中国科学 : 物理学 力学 天文学 2026 年 第 56 卷 第 10 期 : 109504
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica physcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
评 述 环月低频射电天文台(鸿蒙计划)专题

宇宙黎明21 cm信号的前景减除与信号提取

张佳骏[1,2*], 李浩然[2,6,7], 喻凯峰[3], 张乐[3*], 倪书磊[4*], 史峰[5*], 全冬晖[8,4], 邓辅仁[2,6,7], 周萌[2,6], 刘天阳[1,7], 王梓同[5], 马潇凡[5], 王鑫[3], 徐怡冬[2,6], 陈学雷[2,6,7]

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030
2. 射电天文与技术全国重点实验室, 中国科学院国家天文台, 北京 100101
3. 中山大学物理与天文学院, 珠海 519082
4. 之江实验室天文计算研究中心, 杭州 311121
5. 西安电子科技大学空间科学与技术学院, 西安 710126
6. 中国科学院国家天文台, 北京 100101
7. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049
8. 西交利物浦大学物理系, 苏州 215123
*联系人, 张佳骏, E-mail: jjzhang@shao.ac.cn; 张乐, E-mail: zhangle7@mail.sysu.edu.cn; 倪书磊, E-mail: nisl@zhejianglab.edu.cn; 史峰, E-mail: fshi@xidian.edu.cn

收稿日期: 2026-01-12; 接受日期: 2026-02-25; 网络出版日期: 2026-09-08
太空探源专项(编号: GJ11010405)、国家重点研发计划(编号: 2020SKA0110401, 2020SKA0110402, 2020SKA0110100, 2022SKA0110200, 2022SKA0110202, 2020YFC2201600, 2022YFF0504300, 2022YFB4501405)、国家自然科学基金(编号: 12473097, 12361141814, 12473006)、中国载人航天工程(编号: CMS-CSST-2021 (A02, A03, B01))、中国科学院(编号: ZDKYYQ20200008)、暗物质物理国家重点实验室和中国国家天文数据中心青年数据科学家项目(编号: NADC2025YDS-01)、广东省基础与应用基础研究基金(编号: 2024A1515012309)、中央高校基本科研业务费专项资金(编号: ZYTS25248)、浙江省领军型创新创业团队(编号: 2023R01008)、浙江省自然科学基金(编号: LY24A030001)和浙江省重点研发计划(编号: 2024SSYS0012)资助

摘要 探测宇宙黎明时期的21 cm全天平均谱是揭示早期宇宙演化的关键手段, 但面临银河系前景辐射强于目标信号4–5个量级、仪器系统效应复杂等挑战. 鸿蒙计划通过部署绕月卫星平台(30–120 MHz高频观测), 突破地面观测的电离层干扰与射频污染限制, 实现全天区覆盖. 近年来, 研究团队针对前景减除和信号提取问题提出了一系列创新方法, 具体研究了波束卷积效应、月球影响、天线多色性等问题, 并对宇宙黎明21 cm全天频谱仿真信号进行了信号提取实验. 实验结果表明, 鸿蒙计划需要累计10天的有效积分观测时间, 可达到提取21 cm信号的要求.

关键词 宇宙黎明, 21 cm, 射电天文

PACS: 98.80.-k, 98.62.Py, 95.75.Pq, 98.58.-w, 95.85.Bh

引用格式: 张佳骏, 李浩然, 喻凯峰, 等. 宇宙黎明21 cm信号的前景减除与信号提取. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 109504
Zhang J, Li H, Yu K, et al. Foreground removal and 21 cm signal extraction from Cosmic Dawn (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 109504, doi: 10.1360/SSPMA-2026-0025

© 2026 《中国科学》杂志社

1 引言

宇宙黎明(CD)标志着第一代发光天体(如恒星)通过引力坍缩开始形成的时期, 结束了宇宙的“黑暗时代”. 紧随其后的再电离时期(EoR), 这些早期天体的紫外线和X射线辐射加热并电离了周围的中性氢气体. 21 cm信号之所以能成为探测CD/EoR的关键探针, 是因为在CD/EoR期间, 宇宙膨胀和第一代天体加热导致气体温度与宇宙微波背景(CMB)温度发生偏离[1]. 氢原子与物质或辐射的相互作用会在不同时期产生独特的吸收或发射特征(反映在21 cm亮温度上). 宇宙膨胀将这些来自不同时期的特征信号红移到不同的频率(对于CD/EoR, 红移范围约z = 6–27, 对应频率约50–200 MHz), 形成连续的谱线轮廓. 21 cm 信号谱反映了CD/EoR期间物质与辐射相互作用的物理过程(如气体加热、电离速率变化等), 为我们提供了关于宇宙第一代天体形成、演化及其对周围环境影响的独特信息, 是重建宇宙演化历史“最后一块拼图”[2].

全天总功率测量, 或称全天平均谱测量是测量来自整个天空的、频率依赖的总功率(亮度温度)谱. 科学目标是直接探测宇宙全天平均的21 cm信号谱形, 特别是预期在CD/EoR期间存在的吸收谷特征, 最大深度$\lesssim$ 200 mK[3–5]. 目标是测量该吸收谷的中心频率、宽度、深度和形状, 从而推断出第一代天体形成和再电离过程的平均时间线、效率以及加热机制等关键宇宙学参数和天体物理参数. 通常会使用一个宽频带、宽波束(接近全向)的单天线接收机系统. 天线收集来自整个天空(或尽可能大天区)的射电辐射总功率, 并测量其随频率变化的亮度温度谱. 核心挑战在于将极其微弱的宇宙学信号从强大得多的前景辐射和各类系统噪声中分离提取出来.

目前主要在地面进行的多个实验采用了单天线方案, 包括EDGES (Experiment to Detect the Global EOR Signature)[6–9], SARAS3 (Shaped Antenna measurement of the background RAdio Spectrum 3)[10,11], REACH (Radio Experiment for the Analysis of Cosmic Hydrogen)[12–15], LEDA (Large-Aperture Experiment to detect the Dark Ages)[16–18], BIGHORNS (Broadband Instrument for Global HydrOgen ReioNisation Signal)[19,20], SCI-HI (Sonda Cosmológica de las Islas para la Detección de Hidrógeno Neutro)[21], PRIZM (Probing Radio Intensity at high-Z from Marion)[22], MIST (Mapper of the IGM Spin Temperature)[23–25], RHINO (the Remote HI eNvironment Observer)[26]等项目. 它们均采用单天线设计, 因其相对简单、成本较低且易于部署. 其中只有EDGES声称在78 MHz附近探测到一个深度超过500 mK的宽吸收谷信号[7]. 然而, 该信号的深度远超理论预期(< 200 mK), 引发了广泛质疑. SARAS3团队分析后认为EDGES的信号很可能是其低频仪器噪声引起的谱畸变[27]. 其他实验尚未报告类似的明确探测结果. 这凸显了在地球环境下进行此类高精度测量的巨大困难, 特别是系统误差的控制和前景扣除的准确性.

上述实验的经验告诉我们, 地球环境对低频(< 200 MHz) 21 cm信号探测构成严重障碍. 地面观测面临多重且强度远超宇宙学信号的干扰源. 其中地球的电离层会强烈地折射、反射和吸收低频电磁波. 其引入的天线温度偏差比21 cm 全局信号强2–3个数量级(10^2–10^3倍), 且具有频率依赖性[28–30]. 大量自然(如雷电)和人工(通信、广播、雷达等)射频信号充斥该频段. 通过电离层突发E层传播或对流层传播, 干扰可能传播到偏远观测站[20]. 土壤介电特性导致天线与地面间产生驻波, 引起天线温度中出现正弦波状的系统误差[31,32].

鸿蒙计划(Discovering the Sky at the Longest Wavelength, DSL)[33–36]提出于月球轨道部署多颗卫星绕月编队形成超长波天文观测阵列, 能有效规避在地面进行该波段观测的主要限制, 实现全天区0.1–120 MHz的探测. 月球本身作为一个巨大的物理屏障, 能有效阻挡来自地球的所有人工和大部分自然射频干扰. 月球没有大气层, 因此不存在会干扰低频信号的电离层. 当卫星位于月球夜间侧时, 月球也能屏蔽来自太阳的低频辐射. 综合以上因素, 月球背面提供了目前已知最“宁静”的低频射电观测环境[37,38]. 除鸿蒙计划之外, 国际上也提出了多个利用月球背面环境进行21 cm探测的计划, 如DAPPER (Dark Ages Polarimeter PathfindER)[39,40], DARE (Dark Ages Radio Explorer)[41], 以及FARSIDE (Farside Array for Radio Science Investigations of the Dark ages and Exoplanets)[40,42,43] 等. DAPPER是一个单天线项目, 使用贴片天线和线型天线, 预计可以作为一个小型载荷, 在月球轨道上运行或降落在月球背面运行. DARE是一个月球轨道全天频

谱测量项目, 使用双锥天线, 测量全天总功率的同时还计划测量两种不同的偏振功率. FARSIDE是一个计划部署在月球背面的低频天线阵列, 预计包括128个对数周期天线, 覆盖10 km的范围, 进行干涉成像. 相比这三个项目, 鸿蒙计划同时具备超长波干涉成像能力和全天频谱观测能力.

但是即便避开地球的干扰, 想精确提取微弱宇宙学21 cm信号仍面临根本性困难, 其核心挑战就在于前景扣除. 前景主要成分包括银河系的同步辐射、自由-自由辐射, 以及系外点源. 银河系前景亮温度(~10^3 K)比21 cm信号吸收谷最深点(~0.1 K)高出约4个数量级(10000倍). 理论上, 前景辐射在感兴趣的频段(50–200 MHz)应是光滑的, 近似幂律谱. 然而, 天线多色性使这一假设失效. 天线的多色性是指天线的方向图(波束)随频率变化. 这意味着, 随着频率改变, 天线"看到"的天空区域, 特别是前景亮度的空间结构, 也在变化. 天线多色性将前景辐射的空间结构耦合到了观测到的频率谱中, 导致测得的"总功率"天线温度谱不再是理想的光滑幂律谱, 而会叠加额外的频谱结构. 常用的多项式拟合法假设前景是光滑的[27,44–48], 但天线多色性引入的畸变破坏了这一假设, 导致拟合效果不佳, 可能掩盖信号或产生假信号[13,18,29,49,50].

本文主要介绍全天总功率探测中的前景扣除方法. 第2节首先介绍鸿蒙计划全天总功率探测的大致情况, 并介绍我们的仿真观测探索情况. 第3节介绍现在国际和国内团队发展的多套前景扣除方法. 第4节介绍成像观测的前景扣除方法作为参考. 第5节总结现在根据仿真观测得出的部分结论和科学预期, 并展望尚需进一步发展的方向.

2 绕月探测的独特优势与挑战

月球轨道环境, 特别是卫星处于特定位置时, 会对观测产生重要影响. 月球背面能有效地屏蔽地球射频干扰(RFI), 当卫星处于月球夜间侧时, 月球能屏蔽太阳低频辐射. 因此存在一个被称为"双优时间"的观测窗口(约占每个绕月轨道时间的10%), 此时月球同时遮挡了太阳和地球, 提供了最纯净的观测环境. 在这个窗口期内(每个绕月轨道约8246 s中的10%, 约824.6 s), 卫星位置使得月球同时遮挡了来自太阳和地球方向的辐射/干扰. 这是进行最灵敏21 cm信号测量的黄金时间.

即使在屏蔽了地球RFI和太阳辐射的月球轨道理想环境下, 探测微弱的21 cm信号仍面临以下核心干扰挑战: 银河系前景辐射, 天线多色性与波束建模误差, 来自外界和仪器自身的射频干扰, 仪器噪声和月球辐射等.

银河系前景辐射是最强的前景污染源, 在目标频段(50–200 MHz)亮度温度高达约~10^3 K, 比21 cm信号吸收谷(~0.1 K)强约4个数量级, 其本身应是光滑的幂律谱, 可利用多项式拟合等方法去除. 但实际上, 天线的多色性, 即天线的方向图(波束)随频率变化, 会导致前景辐射的空间结构被耦合到观测的频谱中, 这破坏了前景原本光滑的幂律特性, 引入了额外的频谱结构, 使得传统(如多项式拟合)前景扣除方法失效. 因此在天线设计时, 保持多色性越低越好.

鸿蒙项目的高频子星将采用一种类似雪糕筒形状的、配有底盘和套筒的长球锥形天线进行宇宙21 cm全天平均信号观测. 该天线设计具有宽视场, 有助于减小小尺度涨落对全天平均信号的影响. 同时追求低多色性, 以避免引入额外的频谱结构. 天线呈旋转对称结构, 如图1所示, 展示了鸿蒙项目高频子星的雪糕筒外形, 作为对比同时展示了在地面实验中设计使用的一种刀片型天线. 图2 仿真结果显示, 雪糕筒天线在目标频段(50–120 MHz)内表现出良好的频率无关性, 即其方向图(波束)随频率变化较小, 这是其低多色性的体现. 而在地面实验中表现良好的刀片型天线, 在没有地面反射的空间环境下, 方向图随频率变化较大, 多色性高, 不适用于空间实验. 由此对比可以看出在空间实验中进行天线重新仿真设计的重要性. 但在实际上, 我们无法精确知晓天线方向图. 仿真的波束模型必然存在误差, 即使是系统校准后仍有残余误差. 因此, 前景减除算法必须要有一定的抗多色性能力, 并能够在波束模型有一定误差的情况下仍然能够提取信号.

虽然月球屏蔽了来自地球的RFI, 但干扰并不能完全避免. 天线和接收机系统自身可能产生RFI; 在"双优时间"窗口外或月球未完全遮挡地球时, 地球RFI可能泄漏. 对于宽带RFI, 如FM广播(88–108 MHz), 信号强, 易识别, 通常做法是标记(Flagging)并剔除受污染频段数据. 但若该频段包含21 cm信号(如88–120 MHz被剔除), 会导致信号轮廓不完整, 显著降低拟合精度和增大不确定性. 对于窄带RFI, 近似线谱, 可能由仪器自身产生, 若未被识别且强度超过热噪声, 会阻碍信号

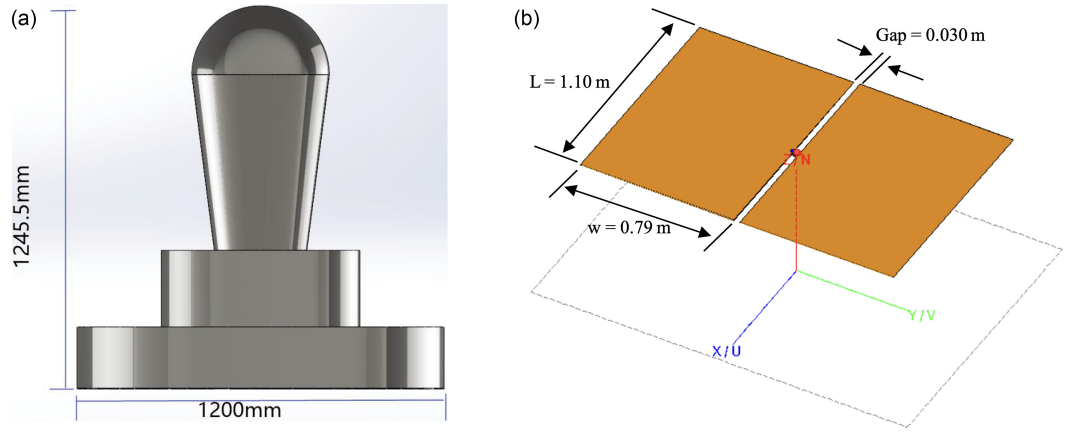


图 1 (a) 展现鸿蒙计划高频子星配有底盘和套筒的长球锥形天线外形, 形似一个雪糕筒. (b) 展现的是在地面仿真实验中展现出低多色性的刀片型天线

Figure 1 (a) The ice cream antenna for the Hongmeng Project's high-frequency satellite. (b) A blade-type antenna with low chromaticity in ground-based simulations, shown for comparison.

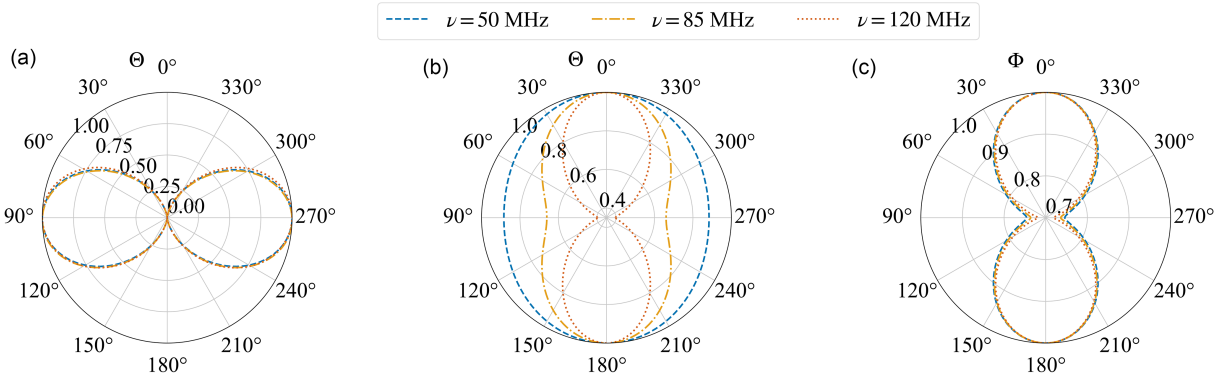


图 2 50 MHz(蓝色虚线)、85 MHz(橙色点划线)及120 MHz(朱红色点线)对应的功率束横向截面分布图. (a) 展示雪糕筒天线在不同天顶角Θ下的增益值, 其中180°–360°范围内的数值表示Φ的相反方向. (b)和(c) 分别呈现刀片天线在不同天顶角(固定方位角$\Phi = 0°$与$\Phi = 180°$)及不同方位角(固定天顶角$\Theta = 30°$)下的增益值. 可见雪糕筒天线在目标频段的多色性较低. 由于空间环境与地面环境的差异, 在地面仿真表现良好的刀片型天线在空间环境中的多色性较高

Figure 2 Transverse cross-sectional distribution of the power beam at 50 MHz (blue dashed line), 85 MHz (orange dash-dotted line), and 120 MHz (vermilion dotted line). (a) shows the gain of the ice-cream-cone antenna at different zenith angles Θ, where values in the range of 180° – 360° represent the opposite direction of Φ. (b) and (c) illustrate the gain of the blade-type antenna at different zenith angles (with fixed azimuth angles $\Phi = 0°$ and $\Phi = 180°$) and at different azimuth angles (with fixed zenith angle $\Theta = 30°$), respectively. It can be seen that the ice-cream-cone antenna exhibits low chromaticity in the target frequency band. Due to the differences between the space environment and the ground environment, the blade-type antenna, which performed well in ground-based simulations, shows high chromaticity in the space environment.

提取.

仪器噪声包含热噪声、接收机噪声和由于阻抗不匹配而引入的反射噪声等. 热噪声是系统固有的最小噪声, 其RMS由系统温度$T_{\rm sys}(\nu) = T_{\rm sky}(\nu) + T_{\rm rec}(\nu)$、独立测量次数$N_m$、频率通道带宽$\Delta\nu$和积分时间$t_{\rm int}$决定($\sigma_n(\nu) = \frac{T_{\rm sys}(\nu)}{\sqrt{N_{\rm m}\Delta\nu t_{\rm int}}}$). 接收机噪声用等效天线温度$T_{\rm rec}$表示. 鸿蒙项目高频子星设计$T^0_{\rm rec} \approx 450\,{\rm K}$. 阻抗不匹配而引入的反射噪声是由于输入输出阻抗不匹配导致部分信号被反射与原始信号混合(反射系数$\Gamma(\nu)$), 会放大接收机噪声(公式$T_{\rm rec}(\nu) = \frac{T^0_{\rm rec}}{1-|\Gamma(\nu)|^2}$). 其频率依赖性可通过仿真获得.

最后, 月球自身也具有辐射特性. 月球具有热辐射效应, 在CD-EoR对应的射电频率下, 月球可被视为一个黑体, 其固有辐射温度可近似看作$T_{\rm Moon} = 180\,{\rm K}$.

这个温度虽然相对较低, 但相比微弱的宇宙21 cm信号(~0.1 K)是不可忽略的. 月球还具有反射效应, 其表面会反射射电天空辐射. 月球表面的反射率取决于月球表面的地形和月壤成分等, 较为复杂. 虽然文献[51]使用月球轨道激光高度计(Lunar Orbiter Laser Altimeter LOLA)[52]给出了月球背面的地形, 但是在鸿蒙项目高频子星的目标频段仍然缺乏实际反射率观测数据. 当前模型假设月球背面(目前无实测反射数据, 暂时借用月球正面雷达反射数据和模型推测[53])在目标频段表现为7%反射率的镜面反射, 并忽略地形起伏, 视为光滑球面. 反射的天空温度基本呈现光滑的幂律谱, 但月球固有辐射($T_{\rm Moon}$)在频率上近似为一条水平线(非常数), 因此月球总辐射($T_{\rm Lunar} = T_{\rm Moon} + T_{\rm refl}$)不遵循幂律谱. 即使在地球和太阳干扰被屏蔽的"双优时间"内, 月球辐射(固有热辐射 + 反射)是天线接收到的重要组成部分, 必须在模拟和数据处理中考虑($T_{\rm sky}(\theta,\phi) = \mathcal{S}(\theta)T_b(\theta,\phi) + [1-\mathcal{S}(\theta)]\,T_{\rm Lunar}(\theta,\phi)$). 图3卫星相对月球在四个不同方位时可以看到的天空的图像, 该仿真中考虑了月球的遮挡和反射, 图中较暗的部分是月球, 较亮的条带是银河系. 关于鸿蒙卫星的具体介绍, 可参见文献[36]; 而关于高频子星的绕月探测仿真, 可参见文献[54].

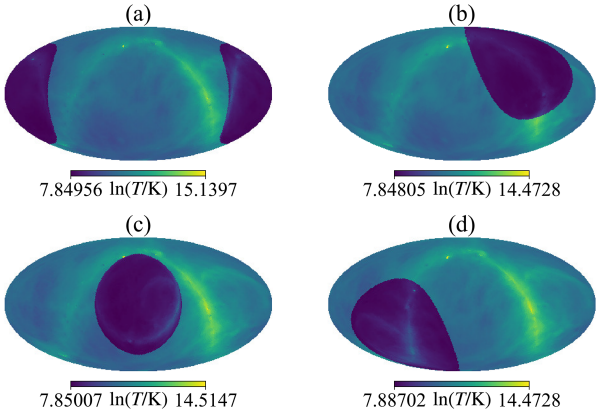


图 3 月球相对子星在四个不同位置时(0° (a), 90° (b), 180° (c), 270° (d)), 子星能够观测到的天空图像, 图中较暗的部分是月球. 同时能够在较暗的部分看到天空的反射图像

Figure 3 When the Moon is at four different positions relative to the sub-satellite (0° (a), 90° (b), 180° (c), 270° (d)), the sky images observable by the sub-satellite are presented, where the darker regions represent the Moon. Additionally, the reflected image of the sky can be seen in the darker regions.

3 全天平均谱前景扣除算法

3.1 国际上已有算法和问题

在宇宙学21 cm信号的观测中, 主要有两种策略, 一是通过测量全天平均谱, 二是测量其空间分布涨落(功率谱), 而两者所面临和要解决的主要挑战是如何在前景主导的数据中提取出微弱的21 cm信号. 对全天平均谱的观测通常采用具有较宽波束的单天线设备, 因而此类观测缺乏对天空的足够空间分辨能力, 使得某些可利用前景和宇宙学信号在不同视线方向间的统计特征差异进行信号分离的方法[55,56], 如基于主成分分析(PCA)、独立成分分析(ICA)、广义形态成分分析(GMCA)等的方法难以有效应用. 鸿蒙项目中涉及前景减除的主要是对宇宙黎明和再电离时期的21 cm信号全天平均谱的观测, 因此这里主要介绍全天平均谱实验中前景减除和信号提取的一些方法.

与宇宙学21 cm信号会表现出较复杂的频谱结构不同, 前景信号的频谱被认为更平滑, 全天平均谱实验中的前景减除方法通常利用该特性. 使用低阶多项式模型如常见的$\log(T_{\rm fg}(\nu)) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i[\log(\nu)]^i$, 对观测数据中被认为主要是前景信号的平滑成分进行拟合并减除, 残差部分则被认为包含宇宙学信号和测量误差. 多项式拟合是一种参数化拟合方法, 通过构建不同的多项式对前景进行建模来拟合观测数据, 要想将前景与宇宙学信号成功分离, 一个合适的前景模型对纯前景信号的拟合残差需要低于测量误差. 而不同多项式前景模型的主要区别则在于多项式中基函数和项数的选择, 以及是否假设包含关于信号和系统效应的先验信息等. 此前也已有文献对比了多种不同前景模型的拟合结果, 包括线性和非线性正向模型, 多项式模型, 以及最大平滑多项式模型[57]. 在EDGES实验中, 基于对银河系同步辐射谱和地球电离层的认识, 使用了一个基于物理和一般形式的有5项的多项式模型分别对前景成分进行了拟合, 分别为

$$\begin{aligned} T_{\rm fg}(\nu) \approx & a_0\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{-2.5} + a_1\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{-2.5}\log\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right) \\ & + a_2\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{-2.5}\left[\log\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)\right]^2 + a_3\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{-4.5} \\ & + a_4\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{-2} \end{aligned}$$

和

$$T_{\rm fg}(\nu) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \nu^{n-2.5},$$

其中ν_0是观测频带的中心频率, 系数a_n是待拟合的参数, 两种模型都能得到具有类似吸收特征的结果[7]. SARAS3实验[58]则使用的是一个对数空间的多项式作为前景模型. 需要注意的是, 使用多项式拟合前景的方法利用了前景信号相较宇宙学21 cm信号在频谱结构上更简单这一特性, 低阶多项式可以更好地拟合出平滑的前景信号, 而难以描述出全天平均21 cm信号在频谱上表现出的转折特征. 但一些仪器系统效应如波束的多色性、校准误差、波束的形状等, 以及地球大气电离层的作用等其他因素都可能导致前景理论上频谱平滑性被破坏, 使得往往需要增加多项式拟合的项数, 这也会使得部分宇宙学信号被拟合而同时与前景被扣除掉, 进而导致信号损失. 此外, 由于缺乏低频前景信号的观测, 其模型也往往并不准确, 在使用多项式拟合对前景信号进行时, 往往会出现过拟合或欠拟合的情况, 也会使得无法准确分离出宇宙学信号. 因此该方法容易受未知的系统效应和可能存在的未充分考虑的前景信号的影响.

为考虑仪器效应和前景建模的不确定性, 贝叶斯分析框架被广泛应用[59–62]. 贝叶斯推断是一种利用贝叶斯定理进行统计推断和模型拟合的方法, 用由参数$\theta_{\mathcal{M}}$进行描述的模型$\mathcal{M}$来拟合给定的观测数据$\mathcal{D}$. 主要通过结合对模型参数的先验信息(Prior), 以及用于表征给定模型和参数对观测数据支持程度的似然函数(Likelihood), 根据贝叶斯定理来更新模型参数的后验分布(Posterior)

$$P(\theta_{\mathcal{M}}|\mathcal{D},\mathcal{M}) = \frac{P(\mathcal{D}|\theta_{\mathcal{M}},\mathcal{M})P(\theta_{\mathcal{M}}|\mathcal{M})}{P(\mathcal{D}|\mathcal{M})}. \tag{1}$$

在该分析框架下, 可以将前景与宇宙学21 cm信号进行联合建模, 通过构建似然函数以及引入先验信息(如信号的预期频谱、天空谱指数等), 能自然地将可能的仪器系统效应和误差等进行考虑. 若简单假设不同频道数据间的噪声是不相关且是高斯的, 则似然函数可写作

$$\log\mathcal{L} = \sum_i -\frac{1}{2}\log(2\pi\sigma_n^2) - \frac{1}{2}\left(\frac{T_{\rm data}(\nu_i) - T_{\rm model}(\nu_i)}{\sigma_n}\right)^2, \tag{2}$$

其中$T_{\rm data}(\nu_i)$是观测数据, σ_n是用来描述高斯噪声的先验值. $T_{\rm model}(\nu_i)$可以是根据不同参数的物理模型得到的模拟观测数据(可以包含天空和天线响应模型, 以及其他各类仪器和环境效应等), 也可以是一个用于拟合观测数据的数学模型(如多项式)等.

之后通过MCMC等采样方法得到相关模型参数的后验概率分布以及评估测量的不确定性. 但信号能否准确被提取较大程度取决于模型和先验信息的选择, 如果模型参数过多或参数间存在一定耦合, 则也会使得采样过程的计算量和难度增大.

基于奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)的方法也被提出用于信号拟合和提取[63,64], 通过正向模型生成不同的波束加权信号模型和系统效应下的模拟观测数据作为训练集, 再通过奇异值分解方法得到不同成分训练集的本征矢量和本征值, 如果训练集能准确代表所有可能的观测数据, 则得到的本征模可以构成一组能够拟合训练集的基函数. 随后可以用得到的基函数去(联合)拟合观测数据中的成分. 但该方法对所构建的训练集的完备性和准确性要求较高, 需要对系统效应有较好认识, 且由于不同成分所得到的本征模并不严格正交, 这可能导致拟合中不同成分间存在混淆, 导致所拟合的信号存在偏差.

高斯过程回归(Gaussian Process Regression, GPR)方法也被用于分离前景和宇宙学信号[65–67], 主要原理是对观测数据中的平滑成分进行拟合, 根据不同成分(前景信号、宇宙学信号、系统误差等)的频谱结构差异而设计相应的频率协方差函数, 得到前景信号在该观测数据下的后验分布, 再从数据中减去以分离得到宇宙学信号. 这里简单介绍高斯过程回归的基本原理. 高斯过程是一种对函数进行统计建模的方法, 其假设该函数上任意有限点的函数值的集合都服从一个多变量高斯分布. 假设数据$\boldsymbol{f} = f(\boldsymbol{\nu})$可以用一个高斯过程进行描述, 则其概率分布可表示为

$$\boldsymbol{f} \sim \mathcal{N}(m(\boldsymbol{\nu}), K(\boldsymbol{\nu},\boldsymbol{\nu})),$$

其中$m(\boldsymbol{\nu}) = \mathbb{E}[f(\boldsymbol{\nu})]$是数据的均值函数, $K(\boldsymbol{\nu},\boldsymbol{\nu})$是其协方差矩阵. 其与另一个定义在其他数据点构成的集

合$\boldsymbol{\nu}'$上的高斯过程$\boldsymbol{f}'$的联合概率分布为

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{f}\\ \boldsymbol{f}'\end{bmatrix}\sim\mathcal{N}\left(\begin{bmatrix}m(\boldsymbol{\nu})\\ m(\boldsymbol{\nu}')\end{bmatrix},\begin{bmatrix}K(\boldsymbol{\nu},\boldsymbol{\nu}) & K(\boldsymbol{\nu},\boldsymbol{\nu}')\\ K(\boldsymbol{\nu}',\boldsymbol{\nu}) & K(\boldsymbol{\nu}',\boldsymbol{\nu}')\end{bmatrix}\right). \tag{3}$$

则$f(\boldsymbol{\nu}')$条件于观测数据$f(\boldsymbol{\nu})$的后验概率分布为

$$\boldsymbol{f}'|\boldsymbol{f}\sim\mathcal{N}(\mathbb{E}(\boldsymbol{f}'),\mathrm{Cov}(\boldsymbol{f}')),$$

其中

$$\begin{aligned}&\mathbb{E}(\boldsymbol{f}')=m(\boldsymbol{\nu}')+K(\boldsymbol{\nu}',\boldsymbol{\nu})[K(\boldsymbol{\nu},\boldsymbol{\nu})]^{-1}(\boldsymbol{f}-m(\boldsymbol{\nu}')),\\&\mathrm{Cov}(\boldsymbol{f}')=K(\boldsymbol{\nu}',\boldsymbol{\nu}')-K(\boldsymbol{\nu}',\boldsymbol{\nu})[K(\boldsymbol{\nu},\boldsymbol{\nu})]^{-1}K(\boldsymbol{\nu},\boldsymbol{\nu}').\end{aligned} \tag{4}$$

对于宇宙学21 cm信号数据处理的情况, 假设观测数据$\boldsymbol{T}_{\rm data}=T_{\rm data}(\boldsymbol{\nu})$中主要包含前景信号、宇宙学21 cm信号和噪声, 即$\boldsymbol{T}_{\rm data}=\boldsymbol{T}_{\rm fg}+\boldsymbol{T}_{21}+\boldsymbol{T}_{\rm n}$. 为了对观测数据中的各成分进行建模和拟合, 还需要根据不同信号的频谱特征构建相应的协方差函数(核函数$\boldsymbol{K}\equiv K(\boldsymbol{\nu},\boldsymbol{\nu})$), 如前景信号的协方差函数的选择应充分利用其在频谱上的平滑性. 常见的核函数如高斯函数或径向基函数

$$K(\nu,\nu')=\sigma^2\exp\left(\frac{(\nu-\nu')^2}{2\ell^2}\right).$$

假设各成分间相互独立, 则数据的协方差函数为各成分之和:

$$\boldsymbol{K}_{\rm data}=\boldsymbol{K}_{\rm fg}+\boldsymbol{K}_{21}+\boldsymbol{K}_{\rm n}.$$

通常可以假设式(3)中均值函数$m(\boldsymbol{\nu})=m(\boldsymbol{\nu}')=\boldsymbol{0}$, 则数据和前景模型的联合概率分布可写为

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{T}_{\rm data}\\ \boldsymbol{T}_{\rm fg}\end{bmatrix}\sim\mathcal{N}\left(\begin{bmatrix}\boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0}\end{bmatrix},\begin{bmatrix}\boldsymbol{K}_{\rm fg}+\boldsymbol{K}_{21}+\boldsymbol{K}_{\rm n} & \boldsymbol{K}_{\rm fg}\\ \boldsymbol{K}_{\rm fg} & \boldsymbol{K}_{\rm fg}\end{bmatrix}\right), \tag{5}$$

根据式(7), 前景模型的后验概率分布的期望和协方差分别为

$$\mathbb{E}(\boldsymbol{T}_{\rm fg})=\boldsymbol{K}_{\rm fg}[\boldsymbol{K}_{\rm fg}+\boldsymbol{K}_{21}+\boldsymbol{K}_{\rm n}]^{-1}\boldsymbol{T}_{\rm data}, \tag{6}$$

$$\mathrm{Cov}(\boldsymbol{T}_{\rm fg})=\boldsymbol{K}_{\rm fg}-\boldsymbol{K}_{\rm fg}[\boldsymbol{K}_{\rm fg}+\boldsymbol{K}_{21}+\boldsymbol{K}_{\rm n}]^{-1}\boldsymbol{K}_{\rm fg}, \tag{7}$$

分别用来描述对数据中前景信号的拟合及其中的不确定性. 对高斯过程中的超参数, 如不同成分中的核函数的相关参数(如高斯核函数中的σ和ℓ), 可通过MCMC或梯度下降法进行优化. 将得到的前景信号模型在数据中减去, 残差$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{T}_{\rm data}-\mathbb{E}(\boldsymbol{T}_{\rm fg})$则被认为是宇宙学信号及系统噪声. 为降低高斯过程与前景模型间的简并, 还可以对高斯过程进行一些限制或约束, 如仅拟合与前景信号正交的成分作为宇宙学信号与系统误差混合成分的估计[67]. 高斯过程回归方法的缺点在于, 高斯过程完全由其平均值和协方差函数进行描述, 而协方差函数(或核函数)的选择, 以及相关先验参数的选择对最终结果都会有较大影响.

近年来, 机器学习和神经网络也被尝试用来提取宇宙学21 cm信号, 如第4.1和4.2节所介绍的两种利用了神经网络的方法可以用来提取宇宙再电离时期21 cm 信号的空间涨落信息. 神经网络也被应用于全天频谱实验中对21 cm信号的提取和参数推断[48,68,69]. 神经网络一旦完成训练, 可以不依赖于通过MCMC方法进行采样而能快速预测得到相关信号模型的参数, 但该方法的性能依赖于所构建的训练集的完备性与真实性, 且神经网络目前的黑箱性质使其物理可解释性相对较弱.

此外, 为考虑和缓解普遍存在的天线波束多色性对信号分离的影响, 除了在模型和贝叶斯分析中考虑其影响, 如第3.2和3.3节介绍的方法, 还有一些方法提出可以对这一效应进行修正, 如一种称为基于波束因子的多色性修正(Beam-Factor based Chromaticity Correction, BFCC)的方法[60,70], 其主要通过将数据除以基于仪器波束加权的天空模型, 以抑制因波束多色性引入的复杂频谱结构. 修正因子定义为

$$B_{\rm factor}(\nu,t)=\frac{\int T_{\text{sky-model}}(\theta,\phi,\nu_{\rm ref},t)D(\theta,\phi,\nu)\mathrm{d}\Omega}{\int T_{\text{sky-model}}(\theta,\phi,\nu_{\rm ref},t)D(\theta,\phi,\nu_{\rm ref})\mathrm{d}\Omega}, \tag{8}$$

其中$D(\theta,\phi,\nu)$是天线的方向响应, 天空模型可假设为

$$T_{\text{sky-model}}(\theta,\phi,\nu_{\rm ref},t)=[T_{\rm base}(\theta,\phi,t)-T_{\rm CMB}]\left(\frac{\nu_{\rm ref}}{\nu_{\rm base}}\right)^{-2.5},$$

$T_{\rm base}$是频率为$\nu_{\rm base}$的基准天图, 如可用408 MHz的Haslam天图. 随后, 将观测到的数据除以这一修正因子以期修正其中天线的多色性的影响, 修正后的数据为

$$T_{\rm corr}(\nu)=\int_{t_{\rm start}}^{t_{\rm end}}\frac{T_{\rm data}(\nu,t)-T_{\rm CMB}}{B_{\rm factor}(\nu,t)}\mathrm{d}t+T_{\rm CMB}. \tag{9}$$

根据天空模型$T_{\text{sky-model}}$的不同选择, 这一修正也对天空信号作出了不同的假设. 随后结合多项式拟合或贝叶

斯分析方法等处理修正后的数据, 也可以更有效地提取21 cm信号. 然而该修正方法也存在一些局限性, 如参考天空模型与真实天空的空间和频率结构上的差异, 天线波束的复杂性和不完全建模等都会使得该方法对天线的多色性效应修正不足.

还有其他一些方法也被提出能有效改进全天平均谱数据中的信号提取问题, 如根据不同谱指数将天空分区进行前景拟合[60], 同时使用多个不同观测时间或来自不同天线的数据进行拟合[61], 以及基于成图的方法对天空低阶多极子进行求解后拟合[71]等.

接下来深入介绍我们自主发展的几种前景扣除和信号提取方法.

3.2 可变零阶多项式拟合方法

可变零阶多项式拟合VZOP (Vari-Zeroth-Order Polynomial)算法是一种改进的全天总功率谱拟合方法, 旨在解决传统多项式拟合因天线多色性导致前景扣除不准确的问题. 其核心创新点在于将天线波束方向图信息整合到拟合模型中. VZOP将天线波束方向图信息($\bar{B}(\nu,\theta)$)嵌入到一个伪多项式模型中. 这个模型的独特之处在于其零阶项不再是常数, 而是随频率变化的. 算法将天顶角范围$[0,\Theta_m]$ (Θ_m是月球遮挡的最大天顶角)离散化为$N_{\rm bin}$个仰角区间(bin). 在每个频率点ν_i, 观测到的平均天线温度$\bar{T}_A(\nu_i)$近似表示为

$$\bar{T}_A(\nu_i) \approx \sum_j \mathcal{S}(\theta_j)\bar{T}_b(\nu_i,\theta_j)\bar{B}(\nu_i,\theta_j)\cos\theta_j,$$

其中, $\mathcal{S}(\theta_j)$是月球遮挡函数(0被遮挡, 1可见), $\bar{T}_b(\nu_i,\theta_j)$是时间平均的平均天空温度模型, $\bar{B}(\nu_i,\theta_j)$是时间平均的平均波束模型(已按方位角平均), $\cos\theta_j$是几何因子. 最终, 天线温度$\boldsymbol{T}_A$被拟合为以下形式:

$$\boldsymbol{T}_A \approx \boldsymbol{S}(\boldsymbol{a})\boldsymbol{B}\hat{\boldsymbol{T}}_{\rm gal} + \hat{\boldsymbol{T}}_{\rm eor}, \tag{10}$$

其中, $\boldsymbol{B}$是平均波束矩阵, 行对应频率通道, 列对应仰角区间($B_{i,j} \equiv \bar{B}(\nu_i,\theta_j)\cos\theta_j$). $\hat{\boldsymbol{T}}_{\rm gal}$是待拟合的前景(银河系)温度向量(每个仰角bin在参考频率ν_r的值). $\boldsymbol{S}(\boldsymbol{a})$是对角矩阵, 包含非零阶多项式项($S(\nu_i;\nu_r,\boldsymbol{a}) \equiv \exp\left[\sum_{n=1}^{N} a_n \log^n(\frac{\nu_i}{\nu_r})\right]$, $\boldsymbol{a}$是多项式系数), 用于描述前景频谱的平滑部分. $\hat{\boldsymbol{T}}_{\rm eor}$是待拟合的21 cm信号向量.

算法通过最大化截断似然函数(Truncated Likelihood) 来求解前景参数($\boldsymbol{a},\hat{\boldsymbol{T}}_{\rm gal}$)和信号参数($\boldsymbol{p}_{\rm eor}$, 对应于$\hat{\boldsymbol{T}}_{\rm eor}$):

$$\begin{aligned}&\log p(\boldsymbol{a},\hat{\boldsymbol{T}}_{\rm gal},\boldsymbol{p}_{\rm eor}|\boldsymbol{T}_A)\\ &\propto -\frac{1}{2}\left[\left(\boldsymbol{T}_A - \boldsymbol{S}(\boldsymbol{a})\boldsymbol{B}\hat{\boldsymbol{T}}_{\rm gal} - \hat{\boldsymbol{T}}_{\rm eor}\right)^{\rm T}\right.\\ &\quad\left.\cdot\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\left(\boldsymbol{T}_A - \boldsymbol{S}(\boldsymbol{a})\boldsymbol{B}\hat{\boldsymbol{T}}_{\rm gal} - \hat{\boldsymbol{T}}_{\rm eor}\right)\right],\end{aligned} \tag{11}$$

其中$\boldsymbol{\Sigma}$是噪声协方差矩阵. 通过显式地将随频率变化的波束模型$\boldsymbol{B}$整合到拟合过程中, VZOP能够有效地反演(Invert)因天线多色性引入的额外频谱结构, 从而更准确地将微弱的宇宙21 cm信号$\hat{\boldsymbol{T}}_{\rm eor}$从强得多的前景辐射$\boldsymbol{S}(\boldsymbol{a})\boldsymbol{B}\hat{\boldsymbol{T}}_{\rm gal}$中分离出来. 该算法适用于对称(如雪糕筒天线)和非对称天线(需卫星自旋以进行方位角平均). 通常使用5阶多项式($N = 5$)和10个仰角区间($N_{\rm bin} = 10$). 图4展示了考虑月球反射、5阶多项式和10个仰角区间时VZOP算法拟合21 cm信号的情况, 可以看到VZOP算法可以有效提取信号.

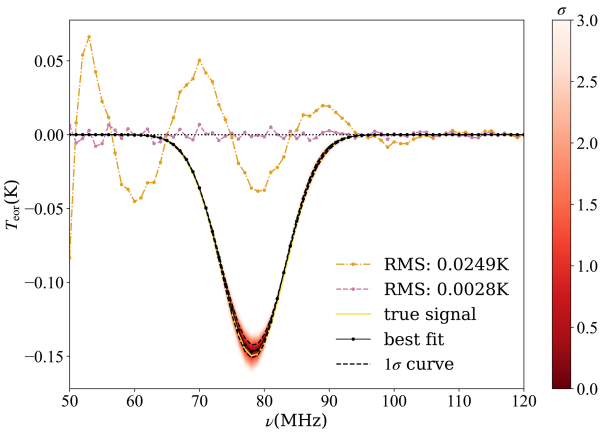


图 4 如图所示是考虑月球反射, 5阶多项式和10个仰角区间时VZOP算法拟合21 cm信号的情况. 黄实线为输入信号; 黑实线为最佳拟合信号; 橙点划线为扣除前景的残差; 紫红虚线为扣除前景并考虑信号拟合后的残差; 渐变色带表征不同置信度误差范围(见右侧色标); 黑虚线标示1σ误差边界. 可见该算法可以有效提取21 cm信号

Figure 4 The figure shows the performance of the VZOP algorithm in fitting the 21 cm signal, considering lunar reflection, with a 5th-order polynomial and 10 elevation bins. The solid yellow line represents the input signal; the solid black line represents the best-fit signal; the orange dash-dotted line represents the residual after foreground subtraction; the purple dashed line represents the residual after foreground subtraction and signal fitting; the gradient color band indicates the error ranges at different confidence levels (see color bar on the right); the black dashed line marks the 1σ error boundary. It can be seen that the algorithm can effectively extract the 21 cm signal.

3.3 基于误差关联性的抗多色性正向建模方法

在21 cm全天频谱信号的提取过程中, 天线多色性是不可避免的影响因素[47,60,72–74]. 天线多色性(或天线色差)是指天线的波束响应在不同频率下并不相同. 这种因素的存在使得前景经过天线响应后不再平滑,产生的额外结构很可能在目标频率范围内制造出假信号, 进而使得传统的多项式提取方法失效. 目前缓解多色性影响的方法主要包括Beam-Factor based Chromaticity Correction (BFCC)、分天区拟合法、奇异值分解法[7,39,60,73,74]等. 为适应鸿蒙计划月球轨道全天频谱实验的特殊性, 我们介绍一种新的考虑模型误差关联性的分天区拟合方法[75]. 这种方法克服了传统拟合提取方法[72]在测量数据来自方向跨度较大的不同天区时出现的困难, 对于月球轨道实验天线方向图随卫星运动快速变化的情况仍然适用.

分天区拟合法本质上是根据天空中谱指数的分布划分若干个天区进行正向建模, 利用有限参数实现前景重构, 有效建立了经天线色差污染的前景模型, 最终实现全天频谱中前景扣除和信号提取. 该方法将天空划分为N_r个服从幂律分布的区域, 在模型中综合考虑了天线方向图以及可能存在的色差. 模拟的频谱测量数据可以表示为

$$T_{\rm mock}(t,\nu)=\frac{1}{\int B(t,\nu,\hat{\boldsymbol{n}})S(t,\hat{\boldsymbol{n}})\mathrm{d}\Omega}\Big\{\int B(t,\nu,\hat{\boldsymbol{n}})S(t,\hat{\boldsymbol{n}})\times[T_{\rm sky}(\nu,\hat{\boldsymbol{n}})+T_{\rm 21cm}(\nu)]\mathrm{d}\Omega+T_{\rm th}(t,\nu)\Big\},$$

其中, $B(t,\nu,\hat{\boldsymbol{k}})$是天线响应, $S(t,\hat{\boldsymbol{k}})$ 是月球的遮挡函数, $T_{\rm sky}(\nu,\hat{\boldsymbol{n}})$是仿真输入的高分辨率天空亮温度, 包含前景天空和宇宙微波背景辐射(CMB), $T_{\rm th}(t,\nu)$为系统热噪声. $T_{\rm 21cm}(\nu)$是21 cm信号, 这里假设信号为高斯型, 由三个高斯参数确定,

$$T_{\rm 21cm}(\nu)=-A\mathrm{e}^{-\frac{(\nu-\nu_0)^2}{2\sigma^2}}. \tag{12}$$

通过正向建模得到的模型频谱数据可以表示为

$$T_{\rm model}(t,\nu)=\sum_i^{N_r}K_{N_i}(t,\nu)\left(\frac{\nu}{408}\right)^{-\beta_i}+T_{\rm CMB}+T_{\rm 21cm}(\nu), \tag{13}$$

其中,

$$K_{N_i}(t,\nu)=\frac{1}{\int B(t,\nu,\hat{\boldsymbol{k}})S(t,\hat{\boldsymbol{k}})\mathrm{d}\Omega}\int B(t,\nu,\hat{\boldsymbol{k}})S(t,\hat{\boldsymbol{k}})M_i(\hat{\boldsymbol{k}})\times[T_{408}(\hat{\boldsymbol{k}})-T_{\rm CMB}]\mathrm{d}\Omega, \tag{14}$$

其中, $M_i(\hat{\boldsymbol{k}})$是一个遮掩函数, 对于在第$i$个区域的像素而言其值为1, 对于其他像素而言其值为0, β_i是该区域的模型常数谱指数. $T_{408}(\hat{\boldsymbol{k}})$是408 MHz下的亮温度天图, $T_{\rm CMB}$是宇宙微波背景辐射温度.

由于每块天区内的谱指数并不均匀, 而模型中只用了一个等效谱指数来代表天区内谱指数的情况, 因此该模型不可避免地存在系统误差. 在鸿蒙项目背景下, 卫星的轨道周期约在2.3 h左右, 因此在不同观测点的天线响应对于同一块天区的权重也会发生很大变化. 这两方面的影响相互耦合, 使得不同观测点和频点之间的残差的关联性不可忽略, 表现在残差协方差的非对角项不为0, 这与地基模拟中的残差独立性假设有很大不同. 因此只有求解出残差完整的协方差矩阵才能实现信号的无偏提取. 在拟合过程中, 该方法对模型参数进行了贝叶斯推断, 似然函数表示为

$$\ln\mathcal{L}=-\frac{y^{\rm T}(C_{\rm model}+C_{\rm th})^{-1}y}{2}, \tag{15}$$

其中,

$$y=(T_{\rm model}-T_{\rm mock})/\sigma_{\rm th}^{\rm eff}, \tag{16}$$

$$\sigma_{\rm th}^{\rm eff}(t_i,\nu_j)=\frac{\sigma_{\rm th}(t_i,\nu_j)}{\int B(t,\nu,\hat{\boldsymbol{k}})S(t,\Omega)\mathrm{d}\hat{\boldsymbol{k}}}, \tag{17}$$

其中, $\sigma_{\rm th}(t_i,\nu_j)$是系统的热噪声标准差, $\sigma_{\rm th}^{\rm eff}$是考虑天线响应及月球遮挡归一化后的等效热噪声标准差, 详情可参见文献[47]; $C_{\rm model}$和$C_{\rm th}$分别是系统误差与热噪声的协方差矩阵, 二者共同构成了完整的残差的协方差矩阵. 应当注意, 由于残差已经过热噪声归一化(式(16)), 热噪声矩阵$C_{\rm th}$退化为单位阵$\boldsymbol{I}$.

该方法基于模拟求解出了误差的关联性(即协方差矩阵). 求解过程中, 考虑了谱指数的空间分布和天空本身亮温度之间的相关性, 利用这种相关性对谱指数天图进行了1000次随机实现. 而后通过最小二乘法得到前景参数的点估计, 最终计算出协方差矩阵. 详细的过程可参见文献[75]. 为了检验模型的有效性, 对误差关联模型进行了多方面的测试, 包括更改分天区数目、更换不同多色性的天线以及使用不同大小的输入信号. 相关的结果在图5中展示: 图中第一行是使用传统拟合方法[72]的提取结果, 第二、三行是使用误差关联性模型的提取结

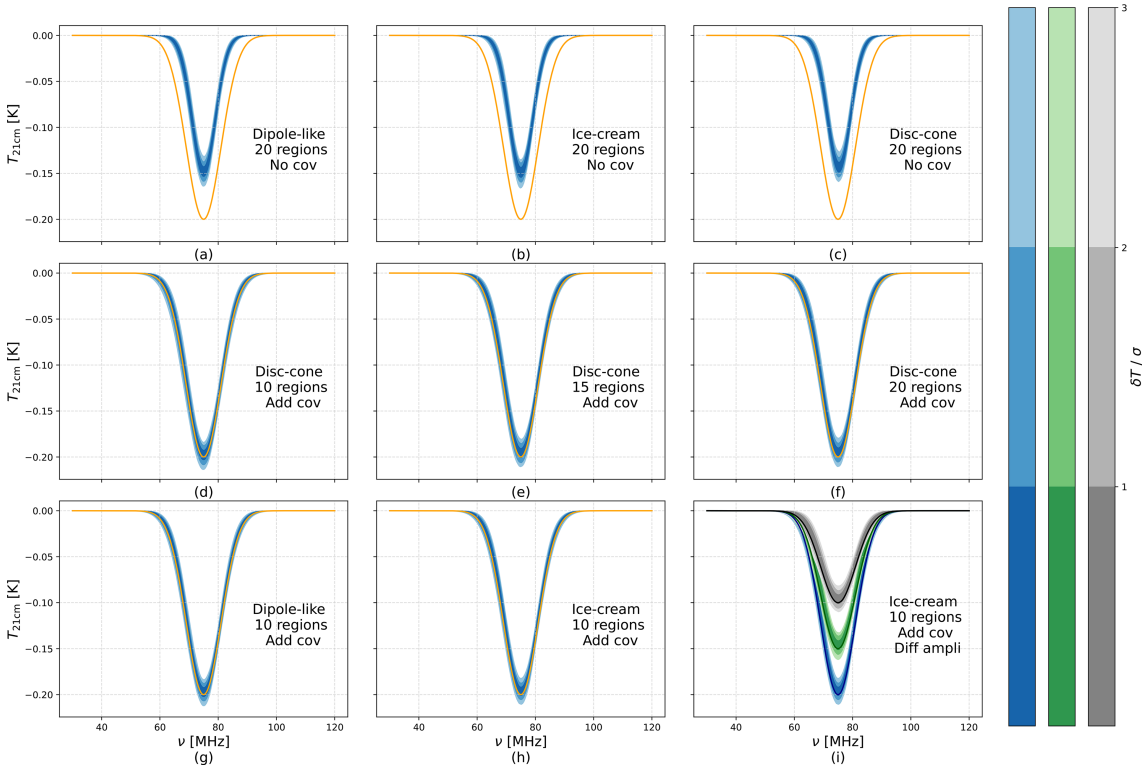


图 5 不同情况下传统正向建模和抗多色性正向建模的信号提取结果. 上排图中, 测试了传统模型在划分20个天区下, 对不同种类天线的提取效果. 从(a)到(c), 天线的多色性逐步增加. 可以看到传统模型能够得到稳定的信号提取结果, 说明其对天线多色性问题具有较好的处理能力, 但结果均有偏差. 中间一排图中, 测试了误差关联性模型对前景参数数量的依赖程度, 分别使用了10个(d)、15个(e)和20个(f)天区模型进行了信号提取. 而后测试了新模型在相同天区数目情况下, 对不同种类天线的鲁棒性(d, g, h). 最后测试了新模型在弱信号的情况下的提取能力(i). 图中的蓝色、绿色和灰色区域, 分别代表幅度为0.2, 0.15 和0.1 K的恢复信号; 图(a)–(h)中的橙色线代表输入的0.2 K信号, 图(i)中深蓝色、深绿色和黑色的线分别代表输入的0.2, 0.15和0.1 K信号. 基本在所有的情况下, 经过误差关联性建模恢复的信号, 其参数的1σ范围都能够涵盖真实输入信号, 这意味着该方法可以在不同情况下可靠地处理天线多色性问题

Figure 5 Signal extraction results of traditional forward modeling and chromaticity-robust forward modeling under different scenarios. The top row shows the extraction performance of the traditional model for different antenna types when dividing the sky into 20 regions. From (a) to (c), the chromaticity of the antennas gradually increases. It can be seen that the traditional model can achieve stable signal extraction results, indicating its capability to handle antenna chromaticity to some extent, but the results are all biased. The middle row tests the dependence of the error correlation model on the number of foreground parameters, using 10 (d), 15 (e), and 20 (f) sky regions for signal extraction. Subsequently, the robustness of the new model to different antenna types is tested with the same number of sky regions (d, g, h). Finally, the extraction capability of the new model for weak signals is tested (i). The blue, green, and gray shaded regions in the figures represent the recovered signals with amplitudes of 0.2, 0.15, and 0.1 K, respectively; the orange lines in panels (a)–(h) represent the input signal of 0.2 K, and the dark blue, dark green, and black lines in panel (i) represent the input signals of 0.2, 0.15, and 0.1 K, respectively. In virtually all cases, the 1σ range of the parameters of the signal recovered after error correlation modeling encompasses the true input signal, indicating that this method can reliably address the antenna chromaticity problem under various circumstances.

果. 可以看到, 在21 cm信号提取可靠性方面, 该模型可以使用有限的参数实现信号的无偏提取; 在模型复杂度方面, 该模型能够利用较少的前景参数成功还原信号, 极大降低了计算成本; 在天线依赖性方面, 该模型成功在经过类偶极子天线、冰激凌天线和盘椎天线(色差依次增加)响应后的频谱中成功提取信号, 证明了模型对天线色差的稳定性; 在提取微弱信号方面, 该模型实现了冰激凌天线模拟下, 0.1和0.15 K弱信号的提取, 为未来的信号提取任务提供了强有力的保证. 总体来说, 这种抗天线多色性的21 cm信号提取方法将大幅降低天线的多色性设计制造要求, 为未来的地基和空基实验中信号的提取方法提供了一条新的思路.

4 21 cm功率谱前景扣除算法

在介绍了全天平均谱前景扣除算法之后, 我们将介绍自主发展的对于21 cm成像和功率谱探测的前景扣除算法. 这些算法构成了全天平均谱前景扣除和信号提取算法的重要参考.

4.1 深度学习方法

在21 cm信号提取中, 波束效应引起的空间卷积会显著扭曲前景在空间上的特征, 从而加剧前景污染, 增加分离难度[76–79]. 为应对这一问题, 研究者提出了PI-AstroDeconv方法[80,81], 这一方法并非直接依赖深度网络盲目学习, 而是首先根据观测成像的物理规律构建了一个明确的成像模型

$$I_D(x,y) = P_D(x,y) \otimes I'(x,y), \tag{18}$$

即脏图$I_D(x,y)$等于干净图$I'(x,y)$与望远镜波束函数$P_D(x,y)$的卷积, 从而显式建模波束效应对观测图像的影响, 结构图如图6所示. 基于这一模型, PI-

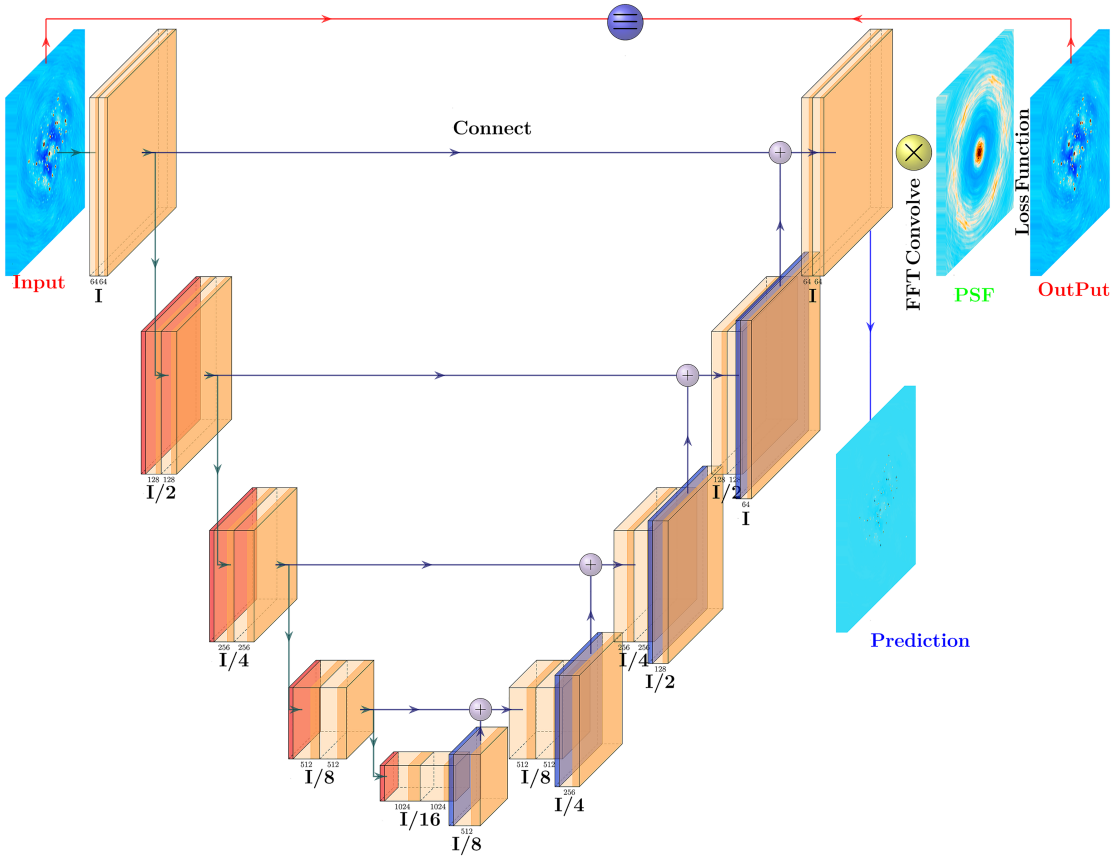


图 6 PI-AstroDeconv架构. 网络左半部分为下采样路径, 右半部分为上采样路径. 每个方块底部标注的是通道数. 图像上方的箭头表示网络各层之间的连接关系. 每一层下方的数字表示该层中卷积核的数量, 字母则表示图像尺寸的变化, 其中“I”表示输入图像的尺寸. UNet的输出(图中Prediction)与该波束进行卷积运算后, 再与标签(真实值)比较以计算损失函数. 网络的输入和真实标签均来自望远镜观测数据

Figure 6 PI-AstroDeconv architecture. The left half of the network represents the downsampling path, and the right half represents the upsampling path. The number at the bottom of each block indicates the number of channels. The arrows above the image illustrate the connections between different layers of the network. The numbers below each layer denote the number of convolution kernels in that layer, while the letters indicate the change in image dimensions, where “I” represents the size of the input image. The output of the UNet (denoted as “Prediction” in the figure) is convolved with the beam and then compared with the label (ground truth) to compute the loss function. Both the input to the network and the ground truth labels are derived from telescope observational data.

AstroDeconv 将波束去卷积问题转化为一个图像间的映射学习问题: 给定一张脏图和对应的PSF, 直接输出一张估计的干净图, 再用同一张PSF与估计图作卷积, 得到一张“脏图”. 整个训练过程只最小化模拟脏图与真实脏图之间的Log-Cosh距离, 因此完全不需要任何干净图像作标签, 实现无监督. 需要指出的是, PI-AstroDeconv直接作用于图像域数据, 因此其输入为经过干涉阵成像后的“脏图”和对应的PSF, 但不依赖传统的去卷积的操作. 这一设计显著简化了前处理流程, 几乎不引入额外的计算开销.

为了兼顾射电图像的大尺寸和高分辨率, 网络在最后一层用FFT在频域完成卷积, 将复杂度从$O(n^4)$到$O(n^2 \times \log(n))$, 显存占用和训练时间都大幅减少. 卷积核固定为输入的PSF, 不随梯度更新, 把望远镜的波束响应作为硬约束写进损失, 从而保证物理一致性. 在去卷积后应用常用的前景减除算法(如PCA), 相比传统基于CLEAN的处理流程, 可显著提升前景去除效果和信号保真度.

PI-AstroDeconv有别于传统反卷积方法, 它不直接求解图像的反卷积结果, 而是通过正向建模避免了传统方法中对卷积算子求逆所引发的边界不确定性问题, 尤其在图像边缘, 有效抑制了由边界效应产生的伪影和重建不稳定性. 特别是在鸿蒙的大天区观测中, 波束效应对全天前景减除影响显著[77], 而PI-AstroDeconv借助物理先验建模, 有效降低波束引起的空间卷积失真, 从而显著提升前景扣除的准确性和稳健性.

4.2 频段差分方法

21 cm信号的天文观测面临的核心挑战之一是银河系同步辐射等强前景噪声对信号的淹没. 传统PCA等盲源分离方法虽可有效去除平滑前景, 但容易过度扣除目标信号, 导致宇宙学信息损失. 基于以上问题, 我们介绍一种基于深度神经网络的新方法——频段差分(Frequency-Difference, FD), 并将其与PCA方法效果进行对比.

频段差分是一种模型无关的技术, 利用了前景信号相较于宇宙学21 cm信号在频谱上的平滑性. 通过在每条视线方向上对相邻频道的数据作差分, 可以有效抑制在频率上变化平缓的前景成分, 而对快速波动的21 cm信号则能够较好地保留.

在本测试中, 差分方法与PCA方法均应用于同一组仿真天空数据, 每个数据立方体的尺寸为64^3, 共192个独立数据块. 每个立方体在频率轴上包含连续的亮温分布, 可用于分析前景去除算法在三维频率-空间域中的表现.

差分数据立方体通过对频率轴作有限差分获得, 计算公式为

$$\delta T(\nu_i) = T(\nu_{i+1}) - T(\nu_i), \tag{19}$$

其中, $T(\nu_i)$表示频率ν_i下的亮温. 该操作无需任何显式建模或特征分解, 即可显著降低残差图中的前景幅度.

PCA方法利用前景信号在频率空间的平滑性, 将其与快速波动的宇宙学信号区分开来. 具体地, 每个64^3的仿真数据块首先在频率轴上重塑为一组一维谱; 随后, 在每个数据块内, 对所有像素的频率谱计算频率-频率协方差矩阵, 以识别主要的频率模. 对应最大特征值的主成分被视为主导的前景结构, 并从原始数据中扣除, 得到去前景的残差立方体. 本测试从每条频率谱中扣除固定数量的主成分(通常为2–3个), 以在抑制大部分前景的同时尽可能保留21 cm信号的有效信息.

本测试采用UNet网络结构, 对包含前景污染的强度图进行21 cm宇宙学信号的重建. 图7展示了UNet网络结构的可视化图. 网络的输入和输出均为尺寸为64^3的三维数据立方体, 分别对应天空局部区域的两个空间维度与一个频率轴. 接下来将FD预处理结果与目标信号作为UNet的输入, 通过端到端监督训练优化参数. 模型损失函数采用对数双曲余弦形式(Logcosh):

$$\mathcal{L}(y, \hat{y}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \log\left[\cosh(\hat{y}_i - y_i)\right], \tag{20}$$

其中, y表示真实值, $\hat{y}$表示网络重建输出, N为样本总数.

图8展示了目标HI场以及分别通过FD+UNet, PCA+UNet和PCA-only方法重建得到的二维切片结果, 每个面板上方为方法标签. 两种基于UNet的方法重建结果在视觉上与真实场高度一致, 而PCA-only由于强行去除主成分, 导致温度分布被明显抑制. 因此, 在没有仪器卷积的叠加前景场景下, FD+UNet和PCA+UNet均能实现对21 cm信号的高保真重建, 显著优于PCA-only基线方法. UNet能够通过

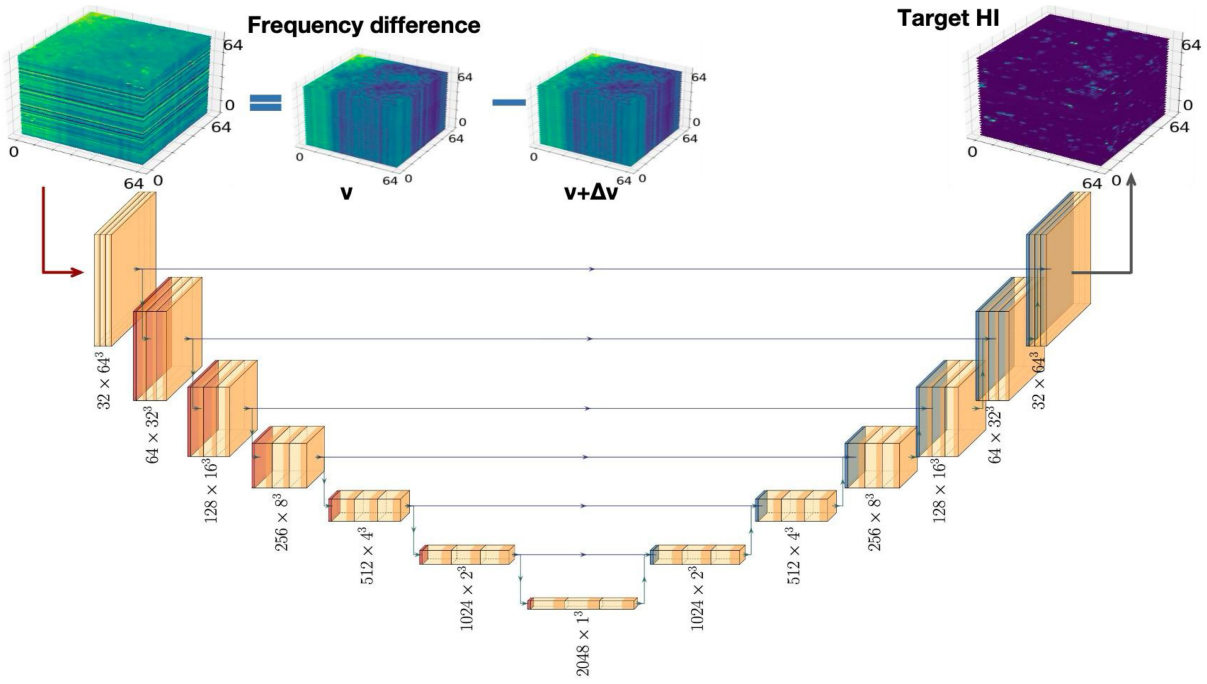


图 7 FD+PCA+UNet网络结构可视化. 网络的输入与输出均为尺寸为64^3的三维数据立方体. 输入为FD 预处理数据与目标信号的组合, 即频段差分(记作$\nu-(\nu+\Delta\nu)$)与HI亮温图, 输出为目标HI亮温图. 该架构共包含13 层, 其中包括6个编码器层、6个解码器层和1个瓶颈层. 每层(除输出层外)均包含3个卷积操作, 辅以批归一化和激活函数. 深红色与蓝色方框分别标示输入和输出, 同时标注通道数与空间尺寸. 下箭头、右箭头与上箭头分别表示最大池化、跳跃连接和转置卷积

Figure 7 Visualization of the FD+PCA+UNet network architecture. Both the input and output of the network are three-dimensional data cubes of size 64^3. The input is a combination of the FD-preprocessed data and the target signal, namely the frequency-difference (denoted as $\nu-(\nu+\Delta\nu)$) and the HI brightness temperature map, while the output is the target HI brightness temperature map. The architecture consists of a total of 13 layers, including 6 encoder layers, 6 decoder layers, and 1 bottleneck layer. Each layer (except the output layer) comprises 3 convolution operations, accompanied by batch normalization and activation functions. The dark red and blue boxes indicate the input and output, respectively, with the number of channels and spatial dimensions annotated. The down arrow, right arrow, and up arrow represent max pooling, skip connection, and transposed convolution, respectively.

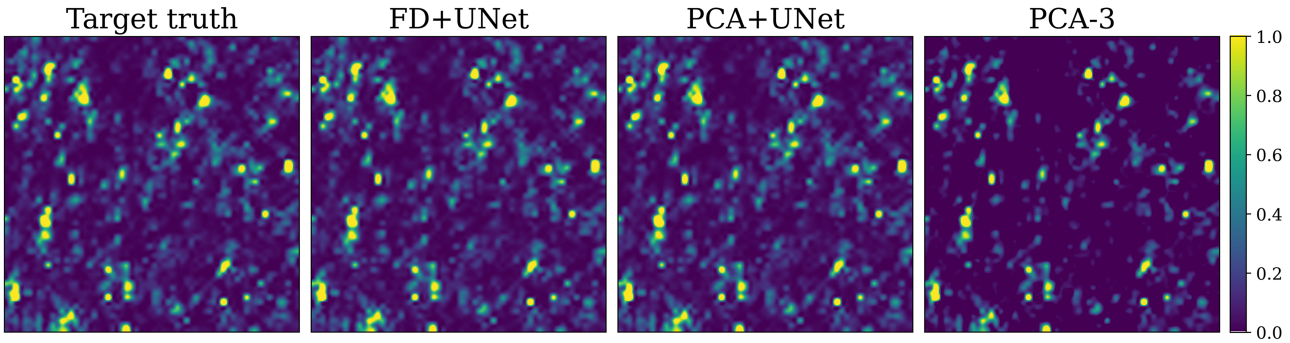


图 8 在无波束效应条件下, 1110 MHz频率下的HI亮温图像重建结果对比. 自左至右依次为真实HI信号图(Target truth)、FD+UNet重建结果、PCA+UNet 重建结果, 以及PCA-only (PCA-3)重建结果. PCA-only方法能够有效去除前景, 但同时严重抑制了大尺度宇宙学结构; 而FD+UNet和PCA+UNet方法则能够更好地同时保留大尺度与小尺度特征

Figure 8 Comparison of HI brightness temperature image reconstruction results at 1110 MHz under the condition of no beam effects. From left to right: the true HI signal map (Target truth), the FD+UNet reconstruction result, the PCA+UNet reconstruction result, and the PCA-only (PCA-3) reconstruction result. The PCA-only method can effectively remove foregrounds, but at the same time severely suppresses large-scale cosmological structures. In contrast, the FD+UNet and PCA+UNet methods are able to better preserve both large-scale and small-scale features simultaneously.

学习训练数据中的空间与频率特征, 恢复部分预处理过程中损失的信号成分.

频段差分方法在21 cm成像与功率谱分析中已被证明能有效抑制随频率平滑变化的前景成分, 同时保留相对快速变化的结构信息. 然而, 当应用于全天总功率谱测量时, 其效果需要重新评估. 由于差分操作在数学上相当于一种强调频率梯度的处理, 它会削弱缓慢演化的谱形分量, 从而对宇宙黎明和再电离时期的宽吸收谷或平滑上升曲线造成一定程度的压制. 这表明, 频段差分方法在全天平均谱中可能导致宇宙学信号的幅度损失或形态失真. 未来的研究可在模型拟合或贝叶斯分析框架中, 将差分处理作为一种辅助策略, 以评估其在前景建模与系统效应诊断中的潜在应用价值, 但仍需通过专门的模拟与观测数据加以验证.

4.3 重卷积方法

为应对强烈的前景污染及仪器效应对21 cm信号提取的挑战, 研究者提出了一种前景去除方法——重卷积(Reconvolution) 算法 [82], 其核心包含三个步骤.

(1) 重卷积预处理

该步骤通过对脏图(Dirty Map)沿频率方向进行重卷积, 抑制合成波束(PSF)副瓣效应, 缓解干涉仪观测中的模式混叠(Mode-Mixing)问题. 理想情况下, 前景信号沿频率应非常平滑, 易与振荡的21 cm信号区分. 然而, 仪器不完整的uv覆盖和长基线会在脏图中引入复杂频率结构, 使传统方法(如PCA)失效. 常规去卷积(如CLEAN)无法保证频率平滑, 反而引入伪影, 破坏21 cm信号. 重卷积处理通过在每个频率通道施加适当的平滑卷积核$K(x,y)$, 在抑制高频干扰的同时保留目标功率谱尺度范围内的有效傅里叶模. 测试表明, 合理选择低通滤波器可以在最大程度上抑制模式混叠, 同时保留21 cm信号的主要成分. 经过重卷积处理后, 图像在频率方向上恢复高度平滑性, 尽管空间上的小尺度结构被模糊, 但频率平滑性对前景去除至关重要.

(2) 主成分分析(PCA)去除前景

频率-频率协方差矩阵的理想特征值应呈指数下降, 前几阶主成分即可捕获大部分前景. 然而脏图的特征值下降缓慢, 即使移除大量主成分也难以恢复21 cm信号. 经过重卷积预处理后, 特征值分布接近无仪器效应的理想情况, 仅需丢弃前约20个主成分即可有效抑制前景污染. 随后, 通过对傅里叶模式在$(k_\perp, k_\parallel)$壳层内平均, 得到二维柱状功率谱$\tilde{P}(k_\perp, k_\parallel)$. 图9直观展示了逐步去除前景的全过程. 仿真结果显示: 前景强度比21 cm信号高出4–5个数量级, 经过重卷积处理后图像沿频率方向恢复平滑性, 依次剔除$N_c = 3, 10, 20$主成分后, 可在万分之一精度重建21 cm信号, 显著抑制强前景干扰, 验证方法在极端前景条件下的稳健性与准确度.

(3) 功率谱校正

估算功率谱的振幅需校正四种效应: 主波束响应、PSF影响、重卷积处理带来的信号抑制, 以及PCA所引起的21 cm信号损失. 该方法采用“转移函数”$T(k_\perp, k_\parallel) = \langle P/\tilde{P} \rangle$在功率谱层面进行统一修正, 最终21 cm功率谱通过$P = T \cdot \tilde{P}$计算得出, 误差则为$\Delta P = \Delta T \cdot \tilde{P}$, 其中$\Delta T$来自模拟. 转移函数主要取决于输出与输入之比, 而不敏感于输入功率谱的形状. 通过仿真模拟, 可以定出T及其误差, 从而完成对21 cm

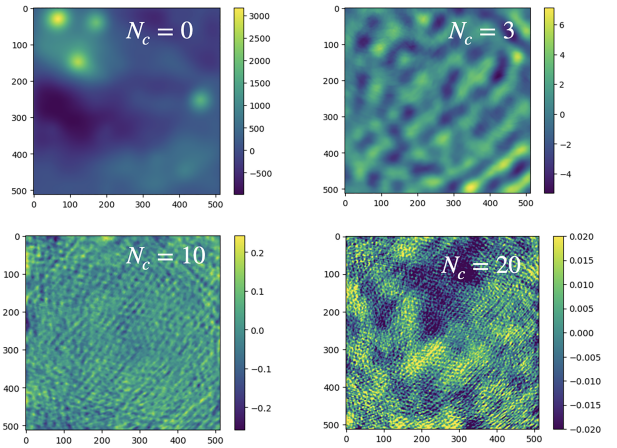


图 9 “重卷积算法”对模拟仿真的结果. 在模拟数据中, 前景污染强度比21 cm信号高出约4–5个数量级. 应用“重卷积算法”对脏图进行处理后, 逐步扣除主成分个数N_c, 当$N_c = 20$时, 即可在万分之一精度上成功重建21 cm信号, 显著抑制了强前景的干扰, 验证了该方法在极端前景条件下的有效性

Figure 9 Simulation results of the “Reconvolution algorithm”. In the simulated data, the foreground contamination intensity is approximately 4–5 orders of magnitude higher than the 21 cm signal. After applying the “Reconvolution algorithm” to process the dirty map and progressively subtracting the number of principal components N_c, the 21 cm signal can be successfully reconstructed at an accuracy of one part in ten thousand when $N_c = 20$, significantly suppressing the strong foreground interference. This validates the effectiveness of the method under extreme foreground conditions.

功率谱修正和误差估计.

对于全天21 cm平均谱的提取, 也可以借鉴“重卷积+前景滤波+转移函数校正”的方法论. 由于前景在频率方向极为平滑, 重卷积处理可以看作对仪器引入的频率波动进行低通滤波, 从而增强前景平滑性, 使其在主成分或SVD分解中更易分离. 随后, 通过去除前几阶主成分, 可以有效抑制强前景, 同时保留21 cm平均信号的主要成分. 最终, 可通过注入模拟信号建立转移函数, 对仪器响应及滤波或前景去除引起的信号抑制进行校正, 从而获得幅度和形状均可靠的全天21 cm平均谱. 这一策略为全天谱的稳健提取提供了新的可行路径.

5 结论

鸿蒙计划(DSL)的高频子星经过特殊设计, 旨在实现高精度的21 cm全天总功率谱测量, 以揭示宇宙黎明(CD)和再电离时期(EoR)的演化历史. 根据标准宇宙学模型预测, 宇宙黎明时期的21 cm吸收信号幅度不超过0.2 K [5]. 基于当前对系统热噪声的模拟结果, 为达到足够的信噪比(将接收机热噪声降低至信号最大幅度的约1/10, 即20 mK以下, 如图10所示), 需要累计10天的有效积分观测时间.

为实现这一目标, 高频子星将在月球背面轨道运行, 并严格将观测时间控制在“双优时间” (Doubly Good Time)窗口内. 此窗口期内, 月球同时屏蔽了太阳辐射和地球射频干扰(RFI), 提供最理想的射电环境. 由于每个绕月轨道中“双优时间”仅占约10% (约800 s), 卫星需累计运行约103天(完成1080圈轨道)才能累积达到所需的10天有效积分时间.

成功提取微弱宇宙信号的关键在于严格的时间窗口控制和采用先进的前景扣除和信号提取算法. 必须确保观测严格限定在“双优时间”内进行, 并在地球即将进入视野前提前停止观测, 以绝对避免地球射频干扰(RFI), 特别是像FM广播(88–108 MHz)这类强宽带干扰的泄漏, 否则将严重损害信号提取的精度.

工程实现上, 项目选用对称的雪糕筒天线. 研究也表明, 即使天线有一定的非对称性, 卫星也无需额外增加自转功能, 这简化了卫星姿态控制系统设计. 观测

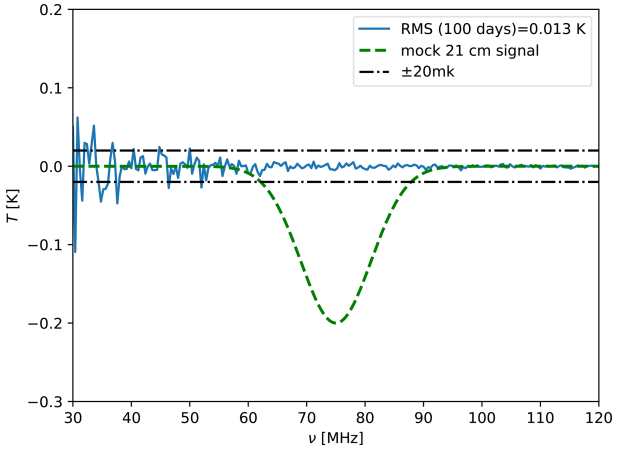


图 10 绕月100天后的热噪声水平. 蓝色线代表热噪声, 绿色虚线是模拟的高斯型21 cm信号, 其幅度代表当前宇宙学模型下信号的最大值. 可以看到, 在绕月100天后, 热噪声将不会对信号提取产生很大影响, 理论上能够实现宇宙黎明时期21 cm全天平均信号的提取

Figure 10 Thermal noise level after 100 d of lunar orbit. The blue line represents the thermal noise, and the green dashed line is the simulated Gaussian 21 cm signal, whose amplitude represents the maximum signal value under the current cosmological model. It can be seen that after 100 d in lunar orbit, the thermal noise will not significantly affect signal extraction, theoretically enabling the extraction of the global 21 cm signal from the Cosmic Dawn.

系统需具备精确的轨道预报和时间控制能力, 确保“双优时间”窗口的严格利用. 数据处理环节需包含有效的RFI监测与标记机制: 强线谱RFI可被识别剔除后通过数据插值填补, 弱线谱RFI则可在VZOP 拟合后通过分析残差曲线间接识别处理. 值得注意的是, 不同的频率分辨率(1, 0.5, 0.1 MHz)对前景扣除的性能影响不显著, 允许选择较宽的分辨率以简化数据处理, 特别是利于线谱RFI的处理. 鸿蒙计划设定的优于1 MHz的频率分辨率可以达到要求.

综上所述, 在月球背面宁静的电磁环境下, 通过严格控制观测于“双优时间”窗口(累计有效积分10天, 需约103天任务时长)并应用先进的算法, 鸿蒙项目有望可靠提取宇宙黎明时期的21 cm全天总功率信号. 然而, 实际工程中仍需解决天线与接收机间驻波反射导致的谱畸变问题, 并持续优化天线系统设计. 当前的月球远地面反射模型(借用近地面数据)亦需未来实测数据的完善.

参考文献

1 Pritchard J R, Loeb A. 21 cm cosmology in the 21st century. Rep Prog Phys, 2012, 75: 086901
2 Bayer-Santos E, Aguilar-Bonavides C, Rodrigues S P, et al. Proteomic analysis of *Trypanosoma cruzi* secretome: Characterization of two populations of extracellular vesicles and soluble proteins. J Proteome Res, 2013, 12: 883–897
3 Cohen A, Fialkov A, Barkana R. Charting the parameter space of the 21-cm power spectrum. Mon Not R Astron Soc, 2018, 478: 2193–2217
4 Reis I, Fialkov A, Barkana R. The subtlety of Ly α photons: Changing the expected range of the 21-cm signal. Mon Not R Astron Soc, 2021, 506: 5479–5493
5 Xu Y, Yue B, Chen X. Maximum absorption of the global 21 cm spectrum in the standard cosmological model. Astrophys J, 2021, 923: 98
6 Rogers A E E, Bowman J D. Absolute calibration of a wideband antenna and spectrometer for accurate sky noise temperature measurements. Radio Sci, 2012, 47: 1–9
7 Bowman J D, Rogers A E E, Monsalve R A, et al. An absorption profile centred at 78 megahertz in the sky-averaged spectrum. Nature, 2018, 555: 67–70
8 Murray S G, Bowman J D, Sims P H, et al. A Bayesian calibration framework for EDGES. Mon Not R Astron Soc, 2022, 517: 2264–2284
9 Rogers A E E, Barrett J P, Bowman J D, et al. Analytic approximations of scattering effects on beam chromaticity in 21-cm global experiments. Radio Sci, 2022, 57: e2022RS007558
10 Girish B S, Srivani K S, Subrahmanyan R, et al. SARAS CD/EoR radiometer: Design and performance of the digital correlation spectrometer. J Astron Instrum, 2020, 09: 2050006
11 Nambissan T J , Subrahmanyan R, Somashekar R, et al. SARAS 3 CD/EoR radiometer: Design and performance of the receiver. Exp Astron, 2021, 51: 193–234
12 de Lera Acedo E. Reach: Radio experiment for the analysis of cosmic hydrogen. In: Proceedings of the 2019 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). Granada: IEEE, 2019. 0626–0629
13 de Lera Acedo E, de Villiers D I L, Razavi-Ghods N, et al. The REACH radiometer for detecting the 21-cm hydrogen signal from redshift $z \approx$7.5–28. Nat Astron, 2022, 6: 984–998
14 Cumner J, de Lera Acedo E, de Villiers D I L, et al. Radio antenna design for sky-averaged 21 cm cosmology experiments: The REACH case. J Astron Instrum, 2022, 11: 2250001
15 Kirkham C J, Anstey D J, de Lera Acedo E. A Bayesian method to mitigate the effects of unmodelled time-varying systematics for 21-cm cosmology experiments. Mon Not R Astron Soc, 2024, 527: 8305–8315
16 Greenhili L, Werthimer D, Taylor G, et al. A broadband 512-element full correlation imaging array at VHF (LEDA). In: Proceedings of the 2012 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. Cape Town: IEEE, 2012. 1117–1120
17 Garsden H, Greenhill L, Bernardi G, et al. A 21-cm power spectrum at 48 MHz, using the Owens valley long wavelength array. Mon Not R Astron Soc, 2021, 506: 5802–5817
18 Spinelli M, Kyriakou G, Bernardi G, et al. Antenna beam characterization for the global 21-cm experiment LEDA and its impact on signal model parameter reconstruction. Mon Not R Astron Soc, 2022, 515: 1580–1597
19 Sokolowski M, Tremblay S E, Wayth R B, et al. BIGHORNS—Broadband instrument for global hydrogen reionisation signal. Publ Astron Soc Aust, 2015, 32: e004
20 Sokolowski M, Wayth R B, Tremblay S E, et al. The impact of the ionosphere on ground-based detection of the global epoch of reionization signal. Astrophys J, 2015, 813: 18
21 Voytek T C, Natarajan A, Jáuregui García J M, et al. Probing the dark ages at $z \sim 20$: The SCI-HI 21 cm all-sky spectrum experiment. Astrophys J, 2014, 782: L9
22 Philip L, Abdurashidova Z, Chiang H C, et al. Probing radio intensity at high-z from Marion: 2017 instrument. J Astron Instrum, 2019, 08: 1950004
23 Restrepo O A, Lucero F I, Chaparro G, et al. Optimization of antenna performance for global 21 cm observations and verification using scaled copies. J Astron Instrum, 2023, 12: 2350005
24 Monsalve R A, Bye C H, Sievers J L, et al. Simulating the detection of the global 21 cm signal with MIST for different models of the soil and beam directivity. Astrophys J, 2024, 961: 56
25 Monsalve R A, Altamirano C, Bidula V, et al. Mapper of the IGM spin temperature: Instrument overview. Mon Not R Astron Soc, 2024, 530: 4125–4147
26 Bull P, El-Makadema A, Garsden H, et al. RHINO: A large horn antenna for detecting the 21 cm global signal. arXiv: 2410.00076
27 Singh S, Nambissan T. J, Subrahmanyan R, et al. On the detection of a cosmic dawn signal in the radio background. Nat Astron, 2022, 6:

607–617
28 Vedantham H K, Koopmans L V E, de Bruyn A G, et al. Chromatic effects in the 21 cm global signal from the cosmic dawn. Mon Not R Astron Soc, 2014, 437: 1056–1069
29 Shen E, Anstey D, de Lera Acedo E, et al. Quantifying ionospheric effects on global 21-cm observations. Mon Not R Astron Soc, 2021, 503: 344–353
30 Wang Y, Wang X, Sun S, et al. Tackling the challenges in the 21 cm global spectrum experiment: The impact of ionosphere and beam distortion. Astrophys J, 2024, 967: 87
31 Bevins H T J, Handley W J, Fialkov A, et al. Maxsmooth: Rapid maximally smooth function fitting with applications in Global 21-cm cosmology. Mon Not R Astron Soc, 2021, 502: 4405–4425
32 Bevins H T J, de Lera Acedo E, Fialkov A, et al. A comprehensive Bayesian reanalysis of the SARAS2 data from the epoch of reionization. Mon Not R Astron Soc, 2022, 513: 4507–4526
33 Boonstra A J, Garrett M, Kruithof G, et al. Discovering the sky at the longest wavelengths (DSL). In: Proceedings of the 2016 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2016. 1–20
34 Chen X, Burns J, Koopmans L, et al. Discovering the sky at the longest wavelengths with small satellite constellations. arXiv: 1907.10853
35 Chen X, Yan J, Deng L, et al. Discovering the sky at the longest wavelengths with a lunar orbit array. Phil Trans R Soc A, 2021, 379: 20190566
36 Chen X, Yan J, Xu Y, et al. Discovering the sky at the longest wavelength mission—A pathfinder for exploring the cosmic dark ages. Chin J Space Sci, 2023, 43: 43
37 Silk J, Crawford I, Elvis M, et al. Astronomy from the Moon: the next decades (part 2). Phil Trans R Soc A, 2024, 382: 20230079
38 Koopmans L V E, Barkana R, Bentum M, et al. Peering into the dark (ages) with low-frequency space interferometers. Exp Astron, 2021, 51: 1641–1676
39 Tauscher K, Rapetti D, Burns J O. A new goodness-of-fit statistic and its application to 21-cm cosmology. J Cosmol Astropart Phys, 2018, 2018: 015
40 Burns J O. Transformative science from the lunar farside: Observations of the dark ages and exoplanetary systems at low radio frequencies. Phil Trans R Soc A, 2021, 379: 20190564
41 Burns J O, Bradley R, Tauscher K, et al. A space-based observational strategy for characterizing the first stars and galaxies using the redshifted 21 cm global spectrum. Astrophys J, 2017, 844: 33
42 Burns J O, Hallinan G, Lux J, et al. NASA probe study report: Farside array for radio science investigations of the dark ages and exoplanets (FARSIDE). arXiv: 1911.08649
43 Burns J, Hallinan G, Chang T C, et al. A lunar farside low radio frequency array for dark ages 21-cm cosmology. arXiv: 2103.08623
44 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. Mon Not R Astron Soc, 2016, 455: 3890–3900
45 Bernardi G, Zwart J T L, Price D, et al. Bayesian constraints on the global 21-cm signal from the Cosmic Dawn. Mon Not R Astron Soc, 2016, 461: 2847–2855
46 Gu J, Wang J. Direct parameter inference from global EoR signal with Bayesian statistics. Mon Not R Astron Soc, 2020, 492: 4080–4096
47 Shi Y, Deng F, Xu Y, et al. Lunar orbit measurement of the Cosmic Dawn's 21 cm global spectrum. Astrophys J, 2022, 929: 32
48 Tripathi A, Datta A, Choudhury M, et al. Extracting the global 21-cm signal from cosmic dawn and epoch of reionization in the presence of foreground and ionosphere. Mon Not R Astron Soc, 2024, 528: 1945–1964
49 Sims P H, Pober J C. Testing for calibration systematics in the EDGES low-band data using Bayesian model selection. Mon Not R Astron Soc, 2020, 492: 22–38
50 Anstey D, Cumner J, de Lera Acedo E, et al. Informing antenna design for sky-averaged 21-cm experiments using a simulated Bayesian data analysis pipeline. Mon Not R Astron Soc, 2022, 509: 4679–4693
51 Le Conte Z A, Elvis M, Gläser P A. Lunar far-side radio arrays: A preliminary site survey. RAS Tech Instrum, 2023, 2: 360–377
52 Smith D E, Zuber M T, Jackson G B, et al. The lunar orbiter laser altimeter investigation on the lunar reconnaissance orbiter mission. Space Sci Rev, 2010, 150: 209–241
53 Evans J V. Radar studies of planetary surfaces. Annu Rev Astron Astrophys, 1969, 7: 201–248
54 Liu T, Zhang J, Shi Y, et al. Forecast measurement of the 21 cm global spectrum from lunar orbit with the Vari-Zeroth-Order Polynomial (VZOP) method. Publ Astron Soc Aust, 2025, 42: e039
55 Alonso D, Bull P, Ferreira P G, et al. Blind foreground subtraction for intensity mapping experiments. Mon Not R Astron Soc, 2015, 447: 400–416

56 Spinelli M, Carucci I P, Cunnington S, et al. SKAO H I intensity mapping: Blind foreground subtraction challenge. Mon Not R Astron Soc, 2022, 509: 2048–2074

57 Hibbard J J, Rapetti D, Burns J O, et al. Fitting and comparing galactic foreground models for unbiased 21 cm cosmology. Astrophys J, 2023, 959: 103

58 Bevins H T J, Fialkov A, de Lera Acedo E, et al. Astrophysical constraints from the SARAS 3 non-detection of the cosmic dawn sky-averaged 21-cm signal. Nat Astron, 2022, 6: 1473–1483

59 Harker G J A, Pritchard J R, Burns J O, et al. An MCMC approach to extracting the global 21-cm signal during the cosmic dawn from sky-averaged radio observations. Mon Not R Astron Soc, 2012, 419: 1070–1084

60 Anstey D, de Lera Acedo E, Handley W. A general Bayesian framework for foreground modelling and chromaticity correction for global 21 cm experiments. Mon Not R Astron Soc, 2021, 506: 2041–2058

61 Anstey D, de Lera Acedo E, Handley W. Use of time dependent data in Bayesian global 21-cm foreground and signal modelling. Mon Not R Astron Soc, 2023, 520: 850–865

62 Pagano M, Sims P, Liu A, et al. A general Bayesian framework to account for foreground map errors in global 21-cm experiments. Mon Not R Astron Soc, 2024, 527: 5649–5667

63 Tauscher K, Rapetti D, Burns J O, et al. Global 21 cm signal extraction from foreground and instrumental effects. I. Pattern recognition framework for separation using training sets. Astrophys J, 2018, 853: 187

64 Hibbard J J, Tauscher K, Rapetti D, et al. Modeling the galactic foreground and beam chromaticity for global 21 cm cosmology. Astrophys J, 2020, 905: 113

65 Mertens F G, Ghosh A, Koopmans L V E. Statistical 21-cm signal separation via Gaussian process regression analysis. Mon Not R Astron Soc, 2018, 478: 3640–3652

66 Kern N S, Liu A. Gaussian process foreground subtraction and power spectrum estimation for 21 cm cosmology. Mon Not R Astron Soc, 2021, 501: 1463–1480

67 Heimersheim S, Rønneberg L, Linton H, et al. FlexKnot and Gaussian process for 21 cm global signal analysis and foreground separation. Mon Not R Astron Soc, 2024, 527: 11404–11421

68 Choudhury M, Datta A, Chakraborty A. Extracting the 21 cm global signal using artificial neural networks. Mon Not R Astron Soc, 2019, 491: 4031–4044

69 Mohapatra V, Johnny J, Natwariya P K, et al. In search of global 21-cm signal using artificial neural network in light of ARCADE 2. Eur Phys J C, 2025, 85: 533

70 Mozdzen T J, Bowman J D, Monsalve R A, et al. Improved measurement of the spectral index of the diffuse radio background between 90 and 190 MHz. Mon Not R Astron Soc, 2017, 464: 4995–5002

71 Ignatov Y D and Pritchard J R. Low multipole mapmaking for global 21-cm experiments. arXiv: 2506.21258

72 Anstey D, de Lera Acedo E, Handley W. Use of time dependent data in Bayesian global 21-cm foreground and signal modelling. Mon Not R Astron Soc, 2023, 520: 850–865

73 Sims P H, Bowman J D, Mahesh N, et al. A Bayesian approach to modelling spectrometer data chromaticity corrected using beam factors—I. Mathematical formalism. Mon Not R Astron Soc, 2023, 521: 3273–3297

74 Sims P H, Bowman J D, Murray S G, et al. A Bayesian approach to modelling spectrometer data chromaticity corrected using beam factors—II. Model priors and posterior odds. Mon Not R Astron Soc, 2025, 544: 2340–2364

75 Li H, Deng F, Zhou M, et al. Robust extraction of global 21 cm spectrum from experiments with a chromatic beam based on physics-motivated error modeling. Astrophys J, 2026, 997: 4

76 Hothi I, Chapman E, Pritchard J R, et al. Comparing foreground removal techniques for recovery of the LOFAR-EoR 21 cm power spectrum. Mon Not R Astron Soc, 2020, 500: 2264–2277

77 Ni S, Li Y, Gao L Y, et al. Eliminating primary beam effect in foreground subtraction of neutral hydrogen intensity mapping survey with deep learning. Astrophys J, 2022, 934: 83

78 Wang H, Masui K, Bandura K, et al. Demonstration of hybrid foreground removal on CHIME data. Phys Rev D, 2025, 111: 103531

79 Cox T A, Parsons A R, Dillon J S, et al. Spectral redundancy for calibrating interferometers and suppressing the foreground wedge in 21 cm cosmology. Mon Not R Astron Soc, 2024, 532: 3375–3394

80 Ni S, Qiu Y, Chen Y, et al. PI-AstroDeconv: A physics-informed unsupervised learning method for astronomical image deconvolution. arXiv: 2403.01692

81 Ni S, Qiu Y, Chen Y, et al. Application of physics-informed neural networks in removing telescope beam effects. Astrophys J, 2025, 990: 122

82 Bonaldi A, Hartley P, Braun R, et al. Square kilometre array science data challenge 3a: Foreground removal for an EoR experiment. Mon Not R Astron Soc, 2025, 543: 1092–1119

Foreground removal and 21 cm signal extraction from Cosmic Dawn

ZHANG Jiajun[1,2*], LI Haoran[2,6,7], YU Kaifeng[3], ZHANG Le[3*], NI Shulei[4*], SHI Feng[5*], QUAN Donghui[8,4], DENG Furen[2,6,7], ZHOU Meng[2,6], LIU Tianyang[1,7], WANG Zitong[5], MA Xiaofan[5], WANG Xin[3], XU Yidong[2,6] & CHEN Xuelei[2,6,7]

[1]*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*
[2]*State Key Laboratory of Radio Astronomy and Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*
[3]*School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China*
[4]*Research Center for Astronomical Computing, Zhejiang Laboratory, Hangzhou 311121, China*
[5]*School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710126, China*
[6]*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*
[7]*School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
[8]*Department of Physics, Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou 215123, China*
**Corresponding authors (ZHANG Jiajun, email: jjzhang@shao.ac.cn; ZHANG Le, email: zhangle7@mail.sysu.edu.cn; NI Shulei, email: nisl@zhejianglab.edu.cn; SHI Feng, email: fshi@xidian.edu.cn)*

Detecting the global 21 cm power spectrum from the Cosmic Dawn is a crucial window for unveiling the evolution of the early universe. However, it faces challenges such as Galactic foreground radiation being 4–5 orders of magnitude stronger than the target signal and complex instrumental systematics. The Hongmeng Project aims to overcome the limitations of ground-based observations—such as ionospheric interference and radio frequency contamination—by deploying a lunar-orbiting satellite platform (conducting high-frequency observations at 30–120 MHz), enabling full-sky coverage. In recent years, the research team has proposed a series of innovative methods to address foreground subtraction and signal extraction, specifically investigating beam convolution effects, lunar influence, antenna chromaticity, dipole detection, and related issues. In summary, the foreground subtraction and signal extraction methods can extract 21 cm signal from Cosmic Dawn in the simulation.

Cosmic Dawn, 21 cm, radio astronomy

PACS: 98.80.-k, 98.62.Py, 95.75.Pq, 98.58.-w, 95.85.Bh

doi: 10.1360/SSPMA-2026-0025