

强太阳活动对“天问一号”测控影响

孔静^{1*}, 汪赛进¹, 胡国林¹, 马茂莉², 刘少然¹

1. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094

2. 中国科学院上海天文台, 上海 200030

* 联系人, E-mail: kj_bacc@hotmail.com

2024-10-08 收稿, 2025-06-03 修回, 2025-06-05 接受, 2025-06-06 网络版发表

国家自然科学基金(42241118)资助

摘要 2024年, 随着太阳活动进入第25个周期的极大期, 强烈的日冕物质抛射(coronal mass ejections, CME)事件对空间环境产生了显著扰动, 严重影响了近地空间航天器的正常运行和可靠性. 针对深空探测任务, 研究CME在日球层内远距离传播演化过程中对无线电链路的干扰效应具有重要的科学意义和工程价值. 本文基于“天问一号”探测器遥外测数据, 系统分析了第25个太阳活动周期间, 特别是AR3664活动区爆发的CME事件对深空测控通信链路的影响. 首先, 通过CME传播方向与地球-太阳-火星相对位置关系的几何分析, 确定了CME可能对器地链路产生干扰的空间范围和时间窗口; 其次, 采用实测数据与理论模型对比分析方法, 定量评估了太阳活动区AR3664爆发的CME事件对测控实施的具体影响. 研究结果表明, 在稀疏观测条件下, CME未在信号闪烁噪声特征上表现出显著影响, 但导致了测距信号系统差的抖动; 此外, 依据实测数据验证了极端太阳活动条件下的链路可靠性保障能力. 这一发现为深空探测任务的测控系统设计和抗干扰策略制定提供了参考.

关键词 强太阳活动, 天问一号, 行星际闪烁, 等离子体延迟, 测控通信

日冕物质抛射(coronal mass ejections, CME)是太阳系中最剧烈的空间天气现象之一, 被誉为空间天气的“飓风”. CME将大量太阳风等离子体和磁场扰动从日冕层抛射至行星际空间, 其影响范围可延伸至日球层边界. 一次典型的CME事件可抛射约 10^{12} kg的等离子体物质, 释放高达 10^{23} J的动能^[1]. 这些能量通过内日球层传播, 对行星际空间环境产生深远影响. 作为太阳和空间物理研究中的重要现象, CME不仅是影响地球空间环境的最强扰动源, 引发的强烈地磁暴可导致卫星故障、导航系统失准、电力系统损坏等一系列严重后果^[2]. 此外, CME在传播过程中会显著改变行星际介质的电磁特性. 太阳日冕的剧烈膨胀向外释放大量等离子体流, 导致空间无线传输信号出现不规则幅度起伏, 影响行星际空间的电波传播特性. CME引起的等离子

体密度变化、磁场扰动等效应, 可能导致深空通信链路出现信号衰减、相位闪烁、时延抖动等现象^[3], 影响深空探测任务的可靠实施. 因此, 深入研究CME对深空测控通信链路的影响机制, 对保障深空探测任务的成功实施具有重要的理论和实践意义.

目前, 对日冕区背景太阳风影响电波传播的研究已取得显著进展^[4], 特别是在太阳-探测器-地球三者位置接近直线的上合期间(superior conjunction), 研究人员对深空测控通信所受影响进行了深入探索. 这些研究建立了“宁静太阳风”条件下等离子体密度、太阳风速等关键参数的不同计算模型, 为理解常规空间环境下的电波传播特性奠定了理论基础. 然而, CME作为一种极端空间天气事件, 其引发的行星际扰动效应远超出背景太阳风的影响范畴. 当CME在行星际空间传

引用格式: 孔静, 汪赛进, 胡国林, 等. 强太阳活动对“天问一号”测控影响. 科学通报, 2025, 70: 4969–4977

Kong J, Wang S, Hu G, et al. Impact of intense solar activity on the tracking, telemetry, and command (TT&C) of Tianwen-1 (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 4969–4977, doi: [10.1360/TB-2024-1045](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1045)

播时,形成行星际日冕物质抛射(interplanetary CME, ICME)^[5],其结构特征和演化过程更为复杂.ICME的研究对于提升空间天气预报精度和可靠性具有重要价值.通过分析ICME在行星际空间的传播特性、结构演化及其与背景太阳风的相互作用,不仅可以深化我们对空间天气物理过程的认识,还能为准确预测CME到达时间及其对空间系统的影响提供科学依据.

基于Richardson和Cane^[6]建立的1996年以来ICME事件目录,研究人员筛选出11个同时满足以下条件的特殊事件:在地球附近被探测的同时,Ulysses卫星所在位置与地球的黄经差小于30°且处于低纬度区域.这些事件主要发生在日心距大于1 AU的深空环境,其基本参数虽存在个体差异,但整体特征与不同日心距离下的统计研究结果具有一致性.值得注意的是,同一ICME事件在地球与Ulysses的观测特征呈现显著差异性,仅少数事件能在两个观测点保持可辨识的共性结构特征;利用射电望远镜以及多普勒测速观测到的行星际无线电信号相位起伏可以反演随机介质的空间特性,Molera Calvés团队通过分析地面站与火星快车探测器(Mars Express, MEX)的无线电信号特性^[7],发现ICME穿越器地链路期间信号相位闪烁指数激增至背景值的4倍,这一发现直接证实了ICME对深空通信链路的显著干扰效应.

然而,现有研究仍存在明显局限性.一方面,受深空探测平台观测能力制约,目前对ICME在1 AU以远行星际空间的传播机制仍缺乏系统性认知.另一方面,由于太阳爆发的随机性和ICME事件捕捉的时效性限制,针对太阳活动峰年期极端ICME事件的研究样本严重不足,这直接制约了相关扰动模型的预测精度.

2024年5月受太阳黑子活动区AR3664活动影响,爆发了自2003年10月以来最强地磁暴.根据美国国家海洋和大气管理局太空天气预报中心(NOAA SWPC)的观测记录,AR3664于2024年5月1日首次出现在太阳东侧日面,初始坐标为S18E64(南纬18°,东经64°).在随后的7天内,该活动区持续演化,其内部磁通量不断重组并伴随新生黑子群的涌现,导致有效面积迅速扩展.至5月8日,当AR3664移动至日面西侧(坐标为S20W22,即南纬20°,西经22°)时,该活动区在此期间频繁爆发X级耀斑,其释放的CME携带的高能粒子流于5月10日抵达地球,引发持续18小时的超强地磁暴事件(Kp指数峰值达9).随着太阳自转,AR3664于5月14日逐渐转入日面背侧,其活动被欧洲航天局(ESA)的太阳

轨道飞行器(solar orbiter)成功捕获.5月20日,当该活动区尚未完全脱离背侧时,X级耀斑继续爆发,其产生的CME在5月22~24日间抵达火星,导致好奇号(Curiosity)火星车的导航相机与奥德赛(Odyssey)轨道器的恒星跟踪相机出现短暂数据异常(<https://www.nasa.gov/solar-system/planets/mars/nasa-watches-mars-light-up-during-epic-solar-storm/>).5月28日,AR3664重新出现在日面东侧(更新坐标为S18E56),NOAA SWPC重新编号为AR3697.此外,2024年共爆发X级以上大耀斑有52次,日冕物质抛射给地球制造的大地磁暴及以上活动有12次,10月3日太阳耀斑强度达到X9.

作为空间天气因果链中尺度最大的关键环节,广袤行星际空间目前仍是太阳系内最缺乏高时空分辨率连续监测的区域.本研究以2024年强太阳爆发事件,特别是AR3664为研究对象(2024年5月8~28日),基于“天问一号”探测器遥测与外测数据,系统分析极端空间天气对深空测控通信链路的多维度影响机制^[8],揭示了CME在行星际空间传播过程中引发的信号时延、相位扰动及数据丢包等效应,为后续深空探测任务的测控系统抗干扰设计、通信链路容错机制构建提供科学依据.

1 CME的传播

准确预测行星际太阳风传播过程是分析其对深空无线电影响的前提.CME预测需要尽可能准确地了解其离开太阳后的传播方向,不同的日光层结构可能会改变CME的轨迹,强烈喷发的耀斑会改变最初的传播方向.在几个太阳半径内CME主要受磁场的影响,在行星际传播过程中CME的传播方向由于与背景太阳风的相互作用也会发生改变^[9].

WSA-Enlil模型是一种结合了Wang-Sheeley-Arge (WSA)日冕模型和Enlil磁流体动力学(magnetohydrodynamics, MHD)模型的预测工具,用于模拟太阳风的传播和日球层中的瞬态结构,如CMEs,以提供太阳风结构和地球指向的CMEs的预警^[10].基于WSA-Enlil数值模型对活动区AR3664活跃期间的一次CME行星际太阳风参数的模拟结果(等离子体密度、太阳风速),该模型预测:CME对地球-火星链路的显著干扰时段为2024年5月11日12:00–21:00 UTC.如图1(a)所示,选取14:00 UTC作为特征时刻,其模拟结果清晰呈现了等离子体参数空间分布及地球、火星与太阳的瞬时几何构型.为进一步分析CME传播的方向性依赖,图1(b)展示了5

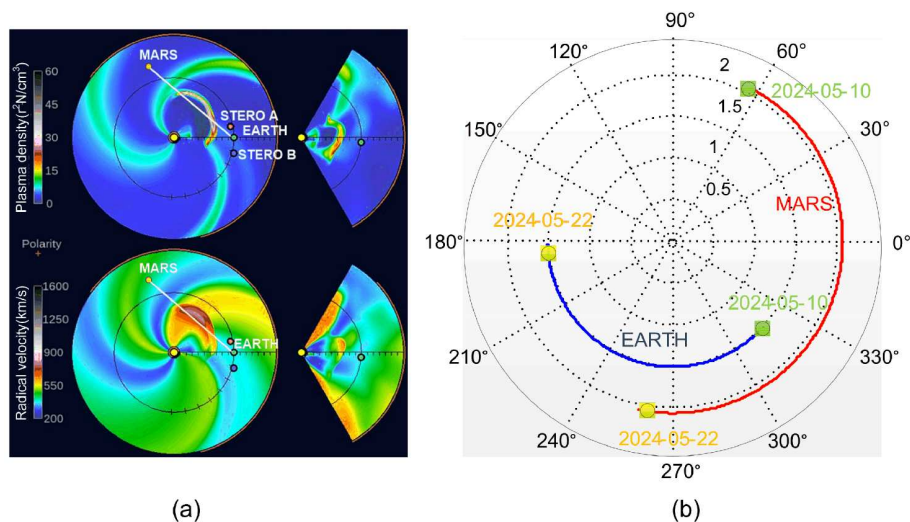


图1 CME传播过程时空特性分析。(a) WSA-Enlil模型预测的太阳风结构(2024-05-11T14:00 UTC)。(b) 地球和火星日心卡林顿坐标系经度
Figure 1 Spatiotemporal characteristics analysis of the CME propagation process. (a) Solar wind structure predicted by the WSA-Enlil model (2024-05-11T14:00 UTC). (b) Longitude of Earth and Mars in heliocentric Carrington coordinate system

月10~22日期间地球与火星在日心卡灵顿坐标系(heliocentric carrington coordinate system)下的相对位置演化。模拟数据显示,在首次CME爆发时(5月9日),地球与火星的日心经度差为 105° ,导致CME主体结构(即行星际日冕物质抛射, ICME)覆盖地球和火星之间的行星际空间无线电信号传输路径。

值得注意的是,受太阳自转及行星轨道运动的影响,至5月20日CME爆发时,火星已移动至CME传播方向的直接覆盖区域。“天问一号”探测器有效载荷单粒子计数值激增,如图2所示。2024-05-20T05:46至2024-05-21T02:52,单粒子在21小时内从计数值72增加至87,计数值增加了15,之后单粒子计数值恢复正常,5月21~28日,平均2~3天计数值增加1。

表1给出了5月11日前后CME期间的喀什(KS)、阿根廷(AGT)以及佳木斯(JMS)三个深空站跟踪“天问一号”情况。将“天问一号”的跟踪弧段与WSA-Enlil模型的结果进行比对,可以发现由于深空站采用稀疏跟踪模式,观测弧段未覆盖CME激波前峰的高梯度区。

2 对测控影响分析

深空测控系统作为实施深空探测任务的地面基础设施,是制约工程顺利推进的核心关键因素之一。在“天问一号”任务过程中,中国深空测控网3个深空站的6套大口径深空天线全部投入使用,圆满完成了“天问一号”探测器各个任务阶段的遥测、遥控和轨道测量

任务^[11]。无线电测量方式主要有多普勒测速、测距和VLBI (Very Long Baseline Interferometry)干涉测量。本文重点分析强太阳活动下太阳风对深空站测距、测速以及下行遥测链路的影响。

2.1 对轨道测量的影响分析

2.1.1 测速数据噪声模型

当探测器无线电载波信号穿过太阳风时,粒子的波动、碰撞以及对信号的折射,会引起幅度、相位的随机起伏、频谱的展宽,也就是行星际闪烁(interplane-

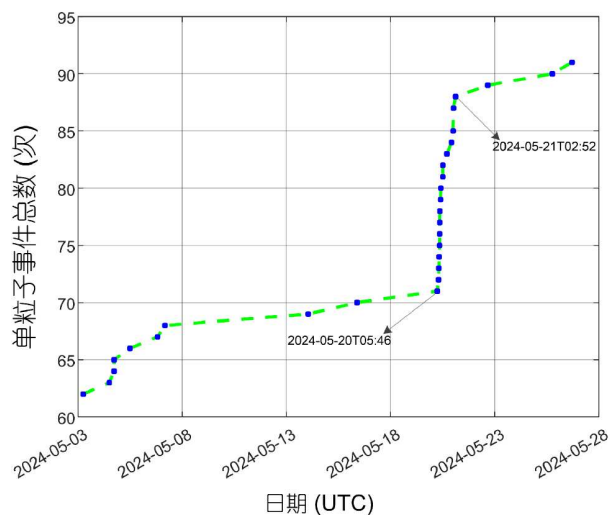


图2 “天问一号”有效载荷单粒子事件统计
Figure 2 Statistics on single particle events of Tianwen-1's payloads

表 1 深空站跟踪“天问一号”弧段

Table 1 Arcs of deep space stations tracking Tianwen-1

弧段	测站	开始跟踪时间(UTC)	结束跟踪时间(UTC)	方位角(°)	仰角(°)
1	KS	2024-05-09T23:32	2024-05-10T00:00	103~105	19~21
2	KS	2024-05-10T23:32	2024-05-11T01:00	103~105	19~21
ICME (2024-05-11T12~2024-05-11T21)					
3	KS	2024-05-11T23:32	2024-05-12T00:00	103~105	19~21
4	AGT	2024-05-13T09:28	2024-05-13T11:41	69~71	19~21

tary scintillation, IPS). 多普勒测量技术可以确定探测器的高精度状态矢量, 用于行星引力场、内部结构、质量、星际等离子体等研究^[12]. “天问一号”探测器主要采用双向多普勒测速数据, 测速的精度为0.1 mm/s (60 s 积分), 这里主要对多普勒数据的随机误差进行分析. 多普勒测速的测量误差源主要有: 接收机处的热噪声、频率源的相位噪声以及相位闪烁噪声. 双向多普勒测量的误差方差 σ_V^2 可以建模为^[13]

$$\sigma_V^2 = \sigma_{VN}^2 + \sigma_{VF}^2 + \sigma_{VS}^2, \quad (1)$$

式中, σ_{VN}^2 、 σ_{VF}^2 和 σ_{VS}^2 分别表示接收机处的热噪声、频率源的相位噪声以及来自太阳的相位闪烁噪声.

(1) 接收机热噪声

接收机热噪声可以表示为

$$\sigma_{VN}^2 = \sigma_{VNU}^2 + \sigma_{VND}^2, \quad (2)$$

其中, σ_{VNU} 和 σ_{VND} 分别表示上行和下行的热噪声:

$$\sigma_{VNU}^2 \cong \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{c}{2\pi f_c T} \right)^2 \cdot \frac{G^2}{\rho_{TR}} \cdot \frac{B_L}{B_{TR}}, & B_L < B_{TR}, \\ \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{c}{2\pi f_c T} \right)^2 \cdot \frac{G^2}{\rho_{TR}}, & B_L \geq B_{TR}, \end{cases} \quad (3)$$

式中, f_c 表示下行接收频率, T 表示积分周期, G 为转发比, ρ_{TR} 为应答器载波环路中的信噪比, B_{TR} 为应答器载波环路的噪声等效带宽, B_L 为单边环路带宽.

$$\sigma_{VND}^2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{c}{2\pi f_c T} \right)^2 \cdot \frac{1}{\rho_L}, \quad (4)$$

$$\rho_L = \frac{P_C}{N_0} \cdot \frac{1}{B_L}, \quad (5)$$

式中, P_C/N_0 为信号功率和噪声功率谱密度之比. “天问一号”多普勒的热噪声在 ± 0.02 mm/s.

(2) 频率源相位噪声

$$\sigma_{VF}^2 \cong c \frac{\sigma_y(T)}{\sqrt{2}}, \quad (6)$$

其中, $\sigma_y(T)$ 表示地面站时钟的稳定度, 用阿伦方差表

示. 由于深空站使用高稳定度的原子钟作为时钟基准, σ_{VF} 对多普勒测速噪声的影响较小, 通常可以忽略.

(3) 太阳闪烁噪声影响

载波通过太阳风时会产生相位闪烁, 造成多普勒测速的随机误差. 相位闪烁对多普勒测速误差 σ_{VS}^2 取决于太阳-地球-探测器(Sun-Earth-probe, SEP)角度、载波频率和积分时间, σ_{VS}^2 近似值为

$$\sigma_{VS}^2 = \begin{cases} \frac{0.53 C_{\text{band}} c^2}{f_c^2 T^{0.35} [\sin(\theta_{\text{SEP}})]^{2.45}}, & 0^\circ < \theta_{\text{SEP}} \leq 90^\circ, \\ \frac{0.53 C_{\text{band}} c^2}{f_s^2 T^{0.35}}, & 90^\circ < \theta_{\text{SEP}} \leq 180^\circ, \end{cases} \quad (7)$$

式中, θ_{SEP} 为太阳-地球-探测器角度, C_{band} 为常值, 由发射频率决定, “天问一号”采用X频段测控, $C_{\text{band}} = 5.5 \times 10^{-6}$. AR3664活跃期间, $\theta_{\text{SEP}} = 43^\circ$, 太阳闪烁造成的噪声大小约为0.15 mm/s.

2.1.2 测距数据等离子体延迟和噪声模型

与测速数据不同的是, 测距数据需要同时考虑系统误差和随机误差. 测距数据的系统误差受站址坐标、对流层和电离层误差以及行星际等离子体等的影响. 其中, 传播路径中由于存在电离介质而产生额外的延迟, 它是路径上总电子含量和无线电波频率的函数, 表示为

$$\Delta r = \Delta \tau \cdot c = \frac{40.3}{f^2} \int_{\text{earth}}^{\text{spacecraft}} N_e dl, \quad (8)$$

其中, Δr 为测距误差, $\Delta \tau$ 为时延, c 为光速, $N_e(r)$ 为与太阳距离 r 处的电子浓度, 用经验公式表示为^[4]

$$N_e(r) = 2.21 \times 10^{14} \left(\frac{r}{R_0} \right)^{-6} + 1.55 \times 10^{12} \left(\frac{r}{R_0} \right)^{-2.3}, \quad (9)$$

式中, R_0 为太阳半径. $N_e(r)$ 有多个模型, 差别主要在指数项上.

随机误差主要受接收机的热噪声影响, 测距噪

声 σ_R 表示为

$$\sigma_R = \frac{c}{16f_t \sqrt{\rho_L}}, \quad (10)$$

式中, f_t 表示测距音的最高频率成分.

需要指出的是, 太阳风对无线电信号的影响, 包括群延迟、相位闪烁和幅度闪烁等, 均与信号的频率密切相关, 且与频率平方成反比. 这意味着无线电信号的频率越高, 受到太阳风的影响就越小. 以“天问一号”为例, 其采用X频段进行测量和通信, 因此受到的行星际闪烁(IPS)影响较S频段显著降低, 仅为采用S频段时的 $1/16^{[14]}$.

2.1.3 实测数据分析

(1) 测速数据比对分析

使用2.1.1节分析的多普勒噪声理论值与实际测量值进行比对分析, 结果如图3所示. 图3中多普勒噪声的实测值与理论预测值呈现出高度一致性, 且其幅值变化与太阳-地球-探测器几何夹角(θ_{SEP})显著相关. 特别地, 在2023年11月上合事件期间(15~22日), 当 θ_{SEP} 角趋近于 0° 时, 噪声幅值达到峰值, 这直接验证了太阳风等离子体闪烁效应对深空信号传输的调制机制. 基于多普勒测速数据的轨道确定结果显示(图4), 除子图4(h)

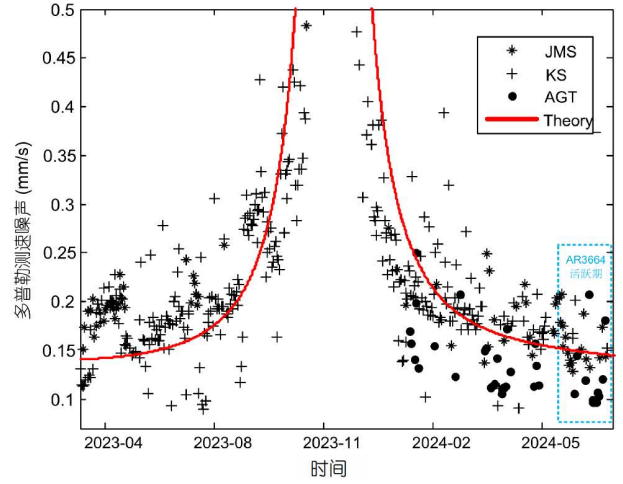


图3 多普勒测速噪声理论值与实测值

Figure 3 Theoretical and measured values of Doppler noise

中由推进器姿控喷气引发的瞬时扰动外, 其余弧段的测速残差RMS均保持在 0.2 mm/s 的理论误差范围内. 这一现象表明: ① CME事件的时空匹配性要求: 观测弧段未覆盖CME激波前峰的高梯度区, 因而未能记录到由剧烈等离子体扰动引发的测速异常; ② 多普勒测量对行星际等离子体密度缓变的敏感性受限: 现有测

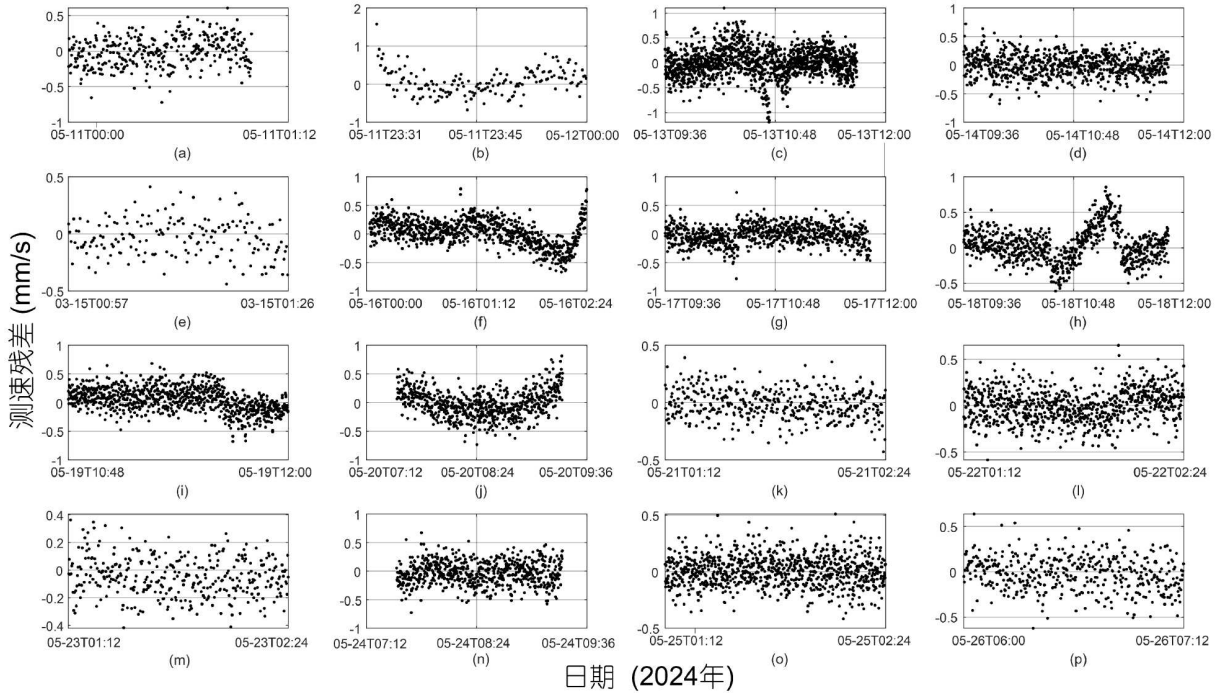


图4 多普勒测速数据残差2024年5月11~26日期间按天统计的多普勒测速残差图, 每幅子图代表一天的数据

Figure 4 Residual of Doppler velocity measurement data. Daily Doppler velocity residual plots from May 11 to 26, 2024, with each subplot representing data for one day

速精度(0.1 mm/s, 1 s积分)无法有效分辨其动态特征.

(2) 测距数据分析

利用测距数据进行轨道确定, 在测距数据的处理中仅对地球大气进行修正, 不考虑式(8)中行星际等离子体造成的延迟误差. 定轨计算中解算位置速度的同时解算测距系统差, 测距系统差的解算结果如图5所示.

由于测距数据处理过程中未将行星际等离子体延迟纳入考量, 在其他解算策略保持不变的前提下, 测距系统差直接反映了等离子体对测距信号延迟的影响. 从长期解算结果来看, 系统差中存在约780天的周期性变化, 这与地球与火星的会合周期一致, 考虑周期项是由地球与火星轨道动力学造成的, 与使用星历表等力学模型有关. 与测速噪声类似, 在2023年11月上合期间, 测距时延达到了最大值. 在AR3664活跃期间, 行星际等离子体浓度变化对“天问一号”探测器的测距数据系统差解算造成了约40 m的扰动.

2.2 对遥测信号影响分析

当前深空接收机普遍采用锁相环(phase locked loop, PLL)技术实现载波同步, 但太阳闪烁效应会引发双重恶化机制: 相位闪烁产生的相位噪声会导致PLL环路相位误差累积, 而幅度闪烁引起的信号功率衰落则会降低环路等效信噪比(signal-to-noise ratio, SNR), 当综合相位抖动超过PLL捕获带宽时可能引发失锁风险. 为此, 现代深空任务普遍采用X/Ka高频段无线电通信, 并在地面站部署35~70 m大口径抛物面天线, 通过提升天线增益和降低系统噪声温度来补偿路径损耗. 然而, 在地球-太阳-火星上合期间, 太阳射电爆发产生的宽频带噪声会使地面接收系统噪声温度骤升, 导致接收信号信噪比(SNR)急剧下降至解调门限以下, 进而造成天地通信链路中断.

进行通信链路设计时, 除了要考虑自由空间损耗、雨衰、极化损耗等常规通信方式下的链路参数外, 在通信频率选择、传输信号带宽设计、调制方式选择、锁相环路带宽设计等方面必须要考虑太阳闪烁对通信链路的影响.

“天问一号”使用X频段测控, 探测器下行链路通信性能如表2所示^[15], 环绕器为正常工作状态.

图6展示了2024年1~8月期间三个深空站跟踪弧段内信号功率与噪声谱密度比 P_C/N_0 的观测统计结果. 数据表明, JMS站凭借66 m天线的高增益特性, 其 P_C/N_0 均值较KS/AGT(35 m)站提升 4.1 ± 0.2 dB; 在地火距离

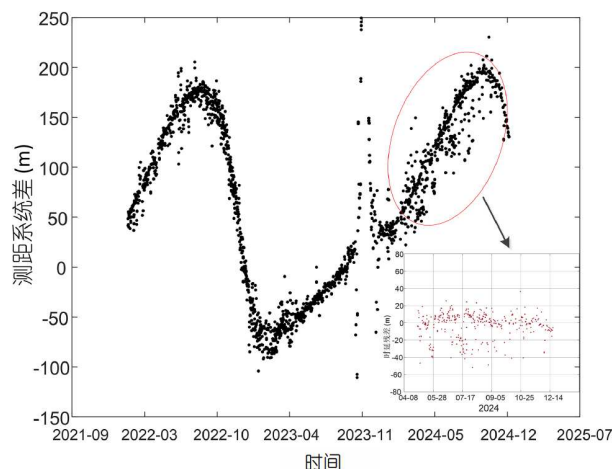


图5 测距数据系统差解算结果

Figure 5 Calculation results of system errors of ranging data

表2 “天问一号”地球下行链路通信性能(X频段)

Table 2 Earth downlink communication performance of Tianwen-1 (X band)

	参数	单位	数值
探测器	探测器饱和输出功率 (100 W行放)	dBm	50
	线路损耗	dB	≥ -1.0
	ERIP(低增益天线)	dBW	21
	ERIP(中增益天线)	dBW	28.5
	ERIP(高增益天线)	dBW	≥ 57.4
	指向误差	dB	-0.1
空间损耗	空间损耗(4×10^8 km)	dB	283.02
地面站	地面站天线G/T(66 m)	dB/K	≥ 53.3
	地面站天线G/T(35 m)	dB/K	≥ 49
	噪声温度	K	46

从2.34 AU减小至1.14 AU的过程中, P_C/N_0 的均值提升5.1 dB, 与自由空间传播模型预测趋势一致. 值得注意的是, 在太阳活动区AR3664活动期间(5月10~28日), 地面接收信号 P_C/N_0 未出现显著变化.

环绕器分别采用高增益天线(high gain antenna, HGA)、中增益天线(medium gain antenna, MGA)和低增益天线(low gain antenna, LGA)工作时, 地面站接收下行信号 P_C/N_0 的计算值如图7所示.

通过理论值与实测值的比较可以得出, P_C/N_0 实测值与理论值一致性较好. 针对AR3664活跃期深空通信链路的性能分析表明, 在HGA与地面66 m/35 m口径天线协同工作模式下, 下行信道余量分别达到27 dB(66 m

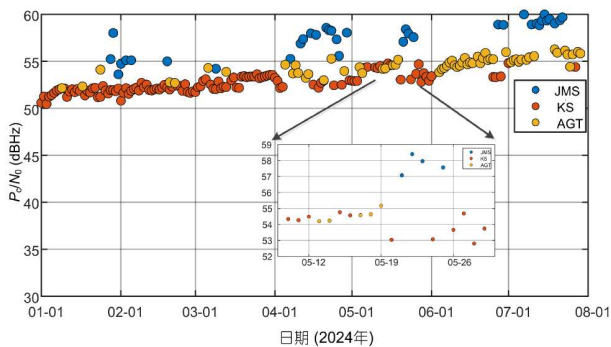


图 6 P_C/N_0 的变化
Figure 6 Variation of P_C/N_0

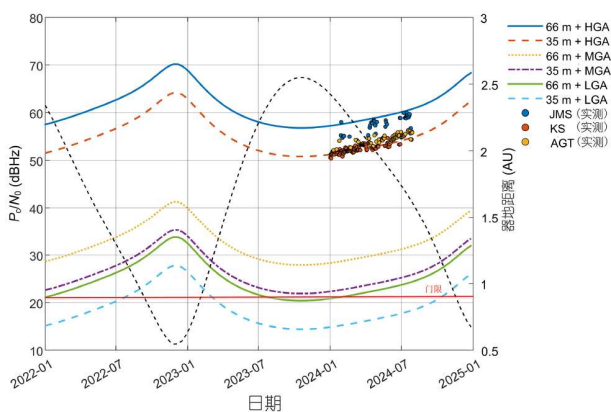


图 7 地面接收下行信号 P_C/N_0 变化
Figure 7 Variation of downlink signal

站)及23 dB(35 m站). 在信道编码方面, 环绕器采用RS码、伪随机序列扰码与卷积码的级联方案, 实测误帧率稳定维持在 $0\sim 4.17\times 10^{-4}$ 区间, 如图8所示, 较任务要求的 1×10^{-3} 指标提升2倍, 验证了极端太阳活动条件下的链路可靠性保障能力. 需要指出的是, 在AR3664活跃期, 如果使用中增益天线和35 m站接收, 则下行信道

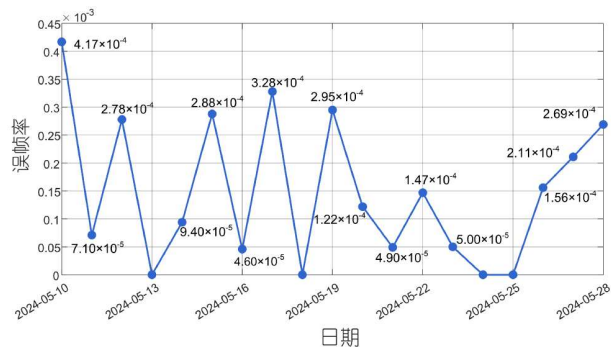


图 8 “天问一号”的遥测数据误帧率统计
Figure 8 Frame error rate in telemetry data of Tianwen-1

余量为0. 使用低增益天线, 地面站使用66 m或35 m天线接收, 链路的余量不能满足指标要求, 此时太阳活动的影响将显著增加.

3 结论

本文基于第25太阳活动周峰值期, 特别是AR3664活跃期的CME事件, 系统分析了ICME对“天问一号”深空测控链路的扰动影响, 主要结论如下.

(1) 观测数据分析表明, 受限于ICME对观测时空匹配性要求, 稀疏观测模式下“天问一号”多普勒测速数据未能捕获激波峰面穿越期多普勒的相位闪烁现象, 现有测速精度(0.1 mm/s, 1 s积分)无法有效分辨其动态特征; 离散在行星际的等离子造成测距系统差约40 m的扰动; 我国深空天线的高动态跟踪能力与自适应信号处理技术有效抑制了等离子体噪声, 保障了测控链路的稳定性.

(2) 根据“天问一号”实测数据分析, 整个CME期间, 遥测信号的误帧率优于 4.17×10^{-4} , 验证了极端太阳活动条件下的链路可靠性保障能力.

致谢 感谢中国科学院国家空间科学中心王晶晶博士、兰州空间技术物理研究所李存惠研究员、北京跟踪与通信技术研究所王宏高级工程师对本文的有益讨论.

参考文献

- Opitz A, Fedorov A, Wurz P, et al. Solar-wind bulk velocity throughout the inner heliosphere from multi-spacecraft measurements. *Sol Phys*, 2010, 264: 377–382
- Lu J H, Du B, Ge N. Complexity and uncertainty: wireless communications face dual challenges (in Chinese). *Sci Sin-Inf*, 2013, 43: 1563–1577 [陆建华, 葛宁, 杜冰. 复杂性与不确定性: 无线通信面临的双重挑战. *中国科学: 信息科学*, 2013, 43: 1563–1577]
- Yao X J, Liu B, Du Y Y, et al. Interplanetary communication parameters design under influence of solar scintillation (in Chinese). *J Astronaut*,

- 2018, 39: 1167–1175 [姚秀娟, 刘波, 杜艺颖, 等. 太阳闪烁影响下的星际通信链路参数设计. 宇航学报, 2018, 39: 1167–1175]
- 4 Xu G J. Research on the impact of the coronal solar wind on deep space electromagnetic wave propagation (in Chinese). Doctor Dissertation. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 [徐冠军. 日冕区太阳风对深空电波传播影响的研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017]
- 5 Liu L J, Peng B. Overview of IPS observations in China (in Chinese). *Sci Sin Phys Mech Astron*, 2016, 46: 18–23 [刘丽佳, 彭勃. 我国行星际闪烁观测概述. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 18–23]
- 6 Richardson I G. Identification of interplanetary coronal mass ejections at ulysses using multiple solar wind signatures. *Sol Phys*, 2014, 289: 3843–3894
- 7 Molera Calvés G, Kallio E, Cimo G, et al. Analysis of an interplanetary coronal mass ejection by a spacecraft radio signal: a case study. *Space Weather*, 2017, 15: 1523–1534
- 8 Liu Y D, Hu H, Zhao X, et al. A pileup of coronal mass ejections produced the largest geomagnetic storm in two decades. *ApJL*, 2024, 974: L8
- 9 Fu S, Ding Z, Zhang Y, et al. First report of a solar energetic particle event observed by China's Tianwen-1 mission in transit to Mars. *ApJL*, 2022, 934: L15
- 10 He Q B, Wang Z C, Liu Q H, et al. CME-related large decreases in the differential phase delay of Tianwen-1 DOR signals. *Astrophys J Lett*, 2022, 940: L2
- 11 Yu Z J, Li H T. Review on development history of TT&C system of China's lunar and planetary exploration projects (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2021, 8: 543–554 [于志坚, 李海涛. 月球与行星探测测控系统建设与发展. 深空探测学报, 2021, 8: 543–554]
- 12 Ma M L, Zheng W M, Xia B, et al. Interplanetary scintillation observation and analysis using Martian spacecraft downlink signal from VLBI station (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2017, 47: 448–454 [马茂莉, 郑为民, 夏博, 等. 基于VLBI站接收的火星探测器信号研究行星际闪烁. 中国科学: 技术科学, 2017, 47: 448–454]
- 13 Kong J, Zhang Y, Duan J F, et al. Orbit determination of Tianwen-1 with one-way Doppler (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2023, 52: 588–595 [孔静, 张宇, 段建锋, 等. 利用单向多普勒确定“天问一号”轨道. 测绘学报, 2023, 52: 588–595]
- 14 Ma M L, Zheng W M, Chang S Q, et al. Precise three-way Doppler of spacecraft based on VLBI data and its application (in Chinese). *Sci Sin Phys Mech Astron*, 2016, 46: 77–84 [马茂莉, 郑为民, 昌胜骐, 等. 基于VLBI数据的深空探测器精密三向测速及应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 77–84]
- 15 Zhang R Q. China's First Mars Exploration Program (in Chinese). Beijing: China Astronautic Publishing House, 2021 [张荣桥. 中国首次火星探测工程. 北京: 中国宇航出版社, 2021]

Summary for “强太阳活动对‘天问一号’测控影响”

Impact of intense solar activity on the tracking, telemetry, and command (TT&C) of Tianwen-1

Jing Kong^{1*}, Saijin Wang¹, Guolin Hu¹, Maoli Ma² & Shaoran Liu¹

¹ Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China

² Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

* Corresponding author, E-mail: kj_bacc@hotmail.com

As the largest-scale critical link in the space weather causal chain, the vast interplanetary space remains one of the least continuously monitored regions in the solar system with high spatiotemporal resolution. This study focuses on the intense solar eruption events of 2024, particularly those originating from Active Region 3664 (AR3664) (May 8–28, 2024), to systematically analyze the multidimensional impact mechanisms of extreme space weather on deep-space telemetry, tracking, and command (TT&C) communication links. Leveraging telemetry and tracking data from China's Tianwen-1 Mars probe, we investigate the effects of coronal mass ejections (CMEs) during their propagation through interplanetary space, including signal delay, phase perturbations, and data packet loss. The findings provide critical scientific insights for enhancing the anti-interference design of TT&C systems and constructing fault-tolerant communication mechanisms for future deep-space exploration missions.

During the peak of the 25th solar cycle, especially during the AR3664 active period, we conducted a comprehensive analysis of the disturbances caused by interplanetary coronal mass ejections (ICMEs) on the Tianwen-1 deep-space TT&C link. The key conclusions are as follows: (1) Observation and Analysis of Plasma Disturbances. Under sparse observation conditions, the Doppler velocity measurements from Tianwen-1 failed to capture the phase scintillation phenomena associated with shock front crossings due to the stringent spatiotemporal matching requirements imposed by ICMEs. The current velocity measurement precision (0.1 mm/s, 1 s integration time) was insufficient to resolve all the dynamic features of these disturbances. However, discrete plasma structures in interplanetary space introduced a ranging system error of approximately 40 meters. Despite these challenges, China's deep-space antennas demonstrated robust high-dynamic tracking capabilities and adaptive signal processing techniques, effectively mitigating plasma-induced noise and ensuring the stability of the TT&C link. (2) Verification of Communication Link Reliability. Analysis of Tianwen-1 telemetry data revealed that the frame error rate (FER) remained below 4.17×10^{-4} throughout the CME event, validating the reliability of the communication link under extreme solar activity conditions. This empirical evidence underscores the resilience of the existing TT&C architecture in maintaining data integrity despite severe space weather disturbances.

The study highlights two major contributions. (1) Mechanistic Understanding: by quantifying the effects of ICMEs on deep-space communication signals, we elucidate the relationship between solar wind plasma structures and TT&C performance degradation. This is particularly relevant for missions operating in high solar activity environments. (2) Operational Validation: the successful operation of Tianwen-1 during the AR3664 eruptions demonstrates the effectiveness of current mitigation strategies, including high-precision tracking and adaptive signal processing. These results provide a benchmark for future mission designs.

Given the increasing frequency of extreme space weather events during solar maxima, future deep-space missions must incorporate enhanced real-time monitoring and adaptive correction algorithms to further improve TT&C robustness.

In summary, this study advances our understanding of CME-induced disruptions in deep-space communication systems and offers actionable recommendations for safeguarding future missions against space weather hazards. The Tianwen-1 dataset serves as a valuable resource for validating theoretical models and optimizing next-generation TT&C technologies.

intense solar activity, Tianwen-1, interplanetary scintillation, plasma delay, telemetry, tracking, and command (TT&C)

doi: [10.1360/TB-2024-1045](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1045)