

CHEN Xuelei, YAN Jingye, XU Yidong, DENG Li, WU Fengquan, WU Lin, ZHOU Li, ZHANG Xiaofeng, ZHU Xiaocheng, YANG Zhongguang, WU Ji. Discovering the Sky at the Longest Wavelength Mission-A Pathfinder for Exploring the Cosmic Dark Ages (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(1): 43–59. DOI:10.11728/cjss2023.01.220104001

宇宙黑暗时代探路者——鸿蒙计划*

陈学雷^{1,4} 阎敬业^{2,4,5} 徐怡冬^{1,4} 邓 丽^{2,4,5}
吴锋泉^{1,4} 武 林^{2,4,5} 周 莉^{2,4} 张晓峰³
朱晓钺³ 杨中光³ 吴 季^{2,4}

1(中国科学院国家天文台 北京 100101)

2(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

3(中国科学院微小卫星创新研究院 上海 201304)

4(中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

5(空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

摘 要 低频射电探测任务构想——鸿蒙计划旨在利用多颗卫星绕月编队形成超长波天文观测阵列，在月球背面开展空间低频射电天文探测。其科学目标是高精度测量全天射电频谱，揭示宇宙黑暗时代与黎明的演化历史；实现首次高分辨率超长波巡天，打开最后一个电磁窗口；观测太阳和行星超长波活动，揭示空间环境相互作用规律。该任务将获得超长波频段全天空图像，获取超长波波段天文射电源的强度、频谱、分布等信息。这些科学数据对于探索宇宙黑暗时代和黎明时代、研究银河系星际介质、宇宙线起源与传播、河外射电星系、类星体和星系团的演化、太阳活动与行星磁场等，具有重要的科学价值。

关键词 宇宙黑暗时代，宇宙黎明，超长波天文学，低频射电天文学，月基天文学，空间干涉阵列
中图分类号 P17

Discovering the Sky at the Longest Wavelength Mission—A Pathfinder for Exploring the Cosmic Dark Ages

CHEN Xuelei^{1,4} YAN Jingye^{2,4,5} XU Yidong^{1,4} DENG Li^{2,4,5}
WU Fengquan^{1,4} WU Lin^{2,4,5} ZHOU Li^{2,4} ZHANG Xiaofeng³
ZHU Xiaocheng³ YANG Zhongguang³ WU Ji^{2,4}

* 国家重点研发计划青年科学家项目（2022YFF0504300）和中国科学院空间科学战略性先导科技专项（二期）背景型号项目共同资助（XDA15020200）

2021-12-31 收到原稿，2022-10-11 收到修定稿

E-mail: xuelei@cosmology.bao.ac.cn, yanjingye@nssc.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

1(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

2(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

3(Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201304)

4(School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

5(State Key Laboratory of Space Weather, Beijing 100190)

Abstract In this paper we describe a low frequency radio astronomy mission known as the DSL project (also “Hongmeng Project” in Chinese). It is an interferometer array made up of a formation of satellites in a lunar orbit, which makes ultralong wavelength observations in the part of orbit behind the Moon. The scientific objectives include making high precision measurement of the global spectrum, probing the cosmic dawn and dark ages; realizing ultra-long wavelength sky survey with a high resolution for the first time, opening up the last unexplored electromagnetic window; monitoring the radio activity of the Sun and planets, analyzing their interactions in the interplanetary space. The mission will obtain the whole sky map in the ultralong wavelength, and provide information on the intensity, spectrum and distribution of ultralong wavelength radio sources. It has great scientific value for the exploration of the cosmic dark ages and cosmic dawn, and investigations on the interstellar medium, origin and propagation of cosmic rays, extragalactic radio galaxies and quasars, evolution of clusters and groups of galaxies, solar activities, and planetary magnetic field.

Key words Cosmic dark ages, Cosmic dawn, Ultralong wavelength astronomy, Low frequency radio astronomy, Astronomy from the Moon, Space interferometer array

0 引言

宇宙黑暗时代是指从宇宙大爆炸结束、质子与电子复合形成氢原子之时起(宇宙年龄 38 万年, 红移约 1100), 直至第一代恒星和星系形成(理论估计宇宙年龄约 1 亿年, 红移约 30)的一个演化阶段。黑暗时代是宇宙结构形成的起始阶段, 原初密度扰动在这一阶段逐渐增长成为星系形成的种子, 其中蕴含着极其丰富的宇宙学原始信息。对这一演化阶段进行观测和探索, 从而获得宇宙演化的完整图景、理解宇宙结构起源、探索宇宙的基本物理规律极为重要。但是, 这一时期恒星、星系等天体尚未形成, 重子物质主要以氢和氦原子气体形式存在, 目前所知的直接观测手段只有氢原子(中性氢)超精细结构跃迁所产生的频率为 1420 MHz 谱线。根据发射时的波长, 该谱线一般被称为 21 cm 辐射。黑暗时代的 21 cm 谱线经过宇宙红移后频率降低到 45 MHz 以下, 宇宙黑暗时代后的宇宙黎明时代(红移 10~30)对应观测频率为 45~130 MHz。相比银河系辐射等前景, 黑暗时代和

黎明时代的 21 cm 信号非常微弱, 其探测是一个巨大的挑战。

在地面上对宇宙黑暗时代和黎明信号进行探测还面临一个巨大困难, 即地球电离层对低频电磁波的强烈折射、反射和吸收。此外, 地球上还有大量自然和人工产生的该频段电磁辐射, 经电离层反射后在大范围内传播, 这将进一步干扰天文信号的观测。一些地面实验利用电磁干扰较少的频谱间隙进行观测, 但频率范围、分辨率和灵敏度都有很大局限性。特别是迄今为止, 人们对 30 MHz 以下的天文射电源还了解甚少, 还没有清晰的全天天图。即使是在频率较高(约 100 MHz)的频段, 由于电离层折射和调频广播的干扰, 也很难实现探测宇宙 21 cm 信号频谱所需的高精度。在无线电工程中, 30 MHz 以下频段用高频(HF, 3~30 MHz)、中频(MF, 0.3~3 MHz)等定义, 但在射电天文中属于最低的频段(更低频率的电磁波在星际介质等离子体中难以传播)。为了避免混淆, 这里将 30 MHz 以下的频段称为超长波(ULW)。

人类进入太空时代后, 从太空进行天文观测成为

可能。美国射电天文探索者 RAE-1 号和 2 号卫星分别于 1968 年和 1973 年发射。RAE-1 进入地球轨道,但因地球有强烈的天然和人工辐射,使其观测变得相当困难。RAE-2 则进入月球轨道,利用月球的遮挡,可以获得较好的观测结果。然而,由于这一频段对应的波长达几十至几百米,单星观测角分辨率很差,在 RAE-2 天图^[1]上甚至都很难看清银河,更无法分辨其他天体,因此我们对于超长波天空仍然几乎一无所知。

RAE-2 之后的几十年,研究者们提出了空间超长波射电天文台的各种设想。但由于实验的技术难度和工程复杂性,这些设想均未能付诸实施。例如,如果要在月球背面建造超长波望远镜:第一,需要降落在月球背面,布设天线;第二,为了在长达 14 天的月球黑夜开展观测,需要配备同位素电池或超大的太阳能电源和蓄电池;第三,为了把收集的数据传回地球,由于月球永远以同一面向着地球,还需要配备专门的中继卫星,运行在同时能被地球和月球背面看到的位置,用于转播数据。这是一套非常复杂的航天工程,不容易实现。

如果在月球轨道上部署几颗卫星,让其构成一个运动的干涉阵进行观测,则是较为可行的第一步。首先,这些卫星可以利用同一发火箭发射到月球轨道,较之在月球背面着陆并部署阵列要容易得多;其次,在供能方面,卫星环绕月球轨道的周期只有几个小时,可以使用常规的太阳能电池供电;卫星还可以在月球遮挡住地球时开展观测,而待到不被遮挡时把数据传回地球。此外,阵列还能解决低频观测的角分辨率问题。由多颗卫星构成的阵列可以采用干涉测量的方式获得更高的角分辨率,分辨出单个的辐射源,从而获得超越 RAE-2 的观测结果。

2005 年基于对宇宙黑暗时代和黎明时代研究的需求,中国学者提出了绕月卫星阵列超长波观测的实验设想^[2]。2014 年,中国科学院国家空间科学中心提出月球轨道线性卫星编队专利技术,采用多星同轨线性编队,极大地简化了星间基线测量、星间通信和相位同步等技术挑战,利用月球遮挡、轨道运动和轨道面进动实现非常密集的空间频率域采样^[3]。2015 年中国科学院国家空间科学中心、上海天文台和国家天文台,联合波兰、荷兰等科学家,提出了具体的绕月超长波卫星阵列项目建议,即 Discovering Sky at the Longest wavelength(DSL)项目^[4]。卫星在同一轨道

上排成线阵,并分为用于观测的多颗子星和用于收集数据、与地球通信的母星,有效地解决了星间通信和定位问题^[4,5],使方案更加可行。

2018 年中国开展了嫦娥四号任务,首次在月球背面着陆,并进行了多点位低频射电观测实验。哈尔滨工业大学和中国科学院国家空间科学中心联合研制了龙江一号和龙江二号微卫星^[6],拟开展首次空间干涉实验,利用双星验证 DSL 的主要关键技术。由于龙江一号未能成功进入月球轨道,仅龙江二号星获取了低频射电观测数据,验证了月球对地球电磁干扰的良好遮挡效果。实验结果表明,低频射电观测易受航天器自身产生的电磁干扰影响,需要针对电磁兼容问题对航天器和载荷进行专门的设计,才能取得良好的结果^[7]。

超长波天文阵列(DSL)项目拟采用 1 颗主星和 9 颗子星绕月编队的方式,形成拥有 100 m~100 km 基线的空间分布式干涉阵列;通过轨道演化和编队控制,将实现全天区 0.1~120 MHz 探测。其中 1 颗子星携带高频频谱仪,将在 30~120 MHz 频段进行极高精度的全天频谱测量,开展对宇宙黑暗时代和黎明时代的探索。另外 8 颗子星在 0.1~30 MHz 频段进行干涉测量的同时也进行谱测量,以给出超长波波段的天空图和频谱。通过开展此项研究,可以打开电磁频谱中最后的观测窗口,获取超长波波段天文射电源的强度、频谱和分布等信息。这将为研究银河系星际介质、宇宙线起源与传播、河外射电星系、类星体和星系团的演化、太阳活动与行星磁场等提供重要的数据,同时也可全方位、高分辨率地刻画黑暗时代 21 cm 信号观测中的前景辐射^[8,9]。DSL 项目定名为鸿蒙计划,意为探测宇宙鸿蒙初开状态的探路者。本文重点介绍鸿蒙计划的科学目标、有效载荷配置、任务总体设计和关键技术及最新进展。

1 科学目标

鸿蒙计划的主要科学目标包括:高精度测量全天射电频谱,揭示宇宙黑暗时代与黎明的演化历史;实现首次高分辨率超长波巡天,打开最后一个电磁窗口;观测太阳和行星超长波活动,揭示空间环境相互作用规律。三大科学目标及拟解决的关键科学问题如下。

科学目标 1 高精度测量全天射电频谱, 揭示宇宙黑暗时代与黎明的演化历史。

宇宙黑暗时代即宇宙大爆炸结束以后直至第一代发光天体开始形成的时期, 这一时期因缺乏可观测的天体而被称为黑暗时代。而当第一代发光天体形成时, 宇宙就迎来了黎明。在标准宇宙模型中, 氢原子的 21 cm 全天平均频谱(又称整体谱)在 15~20 MHz 之间(红移 $z \approx 80$)有可能产生最强约 40 mK 的吸收谷, 而在 70 MHz 左右($z \approx 20$)则有可能产生最强约 200 mK 的吸收谷^[10,11], 如图 1 所示。

2018 年 EDGES 低频实验在约 78 MHz($z \approx 17$)探测到了疑似来自宇宙黎明的强吸收信号^[12]。这个吸收谱的幅度远高于标准宇宙学模型的预期, 需要利用某种非标准的模型(例如与重子有某种相互作用的暗物质)才能解释^[13]。而根据 EDGES 的测量结果, 宇宙黎明时期 21 cm 吸收信号强度约为 0.5 K, 中心频率为 78 ± 1 MHz, 信号的半高全宽约为 19 MHz。如果该测量结果准确, 那么需要的亮温测量精度至少要到达 0.1 K。对于标准的宇宙学模型, 吸收信号没有这么强, 所需的测量精度还要更高。

对宇宙黑暗时代和宇宙黎明的两个吸收谷的频率、深度和形状的精确测量将提供宝贵的宇宙学信息。前一个吸收谷对应于黑暗时代, 蕴藏着宇宙原初密度扰动与膨胀历史的信息; 后一个的频谱位置与信号强度则反映了宇宙黎明时期第一代恒星的形成时间与光谱能量分布特征, 与第一代恒星和星系的紫外辐射及宇宙加热的历史紧密相关。另外, 如果宇宙早期存在超越标准模型的新物理, 例如宇宙原初黑洞的霍金蒸发或暗物质的衰变, 宇宙早期的热历史也会受

到影响, 改变宇宙黑暗时代和黎明时期的 21 cm 平均谱信号。因此, 超长波段全天射电频谱的精密测量还将有效限制宇宙原初黑洞的丰度、质量分布、产生机制等非标准宇宙模型的参数。

但是, EDGES 实验的结果颇具争议, 例如 SARAS 实验就未在这一频段发现吸收信号^[14]。因此, 亟需一个从仪器设计到测量环境均完全独立且精度更高的实验进行新的测量, 以验证 EDGES 实验的结果。几个重要的来自环境的系统误差有可能影响全天平均频谱的测量, 例如电离层对低频电磁波的吸收和折射^[15,16]、地下导电层的反射^[17]。鸿蒙计划将在月球轨道上开展全天低频频谱的测量, 不受地球电离层强烈折射和吸收的影响, 也不受地面反射的影响。月球表面可产生反射波, 但由于卫星距离月面几百千米, 延迟时间大, 对应在频谱上的特征不影响宇宙黑暗时代和黎明的 21 cm 信号。因此, 鸿蒙计划拟开展的实验可以显著提升全天平均谱的测量精度。对于由少量卫星组成的小型阵列, 其灵敏度不足以测量宇宙黑暗时代的原初涨落^[18,19], 但利用其中一颗子星, 通过一套精密的测量和校准系统, 可以完成全天平均频谱的精确测量, 提取宇宙黑暗时代和黎明的 21 cm 整体信号。该实验不仅可以检验 EDGES 实验的结果是否正确, 所获得的更精确的测量结果也将进一步揭开宇宙黎明时代的演化历史, 揭示宇宙早期基本物理与结构起源的本质。

宇宙黑暗时代和黎明是超长波天文学领域最具吸引力的科学目标。但由于银河系前景的亮温至少高出目标信号 5 个数量级, 测量需要极高的定标精度与前景减除精度。根据超长波天文观测阵列的高频频谱仪目前的设计指标, 其频率范围为 30~120 MHz, 系统频谱测量灵敏度在 100 MHz 处、1 MHz 带宽、10 min 积分时间后, 优于 0.1 K。因此, 超长波天文观测阵列的高频频谱仪经过积分与高精度定标, 将有望探测到来自宇宙黎明的 21 cm 全天平均频谱信号。

宇宙黑暗时代的吸收谱特征对应更低的频段(20 MHz 左右)。频率越低, 银河系产生的前景辐射越强, 测量难度越大。鸿蒙计划也将对 30 MHz 以下频段进行全天平均频谱测量, 虽然难度更大, 但可以大幅度改进现有前景辐射频谱的测量精度, 对黑暗时代进行初步的探索。根据简单估计, 经过 3 年时间的

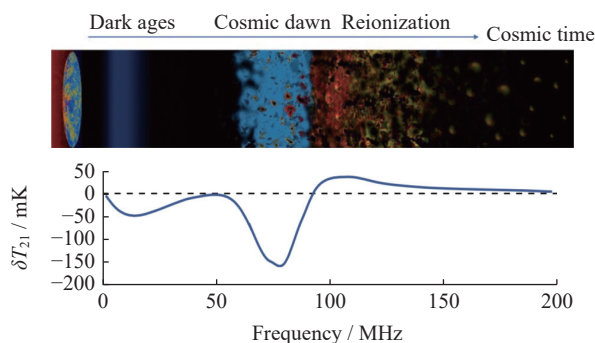


图 1 宇宙历史 (a) 和对应的 21 cm 平均谱 (b)

Fig. 1 Cosmic history (a) and the corresponding 21 cm global spectrum (b)

观测,其热噪声可压低到黑暗时代预期 21 cm 信号的水平。

除了全天平均频谱外,宇宙黑暗时代和黎明的 21 cm 涨落信号强弱与空间分布反映了宇宙原初的密度扰动形式与物理状态。由于结构演化和星系形成在黑暗时代才刚刚开始,黑暗时代是探测宇宙原初密度场的“净土”,该时期的 21 cm 吸收信号及其扰动谱将带给人类干净的原初宇宙的海量信息,而这些信息可用于研究宇宙暴胀过程、暗物质、早期暗能量、原初黑洞、宇宙弦等宇宙中最基础的物理规律。超长波天文观测的终极目标是精确测量来自宇宙黑暗时代的 21 cm 信号幅度及其三维空间分布。但是,由于来自宇宙黑暗时代的 21 cm 信号非常微弱,包括银河系超长波辐射在内的前景信号比黑暗时代的 21 cm 信号幅度高约 8 个数量级。因此,需要平方千米以上的接收面积才能达到探测所需的基本灵敏度,此外还需发展大规模的数据处理和高精度的校准技术^[18,19]。以当前的航天技术水平而言,在空间特别是月球背面或轨道建造这种超大规模的阵列尚非易事。美国提出了在月背布设 128 个干涉单元的 FAR-SIDE 计划^[20],用于对宇宙黑暗时代和系外行星的探测。该计划目前尚在概念论证阶段,其实施尚需相当时间的准备。作为黑暗时代的探路者,鸿蒙计划将有望首先获得超长波高分辨率天图,精确刻画低频射电前景,这也是探测宇宙黑暗时代和黎明涨落 21 cm 信号的必经之路。

科学目标 2 实现首次高分辨率超长波巡天,打开最后一个电磁窗口。

目前尚无 30 MHz 以下的高分辨率天图,甚至对这一频段的主要辐射天体是什么也还不清楚。获取高分辨率的超长波天图,对于天体物理和宇宙学研究具有开创性意义。鸿蒙计划获得新的高分辨率天图后,将发现这一频段的主要天体辐射源,编制超长波射电源星表;获得射电源的成分、强度、空间分布,给出超长波射电源星表中射电源的频谱特征。

超长波天图可用于研究银河系超长波弥散辐射与吸收,以及研究太阳系的周边环境。在超长波波段,银河系本身的辐射是全天主要的超长波辐射来源。因此,银河系本身的超长波辐射是鸿蒙计划重要的科学目标之一。银河系的超长波弥散辐射结构与频谱特征能够为研究星际介质的结构、宇宙线起源与

传播、磁场分布、等离子体分布、太阳系周边环境、费米气泡产生机制以及恒星超长波辐射等提供重要的信息。

在超长波波段,星际介质对电波的吸收变强,因此由更高频率外插得来的超长波天图不够准确。根据现在已知的银河系电子分布模型,考虑辐射转移,构造了推算任意频率天图的程序 ULSA(Ultra-Long Wavelength Sky with Absorption)^[21],利用 ULSA 模型预测的天图如图 2 所示。

反之,有了观测数据,可以通过分析不同频率的吸收结果,重建银河系星际介质分布的三维结构,并

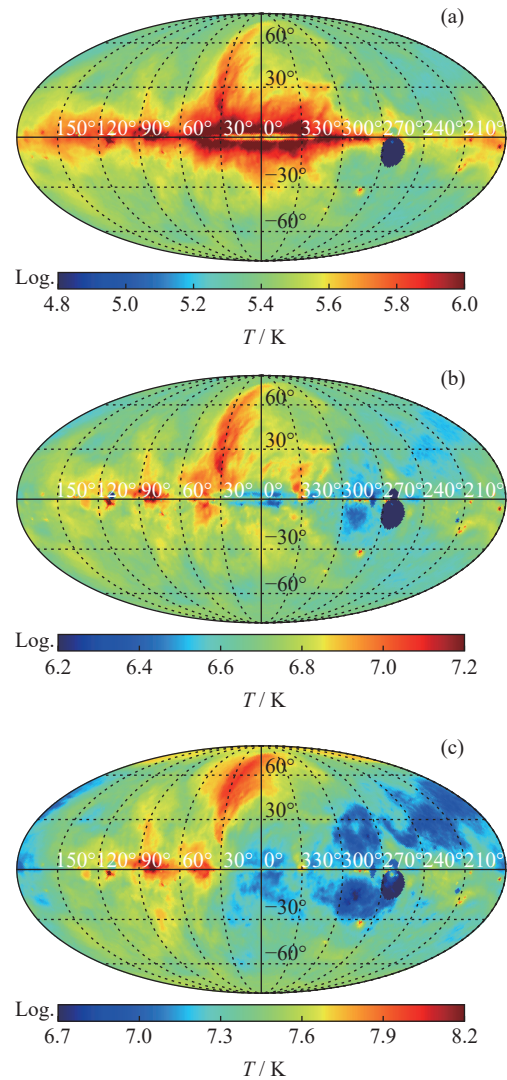


图 2 ULSA 模型预测的 10 MHz (a), 3 MHz (b) 和 1 MHz (c) 天图

Fig. 2 Sky map of 10 MHz (a), 3 MHz (b) and 1 MHz (c) obtained by the ULSA model

更好地测定产生同步辐射的宇宙线分布。本气泡(Local Bubble)是太阳系周边的低密度区,其成因据推测是过去一千万年间多个超新星爆发产生的,这些超新星爆发事件也可能对地球产生影响。利用低频电磁波易被自由电子吸收的特点,通过对不同频率超长波的观测,可以精确地还原出所处位置周围的自由电子三维分布。与其他观测手段(包括恒星吸收线、紫外和X射线观测,宇宙线原位测量)相比,对不同频率超长波的观测可以获得太阳系周边环境更大范围和更完整的物质分布图像,从而更好地理解所处的环境^[22]。

超长波源也包括类星体和活动星系核、射电星系、星系团等河外源。类星体和活动星系核是正在吸积物质的超大质量黑洞。在吸积过程中可以产生相对论性高速喷流,但喷流的产生和准直机制仍不清楚。这些喷流可能来自黑洞旋转能量的提取或吸积盘引力势能,产生强烈的射电辐射。在黑洞喷流活动停止后,射电瓣中的粒子将逐渐损失能量,其辐射频率也将逐渐降低。在超长波段可观测到高频已减弱而低频还比较明亮的射电瓣。这对于理解喷流怎样发生及随后的演化至关重要。同时,通过对不同频率超长波的观测,也可以获得喷流内粒子能量分布和周边物质分布的信息。此外,还可以获得更完整的超大质量黑洞喷流发生和演化统计结果和物理图像,进而理解宇宙中超大质量黑洞的形成和演化。

科学目标 3 观测太阳和行星超长波活动,揭示空间环境相互作用规律。

鸿蒙计划还将同时进行射电变源的超长波射电活动观测,主要包括太阳射电爆发的超长波监测和太阳系行星的射电活动观测。

太阳是离人类最近的一颗恒星。太阳活动是引起日地空间和近地空间环境剧烈扰动的驱动源,主要通过电磁辐射、高能粒子流发射、等离子体抛射产生作用。对上述太阳活动进行探测,可以预报和监测灾害性空间天气事件,对国家安全和社会生活具有重大意义。

在30 MHz以下到0.1 MHz的低频段,与太阳活动有关的辐射主要来源于距离太阳表面 $3\sim 5 R_s$ 以外的行星际空间。由于受地球电离层的吸收和地面各种信号的干扰,地基望远镜无法对这些辐射进行有效探测。行星际空间是太阳风、行星际激波和ICME

的传播、加速和演化的重要区域。该频段的太阳射电观测数据,可用于研究II型、III型太阳射电爆发、日冕高层独立百米波爆发等现象及其辐射特性,从而更好地理解太阳射电爆发的物理机制以及日冕物质抛射(CME)等离子体团在日地空间中的传播、加速和动力学演化机制等。对这些过程的观测和反演是掌握日地空间环境、预测预报灾害性空间天气事件、保障空间安全的重要手段。太阳活动的监测可使用触发机制,自动切换观测模式。超长波天文阵列具有较高的角分辨率,能实现对太阳射电爆发的准成像观测,这是与其他空间太阳低频射电探测器相比的一大优势。

太阳系内行星的射电辐射根据机制可分为三种。第一种是行星(水星、地球、木星、土星、天王星和海王星)磁球与太阳风相互作用产生的回旋加速辐射;第二种是高能带电粒子在巨行星(木星、土星、天王星和海王星)磁球深处产生的同步加速辐射(例如木星的辐射带);第三种是行星大气层内的闪电活动。对系内行星的低频射电辐射测量能够揭示行星射电辐射的时变特性及其与行星自转周期的关联,了解行星磁场及行星内部环流、太阳风的变化以及行星卫星的调制效应,进一步了解外部太阳系几颗大行星的磁场及内部结构。

此外,超长波天文观测阵列在这个基本是空白的频段,有机会发现一些全新的、意想不到的新天体或新现象,即“未知的未知”,这有可能带来其科学上最重要的发现。

2 有效载荷配置

为了实现对0.1~120 MHz宇宙辐射信号的功率谱进行高灵敏度探测,以及在0.1~30 MHz超长波频段对全天空高分辨率成像,鸿蒙计划配置的有效载荷包括:高频频谱仪,低频干涉成像谱仪,星间通信测距同步系统,星间测角系统,相关处理器,定标系统。具体有效载荷配置列于表1。

高频频谱仪在30~120 MHz开展高精度宇宙21 cm全天频谱测量。高频频谱仪采用超宽带接收技术,将30~120 MHz的电磁波信号进行放大滤波,然后采用高速ADC(采样率为每秒250兆次)将放大滤波后的信号转换为数字信号,再通过FPGA对数字信号进行傅里叶变化处理,即可获得超长波谱段的

表 1 有效载荷配置
Table 1 Payloads

卫星	载荷名称	数量
高频子星	高频频谱仪	1
	星间通信测距同步系统	1
	星间测角系统	1
低频子星	低频干涉成像谱仪	8
	星间通信测距同步系统	8
	星间测角系统	8
主星	相关处理器	1
	定标系统	1
	星间通信测距同步系统	1
	星间测角系统	1

频谱测量结果。高频频谱仪部署在 1 颗子星上。

由于超长波段波长较长,为了实现 0.1~30 MHz 全天空高分辨率成像,必须采用干涉测量技术。干涉测量本质是通过对空间中不同点收到的信号进行互相关,测量出信号空间分布的傅里叶分量。使用综合孔径成像方法,可从已测得的傅里叶分量反演出信号的空间分布。每两颗卫星形成一条干涉基线,通过对多颗卫星的探测信号进行干涉处理,得到多条干涉基线测量的空间频率信息集合,该集合被称为可见度函数。通过干涉成像反演算法,可以获得全天空图像。低频干涉成像谱仪对 0.1~30 MHz 低频探测数据进行接收和采集,完成对超长波宇宙辐射的同步接收,实现高精度的成像探测和频谱测量。低频干涉成像谱仪部署在 8 颗子星上。相关处理系统部署在主星上,负责对接收到的 8 颗子星上的低频干涉成像谱仪探测数据进行复相关处理,形成可见度函数。

星间通信测距同步系统与星间测角系统共同完成基线矢量的测量。星间通信测距同步系统具有主星和子星之间的星间通信、测距、时钟同步等功能,利用微波通信链路实时测量 1 颗主星到 9 颗子星的基线距离,同步子星时钟至主星时钟,并将子星的探测数据传输至主星。星间通信测距同步系统部署在 9 颗子星上。星间测角系统负责测量主星与子星之间相对角度的测量。9 颗子星上配置星空相机,对主星上配置的灯阵进行观测,获取主星与子星连线矢量(基线矢量)在惯性坐标系中的角度值。基于星间基线测量数据和编队轨道数据的后处理算法还能够进

一步提高卫星定轨和基线测量的精度。

定标系统部署在主星上,向外发送定标信号,子星通过接收定标信号实现系统级定标。

2.1 高频频谱仪

高频频谱仪主要进行 30~120 MHz 的全天平均频谱高精度测量,目标是探测宇宙黎明时期的 21 cm 信号。宇宙前景辐射比宇宙黎明 21 cm 信号强度高 4~5 个数量级,差别只在于前景信号在频谱上是光滑的,而 21 cm 信号则形成吸收或发射谱特征,如图 1 所示。鸿蒙计划高频频谱仪与一般低频射电接收系统在设计上的主要差别,就在于要确保这种频谱上的非光滑特征不被湮没。主要体现在天线和接收机的频谱响应光滑,且天线方向图尽可能保持与频率无关^[23-25];尽可能保持系统响应稳定,不随时间变化;通过内置系统,精确校准系统响应。

为了达到上述目标,高频频谱仪采用图 3 所示的设计方案,包括探测天线、模拟接收机系统和数字相关频谱仪系统三个部分。频谱仪采用双通道接收,通过干涉差分测量和高输入阻抗接收进行校准和全天频谱测量。表 2 给出了系统设计指标。

为了实现光滑的频谱响应,并使方向图与频率近似无关,考虑选用电小天线。这里采用单极天线,以避免使用巴伦导致的频率依赖性。在设计之初考虑多种形式的天线,例如鞭状天线、对数周期天线、球锥天线、锥形天线等,经过仿真分析和比较,并综合考虑各种因素,选用了一种配有底盘和套筒的长球锥形天线。这种天线结构简单稳定,方向图随频率变化较小。卫星星体可以作为底盘而考虑在内,且底盘内有足够的空间可以放置所需设备。通过电磁仿真模拟对天线参数进行了优化,目前选定的参数为:球锥形天线高度 96.5 cm,锥顶直径 45 cm,底盘平面半径 60 cm,厚度 20 cm。目前设计的天线反射系数呈现平滑单调变化。不匹配造成天线到接收机的信号传输效率在观测频段低端只有 1/10 左右,但由于低频天空前景亮度高达 $10^3\sim10^4$ K,即使不匹配,到达接收机前端的信号功率也比接收机本身产生的噪声功率高,所以这种不匹配的效应对观测信噪比的影响不大。本文给出的灵敏度估计均已考虑了这一效应。仿真模拟结果表明,采用方向图的频率依赖性低的天线,可以得到准确的全天频谱并探测其中的 21 cm 信号^[26]。

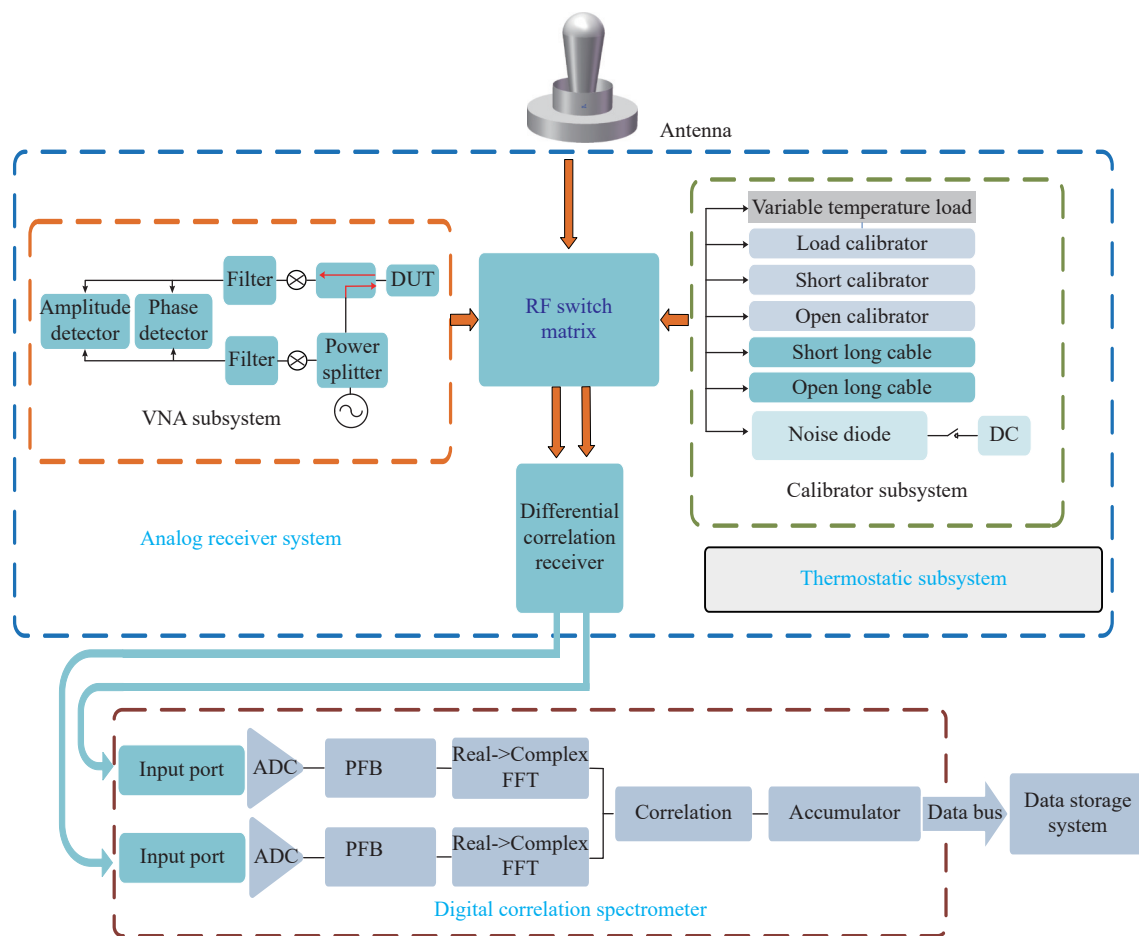


图 3 高频频谱仪测量系统

Fig. 3 High frequency band spectrometer system

表 2 高频频谱仪技术指标
Table 2 Parameters of the high frequency band spectrometer

技术指标	设计要求
天线	尺寸小、波瓣与频率无关、响应平坦
探测频率	30~120 MHz
探测灵敏度	优于0.1 K @ 80 MHz (1 MHz带宽10 min积分时间)
探测动态范围	80 dB
频谱分辨率	≤ 100 kHz
EMI/干扰幅度	$\leq 3 \text{ nV} \cdot \text{Hz}^{1/2}$
EMI/宽频干扰	30~120 MHz内不存在带宽 ≥ 2 MHz的宽频干扰
EMI/单频点干扰	30 ~ 120 MHz内的占比 $\leq 5\%$

系统接收机的模拟和数字电路部分在物理上做适当隔离,以减少数字电路产生的干扰。在模拟电路

部分,把一些稳定性要求更高的部分置于高精度恒温箱内,以确保系统的稳定性。为了校准系统响应,除了放大器之外,还配置了定标校准子系统和矢量网络测量子系统。前者包括可变温度高低温负载、噪声二极管宽带噪声源、长电缆短路开路校准器等,用于定标放大电路的增益和矢量网络测量子系统,后者用于测量天线和放大器因阻抗不匹配产生的反射。通过全向微波开关系统(由一个单刀多掷的微波开关和数个单刀双掷微波开关组成的开关阵列),使矢量网络分析仪能够实时向前测量天线和向后测量接收机系统。

电小天线与接收电路的阻抗不匹配。为了避免在切换时导致系统状态变化,采用双路干涉接收方案^[27],即将天线和校准源的信号通过电桥混合,再利用数字频谱仪双路相关器提取信号。考虑冗余增强设计,还增加了高输入阻抗对比测量通道。数字系统AD采样率 250 MSPS, AD采样精度不低于 12 bit。

将模拟系统的输出功率设计到一个较窄的范围, 保证系统的线性度。FPGA 的 FFT 长度能够保证频谱分辨率小于 10 kHz, 这有利于分辨出窄线干扰, 并保证频谱无干扰的有效带宽。

2.2 低频干涉成像谱仪

低频干涉成像谱仪对低频探测数据进行接收和采集, 完成对超长波宇宙辐射的同步接收, 实现 0.1~30 MHz 高精度成像探测和频谱测量。低频干涉成像谱仪主要包括天线、前置放大单元、中频放大单元和数字信号处理单元等。其系统组成如图 4 所示。

对于超长波信号接收机天线, 基本设计思路是采用电小天线, 即天线的尺寸远小于波长。这种设计在超长波段空间观测中具有很多优点: 工程上更容易

实现; 视场较大, 比较适合全天观测; 也无须对卫星姿态做出很高的控制要求。电小天线也较容易实现平滑的响应曲线, 有利于 21 cm 频谱测量。电小天线的主要缺点是传输效率低, 其收到的信号只有小部分能进入接收机。但是, 由于低频天空亮度很高, 即便在这种情况下, 系统温度仍主要由天空亮度决定, 接收机噪声的对系统温度影响不大, 因此不会严重影响信噪比。

采用安装在卫星平面两侧、可弹性释放的三正交单极子天线, 展开后长度为 2.5 m。这种形式的天线未展开时占用体积小、重量轻, 安装方便, 能够满足对不同极化方向的测量, 并已在龙江二号卫星上使用过。天线管材质为铍青铜, 单天线管重量为 34.5 g,

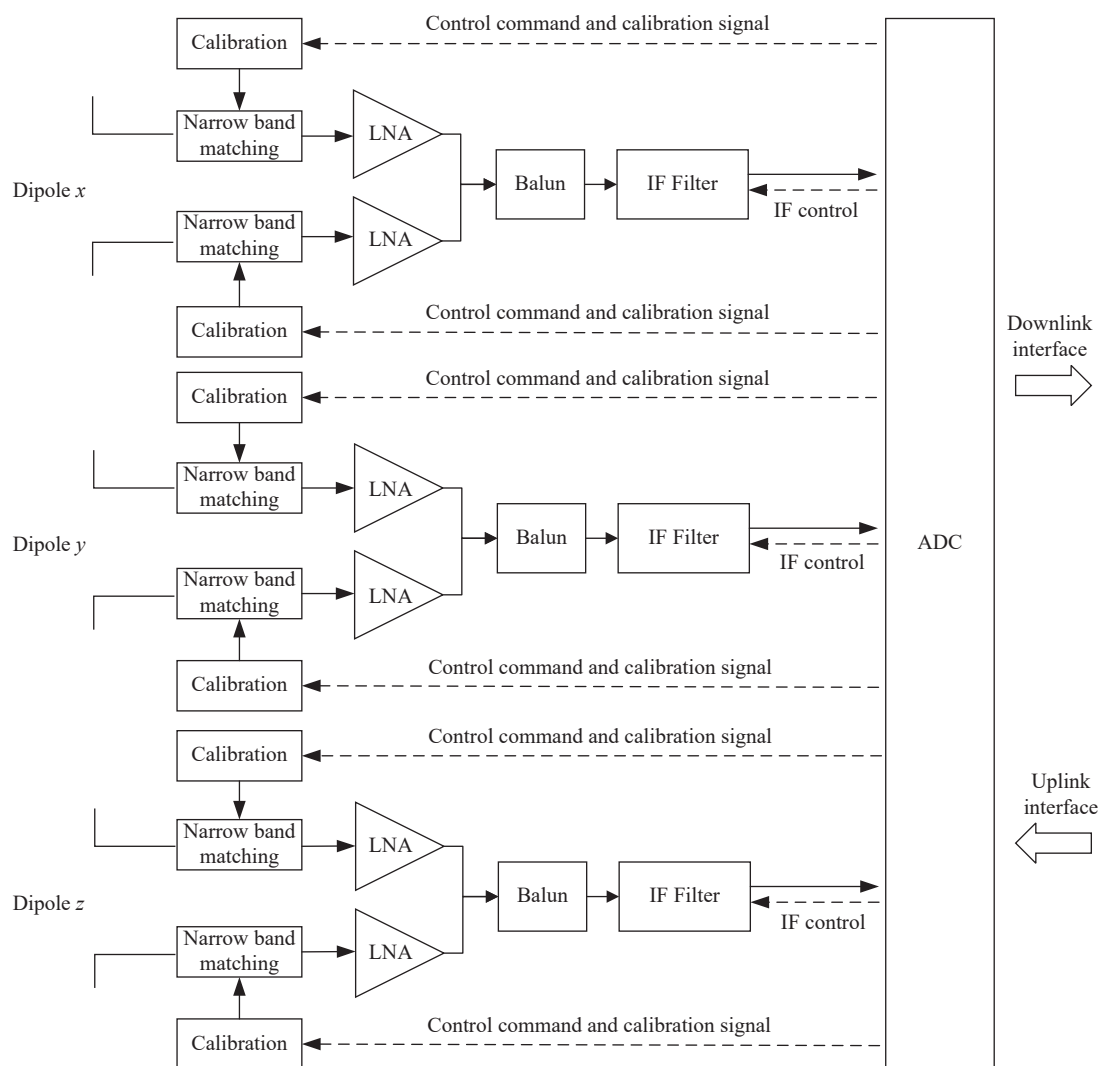


图 4 低频干涉成像谱仪系统

Fig. 4 Low frequency band interferometric imaging spectrometer system

天线管直径设计为 10 mm, 馈电方式采用滑环的方式。

前置放大单元包括接收模块和定标模块, 其中接收模块由宽带匹配模块和预放大模块组成, 定标模块由 DA 定标信号、低温噪声源和高温噪声源组成。前置放大单元将通过开关在观测模式、DA 定标模式(内/外)、高温噪声定标模式和低温噪声定标模式之间进行切换。中频放大滤波单元由巴伦(合路器)、放大器、数控衰减器和滤波器组成。

数字信号处理单元具有梳状滤波、高精度谱分析和原始数据压缩等功能。AD 芯片将采用 AD9254。另外考虑到运算资源需求和功耗约束, 考虑在每个子星单机上设计单片 xilinx 的 k7 系列芯片用于数据预处理。例如在低频干涉成像谱仪的数字系统中, 将设计三个并行数据处理通道, 每路设计 15 个子带的数据滤波以及 8192 点 FFT 处理。

接收系统稳定度将通过高精度定标联合高精度温控共同实现。对前置放大单元、中频放大滤波单元的温度控制精度要求为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$; 对定标用噪声源的温度控制精度要求为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 其稳定度将可达到 0.002 dB; 对定标用 DA 芯片, 其温度控制精度要求为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 其稳定度将可达到 ± 10 ppm。

低频干涉成像谱仪主要技术指标列于表 3。

2.3 星间通信测距同步系统

星间通信测距同步系统集成星间通信、测距、时钟同步、载荷管理等功能。主要包括星间通信天线、发射机、功放、接收机、中频处理等。系统组成如图 5 所示。

表 3 低频干涉成像谱仪技术指标
Table 3 Parameters of the low frequency band interferometric imaging spectrometer

技术指标	设计要求
天线	2.5 m 可展开三正交单极子
探测频率	0.1 ~ 30 MHz
空间分辨率	优于 0.18° @ 1 MHz, 0.012° @ 30 MHz
谱分辨点数	优于 8192
探测灵敏度	优于 1000 K @ 30 MHz (1 MHz 带宽, 10 min 积分时间)
EMI	优于 $\leq 3 \text{ nV}\cdot\text{Hz}^{1/2}$ (0.1~30 MHz, 90% 观测频段) 优于 $9 \text{ nV}\cdot\text{Hz}^{1/2}$ (0.1~30 MHz, 其他频段)

主星和每颗子星的通信速率不低于 $20 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 。星间链路采用 Ka 频率、频分复用, 调制方式为 QPSK。Ka 信道容量能够满足 9 颗子星的通信要求, 但是总的信号带宽受 ADC 采样频率的限制, 因此主星采用双接收机的方案, 子星采用单接收机的方案。可以设定 ADC 工作频率为 320 MHz, 理论带宽为 160 MHz, 将 9 颗子星分在 320~480 MHz 和 640~800 MHz 两个中频通道上, 每颗子星有效带宽设为 26 MHz(QPSK 调制带宽), 信道间隔为 8 MHz, 可以通过数字滤波的方法得到相应通道的信号。

星间中频处理单元主要功能包括: 接收来自射频单元接收通道的上行中频信号, 完成 A/D 转换、载波捕获、数字滤波、解调、解帧(包括相位模糊); 完成信号调制、D/A 转换后, 输出下行中频信号给射频单元的发送通道; 压控晶振控制及时钟分配。主要技术指标列于表 4。

2.4 星间测角系统

星间测角系统测量每颗子星与主星连线矢量(基线矢量)在惯性坐标系中的角度。通过基线角度测量与基线距离测量确定基线矢量。测角系统为星空相机和 LED 灯阵组合方式, 指标列于表 5。星空相机视场为 $2\omega=9.5^\circ$, 对主星上 LED 灯阵的测角 3 sigma 精度优于 1.8 角秒 ($=9 \mu\text{rad}$)。星空相机焦距为 40 mm, 相对孔径 1:1.2, 其重量小于 400 g。

2.5 相关处理器

每个子星 3 个滤波通道, 8 颗子星共计 24 个滤波通道。每个滤波通道有 15 个子带的 I-Q 信号通过星间链路传输至主星, 由相关处理器进行实时复相关和累加处理, 获得可见度函数数据。相关处理器由幅相关校正模块、量化处理模块、自相关处理模块和复相关处理模块等组成, 其输出结果为可直接用于成像的可见度函数数据。

2.6 定标系统

在主星上安装一套 0.1~30 MHz 的系统定标单元(单频点扫频或噪声源)。发射源采用对称单极子天线, 天线可展开。

系统定标单元的原理是通过主星向所有 8 颗低频子星发射定标信号, 在所有低频子星到主星的星间距离均已知(星间距离由 CRS 子系统提供)的情况下, 低频子星接收到信号的相位差包含多星通道间

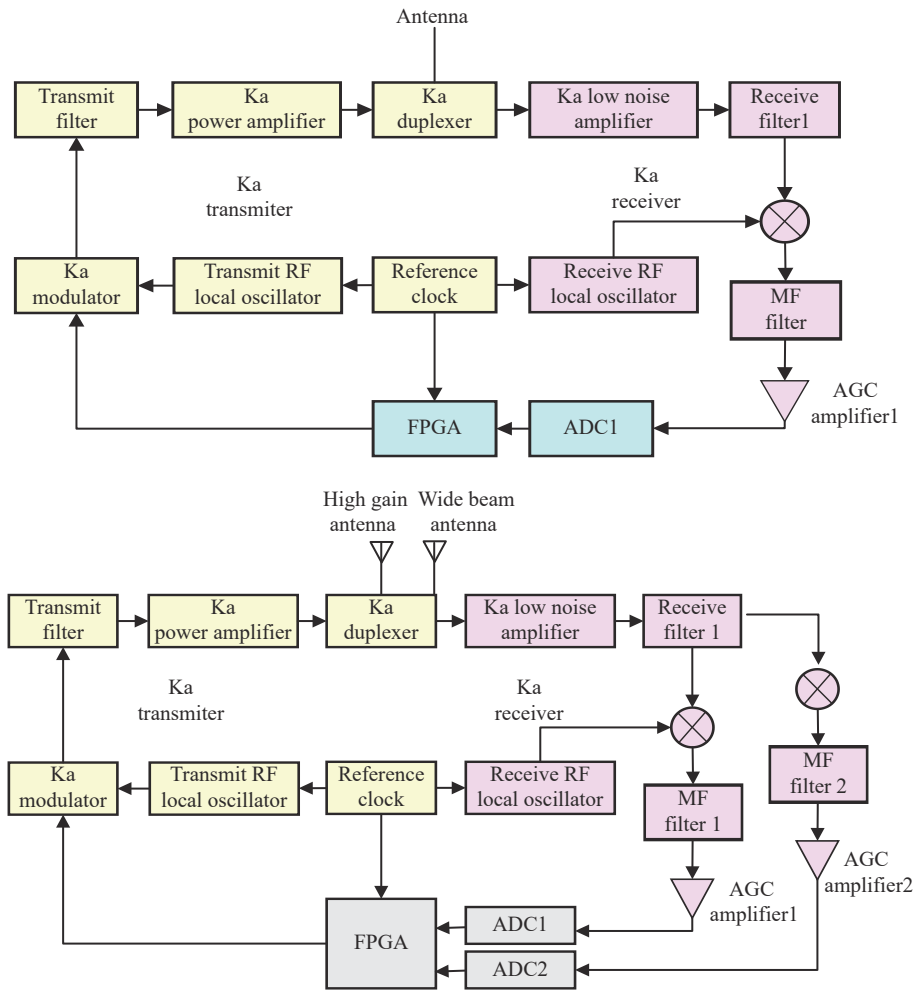


图 5 星间通信、测距和时钟同步系统

Fig. 5 Inter-satellite communication, ranging and clock synchronization system

表 4 星间通信、测距和时钟同步技术指标
Table 4 Parameters of the inter-satellite communication, ranging and clock synchronization

技术指标	设计要求
频率范围	Ka前向链路(22.55~23.55 GHz) 反向链路(25.60~27.22 GHz)
多星通信方式	1主9从
接入方式	频分复用
通信距离	100 km
测距精度	优于1 m
时钟同步精度	≤ 3.3 ns
每星数传速率	≥ 20 Mbit·s ⁻¹

(包括天线和接收链路)和空间距离延迟两部分。在空间距离已知的情况下,可以利用主星上的发射源对所有低频子星多通道间的相位差进行标定。

表 5 星间测角系统技术指标
Table 5 Parameters of inter-satellite direction measurement system

技术指标	设计要求
星空相机视场	9.5°
测角精度	9 μ rad
焦距	40 mm
相对孔径	1:1.2
星空相机重量	≤ 400 g
灯阵发射角	110°
灯阵平均电功率	15 W
灯阵重量	300 g

3 任务总体设计

鸿蒙计划拟采用 1 颗主星与 9 颗子星,在 300 km 绕月圆轨道线形编队形成空间分布式干涉阵列,利用

编队协同观测和轨道演化带来的基线变化,实现对宇宙黑暗时代的空间探测。

月球背面能够有效屏蔽来自地球的射电信号干扰,拥有太阳系中近乎最安静的电磁环境,是开展超长波观测的最佳选择,因此鸿蒙计划选择绕月圆轨道。根据基线覆盖致密性要求,目标轨道高度需要综合考虑任务寿命和轨道进动速度。经仿真分析,选择了 300 km 高度圆轨道。

鸿蒙计划的有效观测弧段为月球遮挡住地球的弧段。对轨道倾角与遮挡时间、进动速度关系进行分析发现,在不同轨道倾角下,轨道倾角越低遮挡时间越长,进动周期越短,但相应的基线分布也更扁平,而对全天成像要求三维的基线分布,因此倾角的选择不能过低。此外,还要兼顾发射、转移和入轨所需的燃料消耗,最后选择轨道倾角为 30° 。

基于基线最优化设计,以及对定标、测距、通信等功能实现的工程便利性需求,分布式卫星阵列拟设计为绕月线性编队,其中最短基线(最小星间距离)与最长基线分别为 100 m 和 100 km。同时拟对卫星阵列采取轨道控制措施,使得线性阵列各星间距离呈周期性缩短与拉伸(类似于“呼吸”),这样可以使得空间频率域覆盖更为致密,为高质量的全天空成像提供基础。

采用线性编队的优势之一是可以快速实现对特定天区的高分辨率成像,即卫星阵列绕月半个轨道即可获得较好的二维基线,实现对基线法线方向的快速成像。在初步设计中,选择 300 km 绕月圆轨道,基线范围为 0.1~100 km。通过绕月轨道的合理设计,使得绕月线性编队轨道面以一定的速度进动,从而在一定时间的测量基线累积后实现完整的三维基线覆盖。

主星和 9 颗子星的组合体由运载火箭整体发射,经地月转移后被月球捕获,进入 300 km 目标轨道。组合体分离释放子星,形成 1 主 9 从的线形编队空间分布式干涉阵列。其中 8 颗子星携带低频干涉成像谱仪,在月球背面分别进行 0.1~30 MHz 高精度成像探测;1 颗子星携带高频频谱仪,开展 30~120 MHz 高精度全天平均频谱探测。所有子星的科学探测数据传输至主星,经主星的互相关处理单元完成数据处理后,将数据下行至地面接收站。任务运行阶段如图 6 所示。

采用 1 颗主星和 9 颗子星,一方面是考虑独立的

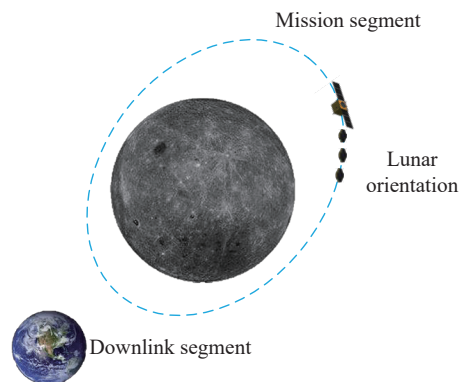


图 6 任务运行阶段

Fig. 6 Operation segments

主星具有测控数传、星间通信和星间测量的独特优势;同时也降低子星复杂度,使得整星 EMI 更加洁净。1 颗高频子星高精度测量全天功率谱,8 颗低频子星利用干涉测量原理进行全天空成像。可以通过一次任务,实现对超长波天文领域中当前科学发现潜力最大部分的探测。子星数量的优化论证涉及科学目标的实现、工程可实施性等诸多方面。子星数量越多,则成像越快、质量越好;但子星数量也受卫星重量、运载能力等工程约束。8 颗低频子星是既能满足科学探测需求,又满足工程约束的择优结果。

鸿蒙计划采用主星侧挂子星的发射方案,组合体发射状态如图 7 所示。主星 1 颗,采用承力筒构型,通过包带与运载连接,具有良好的承载能力。8 颗低频子星通过星间分离机构两两侧挂在主星四个外侧面,1 颗高频子星通过星间分离机构安装在主星顶板。

主星配有可展开的太阳能帆板,如图 8 所示。

根据载荷需求,子星选取平板式卫星构型,并选用体装电池片形式。其中,卫星结构为卫星各分系统的单机设备提供支撑,并保持既定的刚度和尺寸稳定性。太阳电池阵可贴片面积不小于 1.5 m^2 。

低频子星天线展开前和展开后的状态如图 9 所示。低频子星的尺寸如下。

发射时包络尺寸: $1218 \text{ mm}(x) \times 1460 \text{ mm}(y) \times 192 \text{ mm}(z)$ 。

飞行时包络尺寸: $3120 \text{ mm}(x) \times 3600 \text{ mm}(y) \times 2992 \text{ mm}(z)$ 。

高频子星如图 10 所示,高频子星的尺寸如下。

发射时包络尺寸: $1218 \text{ mm}(x) \times 1460 \text{ mm}(y) \times 443 \text{ mm}(z)$ 。

飞行时包络尺寸: $1218 \text{ mm}(x) \times 1460 \text{ mm}(y) \times 443 \text{ mm}(z)$ 。

子星在月球背地面进行探测,并将数据传输至主星。在对地面,主星对地进行数据下行。

4 关键技术

主要关键技术包括: 编队部署与自主协调控制技术、高精度基线矢量确定技术、系统高精度测量与定标、超长波段系统级 EMI 抑制技术,以及变基线阵列大视场成像方法。

4.1 编队部署与自主协调控制技术

鸿蒙计划在近月圆轨道上部署多颗卫星,构成基线周期动态重构的跨尺度阵列。这对卫星相对运动建模、编队构型分离部署、多星自主协调控制等方面提出了很高的要求。

以往卫星编队主要集中在地球轨道上,近月轨道上多星编队尚属空白,相对运动规律更加复杂。需要建立考虑复杂深空摄动力的高精度相对运动模型并求取模型的解析解,探明月球轨道多星编队相对运动规律。通过定量分析月球轨道线性编队受到的复杂空间摄动力,在以主星为基准的相对运动坐标系中,建立考虑月球非球形引力摄动、地球、太阳及太阳系

行星的引力摄动、太阳光压摄动、后牛顿效应等因素的高精度相对运动模型。

子星姿态控制采用三轴轮控的方式,所装推力器比冲不小于 40 s ,主要用作轨道控制和动量轮卸载。任务寿命 3 年,每颗子星所需推进剂消耗约为 2.5 kg (50% 余量)。

针对分离部署过程中的轨道、姿态与结构机构耦合动力学与控制问题,合理规划主星和子星的结构布局,设计具有精准分离能力的子星分离释放机构,优化子星安全分离轨迹以规避对主星的碰撞,并对分离过程中的轨道、姿态、结构耦合动力学过程进行建模与仿真验证,确保分离过程的安全性和准确性。

编队卫星数量较多,星间基线尺度分布从 100 m 到 100 km ,跨越了 3 个数量级,并且星间距离周期性地压缩、膨胀。编队若具有自主控制能力,将极大降低对地面测控的需求。鸿蒙计划将采用主星测控转发的策略,由主星接收地面测控信号,向子星进行转发并实时监控子星的安全距离。

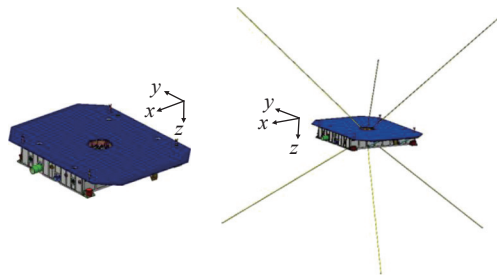


图 9 低频子星天线展开前后状态

Fig. 9 Low frequency daughter satellite before and after antenna deployment

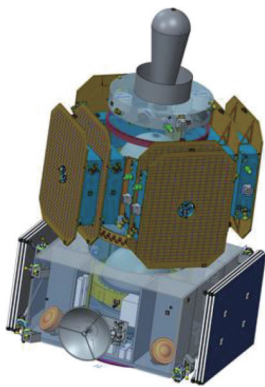


图 7 组合体发射状态

Fig. 7 Assembly as it is launched

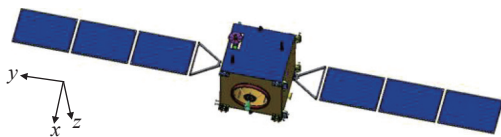


图 8 主星在轨状态

Fig. 8 Mother satellite in flight

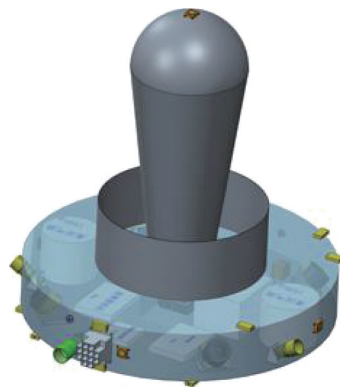


图 10 高频子星在轨状态

Fig. 10 High frequency daughter satellite in flight

4.2 高精度基线矢量确定技术

由干涉成像原理可知,基线矢量的测量精度直接影响干涉成像质量,技术上要求基线测量精度为 $1/10$ 波长,测量精度优于 1 m 。为了实现动态基线测量,采用微波测距方式实现主星对子星的距离测量,采用灯阵和星空相机组合方式实现主星对子星的角度测量。涉及的关键技术包括:星间链路网络架构及多接入技术、多星星间链路信号处理、星间测角及三维基线的精确反演。

主星和9颗子星的星间链路选用频分多路方式。频分多路可以同时建立多个链路连接,进行不间断的通信测距和时间同步,保证多个链路的伪距测量精度不降低。同时,采用FPGA内部“软”滤波器可以规避多个射频通道的硬件成本。每条链路有独立的一个频率,卫星数量越多,就需要分配更多的频段,需要额外的频率保护间隔,这会限制通信速率。同时还需要考虑远近效应,不要让近距离卫星的高功率信号阻塞了远距离卫星的低功率信号。鸿蒙计划采用大系统闭环的功率控制方法。

星间链路采用双向单程伪距测量(DOWR, Dual One Way Ranging)体制进行双向测距并完成时间同步。两条链路测得的伪距经过两个分离方程,可以同时得到两颗卫星之间的真实距离和实际钟差的信息,进而通过时钟驯服消除钟差实现时间同步。

星间测角方案采用灯阵和星空相机的组合测量方法。测角的基本原理是将主星灯阵目标当作一颗星,子星星空相机取得星图之后,将恒星剔除,剩余的提取点大概率就是灯阵目标点。为保证识别率,在目标光源上添加一些信号,并在传感器端缓存一定帧数的星图,根据缓存的结果区别噪声与目标点,提高识别率。最终采用星图方法,通过星图中恒星的坐标确定主星和子星之间的相对角度。星间测角时,将主星设为广播发射光源,各个子星接收的形式,如图11所示。

在获取星间距离和相对角度后,考虑到测量信息含有一定的测量噪声,所以利用事后基线高精度确定方法进一步提高基线的确定精度,并同时提高基线确定的动态特性。三维基线的事后确定分为两个层次。首先利用最优估计理论对星间测距、测角信息进行非线性滤波,得到滤波确定的基线数据序列;然后,以滤波确定的基线数据为初值,在高精度相对运动动

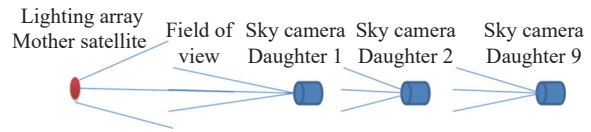


图 11 鸿蒙卫星阵列测角

Fig. 11 Direction measurement for the DSL satellite array

力学模型下进行数值预报,得到预报的伪基线数据,基线误差会导致伪基线随时间演化逐渐偏离滤波基线,利用伪基线与滤波基线偏离的时间积分效应对基线误差进行迭代修正,进一步提高基线确定精度。

4.3 系统高精度测量与定标

低频干涉成像谱仪的接收机增益定标主要包括两个方面:接收机增益稳定度定标和接收机增益不平衡度定标。

增益稳定度定标是通过切换定标网络开关矩阵,使得接收系统周期性地工作在观测和定标模式下,实现接收系统的实时定标(Dicke型辐射计),从而通过定标的手段提高接收机增益稳定度。鸿蒙计划利用高低温噪声源对接收系统增益进行定标。

增益不平衡度定标是通过定标模式下的定标信号,对所有子星和主星有效载荷接收通道的增益不平衡度进行定标,以实现多通道间增益不一致性的校准。接收机相位不平衡度校准主要依赖于DA定标。可以通过多星上的多片DA同时播出多频点同相定标信号,实现各个通道间(不包含天线)相位不一致性定标,相位定标精度和稳定度优于 0.5° 。同时,利用主星发射DA外定标信号对包括天线链路的所有子星模拟通道间的相位不一致性进行定标。

高频频谱仪主要利用高温和常温负载对系统进行温度的绝对校准定标,然后利用端接(terminated)开路、短路校准件的长电缆,放大系统内部的驻波,以方便测量系统的噪声参数。

4.4 超长波段系统级EMI抑制技术

超长波段射电天文的观测目标是非常微弱的宇宙射电信号,所以对卫星EMI有很高的要求。银河系背景辐射在 $0.1\sim 30\text{ MHz}$ 大约为 $26\text{ dB}\mu\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$,考虑卫星EMI强度需要小于科学目标信号 6 dB ,则对于卫星EMI的要求为 $E \leq 20\text{ dB}\mu\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 。然而卫星内部大部分器件的工作频段(或者是其谐波干扰)也在该频段内。为解决这一挑战,采用分层设计、迭代优

化的方案进行 EMI 抑制, 具体可以分为电路级、板级、单机级以及整星级四个层次, 并分别从电磁兼容设计、仿真分析、电磁兼容测试验证、迭代设计优化四个方面进行技术攻关。

EMI 抑制关键技术的设计原则如下。

(1) 从干扰源头上对系统的 EMI 干扰源进行分析排查。

(2) 采用统一时钟设计。

(3) 通过一系列措施减少干扰源, 使得干扰控制为点频干扰。

(4) 电源模块采用统一开关频率。

(5) 对其他数字单元所用到的时钟, 降低或抬高频率, 使得干扰处于工作频段之外。

通过对芯片的板级加固、接口处加光耦隔离等屏蔽措施, 以及对电缆、结构等进行合理的屏蔽加固措施, 抑制干扰功率, 保证接收机动态范围。

4.5 变基线阵列大视场成像方法

由于绕月编队卫星阵列的特殊性, 超长波天文观测阵列具有全天视场、三维动态非共面基线等特点, 且存在随时间变化的月球遮挡等问题, 一般传统地面阵列常用的综合孔径成像技术无法直接使用。同时, 数据量随观测时间的增大、积分时间的减小而不断增大, 庞大的计算量要求非常大的计算资源, 因此对成像算法的开销和并行能力也提出了很高要求。

首先基于三维傅里叶变换方法开展了成像反演和并行计算仿真验证。三维傅里叶成像技术的主要思想是通过三维傅里叶变换来获取天空的二维亮度分布。这一方法之前在地面阵列中已有采用, 通过对三维可见度函数乘以一个因子 $e^{-2\pi i w}$, 去除 w 方向的相位跟踪效应, 并定义一个新的三维可见度函数,

$$F(l, m, n) = \iiint V'(u, v, w) e^{-2\pi i (ul + vm + wn)} du dv dw. \quad (1)$$

式(1)对 $V'(u, v, w)$ 进行三维傅里叶变换, 得到 $F(l, m, n)$ 二维的天空亮度分布 $I(l, m)$ 可以通过 $F(l, m, n)$ 变换得到, 二者之间的关系如下:

$$F(l, m, n) = \frac{I(l, m) \delta(\sqrt{1 - l^2 - m^2} - n)}{\sqrt{1 - l^2 - m^2}}. \quad (2)$$

对于月球轨道阵列, 这一方法不完全适用。因为当阵列运行到轨道上的不同位置时, 不同的天区被月球遮挡, 此种方法还需要更为复杂的修正。但是, 对天空中的亮源, 此方法还是可以将其重建出来。

从更普遍的理论框架看, 阵列数据与天空辐射强度之间存在线性映射关系。在这种情况下可以采用一般线性映射方法, 通过求解线性方程组的方法成像。针对超长波天文观测阵列的特殊需求, 研究并开发了线性映射成像算法^[28], 并针对多种实际问题制定成像技术方案, 进行了仿真验证^[29]。将天空亮度栅格化, 则其可以写成如下矩阵形式:

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\mathbf{T} + \mathbf{n}. \quad (3)$$

其中, 矩阵 $\mathbf{B}$ 的表达式为 $\mathbf{B} = A(t, n) e^{-i \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{n} \cdot \mathbf{r}_{ij}} \Delta\Omega$, 表示随时间不断变化的包含相位的复波束, 这是一个 $(N_{b1} \cdot N_t) \times N_{pix}$ 矩阵, N_{b1} , N_t 和 N_{pix} 分别为基线数量、观测时间点数和天空的格点数; $\mathbf{T}$ 为 $N_{pix} \times 1$ 的天图矢量; 矢量 $\mathbf{n}$ 为平均值为 0 的随机噪声, 其协方差矩阵为 $\mathbf{N} = \langle \mathbf{n}\mathbf{n}^t \rangle$ 。通过式(3)可以计算得到形状为 $(N_{b1} \cdot N_t) \times 1$ 的可见度函数矢量。

式(3)矩阵方程的每一行表示每个时刻得到的可见度函数数据。求解式(3), 可以得到 $\mathbf{I}$ 的最小方差估计, 即

$$\hat{\mathbf{T}} = (\mathbf{B}^\dagger \mathbf{N}^{-1} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^\dagger \mathbf{N}^{-1} \mathbf{V} \equiv \mathbf{B}^{-1} \mathbf{V}. \quad (4)$$

图 12 给出了频率 10 MHz 处、考虑了月球遮挡和噪声情况下一个进动周期的仿真结果, 包括还原天图(图 12 a)、相对于输入天图的相对误差(图 12 b)^[29], 以及还原天图与输入天图的球谐相关系数(图 12 c)。从视觉效果上看, 整个大尺度的还原效果较好, 较大误差主要出现在一些亮点局部。文献[29]给出了输入与还原天图之间的像素均方差(MSE)、结构相似度(SSIM)等定量指标。图 12(c)的球谐相关系数也证明了这一点, 即在对对应较小球谐模式 l (对应较大尺度)处, 相关系数非常接近 1, 这说明大尺度模式的还原是相当准确的。短基线的数量有限, 但仍然能较好地还原大尺度结构。这是因为, 在平直天空近似下, 每条基线长度对应一个特定的空间频率; 但是在考虑天空为球面的情况下, 每条基线的干涉显示度会得到不同阶球谐分量的贡献, 在使用干涉显示度线性反演求解时, 从较长基线也可以解出这些分量。或者换个角度来说, 三维长基线投影在平面上时可以形成短基线, 因此仍提供了足够的大尺度信息。

表 6 给出了 1 MHz 带宽、8 颗卫星的情况下, 10 MHz 处射电点源的探测灵敏度。由于在超长波段射电电源本身的分布并不清楚, 根据不同模型推测的

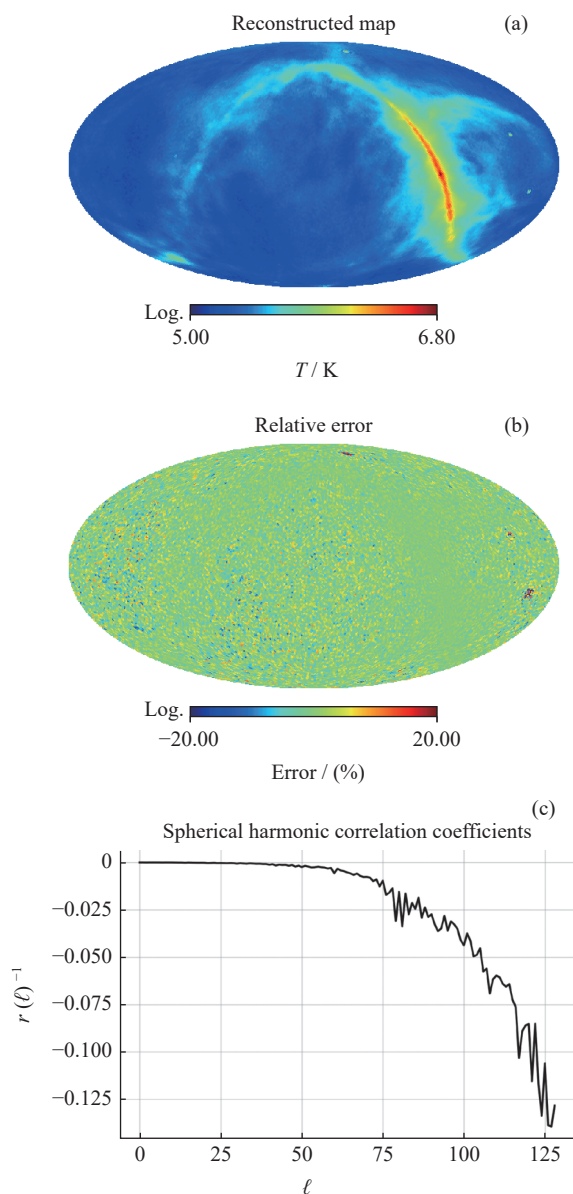


图 12 还原天图与相对误差及球谐相关系数
Fig. 12 Reconstructed map, relative error, and spherical harmonic correlation coefficients

可观测点源数也有一定不确定性,估计鸿蒙计划在 3 年运行期间可探测的点源数量为几百至几万个^[29]。

对于弥散源,源的可探测性与其亮度和尺寸都有关。对于那些需要长基线才能分辨的尺寸很小的源,显然面亮度探测极限更高;而对于尺度较大,可以在较低分辨率下观测的源,面亮度探测极限就要低一些。图 13 给出了角分辨率为 10 角分时,经过一段时间观测后估计达到的温度标准差值(10 MHz 带宽)。亮温超过标准差几倍的弥散源将可以被探测到。

表 6 点源探测灵敏度(10 MHz 频率, 1 MHz 带宽)

Table 6 Point source detection sensitivity (10 MHz frequency, 1 MHz bandwidth)

积分时间	1 hour	1 day	1 week	1 month	1 year
流量/Jy	300	61.1	23.1	11.2	3.2

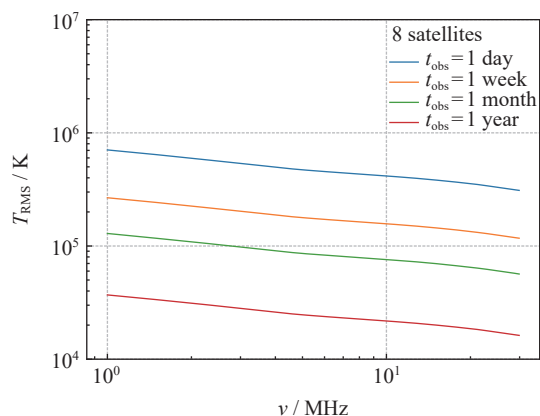


图 13 不同观测时间下 10' 分辨率下的天空温度方差
Fig. 13 Standard deviation of sky temperature at 10' angular resolution with different observation time

5 结语

近年来,国际上出现了重返月球的热潮。美国、欧盟、俄罗斯和中国都在积极策划新的月球科学计划,而其中一个重要的组成部分就是对月球资源的利用。月球背面为射电天文提供了理想的环境,因此在各国的月球计划中,都列入了月基天文学的内容。

鸿蒙计划经过前期的研究,具备了较强的可行性和技术成熟度,非常适合作为月基超长波探测的第一步。希望能抓住时机,迈出超长波探测的第一步,在超长波天文这个新领域中做出中国的贡献。

参考文献

- [1] ALEXANDER J K, KAISER M L, NOVACO J C, *et al*. Scientific instrumentation of the radio-astronomy-explorer-2 satellite[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1975, **40**(4): 365-371
- [2] CHEN Xuelei. Some thoughts on developing space-based low frequency radio astronomy of our country[C]//Proceedings of the 2 nd Academic Annual Meeting of the Deep Space Exploration Commission of the Chinese Astronautics Society. Beijing: China Academy of Space Technology,

- 2005: 49-53 (陈学雷. 关于开展我国空间低频射电天文学研究的一些设想[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第二届学术会议论文集. 北京: 中国宇航学会, 2005: 49-53)
- [3] WU Ji, YAN Jingye, WU Lin, *et al.* An imaging method based on satellite array: CN, 201510208120.5[P]. 2015 (吴季, 阎敬业, 武林, 等, 一种基于卫星编队的成像方法, 专利号 201510208120.5)
 - [4] BOONSTRA A J, GARRETT M, KRUIHOF G, *et al.* Discovering the Sky at the Longest wavelengths (DSL)[C]//2016 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2016: 20
 - [5] WU Ji, HONG Xiaoyu, YAN Jingye, *et al.* Ultralong wavelength radio astronomy telescope[C]//28 th National Space Exploration Meeting. Lanzhou: Chinese Society of Space Research, 2015 (吴季, 洪晓瑜, 阎敬业, 等. 超长波射电天文望远镜[C]//第二十八届全国空间探测学术研讨会. 兰州: 中国空间科学学会, 2015)
 - [6] ZHANG Jinxiu, CHEN Xuelei, CAO Xibin, *et al.* Formation flying around lunar for ultra-long wave radio interferometer mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, **4**(2): 158-165 (张锦绣, 陈学雷, 曹喜滨, 等. 月球轨道编队超长波天文观测微卫星任务[J]. *深空探测学报*, 2017, **4**(2): 158-165)
 - [7] YAN J, WU J, GURVITS L I, *et al.* Ultra-low-frequency radio astronomy observations from a selenocentric orbit: first results of the Longjiang-2 experiments. *Experimental Astronomy*, in print, preprint arxiv: 2212.09590
 - [8] CHEN X L, BURNS J, KOOPMANS L, *et al.* Discovering the sky at the longest wavelengths with small satellite constellations[OL]. arXiv preprint arxiv: 1907.10853, 2019
 - [9] CHEN X L, YAN J Y, DENG L, *et al.* Discovering the sky at the longest wavelengths with a lunar orbit array[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2021, **379** (2188): 20190566
 - [10] CHEN X L, MIRALDA-ESCUDE J. The spin-kinetic temperature coupling and the heating rate due to Ly α scattering before reionization: predictions for 21 centimeter emission and absorption[J]. *The Astrophysical Journal*, 2004, **602**(1): 1-11
 - [11] CHEN X L, MIRALDA-ESCUDE J. The 21 cm signature of the first stars[J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, **684**(1): 18-33
 - [12] BOWMAN J D, ROGERS A E E, MONSALVE R A, *et al.* An absorption profile centred at 78 megahertz in the sky-averaged spectrum[J]. *Nature*, 2018, **555**(7694): 67-70
 - [13] BARKANA R. Possible interaction between baryons and dark-matter particles revealed by the first stars[J]. *Nature*, 2018, **555**(7694): 71-74
 - [14] SINGH S, NAMBISSAN T J, SUBRAHMANYAN R, *et al.* On the detection of a cosmic dawn signal in the radio background[J]. *Nature Astronomy*, 2022, **6**(5): 607-617
 - [15] VEDANTHAM H K, KOOPMANS L V E. Scintillation noise power spectrum and its impact on high-redshift 21-cm observations[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, **458**(3): 3099-3117
 - [16] SHEN E, ANSTEY D, DE LERA ACEDO E, *et al.* Quantifying ionospheric effects on global 21-cm observations[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, **503**(1): 344-353
 - [17] BRADLEY R F, TAUSCHER K, RAPETTI D, *et al.* A ground plane artifact that induces an absorption profile in averaged spectra from global 21 cm measurements, with possible application to EDGES[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **874**(2): 153
 - [18] SILK J, CRAWFORD I, ELVIS M, *et al.* Astronomy from the Moon: the next decades[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2021, **379**(2188): 20190560
 - [19] KOOPMANS L V E, BARKANA R, BENTUM M, *et al.* Peering into the dark (ages) with low-frequency space interferometers[J]. *Experimental Astronomy*, 2021, **51**(3): 1641-1676
 - [20] BURNS J O. Transformative Science from the lunar farside: observations of the dark ages and exoplanetary systems at low radio frequencies[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2021, **379**(2188): 20190564
 - [21] CONG Y P, YUE B, XU Y D, *et al.* An ultralong-wavelength sky model with absorption effect[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **914**(2): 128
 - [22] CONG Y P, YUE B, XU Y D, *et al.* A new method of reconstructing Galactic 3 D structures using ultralong-wavelength radio observations[J]. *The Astrophysical Journal*, 2022, **940**(2): 180
 - [23] LIU A, PRITCHARD J R, TEGMARK M, *et al.* Global 21 cm signal experiments: a designer's guide[J]. *Physical Review D*, 2013, **87**(4): 043002
 - [24] MOZDZEN T J, BOWMAN J D, MONSALVE R A, *et al.* Limits on foreground subtraction from chromatic beam effects in global redshifted 21 cm measurements[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, **455**(4): 3890-3900
 - [25] GU J H, WANG J Y. Direct parameter inference from global EoR signal with Bayesian statistics[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, **492**(3): 4080-4096
 - [26] SHI Y, DENG F R, XU Y D, *et al.* Lunar orbit measurement of the cosmic dawn's 21 cm global spectrum[J]. *The Astrophysical Journal*, 2022, **929**(1): 32
 - [27] SINGH S, SUBRAHMANYAN R, SHANKAR N U, *et al.* SARAS 2: a spectral radiometer for probing cosmic dawn and the epoch of reionization through detection of the global 21-cm signal[J]. *Experimental Astronomy*, 2018, **45**(2): 269-314
 - [28] HUANG Q Z, SUN S J, ZUO S F, *et al.* An imaging algorithm for a lunar orbit interferometer array[J]. *The Astronomical Journal*, 2018, **156**(2): 43
 - [29] SHI Y, XU Y D, DENG L, *et al.* Imaging sensitivity of a linear interferometer array on lunar orbit[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, **510**(2): 3046-3062