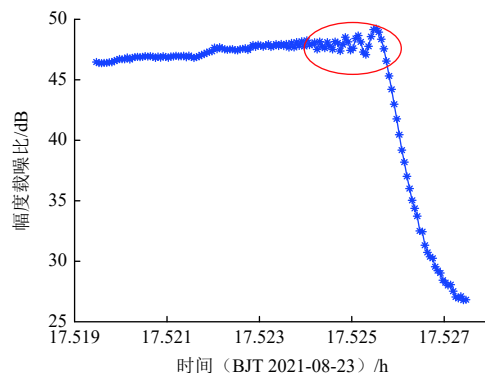


图10 JM01掩星阶段的信号幅度变化
Fig. 10 Signal amplitude of JM01 station in occultation procedure

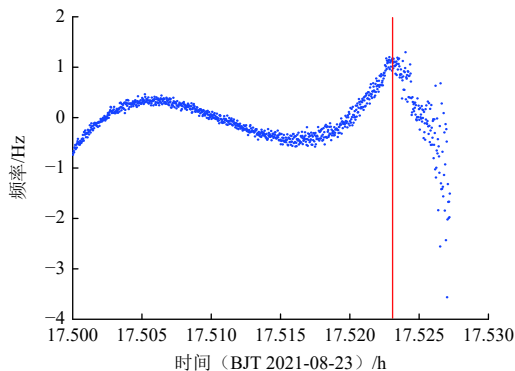


图11 KS01掩星阶段的信号主载波频率拟合残差
Fig. 11 Carrier frequency residuals of KS01 station in occultation procedure

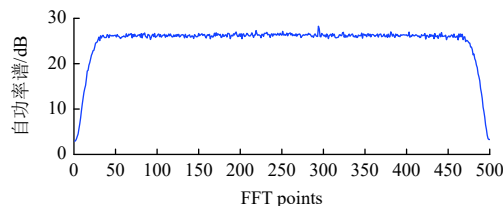


图12 KS01深空站掩星最后阶段的信号自功率谱
Fig. 12 Signal power spectrum of KS01 station in final occultation procedure

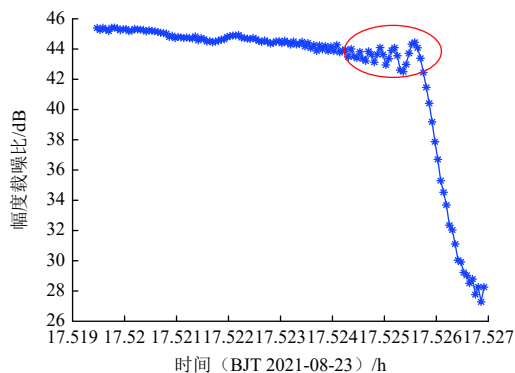


图13 KS01掩星阶段的信号幅度变化

Fig. 13 Signal amplitude of KS01 station in occultation procedure

与此同时, 仔细分析图8与图11的主载波频率拟合残差结果, 不难发现, 如图中红色虚线分段标注所示, 频率拟合残差在发生掩星时, 出现了明显的翘尾与发散现象, 这也是明显的无线电掩星特征。以往国际上的多次火星无线电掩星试验表明, 多普勒频率残差的翘尾与发散特征, 正是火星大气与电离层无线电掩星最直接的证据。本文获取的掩星过程中的频率残差图特征, 与国际上火星无线电掩星过程中的频率残差特征现象吻合一致^[6,24]。在图8与图11中, 频率拟合残差结果明显分为两段不同的特征, 如图中的红色虚线处, 红色虚线左边的拟合残差较为平滑, 有一定的正弦波动, 这是由于多项式拟合误差引起; 红色虚线右边的拟合残差则出现翘尾与发散现象, 且在红色虚线处产生明显的残差转折点, 这是源于火星大气与电离层对于探测器下行无线电信号干扰引入了频率的偏差。

因此, 以上“天问一号”下行信号幅度与频率变化特征, 均印证了此次基于“天问一号”的火星无线电掩星试验取得成功。此次火星无线电掩星观测试验, 获取了整个入掩过程中的全部观测数据, 直至无线电信号完全被火星本体遮掩, 包含了完全掩星观测过程。由于在火星无线电掩星过程中, “天问一号”下行信号穿越了火星表面以上的大气与电离层, 因此, 从原理上讲, 此次火星无线电掩星试验获得的观测数据, 可有效用于火星大气与电离层后续科学反演工作。

本文基于此次“天问一号”无线电掩星测量数据, 尝试性开展了火星大气与电离层反演工作。经初步分析, 深空测控系统在2021年8月, 降低了对“天问一号”的每日跟踪弧长和跟踪频次, 因缺少足够观测数据, 致使“天问一号”轨道, 相较于正常跟踪模式下的轨道确定精度明显偏低。另外, 8月23日接近日凌期, 太阳方向和观测方向的角度 SEP 较小 ($SEP = 15.07^\circ$), 观测期间太阳风对观测影响较大, 使得多普勒观测数据存在一定偏差, 尚不足以完全满足高精度反演火星大

气与电离层需求, 使得计划通过扣除轨道位置影响、地面测站介质影响等主要影响因素后, 仅保留火星大气与电离层对观测数据影响, 来进行火星大气与电离层特性反演研究暂未成功。但此次火星无线电掩星观测试验, 在观测与信号处理层面, 取得了预期效果。后续, 在避免太阳风的影响和确保“天问一号”轨道测定轨精度前提条件下, 本文建议深空测控系统可联合其他观测系统, 进一步专题设计与开展火星无线电掩星观测与反演试验, 有望获得中国自主的火星大气与电离层科学研究成果。

4 结 论

本文介绍了国内自主开展的基于“天问一号”的星-地火星无线电掩星观测试验, 有效获取了掩星全过程高精度观测数据, 分析了下行信号特征与测量精度, 成功检测到无线电信号幅度衍射斑纹与频率翘尾等显著的掩星特征, 验证了基于“天问一号”进行火星无线电掩星观测试验的可行性, 为后续专题开展基于“天问一号”的星-地火星无线电掩星试验与火星大气反演科学研究, 提供了重要技术参考, 具有重要的工程与科学实践意义。

参 考 文 献

- [1] FLAVIO P, GAEL C, ANTONIO A. A technique for the analysis of radio occultation data to retrieve atmospheric properties and associated uncertainties[J]. *Radio Science*, 2021, 56(5): e2020RS007205.
- [2] KLIORÉ A J. Radio occultation observations of the ionospheres of Mars and Venus[J]. *Venus and Mars: Atmospheres, Ionospheres, and Solar Wind Interactions*, 1992, 66: 265-276.
- [3] LINDAL G F, HOTZ H B, SWEETNAM D N, et al. Viking radio occultation measurements of the atmosphere and topography of Mars: data acquired during 1 Martian year of tracking[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1979, 84(B14): 8443-8456.
- [4] KLIORÉ A J, CAIN D L, GUNNAR F, et al. The atmosphere of Mars from Mariner 9 radio occultation measurements[J]. *Icarus*, 1972, 17(2): 484-516.
- [5] HINSON D P, SIMPSON R A, TWICKEN J D, et al. Initial results from radio occultation measurements with Mars Global Surveyor[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1999, 104(E11): 26997-27012.
- [6] PÄTZOLD M, HÄUSLER B, TYLER G L, et al. Mars Express 10 years at Mars: observations by the Mars Express Radio Science Experiment (MaRS)[J]. *Planetary and Space Science*, 2016, 127: 44-90.
- [7] SILVIA T, MARTIN P, BERND H, et al. The structure of Mars lower atmosphere from Mars Express Radio Science (MaRS) occultation measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, 118(2): 306-320.
- [8] 吴季, 朱光武, 赵华, 等. 萤火一号火星探测计划的科学目标[J]. *空间*

- 科学学报, 2009, 29(5): 449-455.
- WU J, ZHU G W, ZHAO H, et al. Overview of scientific objectives of China-Russia Joint Mars exploration program YH-1[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2009, 29(5): 449-455.
- [9] ZHANG S J, PING J S, HAN T T, et al. Implementation of the Earth-based planetary radio occultation inversion technique[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2011, 54(7): 1359-1366.
- [10] 张素君, 王明远, 简念川, 等. 基于无线电掩星观测的火星电离层观测研究进展[J]. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2013(8): 903-916.
- ZHANG S J, WANG M Y, JIAN N C, et al. A review on the study of Martian ionosphere based on Radio Occultation observations[J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2013(8): 903-916.
- [11] 张素君, 平劲松, 洪振杰, 等. 星-地无线电掩星技术探测火星大气和电离层[J]. *物理*, 2009, 38(10): 722-728.
- ZHANG S J, PING J S, HONG Z J, et al. Detection of the martian atmosphere and ionosphere using spacecraft-Earth radio occultation[J]. *Physics*, 2009, 38(10): 722-728.
- [12] 胡雄, 吴小成, 宫晓艳, 等. 火星电离层无线电掩星探测仿真研究[J]. *天文学报*, 2009(3): 301-311.
- HU X, WU X C, GONG X Y, et al. Simulation of the Mars ionosphere radio occultation experiments[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2009(3): 301-311.
- [13] 胡雄, 吴小成, 王鑫, 等. 火星电离层/大气无线电掩星探测仿真研究[C]//第十二届全国日地空间物理学术讨论会论文摘要集. 三亚: 中国空间科学学会空间物理学专业委员会, 2007.
- [14] 孙越强, 杜起飞, 朱光武, 等. 中俄联合火星电离层星-掩星探测[J]. *空间科学学报*, 2009, 29(5): 475-479.
- SUN Y Q, DU Q F, ZHU G W, et al. Joint Russian-Chinese satellite-to-satellite Martian radio occultation experiment[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2009, 29(5): 475-479.
- [15] 张素君, 史弦, 平劲松. 基于 MGS 探测器掩星观测的火星电离层数据初步分析[J]. *天文学进展*, 2009(3): 280-290.
- ZHANG S J, SHI X, PING J S. Preliminary analysis of martian ionospheric observation data based on MGS radio occultation experiment[J]. *Progress in Astronomy*, 2009(3): 280-290.
- [16] 秦珺峰, 邹鸿, 叶雨光. 基于无线电掩星观测的火星高层大气研究[J]. *航天器环境工程*, 2020, 36(6): 571-583.
- QIN J F, ZOU H, YE Y G. Study of Mars' upper atmosphere based on radio occultation observations[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2020, 36(6): 571-583.
- [17] 张荣桥. “天问”一号开启我国行星探测新征程[J]. *中国航天*, 2021, 518(6): 9-10.
- ZHANG R Q. Tianwen 1 start a new journey of planetary exploration[J]. *Aerospace China*, 2021, 518(6): 9-10.
- [18] 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(1): 87-108.
- WU W R, LI H T, LI Z, et al. Status and prospect of China's deep space TT&C network[J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2020, 50(1): 87-108.
- [19] 陈略. 深空无线电开环测速技术与应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- CHEN L. Research on deep space radio open-loop velocity measurement technology and its application[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [20] CHEN L, PING J S, LIU X, et al. Preliminary study of Saturn's upper atmosphere density by observing Cassini plunging via China's deep space station[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, 20(7): 102.
- [21] CHEN L, PING J S, CAO J F, et al. Retrieving Doppler frequency via local correlation method of segmented modeling[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(14): 2846.
- [22] 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(中英文)*, 2018, 5(4): 382-386.
- 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.
- [23] KIMMO L, BACH U, KARRI M, et al. Asteroid sizing by radiogalaxy occultation at 5 GHz[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2016, 822(2): L21.
- [24] CASCIOLO G, PETRICCA F, GENOVA A. Mars' atmospheric calibration of radio tracking data for precise orbit determination[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 177: 103-110.

作者简介:

陈略(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 深空无线电测量技术及科学应用、空间非合作目标无线电监测、地球定向参数解算预报及服务。

通信地址: 北京市5130信箱120号(100094)

电话: (010)66365924

E-mail: chenlue@bao.ac.cn

王美(1984-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 深空无线电测量技术及应用、信号处理技术。

通信地址: 北京市5130信箱105分箱(100094)

电话: (010)66365934

E-mail: wm2004xijiao@163.com

简念川(1977-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 行星科学。

通信地址: 上海市南丹路80号(200030)

电话: (021)34775272

E-mail: jnnccc@shao.ac.cn

Tianwen-1 Radio Occultation Observation Experiment and Feature Analysis

CHEN Lue^{1,2,3}, WANG Mei^{1,2}, JIAN Nianchuan⁴, MAN Haijun^{1,2}, HAN Songtao^{1,2},
KONG Jing^{1,2}, GUO Peng⁴, PING Jinsong³

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

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

3. National Astronomical Observatories, CAS, Beijing 100012, China;

4. Shanghai Astronomical Observatory, CAS, Shanghai 200030, China)

Abstract: China's Tianwen-1 probe orbiting Mars provides necessary conditions for Mars-to-Earth Mars radio occultation observation, and can effectively support the exploration of Mars atmosphere and ionosphere retrieval. In this paper, the first domestic Mars radio occultation observation experiment based on Tianwen-1 was introduced. Firstly, Tianwen-1 was used to forecast the orbit and the occultation observation arc of the ground deep space station. Then, deep space stations were organized to observe the entire process of Tianwen-1 Mars occultation, and the original downlink signals of the probe were sampled and recorded. Finally, the self-developed deep space open-loop measurement software was used to process and analyze the downlink signals of Tianwen-1, to extract the radio occultation features of Mars. The results show that the amplitude diffraction speckles and frequency warping features in the signal were successfully extracted, which confirms that the Mars-to-Earth Mars radio occultation event has been effectively observed, and important technical experience and measurement data have been accumulated for subsequent scientific research on Mars atmospheric exploration based on Tianwen-1.

Keywords: Tianwen-1; radio occultation; Mars atmosphere; atmosphere retrieval; feature analysis

Highlights:

- The first successful observation experiment of the probe-Earth Mars radio occultation based on Tianwen-1 has been implemented.
- The amplitude diffraction speckles and frequency warped-tail features in radio occultation procedure have been effectively extracted from received Tianwen-1 signal.
- This observation experiment pride the first-hand and precious measurement data for the scientific research on Mars atmosphere.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]