火星星间大气掩星星座探测与仿真研究

胡金泽[1,2]、胡雄[1]、吴小成[1,2]、李磊[1]、吴树范[3]、程旋[4]、闫召爱[1,2*]、宋亮[1]、宋淑丽[5]、肖存英[6]

1(中国科学院国家空间科学中心太阳活动与空间天气全国重点实验室，北京 100190)

2(中国科学院大学，北京 100049)

3(上海交通大学，上海 200240)

4(深空探测实验室（天都实验室），北京 100082)

5(中国科学院上海天文台，上海 200030)

6(北京师范大学物理与天文学院，北京 100875)

基金项目：国家自然科学基金项目（12573066）

摘要

火星大气探测数据对于火星大气科学与空间环境研究、天气预报、未来无人/有人探测任务实施及科研站建设具有重要支撑作用。本文提出利用中国天问一号轨道器、天问三号未来轨道器与返回器，协同国际在轨卫星（TGO, MEX）等航天器组成一个火星大气星间掩星探测星座的新概念，以提供大量火星大气探测数据，解决传统星地掩星探测数据存在盲区、时空分布差、精度不高等问题。仿真结果显示，星座掩星事件可达 110500 余次/火星年，覆盖全球不同纬度、经度和地方时段。利用掩星事件模拟观测数据反演表明，星间 U/X 波段无线电链路能够有效获得火星大气与电离层参数剖面。研究结果可为未来国际合作构建高时空覆盖的火星全球大气和电离层掩星探测星座提供参考。

【关键词】无线电掩星；火星探测；星间掩星星座；火星大气和电离层

中图分类号：电离层物理 P352；高层大气探测 P356

最新录用

Detection and simulation study of a Mars intersatellite atmospheric radio occultation constellation

HU Jinze[1,2], HU Xiong[1], WU Xiaocheng[1,2], LI Lei[1], WU Shufan[3], CHENG Xuan[4], YAN Zhaoai[1,2*], SONG Liang[1], SONG Shuli[5], XIAO Cunying[6]

1 (State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2 (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3 (Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

4 (Deep Space Exploration Laboratory (Tiandu Laboratory), Beijing 100082, China)

5 (Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)
6 (School of Physics and Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract Martian atmospheric observations support research on the Martian atmosphere and space environment, weather forecasting, and the planning and execution of future robotic and crewed missions. They also provide a scientific basis for establishing research stations on Mars. This study proposes a conceptual five-spacecraft constellation for inter-spacecraft radio occultation sounding of the Martian atmosphere. It comprises China's Tianwen-1 orbiter, the Mars Orbiter and Earth Return Orbiter envisaged for Tianwen-3, the ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO), and Mars Express (MEX). The constellation is designed to increase atmospheric sampling and address coverage gaps and uneven spatiotemporal sampling in conventional spacecraft-to-Earth radio occultation observations. Orbital propagation and occultation-event searches were conducted over one Martian year, approximately 687 Earth days. The analysis examined event counts, contributions from individual inter-spacecraft links, global spatial coverage, and local mean solar time distributions. The simulations identified more than 110,500 occultation events across the ten inter-spacecraft links. The event distribution provided cumulative global coverage and spanned the full 0–24 h local mean solar time range. Combining multiple orbital geometries therefore offers additional opportunities for sampling regions and local times that are less accessible to conventional spacecraft-to-Earth observations. For a representative MEX-TGO occultation event, U-band (437.1 MHz) and X-band (8.4 GHz) radio links were simulated. Forward simulations accounted for propagation through both the neutral atmosphere and ionosphere and generated the corresponding excess-phase paths. Single-frequency inversions were performed separately for each band to retrieve vertical profiles of ionospheric electron density and neutral atmospheric number density. The retrieved profiles were compared with the prescribed atmospheric and ionospheric background models. Retrievals at both frequencies reproduced the main features of the ionospheric electron density profile at altitudes of 90-300 km. At altitudes of 0-40 km, the X-band retrieval of neutral atmospheric number density agreed more closely with the input profile than the U-

最新录用

band retrieval. The U-band excess-phase paths showed a stronger ionospheric contribution, consistent with the frequency dependence of plasma refraction. These results can inform the design of future international Martian radio occultation constellations with broad spatiotemporal coverage of the neutral atmosphere and ionosphere.

Key words Radio occultation; Mars exploration; Intersatellite occultation constellation; Martian atmospheric and ionospheric retrieval

0 引言

无线电掩星技术作为一种既强大又经济的探测手段，从 20 世纪 60 年代以来一直应用于行星（火星）电离层和大气探测[1]。该技术利用行星大气和电离层对无线电波传播链路的折射效应，获得电波折射弯曲角，可反演中性大气折射率、密度、温度和气压以及电离层电子密度等多种参量，具有长期稳定、无需标定、探测精度和垂直分辨率高、不受沙尘暴影响等特点[1]。探测数据对于行星大气热结构、电离层结构以及动力学等研究具有重要的科学价值。其中，中性大气密度、温度和气压剖面主要用于研究低层大气热结构、波动与天气过程[2-4]，相关大气环境信息也可为火面任务环境分析提供依据[5]；电离层电子密度剖面则主要用于研究电离层日夜结构、太阳活动响应及空间环境变化[6-8]，并为评估电离层对无线电信号传播的影响提供依据[9]。

在火星探测任务中，自 1965 年 Mariner-4 掩星实验首次直接测量火星大气和电离层以来[10]，国际上绝大部分火星探测器都实施了火星大气和电离层的掩星探测实验。肖洛等（2024）系统梳理了火星无线电掩星探测进展，指出多次火星任务已积累大量大气和电离层剖面数据[11]。这些火星掩星探测绝大多数属于“星-地”掩星模式，即发射端（航天器）位于火星轨道，接收端（深空观测站）位于地球。星地掩星受限于太阳、地球与火星相对运动的几何关系，导致观测数据地方时覆盖范围存在局限，即无法观测正午以及子夜时段；其次，火星到地球链路长达 5500 万至 4 亿公里，无线电信号衰减严重，且电波在到达深空站过程中会被地球电离层和大气层折射，对火星大气和电离层参数反演带来影响。为解决上述星地掩星的局限，美国和欧洲分别开展了星间掩星探测模式的探索。星间掩星是指发射端和接收端均位于火星轨道的两航天器间无线电链路穿过火星临边大气和电离层的观测模式[12,13]。美国利用其“奥德赛号”（ODY）和“火星轨道勘测飞行器”（MRO）之间的 U 波段（U-band:Ultra high frequency-band）无线电通信链路开展火星星间掩星探测实验[12]。欧洲航天

最新录用

局（ESA）利用其“火星快车”（MEX）和“微量气体轨道器”（TGO）之间的U波段通信链路开展了星间无线电掩星探测实验[13]，成功验证了星间火星掩星探测技术，基于124次观测提取71条完整火星电离层电子密度剖面，并获得近正午太阳天顶角区域的观测结果[14]，表明星间掩星能够拓展传统星地掩星较难覆盖的观测几何和地方时范围。相较于星地链路，星间链路传播距离更短，可减少地球大气、电离层和深空长距离传播对观测量的影响，有利于提高链路信噪比和事件发生频次，从而为获取更密集的火星大气和电离层剖面提供条件。对于低层大气探测，无线电掩星能够获得高垂直分辨率的密度、温度和气压剖面，有利于识别边界层和小尺度重力波等垂直结构[2,3]。同时，无线电信号受沙尘影响小，Mariner 9曾在全球沙尘暴期间获得火星大气掩星剖面[15]。国际上也在推进火星多航天器协同探测。Sweeney等提出了由6颗小卫星组成的火星星间无线电掩星星座概念，并通过星间链路掩星仿真评估了大气剖面的精度及时空覆盖能力[16]。为增加火星大气剖面的时空采样，并为火星登陆与采样返回任务提供大气环境观测资料，美国进一步提出了由6颗航天器组成的火星无线电掩星观测网络（Mars Radio Occultation Observation Network，MaROON）概念[17]。同时，NASA的ESCAPADE任务采用两颗同型航天器，开展太阳风—火星磁环境相互作用及大气逃逸的多点观测[18]；MACAWS概念则提出利用三颗高轨航天器，同时监测火星低层大气天气过程和近火星空间环境[19]。上述任务与概念表明，多航天器协同观测是提高火星大气和空间环境探测时空覆盖能力的重要途径。

我国首次火星探测任务“天问一号”于2020年发射，任务围绕火星形貌、地质结构、表面物质、空间环境和水冰分布等目标开展综合探测[20]，并自主实施了星地无线电掩星观测试验[21-23]。中国国家航天局发布的天问三号国际合作机遇公告显示，天问三号火星采样返回任务将部署火星轨道器（Mars Orbiter，MO）与地球返回器（Earth Return Orbiter，ERO）[24]，可为我国未来开展火星星间掩星探测提供新的机会。

本文提出由天问一号环火轨道器（TW-1）、天问三号火星轨道器（TW3-MO）和地球返回器（TW3-ERO），以及ESA在轨的微量气体轨道器（TGO）和火星快车（MEX）共5个航天器组成一种火星星间掩星星座的新概念设想，开展星间掩星事件时空分布仿真等研究，为未来可能开展的国际火星星间掩星探测实验提供参考。

最新录用

1. 火星星间无线电掩星探测原理与掩星星座概念

1.1 探测原理

火星星间无线电掩星探测基于两颗环绕火星轨道卫星间无线电（如 U/X 波段）链路[11]。电波射线切点是无线电射线穿过火星中性大气和电离层的弯曲路径上距火星体心最近的位置，其相对于火星参考球面的高度称为切点高度。随着发射星（Tx）与接收星（Rx）的相对运动，其直线链路的切点高度逐渐降低时形成下降掩星，逐渐升高时形成上升掩星[12]。两类掩星事件均可用于获取火星大气和电离层参量剖面，如图 1 所示。

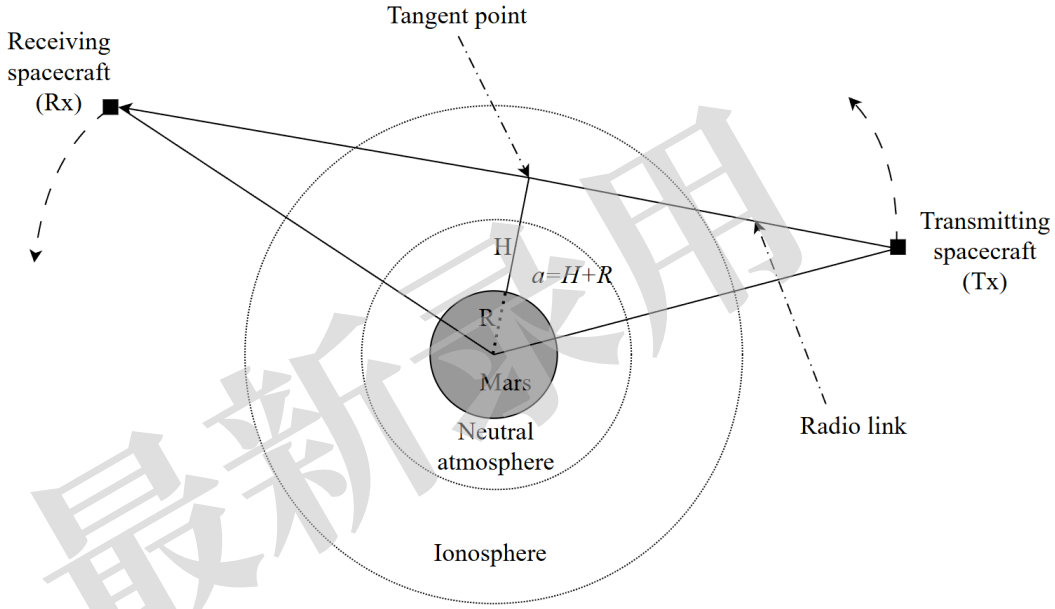


图 1 火星星间无线电掩星观测几何示意图

Fig.1 Schematic observation geometry of Mars intersatellite radio occultation

当无线电信号穿越火星电离层和中性大气时，介质折射率的高度梯度会导致电波射线路径弯曲，并引起传播相位和频率变化。接收机的基本观测量为电波振幅和相位。相位随时间的变化可表征接收频率的变化，而接收频移同时包含航天器相对运动和火星介质折射的贡献。在几何光学和大气介质局部球对称近似下，根据航天器轨道状态计算电波沿直线路径的多普勒频移，并从总频移中分离由火星介质折射引起的附加频移，结合掩星几何关系计算电波弯曲角与碰撞参数[25,26]。利用 Abel 积分变换，可由弯曲角剖面反演得到折射率剖面[25,26]：

$$n(a_0)=\exp\left[\frac{1}{\pi}\int_{a_0}^{\infty}\frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2-a_0^2}}da\right] \quad 11\backslash * \text{ MERGEFORMAT ()}$$

式中，a_0为射线碰撞参数，$\alpha(a)$为对应碰撞参数a的电波弯曲角，$n(a_0)$为对应切点高度处的火星介质折射率。在弱折射近似下，碰撞参数可近似表示为切点半径，即$a_0 \approx R+H$，其中 R 为火星半径，H 为射线切点高度。火星无线电传播介质的折射率由中性大气和电离层共同决定。对于以 CO_2 为主要成分的火星大气，总折射率可表示为：

$$n(h,f)=1+K_{CO_2}N_n(h)-\frac{40.3Ne(h)}{f^2} \quad 22\backslash * \text{ MERGEFORMAT ()}$$

式中，$N_n(h)$为高度 h 处的 CO_2 中性大气数密度，K_{CO_2}为 CO_2 折射率系数，$Ne(h)$为电离层电子密度，f 为无线电载波频率。式中常数项 1 表示真空折射率；$K_{CO_2}N_n(h)$为中性大气对折射率的贡献；$-\frac{40.3Ne(h)}{f^2}$为电离层自由电子对折射率的贡献。

国际上已成功实施单频/双频、单程/双程等多种体制的无线电掩星探测实验[11,23]。其中，按照掩星观测采用的电波链路载波频率数量，可分为单频和双频体制：单频体制采用单一载波频率进行掩星实验，双频体制采用两个载波频率进行掩星实验；按照无线电链路工作方式，可分为单程和双程体制：单程体制是指由发射端发射无线电信号、接收端接收信号形成电波的单程电波路径掩星实验，双程体制则由链路的一端发射信号，经另一端接收并相干转发后返回被接收，形成往返双程无线电路径的掩星实验。一般采用双频双程掩星体制，利用电离层色散特性精确获取/修正行星电离层信息，并有效消除信号相干转发接收机的钟差影响；采用单频单程掩星体制，易于实现掩星实验，但对航天器时钟稳定度要求较高，以获得高精度的掩星结果。本文讨论单频单程星间掩星探测，即一颗航天器以单一载波频率发射无线电信号，另一颗航天器接收该信号，不进行相干转发[12,21,23]。

火星探测器（如 MEX 等）一般搭载 U 波段通信载荷支持其与火星登陆器的通信，并搭载 X 波段载荷支持其与地球的通信，因此可利用 U 波段或者 X 波段开展单频单程星间掩星探测实验。

最新录用

基于（1）式，利用单频电波折射弯曲角测量结果可反演得到介质折射率。在电离层高度（90 km 以上），折射率主要来自等离子体的贡献，有：

$$n(h,f)\approx 1-\frac{40.3Ne(h)}{f^2}$$ 33* MERGEFORMAT ()

从而可由折射率计算得到电子密度：

$$Ne(h)\approx -\frac{f^2}{40.3}\left[n(h,f)-1\right]$$ 44* MERGEFORMAT ()

在 40 km 以下，折射率主要来自中性 CO_2 大气的贡献，有

$$n(h,f)\approx 1+K_{CO_2}N_n(h)$$ 55* MERGEFORMAT ()

因此可得到 CO_2 中性大气数密度：

$$N_n(h)\approx \frac{n(h,f)-1}{K_{CO_2}}$$ 66* MERGEFORMAT ()

进一步可根据 CO_2 分子质量将数密度换算为质量密度。若记高度 h 处中性大气质量密度为 $\rho(h)$，则有：

$$\rho(h)=m_{CO_2}N_n(h)$$ 77* MERGEFORMAT ()

在获得中性大气密度剖面后，通常假设火星大气满足流体静力学平衡，由密度剖面向下积分得到压强剖面[2,3,26]：

$$\frac{dp}{dh}=-\rho(h)g(h)$$

$$p(h)=p(h_{top})+\int_h^{h_{top}}\rho(h')g(h')dh'$$ 88* MERGEFORMAT ()

式中，$p(h)$ 为高度h处的火星大气压强，$g(h)$ 为火星重力加速度，h_{top} 为反演顶部高度。顶部边界条件通常结合火星高层大气经验模型或先验温度给定。由于大气密度随高度近似指数衰减，顶部边界条件引入的误差在向下积分过程中会逐渐减弱。

最后，利用理想气体状态方程获得大气温度剖面：

$$T(h)=\frac{p(h)}{\rho(h)R_{CO_2}}$$ 99* MERGEFORMAT ()

式中，$T(h)$ 为高度 h 处的火星中性大气温度，R_{CO_2} 为以 CO2 为主要成分的火星大气比气体常数。

最新录用

1.2 火星星间掩星星座概念

据不完全统计，目前国际上仍在环绕火星运行的航天器包括：ESA 的微量气体轨道器(TGO)和火星快车(MEX)、中国的天问一号(Tianwen-1)、阿联酋希望号火星探测器(Hope)、美国的奥德赛号（Odyssey）和火星勘测轨道飞行器（MRO）等。随着国际上深空探测的推进，未来火星轨道将迎来新的航天器，如规划中的中国天问三号（Tianwen-3）火星采样返回任务，将部署轨道器（Mars Orbiter）与地球返回器（Earth Return Orbiter）。如果从技术上选择其中的 5 个航天器（轨道参数主要参考 Parrott 等关于 MEX-TGO 星间掩星实验的研究、Hu 等（2022）关于天问一号无线电掩星的研究以及 CNSA 公开公告，具体参数列于表 1），假定这些航天器均具备可用于星间掩星的 U/X 波段无线电载荷，可组成一个利用星间 U/X 波段无线电链路开展火星星间掩星探测的星座。该星座系统通过整合不同轨道高度、不同倾角和不同运行周期的轨道器，其探测数据有望实现对火星大气全球时空维度较好覆盖。

表 1 火星星间掩星星座轨道参数

Table1 Orbital parameters of the Mars intersatellite occultation constellation

卫星名称	半长轴 a /km	偏心率 e	轨道倾角 i /(°)	升交点赤经 Ω /(°)	近火点幅角 ω /(°)	轨道特性
TW3-MO (CNSA)	41590	0.9089	54	0	0	大椭圆/中倾角
TW3-ERO (CNSA)	3740	0.001	30	0	0	近圆/低倾角
TGO (ESA)	3790	0.001	74	180	0	近圆/高倾角
TW-1 (CNSA)	9492.677	0.608	86.9	180	0	大椭圆/极轨
MEX (ESA)	8826	0.5777	86.9	180	90	大椭圆/极轨

表 1 所列参数为星座事件仿真采用的初始轨道参数。MEX、TGO 主要参考已有星间掩星研究和公开任务轨道特征[13]；TW-1 参考天问一号任务和相关掩星

最新录用

研究[20,21]，并对半长轴和偏心率作适当调整，以保持约 320 km 的近火点高度；TW3-MO 和 TW3-ERO 依据天问三号采样返回任务公开构型设置[24]。

本文采用表 1 所列参数开展概念性仿真，未进一步考虑轨道参数的长期演化。受轨道摄动和任务运行状态变化影响，各航天器的实际轨道参数会随时间变化。因此，掩星事件个例仿真结果与未来真实情况不尽相同，但其统计特征，如掩星事件数量和时空覆盖规律，可为评估类似多轨道器构型下的星间掩星探测能力提供参考。

该火星星间掩星星座轨道示意图如图 2 所示。

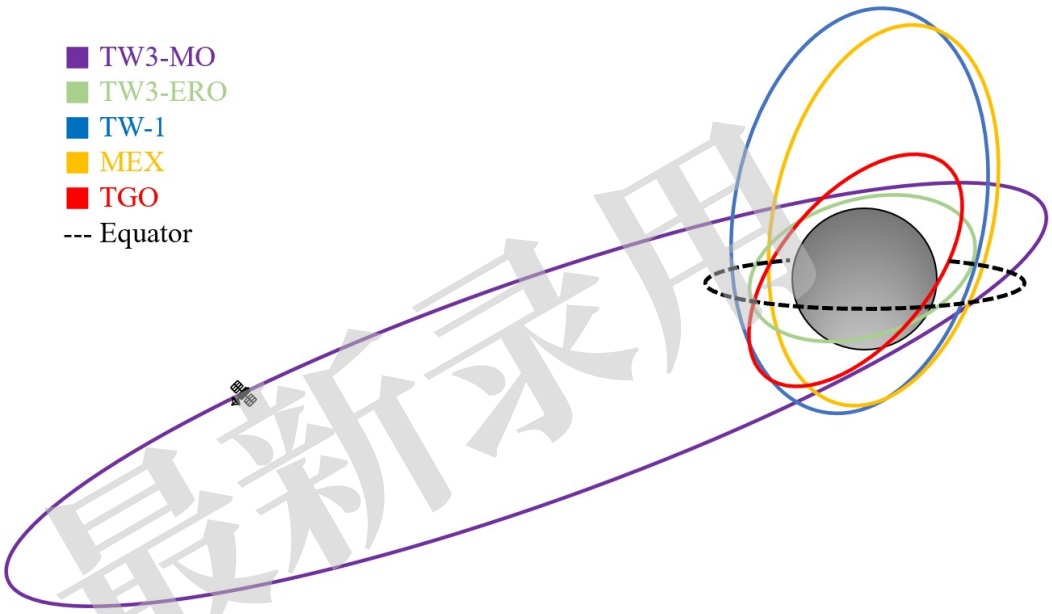


图 2 火星星间掩星星座轨道示意图

Fig.2 Orbital schematic of the Mars intersatellite occultation constellation

图 2 中，不同颜色曲线表示不同轨道器节点的轨道构型。近圆轨道、大椭圆轨道、低倾角轨道、高倾角轨道和近极轨轨道的组合可形成多种星间链路几何关系。

2. 星座掩星探测仿真分析方法与结果

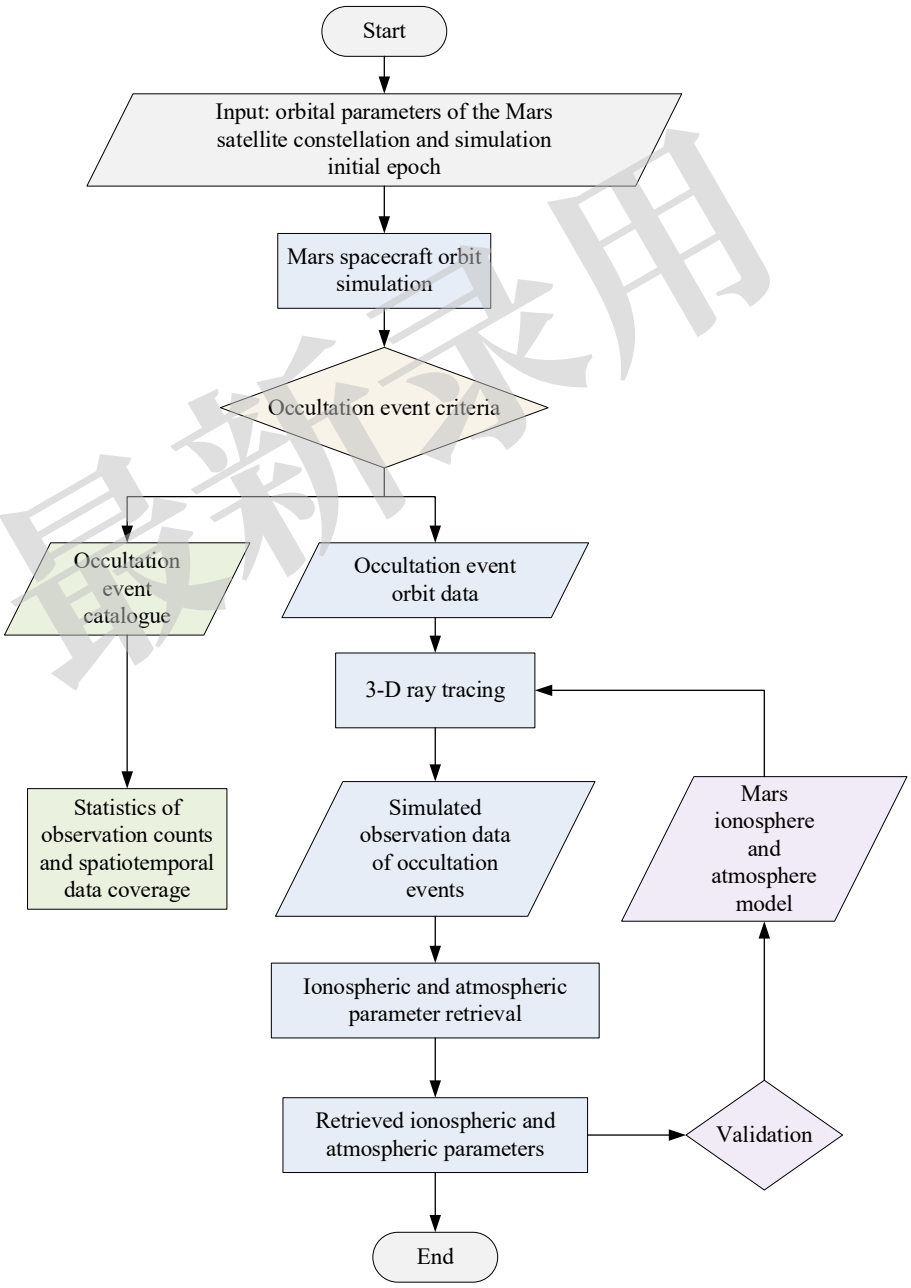
2.1 仿真方法

通过仿真可评估星座的掩星探测能力，包括掩星事件探测次数、掩星数据时空覆盖情况、U/X 波段掩星事件模拟观测数据与火星大气/电离层参数反演情况。

具体仿真流程如图 3 所示，主要仿真方法简要介绍如下。

最新录用

首先，基于开普勒轨道动力学方程仿真卫星星座的三维空间位置随时间的演变，结合掩星事件几何判据筛选每个星间链路可能发生的每个上升和下降掩星事件的发生时刻与该掩星事件切点的空间位置坐标，输出包含这些信息的掩星事件表文件结果，以供统计星座掩星事件的数量及其在火星全球空间与地方时覆盖特性。其次，任意选取掩星事件个例，采用三维射线追踪算法分别模拟U波段和X波段电磁波穿越火星大气/电离层的折射传播路径与相位延迟，给出理想的电波相位延迟观测值，并利用1.1节中的Abel积分变换等方法反演出中性大气与电离层电子密度垂直剖面，对正演和反演结果进行初步比较验证，讨论该掩星星座的大气和电离层参数探测能力。



最新录用

图 3 星座掩星探测仿真方法流程图

Fig.3 Flowchart of the simulation method for constellation occultation sounding

航天器位置仿真以表 1 所示各卫星轨道根数（半长轴 a、偏心率 e、倾角 i、升交点赤经Ω、近火点幅角ω）为初始条件，设定仿真起始历元为 2030 年 1 月 1 日 00:00:00，并假定历元时刻航天器位于近火点，对自该历元起连续 1 个火星年，即 687 个地球日内的航天器位置进行计算。对于任意时刻 t，通过求解开普勒方程获取卫星的真近点角v_k及轨道向径r_k。为计算星间链路相对于火星表面的切点位置，需将卫星状态由火星中心惯性坐标系转换至火星固连坐标系。引入火星自转角速度ω_e，在历元时间增量$\Delta t = t - t_0$下，火星固连坐标系中的等效升交点赤经可写为$\Omega_k = \Omega - \omega_e \Delta t$，轨道面内纬度参量为$\phi_k = v_k + \omega$。卫星在火星固连坐标系下的三维空间位置矢量（$X, Y, Z$）如下：

$$X = r_k \cos\phi_k \cos\Omega_k - r_k \sin\phi_k \cos i \sin\Omega_k$$
$$Y = r_k \cos\phi_k \sin\Omega_k + r_k \sin\phi_k \cos i \cos\Omega_k$$
$$Z = r_k \sin\phi_k \sin i \qquad 1010\text{*}$$

MERGEFORMAT ()

初始轨道位置可能影响单个掩星事件的出现时间和位置，但几乎不会影响掩星次数和时空覆盖的统计特征，见 2.2 节的结果分析。

（2）掩星事件判据

图 1 中假设星间掩星期间直线连线到火面的最近距离为 H，也称为切点高度，为简单起见设火星为球体近似；可以根据 H 的变化来判断星间链路掩星事件是否开始或终止。为了完整覆盖电离层与大气层，设定掩星事件的切点高度范围为：-50 km< H <300 km，其中-50 km 取值是考虑大气折射导致的射线弯曲，其直线连线的切点高度将在火面高度以下。设定掩星事件中被掩卫星的方位角范围位于与卫星运行方向前向及后向的夹角40°范围内，不考虑侧面掩星事件。上述判据采用平均火星半径球面作为统一参考面，未计入真实地形起伏。地形会因阻挡无线电链路而主要影响掩星事件的最低切点探测高度，不会影响掩星次数及其时空覆盖的统计特征，为简单起见，这里不考虑火星地形变化。

根据上述 2 个判据，可以获得每个掩星事件的起始和终止时刻、掩星切点的位置，以及该掩星事件期间两个卫星的轨道数据（位置和速度等），生成掩星事件表和某个掩星事件的轨道数据。

最新录用

掩星事件表不仅记录了每次掩星事件的精确起始时间、终止时间及持续时长，还详尽输出了信号链路切点的关键物理参量。具体信息包括：掩星事件类型（上升掩星或下降掩星），以及切点在火星表面的投影经纬度坐标、视线高度角与方位角等空间几何信息。

单个掩星事件的轨道数据包括事件起止时刻、双星标识以及两颗航天器的位置和速度，可为后续掩星观测值仿真提供输入。

（3）掩星事件观测值仿真方法

任选一个星座掩星事件的卫星轨道仿真数据，开展 U/X 波段单频单程掩星事件电波观测值模拟。采用几何光学近似的三维射线追踪法模拟电波信号自卫星发射、穿越火星大气和电离层传播，到达另一个卫星接收机端的传播路径、电波信号损耗和电波相位等结果[1,27,28]。电波传播损耗主要包括传播距离损耗和电波散焦损耗。

这里 U 波段信号频率选择 437.1 MHz，X 波段频率选择 8.4 GHz。仿真用火星电离层背景采用单 Chapman 电离层模型，峰值高度取 135 km，标高取 40 km，峰值电子密度取 $1.2\times10^{11}m^{-3}$，相关参数参考胡雄等火星电离层无线电掩星仿真研究[27]。火星背景中性大气模型采用 CO_2 指数型模型，地表数密度取 $2.1\times10^{23}m^{-3}$，标高取 11.1 km，CO_2 折射率系数取 $1.804\times10^{-29}m^3$，中性大气背景参数参考 Kliore 等和 Fjeldbo 等基于早期火星掩星实验建立的 CO_2 大气模型[15,29]。

模拟计算获得的电波损耗可作为设计 U/X 波段载荷参考，电波相位可作为火星大气/电离层反演的输入模拟观测值。仿真用到的大气和电离层模型作为无线电传播正演的背景场，并用于反演结果的验证。

（4）火星大气和电离层反演方法

利用模拟的掩星事件电波相位仿真观测值，获得电波信号的多普勒频移，结合掩星几何关系计算大气弯曲角廓线，然后利用 1.1 节介绍的探测原理反演得到掩星事件的大气数密度和电离层电子数密度，并与仿真输入的火星大气和电离层背景模型数据进行对比验证。

2.2 掩星事件时空分布仿真结果

基于上述仿真方法，本文以 2030 年 1 月 1 日 00:00:00 为起始历元，对连续 1 个火星年（687 个地球日，16488 小时）的火星星间掩星星座掩星事件进行了模拟，有关结果如下。

最新录用

2.2.1 星座掩星事件数量统计与其随星间链路分布

在仿真中，将提供稳定载波信号发射的卫星定义为发射星，执行信号接收的卫星定义为接收星。基于一个火星年的仿真，星座共产生有效掩星事件110576次。掩星事件数量远多于星地掩星事件，例如，NASA PDS中的MGS中性大气掩星数据集显示，MGS在约9个地球年的任务期内积累了2万余次中性大气剖面[30]。图4展示了星座10条独立星间链路在一个火星年内的有效掩星事件数量分布。图中横轴航天器代表发射信号的航天器，纵轴航天器代表接收信号的航天器。统计结果直观反映了不同轨道星间链路构型的掩星探测能力。在统计的所有掩星事件中，上升掩星共计54922次，下降掩星共计55654次。不同星间链路的掩星事件次数不同，与星间链路的几何位形随时间的演变有关。这表明星间掩星星座概念的主要优势在于通过多星链路组合显著增加掩星事件数量，并为火星全球尺度的大气和电离层剖面获取提供更密集的采样机会。

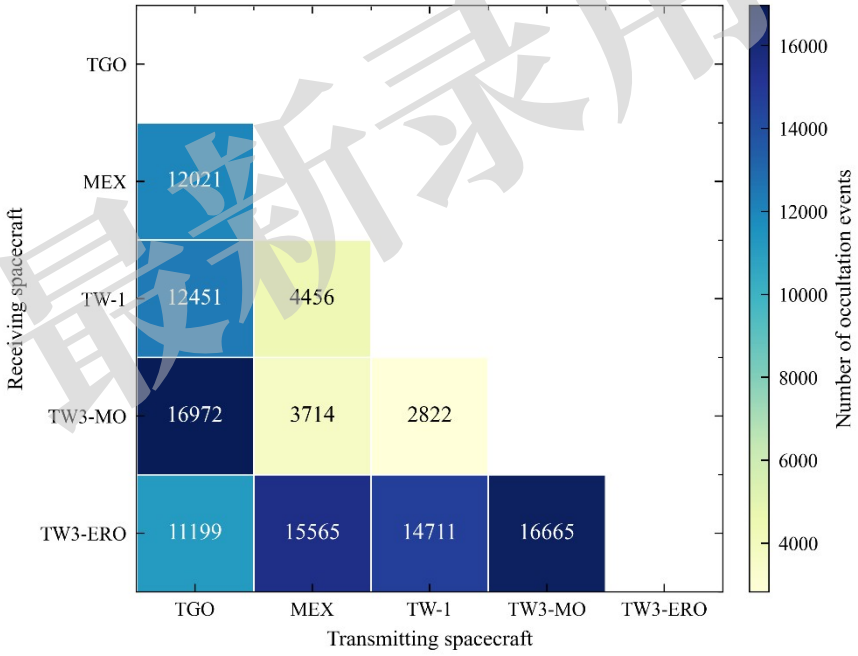


图4 星座各链路有效掩星事件数量矩阵

Fig.4 Matrix of valid occultation event counts for each constellation link

2.2.2 星座掩星探测数据全球覆盖性分析

以每个掩星事件第一秒掩星切点的经纬度位置和时间，代表该次掩星事件探测数据的时空特征。以火星平均半径球面为参考，采用约200 km空间尺度的

最新录用

等面积球面多边形对切点位置的分布进行统计，由 3990 个六边形和 12 个五边形构成。基于一个火星年的仿真结果，图 5(a)给出了掩星事件的全球分布，图 5(b)给出了每 5°纬度带掩星事件数量，结果主要特征可概括为以下两点。

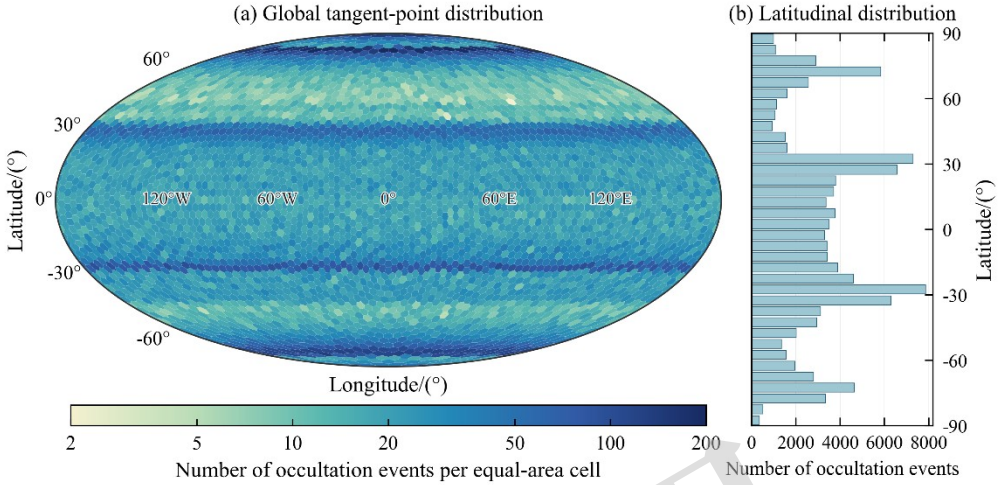


图 5 星座掩星事件全球分布图。（a）掩星事件全球分布；（b）每 5° 纬度带内的掩星事件数量

Fig.5 Global distribution of constellation occultation events. (a) Global distribution of occultation events; (b) number of occultation events in each 5° latitude band.

第一，图 5(a)中的所有等面积图形中均有掩星事件覆盖。第二，不同纬度区域的事件数量差异明显，由图 5(b)可见掩星事件的纬度分布呈现明显的多峰特征，四个峰值分别位于 25°S-30°S、30°N-35°N、70°N-75°N 和 70°S-75°S 纬度带。低纬度区域的事件分布较多，南北纬 35°~60°的中纬度区域相对低纬度区域较少。极区掩星事件最少，北半球比南半球多。这种纬度分布情况与星座中各航天器的轨道倾角有关。

上述结果表明，多航天器组网能够提高火星全球范围内的星间掩星采样机会。同时，中低纬度区域相对集中的剖面也可为未来火星火面探测任务（如天问三号规划的 17°N~30°N 着陆区[5]）的大气环境分析提供参考。

2.2.3 星座探测数据的地方时覆盖性分析

图 6 给出了星座掩星探测数据的纬度-地方时和地方时分布。由图 6 可见，在 1 个火星年的仿真周期内，掩星事件在 0-24 h 的火星地方平太阳时（Local Mean Solar Time，LMST）范围内呈现出连续且均匀的分布，如前所述，星间掩星消除了星地掩星探测数据的中午与子夜时间盲区。

最新录用

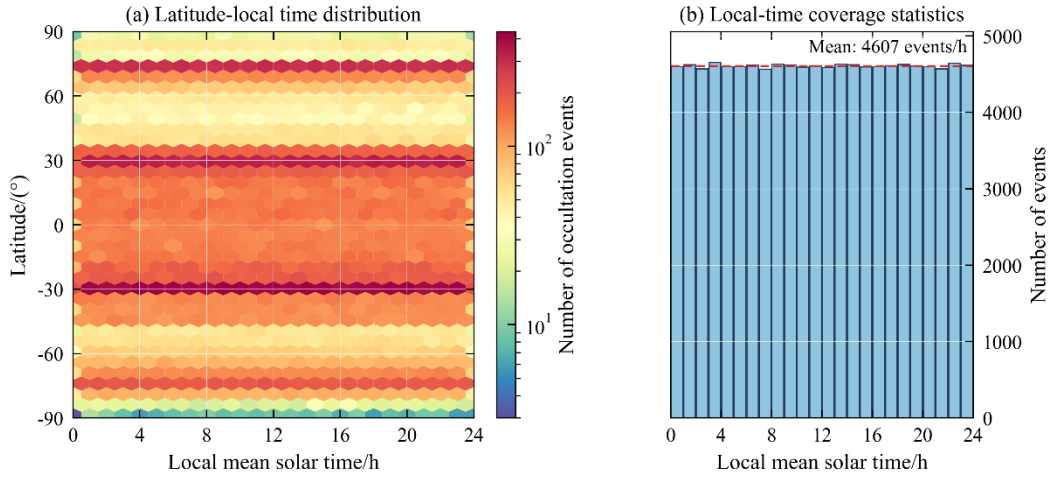


图 6 星座掩星事件纬度-地方时分布图（a）纬度-地方时分布；（b）地方时覆盖统计

Fig.6 Latitude-local-time distribution of constellation occultation events. (a) Latitude–local-time distribution; (b) local-time coverage statistics.

通过多星组网可提高火星不同地方时条件下的中性大气与电离层采样能力，为研究火星大气周日及半日热潮汐变化提供观测基础。近年的研究表明，较完整的地方时采样有助于表征高频迁移潮汐，因此 0-24 h 地方时覆盖是评价掩星星座地方时采样能力的重要指标[31]。对于电离层，星间掩星可在一定程度上补充正午与子夜时段的星地掩星观测，拓展对日侧和夜侧电离层结构的观测[6,7]。近期 Parrott 等利用 MEX-TGO 星间掩星实验观测捕捉到 2024 年太阳超级风暴期间火星电离层的快速响应[8]，进一步说明星间掩星对火星电离层时变过程具有观测潜力。这些不同地方时条件下的观测可为火星电离层光化学与动力学耦合模型提供约束[32,33]。不同地方时条件下的中性大气剖面可用于分析热潮汐等周日变化[31]；电离层电子密度剖面则可用于研究日夜电离层结构和空间环境变化[7]。

上述结果基于一种给定的初始星座位置的仿真结果。考虑到实际任务中各航天器的初始位置通常不会同时位于近火点，为评估初始轨道位置对统计结果的影响，在保持轨道参数、仿真起始历元、仿真时长及事件判据不变的条件下，将 5 颗航天器的初始平近点角M_0（用于表征航天器沿各自轨道的初始运行相位，

M_0=0对应近火点）分别在[0, 2π）范围内独立均匀随机取值，并进行 100 组仿真，随机实验结果见表 2。

表 2 随机初始轨道位置敏感性实验结果

Table2 Results of the sensitivity experiment for random initial orbital positions

类别	评价指标	基准仿真结果	100 组随机实验结果	与基准结果的差异
事件数量	掩星事件总数	110576 次	110550±32 次	0.024%
时间分布特征	0–24 h LMST 覆盖	完整覆盖	100 组均保持完整覆盖	无明显差异
空间分布特征	图 5 等面积网格覆盖	100%	100%	无明显差异
	各 5° 纬带事件分布	四个峰值分别位于 25°S~30°S、30°N~35°N、70°N~75°N 和 70°S~75°S	四峰值区域位置保持一致	无明显差异

注：表中“±”表示均值±标准差。

随机实验的掩星事件总数为 110550±32 次，与基准结果 110576 次仅相差 0.024%；100 组实验均保持 0-24 h 地方时完整覆盖，各 1 h 区间事件占比最大变化为 0.080 个百分点；各 5° 纬带事件占比最大变化为 0.058 个百分点，主要高值区域的位置保持一致。结果表明，初始轨道相位变化会改变具体事件的发生时刻和位置，但对一个火星年尺度的事件数量及主要时空分布统计特征影响可以忽略，上述统计结果具备有效性。

2.3 掩星事件个例观测值模拟和反演验证

为考察 U/X 波段掩星对火星大气和电离层参数的探测能力，任选一个掩星事件，在未叠加测量误差和噪声的理想条件下开展了掩星观测值正演与大气和电离层参数反演原理性验证。

最新录用

2.3.1 掩星事件个例模拟观测量结果

图 7 和图 8 给出了典型 MEX-TGO 星间掩星事件在 U 波段和 X 波段链路下的正演模拟观测量。其中，图 7 展示附加相位和距离平方几何损耗，图 8 展示由射线管聚焦/散焦引起的损耗变化。

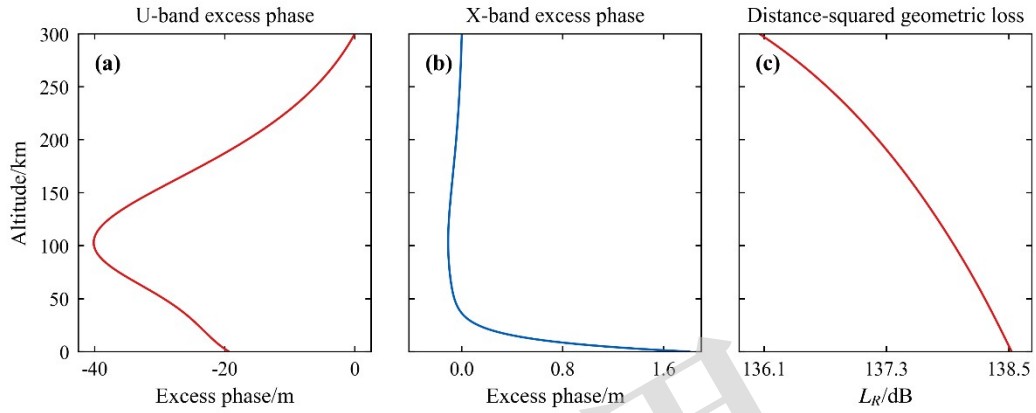


图 7 典型掩星事件 U/X 波段附加相位和距离平方几何损耗。（a）U 波段附加相位；（b）X 波段附加相位；（c）距离平方几何损耗。

Fig.7 U-band and X-band excess phase and distance-squared geometric loss for a representative occultation event. (a) U-band excess phase; (b) X-band excess phase; (c) distance-squared geometric loss.

图 7(a)显示，U 波段附加相位整体为负，并在电离层主峰附近达到最大负值，约为-40 m。该特征主要由火星介质折射率中的电离层项控制。由式（2）可知，电离层项为负值，且其绝对值与电子密度成正比、与载波频率平方成反比。当射线高度由 300 km 逐渐降低至电离层 Chapman 主峰附近时，路径上的电子密度贡献增强，负相位累积随之增大；当射线进一步降低至低层大气时，中性 CO_2 大气产生正相位贡献，对电离层负贡献形成部分抵消，因此 U 波段相位曲线在低空出现回升。但由于中性大气的正延迟量仍小于电离层路径上负延迟的绝对幅度，整体上相位仍表现出负相位延迟特征。图 7(b)显示，X 波段在电离层高度范围内负相位较弱，而在低层中性大气区域表现为正相位延迟；这是因为 8.4 GHz X 波段电离层色散项较弱，低空大气附加相位主要由中性 CO_2 大气正折射项控制。两频段附加相位差异主要反映了电离层项的频率色散特性以及低层中性大气正折射贡献。

最新录用

距离平方几何损耗用于表征发射星与接收星之间几何距离变化引起的信号强度衰减，不包含火星介质吸收、天线增益、发射功率和接收机噪声等系统项。参考已有无线电掩星传播损耗处理方法[1]，本文将该项写为：

$$L_R = 10\log_{10}|\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_T|^2 \qquad 1111\backslash* \text{ MERGEFORMAT ()}$$

式中，$\mathbf{r}_T$ 和 $\mathbf{r}_R$ 分别为发射星和接收星的位置矢量，距离以 m 为单位代入，L_R 的单位为 dB。该项只由星间几何距离决定，不包含波长项，因此不区分 U 波段和 X 波段。如图 7(c)所示，典型事件中 L_R 约为 136.1–138.5 dB；随着切点高度降低，星间几何距离增大，距离平方损耗随之增加。

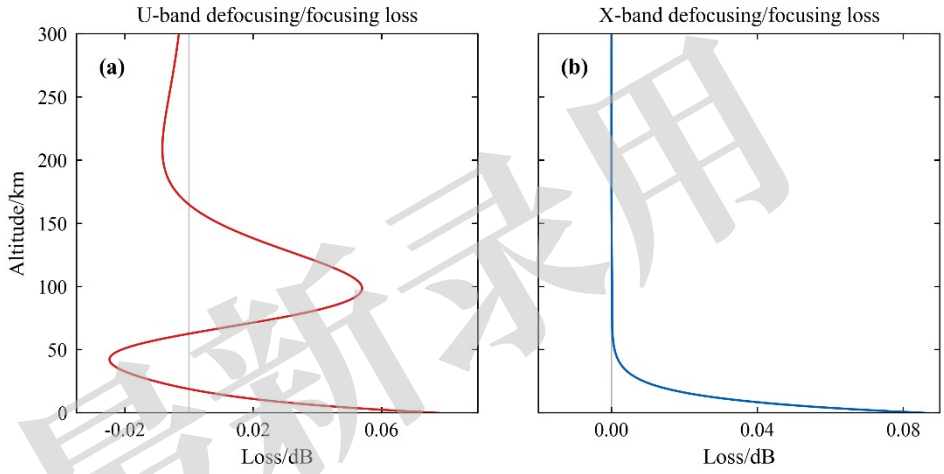


图 8 典型掩星事件 U/X 波段散焦/聚焦损耗。（a）U 波段散焦/聚焦损耗；（b）X 波段散焦/聚焦损耗

Fig.8 U-band and X-band defocusing/focusing loss for a representative occultation event. (a) U-band defocusing/focusing loss; (b) X-band defocusing/focusing loss.

聚焦/散焦损耗用于描述火星大气和电离层折射使射线管收敛或发散造成的强度变化，正值表示散焦损耗，负值表示聚焦增益[1]。如图 8 所示，与百 dB 量级的自由空间基本传播损耗相比，聚焦/散焦损耗量级较小，典型事件中整体小于 0.1 dB，但其符号和随高度变化能够反映射线束受折射率梯度影响产生的收敛或发散过程。

2.3.2 掩星事件模拟观测数据个例反演结果

利用 2.3.1 节得到的模拟附加相位观测量，进一步开展大气和电离层参数反

最新录用

演。无线电掩星反演的一般过程为：首先由附加相位随时间的变化得到附加频移或频率残差，再结合 Tx/Rx 几何关系求取电波弯曲角和碰撞参数；随后采用 Abel 积分反演得到折射率剖面，最后根据折射率与电离层电子密度或中性大气密度之间的关系获得相应物理参数[25,26]。本文在上述反演框架下，分别对 U 波段和 X 波段模拟观测量进行单频反演，并将反演结果与输入背景模型进行比较。图 9 给出了 U 波段和 X 波段电子密度单频反演结果。

由图 9 可见，在给定背景模型且未叠加测量噪声的条件下，90-300 km 高度范围内两种波段均能够恢复电离层主峰位置和主要剖面形态。U 波段和 X 波段反演结果与输入背景模型吻合。

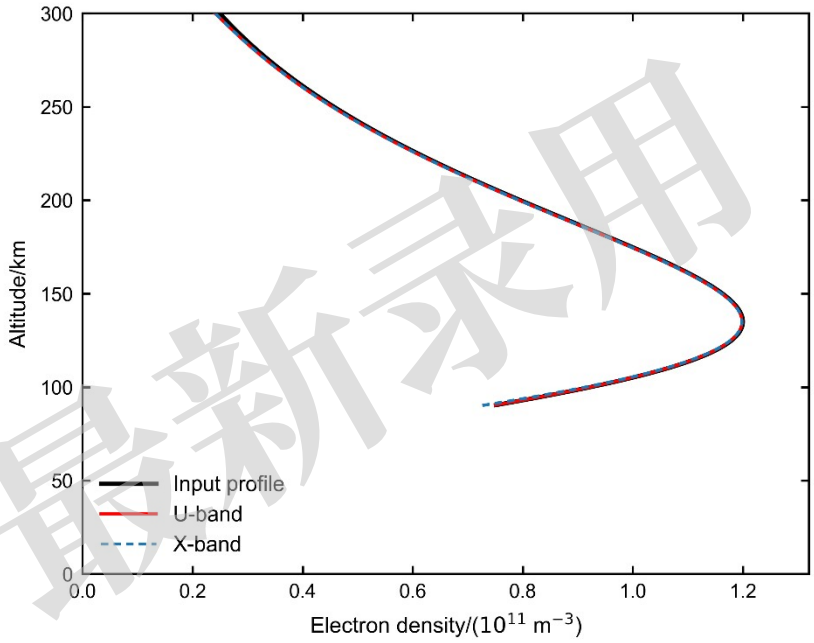


图 9 U 波段与 X 波段电离层电子密度反演结果对比

Fig.9 Comparison of single-frequency ionospheric electron density retrievals using U-band and X-band links

图 10 给出了 U 波段和 X 波段中性大气数密度单频反演结果。

由图 10 可见，在 0-40 km 低层中性大气区域，X 波段反演结果与仿真背景大气模型吻合较好，而 U 波段反演结果与仿真背景大气模型存在明显偏差。其主要原因在于，单频 Abel 反演首先得到的是包含中性大气项和电离层项共同贡献的总折射率剖面。根据式（2），电离层折射项与载波频率平方成反比，且与中性

最新录用

大气折射项符号相反。对于 U 波段，电离层项对总折射率的影响更强，残余电离层贡献在中性大气数密度反演中更容易被误归入中性大气项，从而造成反演偏差。相比之下，X 波段频率较高，电离层贡献显著减弱，在低层中性大气主导区域可近似忽略，因此其反演结果更接近背景模型。

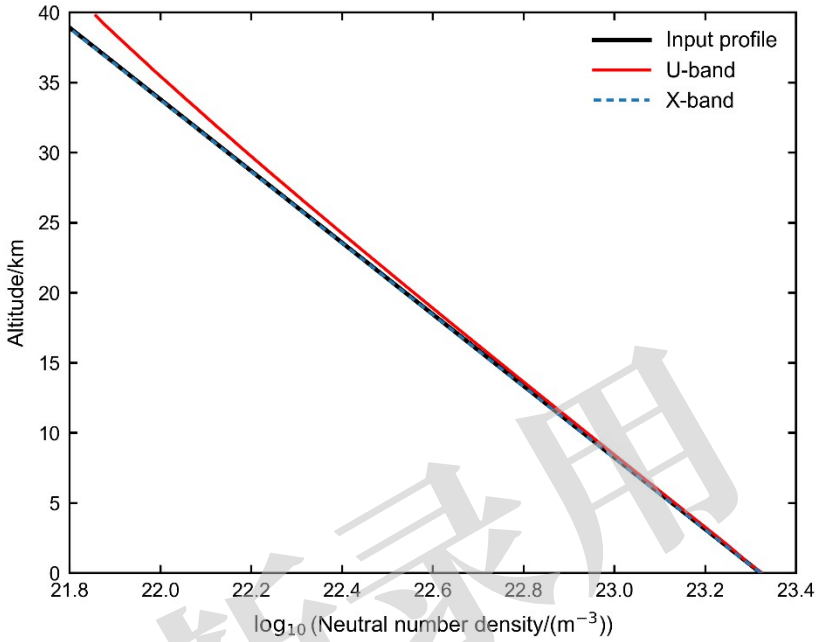


图 10 U 波段与 X 波段中性大气数密度单频反演结果对比

Fig.10 Comparison of single-frequency neutral number density retrievals using U-band and X-band links

无线电掩星观测精度与发射功率、天线增益、链路衰减、接收系统噪声以及频率源稳定度等因素有关，许多文献对此有大量的分析，指出掩星是一种探测能力强大的技术，在行星大气探测中广泛应用[11]。下面利用已有火星掩星数据予以说明。Parrott 等利用 MEX 的 MELACOM 和 TGO 的 Electra U 波段中继设备开展了 437.1 MHz 星间掩星观测。MEX 发射功率为 5 W，在最不利链路预算条件下，预计接收功率约为−140.6 dBm；在 1 Hz 载波环带宽条件下，热噪声对应的相位、路径长度和频率误差分别约为 22.3 mrad、2.4 mm 和 3.6 mHz。该研究根据典型 M2 层残余多普勒特征与短时间尺度噪声的相对量级，将 5%的输入误差加入提取的载波频率，并通过 100 次数值误差传播评估电子密度反演结果的不确定度。两个代表性剖面 2M 和 2I 的 M2 峰值电子密度的 1σ不确定度分别约为$2.46\times10^{9}m^{-3}$和$6.84\times10^{9}m^{-3}$，所采用处理方法的电子密度噪声下限约为

最新录用

$1\times10^{10}\,m^{-3}$[13]。Hinson 等基于 Mars Global Surveyor 的 X 波段掩星实验获得了 88 条火星中性大气垂直剖面，其近地表温度和压强不确定度约为 1 K 和 2 Pa[2]。Sweeney 等针对由 6 颗小卫星组成的火星星间掩星星座，开展了考虑链路热噪声和振荡器时钟噪声的 U 波段与 X 波段仿真。仿真中发射功率设为 5 W，天线增益取 5 dBi，估算 X 波段信噪比约为 41 dB，热噪声引起的频率不确定度约为 20 mHz。在相应链路和噪声条件下，X 波段反演的中性大气温度误差在低层小于 0.5 K，在中高层小于 5 K，所得温度廓线由近地表延伸至约 45 km[16]。

上述分析表明，U/X 波段星间掩星可获取高精度的火星大气和电离层数据。

3. 结论

本文提出了利用中国天问一号、天问三号任务规划的火星轨道器和地球返回器，以及国际在轨的 TGO 和 MEX 共 5 个航天器组成一个未来火星电离层与中性大气星间掩星星座的新概念，并对该星座的掩星探测能力进行了仿真。

仿真结果表明，该星座掩星事件总量可达 110500 余次/火星年。掩星事件切点可覆盖火星主要纬度和经度区域，在±30° 的中低纬度区域及±75°的高纬度极区可实现较高的事件数量覆盖，同时掩星事件可覆盖 0-24 h 火星地方时，整体分布较连续。个例掩星事件观测数据仿真与反演表明，U 波段和 X 波段均可获取 90-300 km 电离层电子密度的垂直剖面；在 0-40 km 低层中性大气反演中 X 波段受电离层项影响较小。

研究结果对未来火星探测带来的启示是，有效利用已有火星探测资源，积极开展国际合作，可以形成新的火星星间掩星星座大气和电离层探测能力。值得指出的是，火星星间无线电链路掩星探测数据，结合轨道动力学建模和参数估计可进一步解算火星静态重力场[34,35]，也可支撑火星重力场研究科学目标。另外，掩星事件统计特征与火星探测器轨道密切相关，未来可以对火星探测器数量和轨道进行优化设计，结合其他大气探测载荷的数据分布，以满足未来火星天气预报对探测数据频次和时空全球均匀覆盖的需求，或者对某特定区域加强探测的需求，充分发挥星座探测的效能。

最新录用

致谢

感谢国家自然科学基金项目（12573066）资助

参考文献

[1] WU Xiaocheng. Radio Occultation Technique for Ionosphere Detection[D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2008 (吴小成. 电离层无线电掩星技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2008)

[2] 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. DOI: 10.1029/1999JE001069

[3] TELLMANN S, PÄTZOLD M, HÄUSLER B, 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. DOI: 10.1002/jgre.20058

[4] XIAO L, XIAO C Y, HU X, et al. Research on internal gravity waves in the Martian atmosphere based on Tianwen-1 and Mars Global Surveyor occultation data[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2024, **8**(6): 890-898. DOI: 10.26464/epp2024067

[5] TIAN Y, LI B, RONG Z J, et al. Martian dust storm spatial-temporal analysis of tentative landing areas for China's Tianwen-3 Mars mission[J]. *Earth and Space Science*, 2024, **11**(6): e2024EA003634. DOI: 10.1029/2024EA003634

[6] HAIDER S A, MAHAJAN K K, KALLIO E. Mars ionosphere: a review of experimental results and modeling studies[J]. *Reviews of Geophysics*, 2011, **49**(4): RG4001. DOI: 10.1029/2011RG000357

[7] PETER K, SÁNCHEZ-CANO B, NĚMEC F, et al. The ionosphere of Mars after 20 years of Mars Express contributions[J]. *Space Science Reviews*, 2024, **220**(4): 41. DOI: 10.1007/s11214-024-01078-x

[8] PARROTT J, SÁNCHEZ-CANO B, SVEDHEM H, et al. Martian ionospheric response during the May 2024 solar superstorm[J]. *Nature Communications*, 2026, **17**(1): 2017. DOI: 10.1038/s41467-026-69468-z

[9] WITHERS P. Attenuation of radio signals by the ionosphere of Mars: theoretical development and application to MARSIS observations[J]. *Radio Science*, 2011, **46**(2): RS2004. DOI: 10.1029/2010RS004450

[10] KLIORE A, CAIN D L, LEVY G S, et al. Occultation experiment: results of the first direct measurement of Mars's atmosphere and ionosphere[J]. *Science*, 1965, **149**(3689): 1243-1248. DOI: 10.1126/science.149.3689.1243

[11] XIAO Luo, XIAO Cunying, HU Xiong, et al. Progress of radio occultation exploration of Mars[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2024, **55**(2): 164-174. DOI: 10.19975/j.dqyxx.2022-083 (肖洛, 肖存英, 胡雄, 等. 火星无线电掩星探测进展[J]. 地球与行星物理论评(中英文), 2024, **55**(2): 164-174. DOI: 10.19975/j.dqyxx.2022-083)

[12] AO C O, EDWARDS C D, KAHAN D S, et al. A first demonstration of Mars crosslink occultation measurements[J]. *Radio Science*, 2015, **50**(10): 997-1007. DOI: 10.1002/2015RS005750

[13] PARROTT J, SVEDHEM H, WITASSE O, et al. First results of Mars Express-ExoMars Trace Gas Orbiter mutual radio occultation[J]. *Radio Science*, 2024, **59**(7): e2023RS007873. DOI: 10.1029/2023RS007873

[14] PARROTT J, SVEDHEM H, SÁNCHEZ-CANO B, et al. Ionospheric analysis with Martian mutual radio occultation[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2025, **130**(6): e2024JE008854. DOI: 10.1029/2024JE008854
[15] KLIORE A J, CAIN D L, FJELDBO G, et al. The atmosphere of Mars from Mariner 9 radio occultation measurements[J]. *Icarus*, 1972, **17**(2): 484-516. DOI: 10.1016/0019-1035(72)90014-0
[16] SWEENEY D, AO C, VERGADOS P, et al. Enabling Mars radio occultation by Smallsats[C]//2021 IEEE Aerospace Conference (50100). Big Sky: IEEE, 2021: 1-12. DOI: 10.1109/AERO50100.2021.9438147
[17] LEWIS A D, PORTER T, SCHOENHARDT S, et al. Mars radio occultation observation network (MaROON)[C]//AIAA SciTech 2025 Forum. Orlando: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2025. DOI: 10.2514/6.2025-1400
[18] LILLIS R, CURRY S, XU S S, et al. Twin spacecraft open a new paradigm for Mars[J]. *Nature Astronomy*, 2026, **10**(2): 325. DOI: 10.1038/s41550-026-02788-8
[19] MONTABONE L, CARDESÍN-MOINELO A, NEWMAN C, et al. The science case for the MArs Constellation for Atmosphere and space Weather (MACAWS) mission concept[C/OL]//EPSC-DPS Joint Meeting 2025. Helsinki: EPSC, 2025: EPSC-DPS2025-2067(2025-07-09)[2026-08-20]. https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC-DPS2025/EPSC-DPS2025-2067.html
[20] LI C L, ZHANG R Q, YU D Y, et al. China's Mars exploration mission and science investigation[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(4): 57. DOI: 10.1007/s11214-021-00832-9
[21] HU X, WU X C, SONG S L, et al. First observations of Mars atmosphere and ionosphere with Tianwen-1 radio-occultation technique on 5 August 2021[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(11): 2718. DOI: 10.3390/rs14112718
[22] CHEN Lue, WANG Mei, JIAN Nianchuan, et al. Tianwen-1 radio occultation observation experiment and feature analysis[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2023, **10**(1): 80-87. DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20220006 (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. DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20220006)
[23] LIU M, CHEN L, JIAN N C, et al. Preliminary estimations of Mars atmospheric and ionospheric profiles from Tianwen-1 radio occultation one-way, two-way, and three-way observations[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(23): 5506. DOI: 10.3390/rs15235506
[24] CHINA NATIONAL SPACE ADMINISTRATION. Announcement of opportunities for international collaboration of Mars Sample Return Mission (Tianwen-3)[EB/OL]. (2025-03-11)[2026-08-20]. https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c10652182/part/10652189.pdf (中国国家航天局. 火星取样返回任务(天问三号)国际合作机遇公告[EB/OL]. (2025-03-11)[2026-08-20]. https://www.cnsa.gov.cn/english/n6465645/n6465648/c10652198/part/10652214.pdf
[25] WITHERS P. Prediction of uncertainties in atmospheric properties measured by radio occultation experiments[J]. *Advances in Space Research*, 2010, **46**(1): 58-73. DOI: 10.1016/j.asr.2010.03.004

[26] FJELDBO G, ESHLEMAN V R. The atmosphere of Mars analyzed by integral inversion of the Mariner IV occultation data[J]. *Planetary and Space Science*, 1968, **16**(8): 1035-1059. DOI: 10.1016/0032-0633(68)90020-2
[27] HU Xiong, WU Xiaocheng, GONG Xiaoyan, et al. Simulation of the Mars ionosphere radio occultation experiments[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2009, **50**(3): 301-311. DOI: 10.3321/j.issn:0001-5245.2009.03.007 (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, **50**(3): 301-311. DOI: 10.3321/j.issn:0001-5245.2009.03.007)
[28] GONG Xiaoyan. Research on GNSS Atmospheric Radio Occultation Technique[D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2008 (宫晓艳. 大气无线电 GNSS 掩星探测技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2008)
[29] FJELDBO G, FJELDBO W C, ESHLEMAN V R. Models for the atmosphere of Mars based on the Mariner 4 occultation experiment[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1966, **71**(9): 2307-2316. DOI: 10.1029/JZ071i009p02307
[30] HINSON D P. Mars Global Surveyor radio occultation profiles of the neutral atmosphere-reorganized: MGS-M-RSS-5-TPS-V1.0[DS/OL]. NASA Planetary Data System, 2008[2026-08-20]. https://pds.nasa.gov/ds-view/pds/viewDataset.jsp?dsid=MGS-M-RSS-5-TPS-V1.0. DOI: 10.17189/n719-8n94
[31] KUMAR A, ENGLAND S L, WILSON R J, et al. Quantifying high-frequency migrating tides in the atmosphere of Mars with observations from EMIRS, curiosity and perseverance[J]. *Geophysical Research Letters*, 2026, **53**(4): e2025GL118933. DOI: 10.1029/2025GL118933
[32] BOUGHER S W, PAWLOWSKI D, BELL J M, et al. Mars global ionosphere-thermosphere model: solar cycle, seasonal, and diurnal variations of the Mars upper atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2015, **120**(2): 311-342. DOI: 10.1002/2014JE004715
[33] REN Z P, LIU Y B, WAN W X, et al. MITM: a new mars ionosphere-thermosphere model[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2025, **9**(2): 337-345. DOI: 10.26464/epp2024064
[34] WANG C Y, YAN J G, LIU S H, et al. Mars gravity field determination using Tianwen-1 orbiter tracking data[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2025, **985**(1): L19. DOI: 10.3847/2041-8213/adce6d
[35] YAN J G, WANG C Y, ZHU X B, et al. Mars gravity field determination based on satellite-to-satellite tracking technique[J]. *The Astronomical Journal*, 2025, **169**(1): 11. DOI: 10.3847/1538-3881/ad90a7

第一作者和通信作者简介:

胡金泽 男，1998 年 9 月出生于山东省潍坊市，现为中国科学院国家空间科学中心硕士研究生，主要研究方向为地球与空间探测技术。

录用稿件，非最终出版稿

闫召爱 男，1981年10月出生于山东省巨野县，现为中国科学院国家空间科学中心正高级工程师，博士生导师，主要研究方向为地球与空间探测技术、临近空间大气、大气激光雷达等。

最新录用