电磁隔离全局信号估计平台（EIGSEP）

Christian H. Bye,[1,2]★ David R. DeBoer,[2,3] Matt Dexter,[2] Aaron Ewall-Wice,[1,2] Adam Fahs,[4,5] Pranav Karthik,[1,2] Komal Kaur,[1,2] Bahram Khalichi,[1,2] Wei Liu,[1,2] Raul A. Monsalve,[5,6,7] Aaron R. Parsons,[1,2] Reid Parsons,[8]Richard R. Rodriguez,[2,9] Richard J. Saeed,[2] Charlie G.Tolley,[2] Dominic Vazquez,[2,9] 和 Dirk Wright[1,2]

[1]天文学系，加州大学伯克利分校，伯克利，*CA 94720*，美国[2]射电天文实验室，加州大学伯克利分校，伯克利，*CA 94720*，美国[3]天体物理学分系，牛津大学，牛津，*OX1-3RH*，英国[4]物理系，加州大学伯克利分校，伯克利，*CA 94720*，美国[5]空间科学实验室，加州大学伯克利分校，伯克利，*CA 94720*，美国[6]地球与空间探索学院，亚利桑那州立大学，坦佩，*AZ 85287*，美国[7]电气工程系，至圣康塞普西翁天主教大学，阿隆索·德·里贝拉*2850*号，康塞普西翁，智利[8]地球与地理科学系，菲奇堡州立大学，菲奇堡，*MA 01420*，美国[9]物理与天文学系，旧金山州立大学，旧金山，*CA 94132*，美国

arXiv:2602.02661v1 [astro-ph.IM] 2 Feb 2026

录用 XXX。收稿日期 YYY；原稿形式 ZZZ

摘要

电磁隔离全局信号估计平台（EIGSEP）是一种新型仪器，旨在测量来自宇宙黎明和再电离时期、红移至250 MHz以下频率的全局21厘米信号。为减少与地面散射相关的天线波束中的频谱结构，EIGSEP采用悬挂于峡谷中、距地面100米处的成形蝴蝶结天线。我们描述了EIGSEP当前的系统设计，包括旋转天线平台、用于表征蝴蝶结天线波束的发射天线，以及辅助地面天线。随后，我们讨论了EIGSEP的校准方案，该方案在接收机中采用传统的迪克开关，并包含波束测绘、波束调制和干涉互相关等新方法。该仪器已部署在犹他州Marjum Pass附近，用于测试和初步数据采集。我们讨论了台址特征，并给出了初步现场测量结果。

关键词：宇宙学：黑暗时代、再电离、第一代恒星——仪器——望远镜

1 引言

在宇宙演化的第一个十亿年里，宇宙从相对均匀的氢氦广袤空间，演变为我们今天观测到的复杂、富含化学元素的网络（Furlanetto et al. 2006）。这一转变由最初几代恒星、星系和黑洞推动，它们的辐射加热并电离星系际介质（IGM），同时在局部为恒星形成播下种子。对宇宙微波背景（CMB；普朗克合作组 et al. 2020；Reichardt et al. 2021）、类星体吸收光谱（Fan et al. 2006；Becker et al. 2015；Bosman et al. 2018, 2022；Eilers et al. 2018）、深场星系观测（McLeod et al. 2015；Castellano et al. 2022；Naidu et al. 2022；Finkelstein et al. 2023；Meyer et al. 2025；Whitler et al. 2025）以及 Lyα 发射体巡天（McQuinn et al. 2007；Ota et al. 2017；Tang et al. 2024；Umeda et al. 2025；Witstok et al. 2025）的测量，可以约束再电离结束阶段的不均匀特征。然而，在可预见的未来，光学和红外探测手段仍无法触及宇宙黎明（$50 \gtrsim z \gtrsim 12$）早期阶段——那时第一代恒星和X射线源刚刚出现（Mason et al. 2015；Liu et al. 2016b）。

尽管如此，仍可通过观测探测宇宙黎明氢的21厘米超精细结构谱线（Madau 等，1997；Shaver 等，1999；Tozzi 等，2000）。包括 HERA（De- Boer 等，2017；Berkhout 等，2024）、LOFAR（van Harleem 等，2013）、LWA（Eastwood 等，2019）、MWA（Tingay 等，2013；Wayth 等，2018）、NenuFAR（Munshi 等，2024）、PAPER（Parsons 等，2010）和 SKA-Low（Dewdney 等，2009）在内的干涉仪，旨在测量21厘米信号的空间各向异性，以探测星系际介质在密度、加热和电离方面的不均匀性。这些实验报告的21厘米功率谱上限已开始约束再电离模型（Ghara 等，2020，2025年；Mondal 等，2020；Greig 等，2021；Abdurashidova 等，2022；HERA 合作组等，2023）。

全球21厘米信号（即单极分量）中的信息，可补充空间21厘米涨落的测量（Liu 与 Parsons，2016）。在高红移时期，全球信号蕴含着关于首批发光源的信息（Mirocha 等，2017）。Ly α 第一代恒星发出的光子会使氢的自旋温度与气体动理学温度耦合，导致相对于宇宙微波背景出现吸收凹陷，发生在 $z \approx 25$。第一代恒星遗留下来的致密天体会发出X射线，加热气体，并可能使其在 $z \approx 9$转为辐射；随后，大范围恒星形成产生的紫外辐射会使星系际介质电离，并在 $z \approx 5$(Kulkarni 等，2019;Bosman 等，2022时有效消除该信号。其发生时间

★ 电子邮件：chbye@berkeley.edu

© 2026 作者

吸收特征的发生时间和深度取决于第一批星系的性质，包括其质量分布、恒星形成效率、X射线、Lyα和紫外线的产生率，以及电离辐射逃逸至星系际介质中的比例（Barkana 2016；Liu & Shaw 2020）。通过独立约束宇宙微波背景中汤姆孙散射的光学深度，全局21厘米信号还有助于改进对中微子质量总和以及为大尺度结构提供种子的原初涨落振幅的约束（Fialkov & Loeb 2016；Liu et al. 2016a）。

一些正在开展的、旨在从地面探测全球信号的实验包括 EDGES（Monsalve 等人，2017b; Bowman 等，2018; Cappallo 等（2025））、GINAN（McKay 等人，2025年）、LEDA（Price 等人，2018年）、MIST（Monsalve 等，2024a）、PRI^{Z}M（Philip 等人，2019年）、REACH（de Lera Acedo 等人，2022年）、RHINO（Bull 等人，2025年）和 SARAS（Jishnu Nambissan 等人，2021年; Singh 等（2022））。天基任务亦已提出或正在进行，包括 CosmoCube（Artuc 与 de Lera Acedo，2025年）、DSL/鸿蒙（Chen 等人，2021年）、LuSEE-Night（Bale 等人，2023年）和 PRATUSH（Sathyanarayana Rao 等人，2023年）。

EDGES实验报告探测到一个异常强的（~ 500毫开尔文）21厘米吸收槽，见Bowman 等(2018年)。如果这一测量结果源自宇宙学过程，则可能意味着重子、光子与暗物质之间存在新的相互作用（Barkana 2018；Muñoz 与 Loeb 2018；Pospelov 等 2018；Slatyer 与 Wu 2018；Sikivie 2019），也可能表明宇宙黎明早期存在超额射电背景（Feng 与 Holder 2018），其来源可能是此前未探测到的超大质量黑洞前身天体（Ewall-Wice 等 2018、2020年）、恒星形成星系（Mirocha 与 Furlanetto 2019）或暗物质湮灭（Fraser 等 2018；Yang 2018）。

另一种可能是，该吸收特征是天线与周围环境、电缆或接地板相互作用所产生的系统性伪影（Hills 等，2018；Bradley 等，2019；Singh 与 Subrahmanyan，2019；Sims 与 Pober，2020）。这类相互作用使银河系前景辐射难以去除；其亮度比目标信号高出四个数量级以上（Di Matteo 等，2002；Oh 与 Mack，2003），也构成了高红移21厘米实验面临的主要挑战。原则上，前景的频谱平滑性和空间变化性使其能够与21厘米全局信号区分开来（Pritchard与Loeb，2010年；Liu 等，2013；Sathyanarayana Rao 等 2017b）。然而，天线波束色散（Bernardi 等 2015；Mozdzen 等 2016）、电离层散射（Vedantham 等，2014；Datta 等 2016；Shen 等 2021）以及导电元件引起的反射（Spinelli 等（2022）；Agrawal 等 2024；Monsalve 等，2024b）等效应会在测得的天线温度中引入显著的频谱结构，从而降低前景减除或滤波的效果。即使天线波束中仅存在微弱的（~ 10^{-4}）频谱结构，也可能产生类似宇宙学信号的特征（Switzer与Liu，2014年）。

2022年，SARAS报告称，以95.3%置信度未探测到EDGES特征（Singh 等（2022））。SARAS将天线架设在筏上，以设定反射的最小延迟，该延迟对应于光传播至湖底所需的时间。这一延迟确保了SARAS数据中与反射相关的谱纹波周期小于1.5兆赫，因此可以将其与21厘米信号区分开来；预计后者随频率变化得更为缓慢（Raghunathan等，2021年；Singh 等（2022））。EDGES与SARAS结果之间的矛盾凸显了开展实验的必要性：在与测量21厘米信号相关的尺度上，使实验与周围环境实现电磁隔离。

本文介绍电磁隔离全局信号估计平台（EIGSEP），这是一项旨在测量宇宙黎明和再电离时期的21厘米全局信号的新实验。EIGSEP设计的关键是将天线悬置在峡谷中，距地面和最近的电导体约100米。这样的距离可抑制地面耦合，并将反射引起的频谱结构限制在较长的延迟上。此外，电磁隔离可能使我们无需详细了解地面的电学性质，就能准确地对天线进行电磁建模。这种隔离度将大大简化天线的电磁仿真，并便于直接比较天线方向图和阻抗的仿真与测量结果。EIGSEP还配备了旋转天线平台，使我们能够在测量过程中改变天线方向图在天空中的投影。旋转天线会产生不同的波束加权前景，可用于区分仪器系统误差与天空辐射。此外，旋转天线还可借助单个固定发射机测量波束方向图。

本文结构如下：第2 节介绍设计原则，接着第3 节介绍系统设计，第4节介绍校准方案。随后，第5节概述迄今为止的EIGSEP部署，包括对场址和射频干扰的讨论。最后，第6节总结实验现状及未来工作。

2 设计原则

EIGSEP实验的目标是测量来自宇宙黎明和再电离时期的红移全球21厘米信号。在存在前景和仪器系统误差的情况下，要区分各种可能的21厘米模型，就必须谨慎地去除前景，以尽量减少信号损失，并避免引入模仿真实宇宙学信号的伪特征。本文概述了EIGSEP设计背后的原则，以实现信号分离。

EIGSEP采取保守的前景去除方法：将所有受仪器加权前景污染的谱模态明确从数据中去除，且不用于对宇宙学信号建模。从数学上说，我们通过构建仪器加权前景的谱协方差矩阵并将其对角化，求得要从数据中去除的模态，从而找到特征模态。协方差矩阵既可以根据测量结果推导，也可以通过仿真获得。在实践中，将此类前景特征模从测量数据中投影出去，很容易将系统误差抑制到亚毫开尔文水平。难点在于确保残差仍保留可测量的宇宙学21厘米辐射贡献。如上所述，本征前景天空在频谱上较为平滑，可以用低阶多项式或最大平滑函数描述（Pritchard与Loeb，2010年；Sathya- narayana Rao et al. 2017b；Bevins等，2021年）。如果天线或其环境能够引入跨越全球21厘米信号模型空间的频谱结构，那么滤除强前景模式后便不会留下任何宇宙学信号。利用前景的空间各向异性将其与单极宇宙学信号分离（Switzer与Liu，2014年），或使用不同仪器进行观测，以将系统误差与天空辐射分离（Saxena等，2023年），或许可以缓解这一问题。

这种方法为 EIGSEP 提出了三项具体的设计原则：

(i) 仪器光谱响应可以用数量有限的谱模态建模，这些模态与 21 厘米信号模态的重叠最小。

(ii) 仪器可在测量之间或测量过程中进行改装，以产生不同的系统误差权重。

(iii) 可以对仪器的系统误差进行建模，并在现场测量。

在本节其余部分，我们将逐一阐述各项原则，并说明它们如何指导 EIGSEP 的设计。我们重点关注与色散天线波束相关的系统误差；对于全球信号实验而言，这类系统误差通常是最难表征的，并且通常在数值模拟中加以考虑（Mahesh 等（2021）；Cumner 等（2022）；Monsalve 等，2024a）。接收机引入的频率相关系统误差通过实验室测量和现场迪克开关进行校准，如第4节所述。在本节中，我们将天线的谱模态定义为对指向取平均后的天线波束谱协方差矩阵的特征模态。

2.1 最小化与21厘米信号的协方差

如果天线波束和前景分别由 $N_{\rm ant}$ 和$N_{\rm fg}$ 个独立谱模态描述，则波束加权前景大约需要 $N_{\rm modes} \sim N_{\rm ant}N_{\rm fg}$ 个模态。乘积 $N_{\rm modes}$ 是用于拟合并从 EIGSEP 数据中去除前景的模型的自由度数目。如果该数目过大，模型会变得过于灵活，从而能够拟合数据中的任何特征，包括宇宙学信号。此外，通过限制描述波束方向图所需的模态数目，可以简化借助测量与仿真来表征天线方向图并将二者进行比较的工作。若干全球信号实验，包括 EDGES（Cappallo 等（2025））、MIST（Monsalve 等，2024a）、REACH（Cumner 等（2022））和 SARAS（Singh 等（2022）），采用几何形状简单的小型天线，以确保波束方向图随频率平滑变化。用此处引入的术语来说：它们的响应可以用少数特征模态来描述。简单几何形状的另一个好处是，它简化了电磁仿真，并减少了仿真结构与实际制造结构之间的差异。这种简洁性提高了仿真的保真度，并使仿真与测量之间的比较更加可靠。

因此，我们要求 EIGSEP 使用一种几何结构简单、易于制造和复制的天线。天线方向图随频率的变化也必须能够用数量有限的模态描述。对此数量的一个实用估算方法是，确定解释天线波束色散所需的特征模态数，使误差约为 10^4,，这大致对应于前景与预期宇宙学信号之间的动态范围。

除了天线自身的几何结构外，天线周围的导电环境也会影响波束色散，因为它会为接收波形成多条传播路径。差分路径长度会引入频率相关干涉波纹，其谱尺度由

$$\tau = \Delta\ell/c = 1/\Delta\nu, \tag{1}$$

其中τ为信号延迟，Δl为差分路径长度，c为光速，且$\Delta\nu$为所得谱纹波的周期。由于全球21厘米信号模型在10–100兆赫的尺度上变化，方程1 表明天线附近 ~ 30米以内的导电结构需要仔细审查。值得注意的是，对于全球信号实验而言，天线下方接地板的存在可能会引入与全球信号特征简并的谱伪影，从而导致虚假或难以解释的结果（Vedantham 等，2014；Hills 等，2018；Bradley 等，2019；Singh 与 Subrahmanyan，2019；Sims 与 Pober，2020）。另一方面，不使用接地板、直接在土壤上开展的实验发现，对其结果的解释关键取决于土壤建模（Spinelli 等（2022）；Monsalve 等，2024b）。

EIGSEP 的标称要求是与天线 100 米范围内的结构实现电磁隔离。根据公式 1，这种隔离将抑制周期为 $\Delta\nu \leq 1$。5兆赫的谱纹波，对应于 $\tau \gtrsim 670$ 纳秒。EIGSEP 通过将天线悬置在峡谷地面上方 100米处来实现电磁隔离。该概念如图 1所示。100 米空气泡范围内唯一的导电结构是用于承载前端电子设备的天线平台。该平台位于天线的近场范围内，并纳入电磁仿真。我们要求金属平台和电子设备均位于距天线 2 米以内。天线发出的模拟信号通过光纤电缆传输至地面，天线则由非导电的凯夫拉绳悬挂。

为说明电磁隔离的作用，我们模拟了峡谷底部上方不同高度处，环境对 EIGSEP 天线反射系数的影响。由于天线与接收机接口处存在阻抗失配，反射系数的谱形主要由此处的反射决定。峡谷反射产生的谱纹波会扰动这一谱形，这与我们预期在天空测量中看到的情况一致。在散射仿真中，我们使用峡谷的数字高程模型，并假设峡谷土壤具有均匀的电导率和介电常数。尽管这是一个简化模型，但数字高程模型捕捉到了峡谷的几何形状，而这决定了纹波的谱尺度。具体而言，我们利用峡谷的地形模型计算反射波到达天线时所对应的延迟尺度分布。结果如图 2 所示，振幅上存在一个尚未确定的比例因子。可以清楚地看到，增加悬挂高度会使反射出现在更长的延迟处。尽管此结果是针对由天线发射的信号计算得出的，天空测量中也会出现同类谱纹波。

2.2 独立测量

除了谱分离之外，打破波束加权前景与宇宙学信号之间简并的另一种方法，是利用波束加权前景的变化。这通常是在使用不同恒星时分箱数据的背景下提出的：随着地球自转，前景会发生变化，而（单极）宇宙学信号保持不变（Switzer 和 Liu，2014年；Tauscher 等，2020；Anstey 等，2023）。另一种可能性是改变仪器。例如，REACH 计划使用两种不同的天线进行观测（de Lera Acedo 等人，2022；Saxena等，2023年），而 EDGES（Cappallo 等（2025））、MIST（Monsalve 等，2024a）和 SARAS（Singh 等（2022））实验则一直在使用不同仪器、于不同地点开展观测。

进行具有不同仪器系统误差加权的独立测量，对于实现对21厘米信号的可靠探测至关重要。EIGSEP是一项便携式实验，可在不同地点开展观测，我们计划使用不同天线进行测量。此外，EIGSEP采用旋转平台，在观测过程中以可控方式改变仪器系统误差。支持两类旋转：天线的方位旋转（类似于LuSEE-Night转台（Bale 等人 2023年））以及平台本身的轴向滚转。说明这些旋转的示意图见图3。在不同天线方位下进行的测量会改变来自天空和地面辐射的波束加权。与在不同恒星时分箱下的观测类似，天线旋转使EIGSEP能够投影去除那些

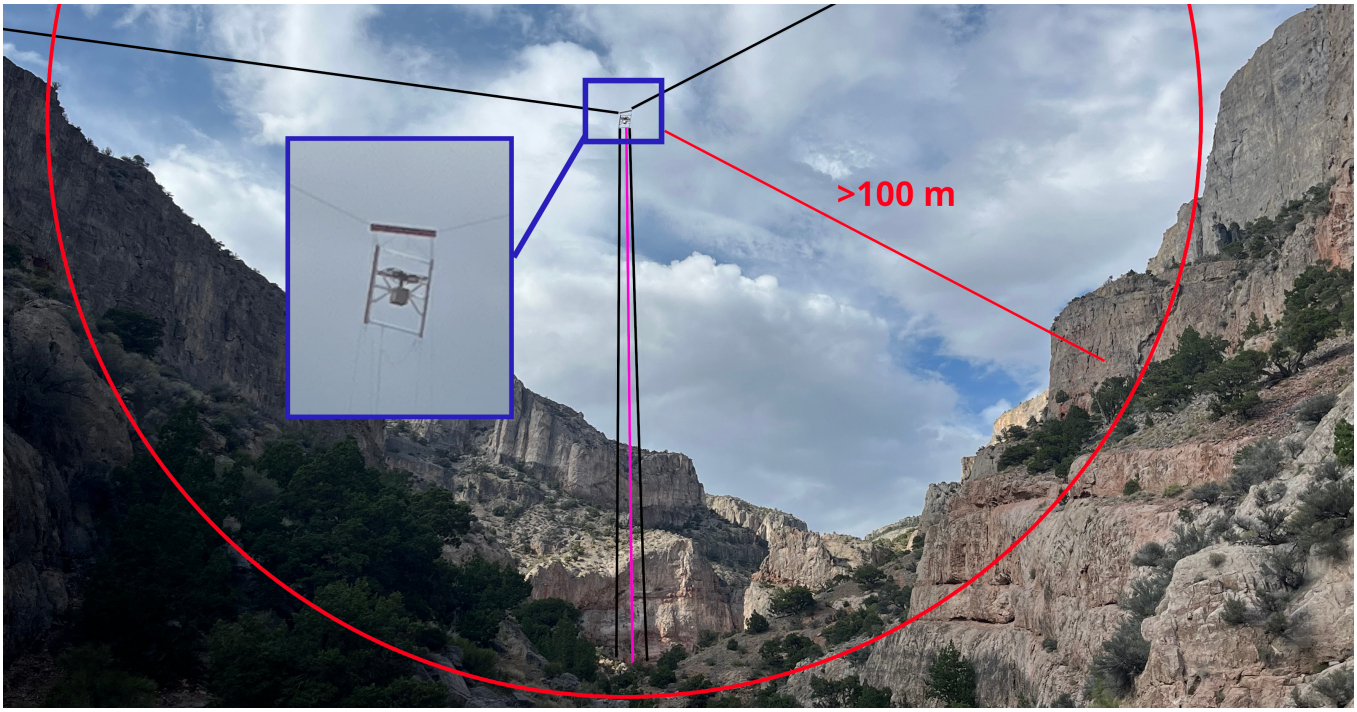

图1. EIGSEP 概念：一副天线悬挂在峡谷中，周围设有一个无电导体的 100 米区域。插图展示了天线的放大视图。无电导体区域以红色标示，天线悬挂在峡谷中央，由凯夫拉绳（黑色）支撑。信号通过不导电的光纤（粉色）传输到地面上的后端电子设备。

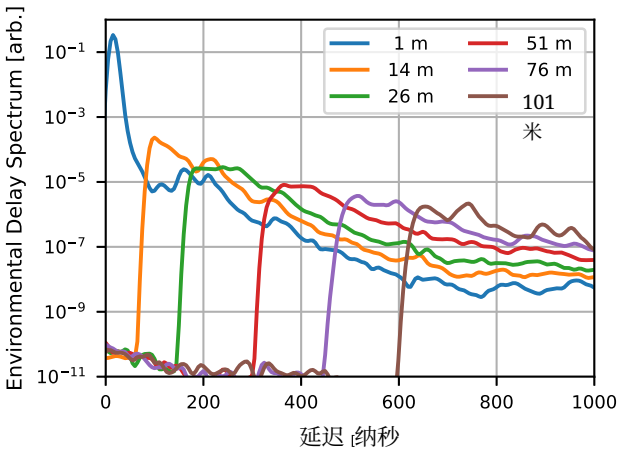

图2. EIGSEP 蝴蝶结天线悬挂在不同高度时，环境散射模拟得到的时延-功率谱。这些谱显示了环境对天线反射系数的贡献。环境反射出现在特定延迟处，该延迟由天线与周围地形之间光的往返传播时间决定，从而在时延空间中形成随高度变化的间隙。随着天线高度增加，信号时延间隙也随之增大，这是因为光到达环境所需的传播时间增加。高度为 100 米的天线可抑制 600 纳秒以下的反射（棕色）。曲线均以同一参考值归一化，以突出相对时延结构。

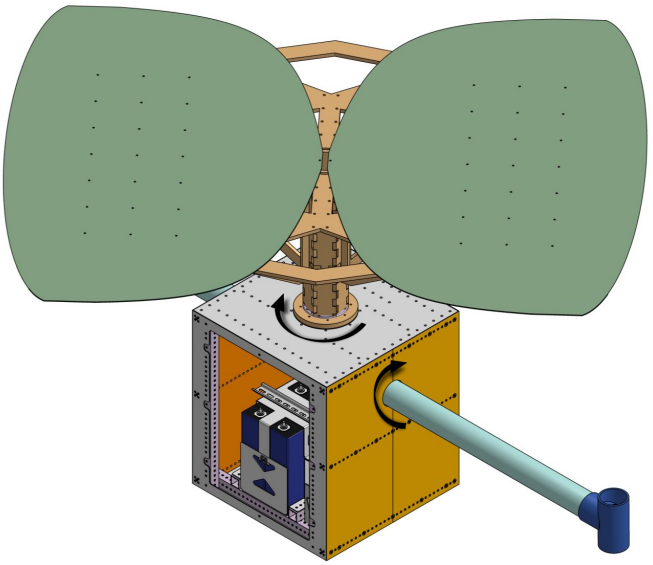

图3.EIGSEP天线（绿色）安装在天线平台上的CAD模型。图中未显示用于屏蔽箱体侧面的铜板。两个黑色箭头表示EIGSEP可进行的两种旋转。

会变化的形状，而全球信号保持不变。除旋转外，还可在现场改变平台高度，以改变地平线轮廓或评估与地面的耦合，这可能会影响信号恢复（Bassett 等人 2021年; Pattison 等人 2024年）。

2.3 系统误差建模与测量

EIGSEP 的第三项设计原则，是能够对系统误差进行建模，并在观测期间于现场测量这些误差。与天线相关的系统误差是天线方向图和阻抗。这两项参数均为乘性且随频率变化，

表1.EIGSEP 系统特性

红移范围	27.4–4.7
带宽	50–250 MHz
频率通道	1024
频率分辨率	244 kHz
积分时间	1.07 s
天线	3
相关性	11
悬挂高度	100 米
光纤长度	305 米
凯夫拉长度	305 米
平台重量	35 kg
系绳张力	100 kg

因此必须以由前景与信号之间动态范围所决定的精度加以确定，约为 10^4 (Cumner 等， 2024)。许多旨在探测全局21厘米信号的实验都在使用矢量网络分析仪（VNA）测量阻抗，但它们通常使用商用电磁求解器仿真天线方向图，以用于校准和色散校正（Bowman 等， 2018；Anstey 等， 2021；Monsalve 等， 2024a）。由于直接测量天线波束存在挑战，仿真的验证往往是间接进行的，或侧重于阻抗测量（Mahesh 等（2021）；Altamirano 等， 2025；Hendricksen 等（2026））。

对于 EIGSEP，我们要求在现场直接测量这些量，以提高我们对校准的信心并验证仿真。EIGSEP 的设计必须有利于精确的电磁仿真，并能够在现场进行直接测量。EIGSEP 天线的电磁隔离再次至关重要，因为可以对天线进行真实仿真，而无需纳入天线下方土壤的几何形状或电学性质模型。EIGSEP 接收机配备矢量网络分析仪和开关网络，可在现场自主测量天线阻抗。为测量天线波束，EIGSEP 使用放置在悬挂天线正下方地面上的发射机天线。发射机必须处于悬挂天线的远场，这一点很重要。100 米的悬挂高度满足该要求，该距离在最低频率下超过 15 个波长。为探测波束的方向依赖性，我们旋转天线平台，从而改变波束中对发射机敏感的部分。

3 系统设计

EIGSEP 仪器是一台三元干涉仪，主天线悬挂在峡谷内，另有两台天线架设在峡谷地面上。包括巴伦、低噪声放大器（LNA）和射频滤波器在内的前端电子设备，均安装在各天线旁。来自三台天线的模拟信号经过数字化后，在地面上的中央节点进行相关处理。本节将介绍该仪器在现场建造和部署后的情况。系统特性概述见表 1，框图见图 4。

3.1 悬挂天线

根据第 2节所述的要求，我们开发了一种经过优化设计的蝴蝶结天线，作为 EIGSEP 的主天线。蝴蝶结天线几何形状简单，具有固有的宽带特性，且辐射方向图近似全向。在在先进的蝴蝶结天线设计中，保形分析促使传统的三角形几何形状改为椭圆形或半椭圆形结构。这些形状可形成更平滑的电流分布，并使阻抗更接近 50 Ω 或 75 Ω（传统上用作特性阻抗的值），从而提升宽带性能。由于天线的张角与其输入阻抗成反比，椭圆轮廓有助于在较宽的频率范围内保持阻抗稳定。

基于这些原理，所提出的蝴蝶结天线设计以半圆形几何结构为基础。随后应用指数参数方程，以形成更完善的渐变轮廓，并针对目标频段内的性能进行优化。为优化天线，使用 Ansys HFSS 对其进行仿真[1]。综合一系列仿真结果，选择天线设计方案，使波束方向图和反射系数的谱形与21厘米信号模型之间的重叠最小。该设计针对50–250兆赫频率范围进行了优化。为提升低频性能，后续版本可能会对天线结构进行弯折和加载。

此外，分析表明，通过加入一个简单的匹配电路，将天线约为75 Ω 的平均阻抗转换为 50 Ω（即系统其余部分的特性阻抗），可以显著改善阻抗匹配。因此，EIGSEP采用了一块配备3:2变压器的定制巴伦板。我们在HFSS中对自由空间中的天线进行仿真，天线架设在一个代表天线平台的简单矩形铝盒上。该模型不包含任何螺丝孔、槽、PVC框架或天线的木质支架。此外，我们在仿真中采用了巴伦板的简化模型，其中使用了理想变压器。我们在图5中展示了模拟天线反射系数 $\Gamma_{\rm ant}$。结果表明，在所需带宽内反射系数平滑，并且天线与 50 Ω 参考阻抗之间具有良好的阻抗匹配，在85兆赫以上为 $|\Gamma_{\rm ant}| < -10$分贝。实际上，由于仿真中的简化，反射系数的测量结果可能会偏离图5。此外，在峡谷中进行测量会在图2所示的尺度上引入谱纹波。未来的工作将展示来自现场的校准测量结果。

天线方向图的仿真结果如图 6所示，频率分别为 50 MHz、150 MHz 和 250 MHz。仿真结果表明，50 MHz 时波束方向图几乎是全向的，且随着频率升高，方向性逐渐增强。此外，增益也随频率升高而增加。仿真结果显示，波束方向图从 50 MHz 到 150 MHz 平滑演变——旁瓣仅在频率高于 150 MHz 时出现，并可在 250 MHz 的仿真结果中观察到。由于金属箱的存在，天线下方（天顶角大于 90°）的增益略高于上方，这在 250 MHz 的仿真结果中尤为明显。

3.2 天线平台

天线安装在作为天线平台的铝箱上。箱体具有边长为14英寸（约36厘米）的正方形横截面，高度为16英寸（约41厘米）。铜板安装在箱体外侧，以对箱体内电子设备产生的射频干扰提供额外屏蔽。箱体尺寸以及与天线的距离已通过电磁仿真进行优化，以使反射系数在所关注的频带内保持平滑。

[1] https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss

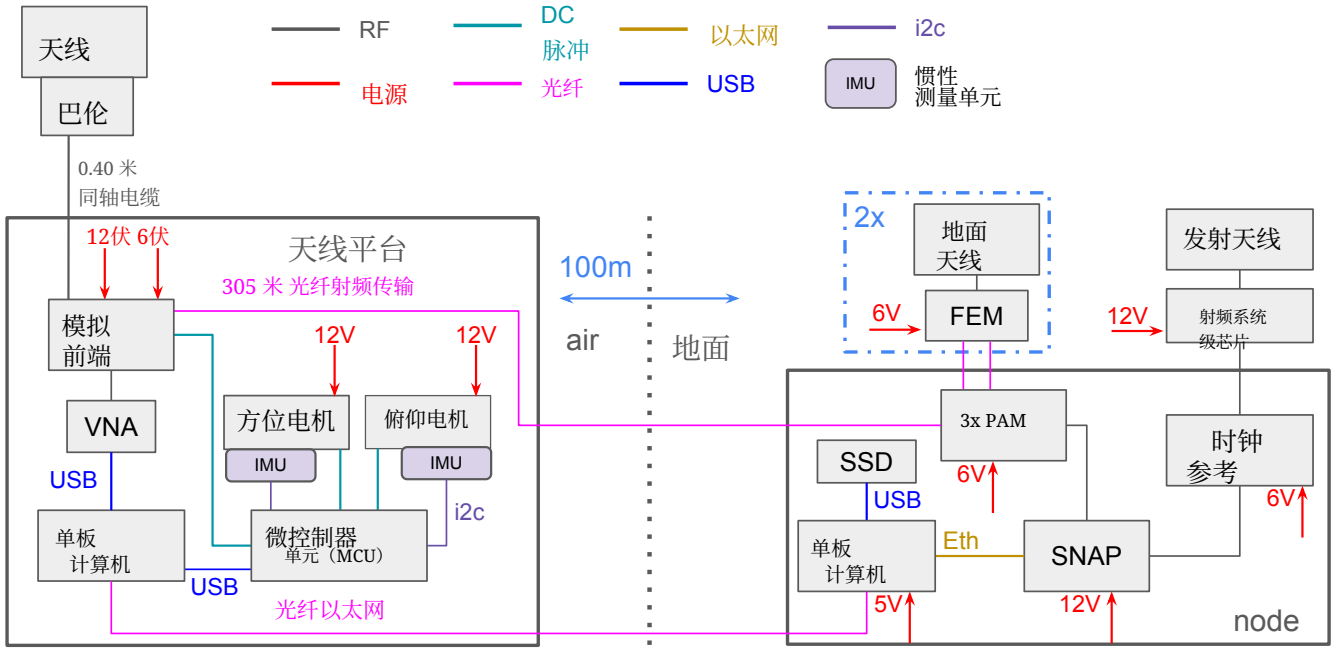

图 4. EIGSEP 仪器的高层框图。天空测量的信号路径从天线和地面天线出发，经过模拟前端（悬挂天线使用定制 EIGSEP 前端，见图 7；地面天线则使用 HERA FEM），再经光纤射频传输到 PAM。PAM 与 SNAP 之间通过同轴电缆连接，信号在 SNAP 中进行数字化和相关处理。SNAP 通过以太网与单板计算机通信，后者将数据保存到外置固态硬盘。

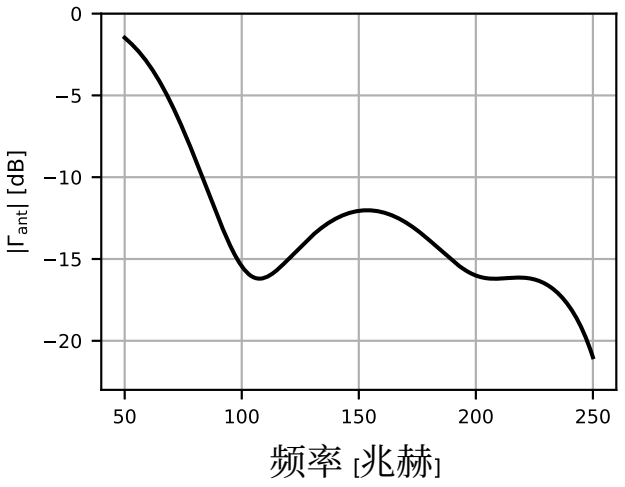

图5.蝴蝶结天线在自由空间中的模拟天线反射系数幅值随频率变化的曲线，单位为分贝。

天线被固定在箱体上方40厘米处，并通过木质结构机械连接至箱体。选用木材是因为其重量轻、强度高且不导电。在天线相对于箱体旋转期间，该结构随天线一起旋转。

如图1 所示，箱体通过一个足够大的框架悬挂在峡谷中，使天线能够绕穿过箱体的水平轴旋转。框架由中空的聚氯乙烯（PVC）管制成，并用 3/16英寸凯夫拉绳悬挂。两根绳索横跨峡谷，分别系在两侧顶部的树木上。这组双绳支撑着一块带有两个尼龙滑轮的滑轮板。

两根悬吊绳和两根安全绳穿过滑轮，系在框架两侧，并锚固在地面上。拉动这些绳索即可从地面升高或降低天线。将天线锚固在地面上也有助于防止其大幅左右移动。

箱体可绕两个轴旋转，如上文所述并在图中所示。3。每个旋转轴均由步进电机驱动回转驱动器。即使电机未通电，这种方案也能保持箱体的位置。通过记录每台电机的步数以及箱体的起始位置，可以推算出箱体的朝向。每个轴还配有一个惯性测量单元（IMU），可独立验证箱体的朝向。

除电机外，箱体内还装有信号链的模拟前端电子设备，以及用于控制箱体的数字电子设备。模拟信号链由6伏电池供电。电机和数字电子设备由12伏电池供电；射频开关和噪声二极管则由独立的12伏电池供电（见第3.3节）。使用独立电池可提高模拟信号链与易产生噪声的数字电子设备之间的隔离度。

3.3 前端电子设备

我们开发了 EIGSEP 信号链原型，并将其用于观测。悬挂式蝴蝶结天线配有专为 EIGSEP 开发的定制前端。本节将介绍该前端，并在图中以示意图展示。7。两根地面天线使用为氢再电离时期阵列（HERA；DeBoer 等，2017年；Berkhout 等，2024）开发的前端模块（FEM）。有关地面天线和前端模块的详情见第3.5节。

巴伦位于蝴蝶结天线馈电端，之后是

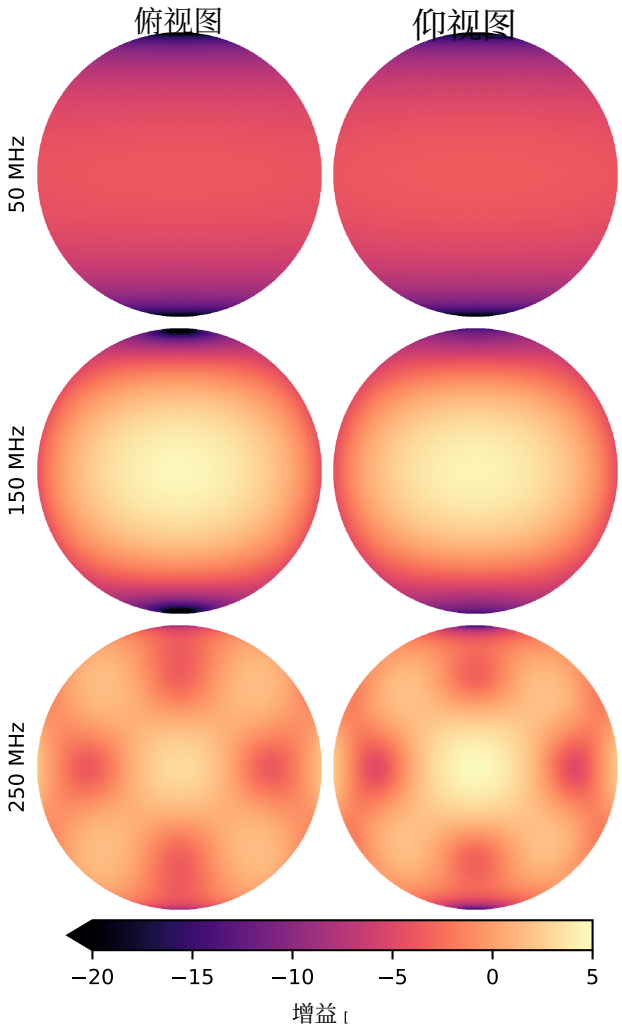

图6。 蝴蝶结天线在50MHz（顶行）、150MHz（中行）和250 MHz（底行）处的模拟实际增益（单位：dBi）。各列分别显示从天线上方投影的波束（俯视图，左列）和从天线下方投影的波束（仰视图，右列）。为便于观察，颜色刻度的低端在 −20 dBi处截断；50 MHz处的实际增益最小值为 ≈ −35dBi。

一根40厘米长的同轴SMA电缆穿过木制平台的中央立柱，连接到箱体内的接收机。箱体内的第一个部件是射频开关网络。该网络包含七个Tele-dyne CCR-33S型机电开关。这些是故障安全型单刀双掷（SPDT）开关，该网络采用了MIST使用的设计（见Monsalve 等，2024a中的图17）。根据数据手册，这些开关的隔离度为70分贝，最大插入损耗为0.2分贝。要切换到高功率状态，开关需要持续供电200毫安；若未供电，则保持在低功率状态。

通过开关的主信号路径将天线连接到接收机，以进行天空观测。其他开关位置用于校准，包括使用矢量网络分析仪进行反射系数测量，以及进行噪声源测量以设定温度标度。继电器开关用于控制噪声二极管的开和关。

校准子系统在第4节中介绍。这里我们重点介绍用于天空观测的放大链。

EIGSEP的放大链采用Mini-Circuits ZX60- P103LN+ 作为第一个低噪声放大器。在50 MHz处，该低噪声放大器的增益为25.3 dB，噪声系数为1.2 dB。低噪声放大器的环境温度通过热敏电阻进行监测。如系统图（图7）所示，低噪声放大器之后依次连接一个6 dB衰减器、提供50–250 MHz带通的滤波器、第二个衰减器以及一个射频光纤（RFoF）模块。该射频光纤模块是一块定制印刷电路板，其设计源自为DSA-2000望远镜开发的一种设计（Hallinan 等，2019）。该模块配备两个板载放大器和一个激光二极管，可将射频信号调制到光学波长，以便通过光纤电缆传输。板载放大器的总增益为 ≈ 40dB。我们对原始电路板进行了小幅修改，包括改变走线宽度以实现阻抗匹配，以及改变板载滤波器以匹配EIGSEP的频率范围。我们还在第二个放大器与二极管之间增加了一个6 dB外部衰减器，以减少反射。原始设计和修改后的射频光纤板均依据CERN OHL S-V2许可证开放源代码。二者分别可在 https://gitlab.com/dsa-2000/asp/rfof/ftx 和 https://github.com/liuweiseu/rfof-ftx/tree/cefad78获取。2025年实施的放大链如图8所示。

一根单模光纤电缆将箱体内的前端连接到地面上的后置放大模块。电缆长 1000 英尺（305 米），不导电。长电缆可确保任何潜在的电缆反射至少延迟 3000 纳秒——足够长，因此可以从测得的频谱中滤除这些反射，而不会造成信号损失（Ewall-Wice 等，2016；Kern 等，2019）。

3.4 数字电子设备

箱体内使用 LattePanda Mu[2] 单板计算机来控制电机、开关和矢量网络分析仪。它配备了 x86 处理器，可运行矢量网络分析仪软件。该计算机连接到微控制器单元（MCU），后者由六个 Raspberry Pi Pico 微控制器组成，用于连接开关、电机、惯性测量单元和温度传感器。该计算机通过数字光纤链路上的以太网，连接到地面上的另一台单板计算机。计算机、MCU 和矢量网络分析仪组成一个单元，放置在天线平台箱体内的独立金属箱中，以最大限度地减少自身射频干扰。

3.5 地面天线

地面天线采用了两台为 HERA 第二阶段研发的 Vivaldi 馈源。每台 Vivaldi 馈源由两片相互正交的叶片组成，可进行双极化测量。该天线针对 50–250 MHz 频段进行了优化，在此频段内与 HERA FEM 实现阻抗匹配，反射系数约为 −10分贝。与定制 EIGSEP 前端一样，HERA FEM 配有光纤射频传输模块，并在输出端连接光纤电缆。地面天线与悬挂天线采用相同类型的光纤电缆。Vivaldi 馈源和 HERA FEM 的详细介绍见 Fagnoni 等(2021年) 和Berkhout 等 (2024年)。HERA 使用 Vivaldi 馈源照射 14 米抛物面天线，而 EIGSEP 则独立使用这些馈源，不配抛物面天线。这一选择使仪器便于携带并降低了成本（Cumner 等（2022））。

[2] https://www.lattepanda.com/lattepanda-mu

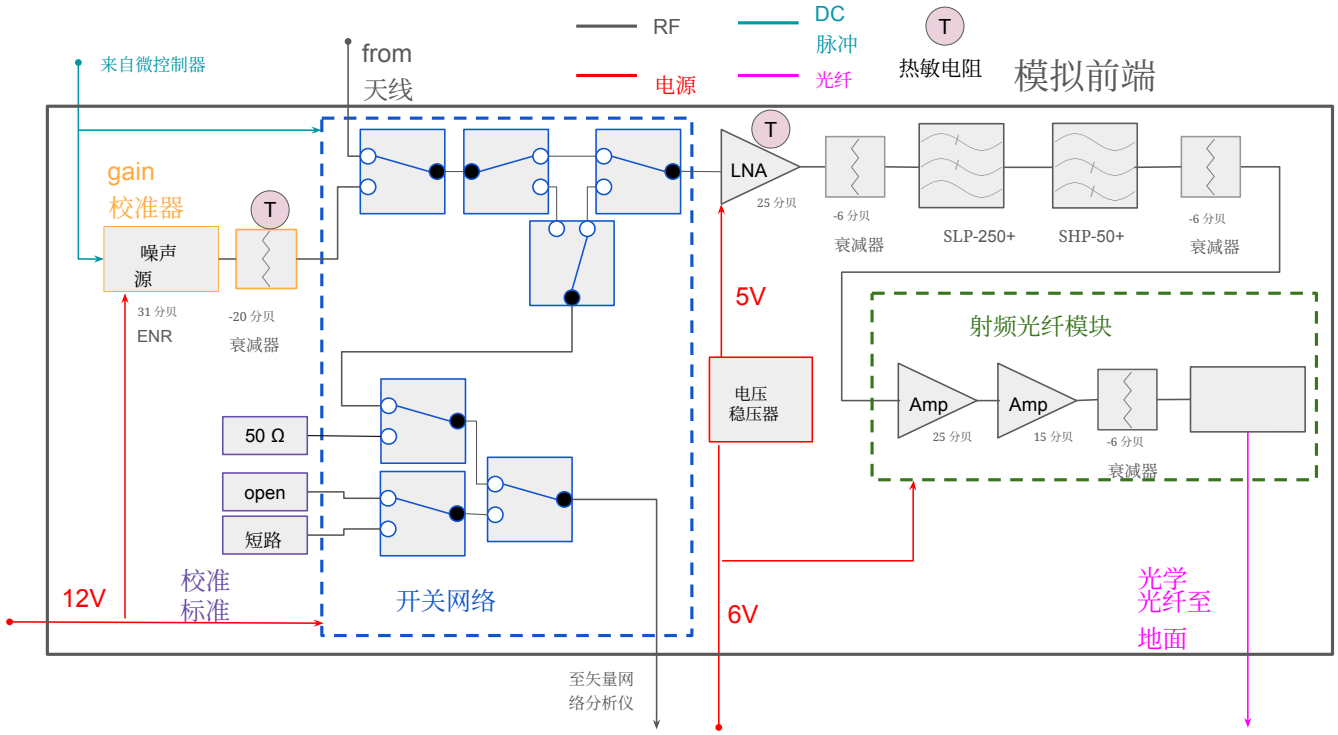

图 7. 连接至悬挂天线的前端框图。

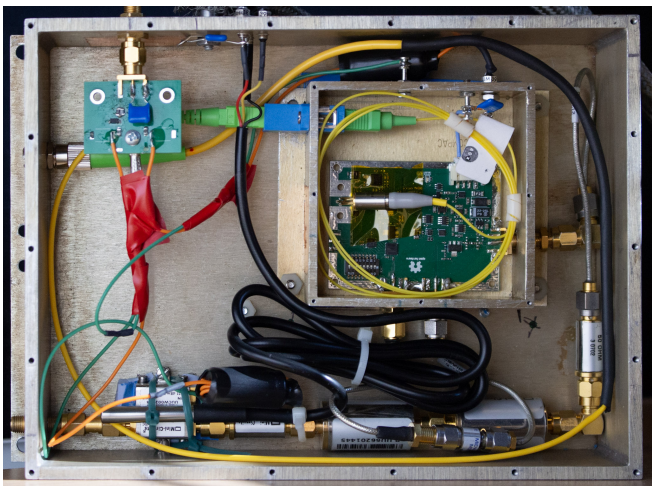

图 8. 蝴蝶结天线的放大链。射频信号输入位于左下角。信号沿逆时针方向经过图片底部和右侧的放大器与滤波器，再经过内侧箱体中的光纤射频传输模块，最后从左上方的光输出端输出。

前端模块配有内部负载和有源噪声源，但当前 EIGSEP 设计无法在天空测量与这些设备之间自主切换。只有用于悬挂天线的接收机将进行绝对校准。在系统的未来版本中，可能会尝试对地面天线进行同等程度的校准。

3.6 后置放大器和相关器

在地面上，来自三根天线的光纤电缆分别连接至 HERA 后置放大器模块（PAM）。HERA PAM 与 HERA 前端模块共同设计，相关细节另见Fagnoni 等人 (2021年) 和 Berkhout 等人 (2024年)。每个 PAM 中，光信号被转换回射频并放大至适合数字化的电平。PAM 安装在射频屏蔽且防水的外壳内。

信号链的最后一级是智能网络化 ADC 处理器（SNAP）。SNAP 是由 HERA 与天文信号处理与电子研究合作组织（CASPER；Hickish 等，2016年；DeBoer 等，2017年）共同设计的基于现场可编程门阵列的数字信号处理模块。它使用 8 位 Hittite HMCAD1511 模数转换器，以 500 Msps 的采样率对五路输入进行数字化处理：一路来自悬挂天线，另外两路分别来自每个地面天线。SNAP 使用 2048 点多相滤波器组对这五路输入进行信道化。每 1.07 秒计算一次积分相关性，并通过 1 Gb 以太网输出至树莓派。当前版本的相关器计算 11 种相关性：五种自相关和六种互相关。互相关包括单偏振悬挂天线与两副双偏振地面天线之间形成的四种乘积，以及两副地面天线之间的两种同极化乘积（N–N 和 E–E）。

一台低功耗单板计算机（树莓派）将相关数据写入 USB 存储设备、配置 SNAP，并记录传感器数据。树莓派安装在一个金属箱内。24 小时观测产生的数据总量约为 5 GB。图9 展示了前端模块、PAM、SNAP 和树莓派。

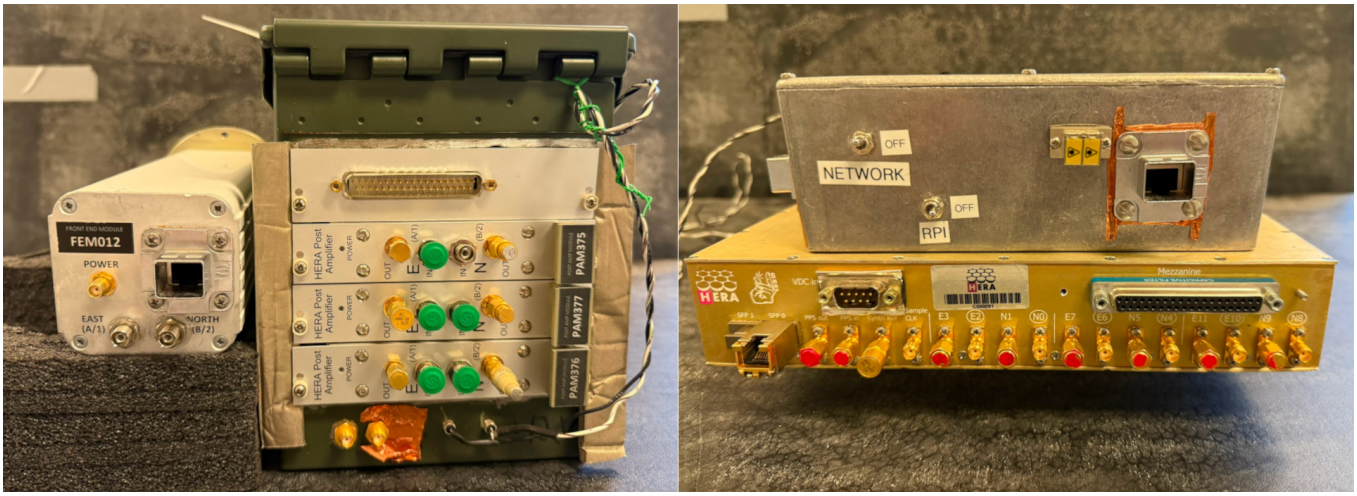

图 9. EIGSEP 接收机在现场部署时的组件。从左到右：前端模块接收各地面天线的模拟信号，将其放大后通过光纤射频传输发送至节点。每个前端模块通过光纤连接至一个 PAM，悬挂天线上的定制前端也以相同方式连接至一个 PAM。三个 PAM 安装在一起。来自三根天线的模拟信号在 SNAP 中数字化并进行相关处理。SNAP 上方是封装起来的树莓派，用于控制 SNAP 并将数据保存到磁盘。每个组件都安装在带连接器的射频屏蔽外壳内。

4 校准方法

测量全局21厘米信号需要极为精确的校准，因为前景与信号之间的动态范围差异很大。这项要求的重要组成部分是建立绝对校准尺度，将测得的电压转换为天空温度，同时考虑信号路径中的所有增益、损耗和反射。通常，这些量都与频率有关，这意味着即使校准误差很小，也可能人为引入类似全局21厘米信号的谱形。

仪器系统误差有三种不同类型：

(i) 加性偏差，例如放大器噪声和阻抗失配，这些因素会引入依赖于频率的信号功率。

(ii) 与方向无关的乘性偏差，例如由放大器、滤波器和电缆反射引起，或由阻抗失配导致；它们会通过乘性带通调制以前景为主的信号。

(iii) 天线波束和周围环境导致的方向相关乘性偏差，会使入射辐射产生随方向变化的乘性失真。

由于校准要求极为严格，EIGSEP 方法的一个关键方面是使用独立测量来校准相同特征。独立测量减少了对任何单一方法的依赖，而且这些测量可以相互验证。下面，我们将介绍测量的数学模型，并概述用于校准仪器系统误差的方法。

4.1 测量模型

悬挂天线测量一个随频率变化的温度$T_{\rm ant}(\nu)$，可写为

$$T_{\rm ant}(\nu) = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} A(\nu,\theta,\phi) T_{\rm emit}(\nu,\theta,\phi)\sin\theta\,{\rm d}\theta\,{\rm d}\phi, \tag{2}$$

其中， A 是归一化的天线方向图， $T_{\rm emit}$ 是与来自天空或地面的任何辐射相关的温度。两个量都是频率 ν 以及天空中的角度 θ 和 ϕ 的函数。在公式 2中，天线方向图 A 在球面上归一化，使得

$$\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} A(\nu,\theta,\phi)\sin\theta\,{\rm d}\theta\,{\rm d}\phi = 1. \tag{3}$$

在此形式体系中， A 不包括天线有限电导率或阻抗失配造成的损耗。相反，我们将这些因素纳入接收机增益 $g_{\rm rx}$，其定义如下。

除射频干扰外（在此模型中我们假设已将其去除）， $T_{\rm emit}$ 主要由天空辐射 $T_{\rm sky}$ 和地面辐射 $T_{\rm gnd}$组成。EIGSEP 旨在测量 $T_{\rm sky}$，但如图6所示，天线对地面辐射非常敏感。这种辐射包括热辐射，以及从地面传播至天线、经历光传播时间后到达的反射天空辐射。由于 EIGSEP 天线具有电磁隔离度，我们预计大部分反射天空辐射都能在时延空间中滤除，而剩余的反射辐射会因传播距离较长而大幅衰减。因此，我们假设剩余的 $T_{\rm gnd}$ 主要是与环境物理温度相关的热辐射。

为简洁起见，我们在符号中省略对 ν、 θ和 ϕ 的显式依赖。我们可以将方程2 中的 $T_{\rm emit}$ 拆分为 $T_{\rm sky}$ 和$T_{\rm gnd}$，从而改写该方程。我们用 $\Omega_{\rm above}$表示未被峡谷壁遮挡的天空部分，用 $\Omega_{\rm below}$ 表示地面和峡谷壁。于是得到

$$T_{\rm ant} = \int_{\Omega_{\rm above}} A T_{\rm sky}\sin\theta\,{\rm d}\theta\,{\rm d}\phi + \int_{\Omega_{\rm below}} A T_{\rm gnd}\sin\theta\,{\rm d}\theta\,{\rm d}\phi. \tag{4}$$

从悬挂天线接收的电源 $P_{\rm ant}$，以自相关谱的形式测量，与天线温度 $T_{\rm ant}$ 、接收机的增益（$g_{\rm rx}$）和温度（$T_{\rm rx}$）之间的关系为

$$P_{\rm ant}(\nu) = g_{\rm rx}(\nu)\left(T_{\rm ant}(\nu) + T_{\rm rx}(\nu)\right). \tag{5}$$

对于每次 $P_{\rm ant}$测量，EIGSEP 校准首先涉及求解 $T_{\rm ant}$ 方程5。随后，我们需要天线波束 A 以及地平线轮廓的精确模型和测量结果，以根据方程 $T_{\rm sky}$ 估算4。对方程进行直接求逆

4可能并非提取 21厘米全局信号所必需，但我们可能需要准确了解 A 和 $T_{\rm sky}$的谱模态。信号提取的细节以及对 EIGSEP 约束能力的估算将留待未来工作。在本节余下部分，我们将重点讨论为获得 $T_{\rm ant}$ 和A所需的校准。

4.2 接收机校准

为测量系统增益并表征带通，EIGSEP 正在着手实现一种由 EDGES 首创的接收机校准形式体系。该方法详见 Rogers & Bowman (2012) 和 Monsalve 等人 (2017a); 此处我们概述该方法在 EIGSEP 中的实现。

我们需要确定接收机增益和温度，以反转方程 5 并求解 $T_{\rm ant}$。在现场，EIGSEP 接收机通过开关在测量天线和内部噪声源之间切换。噪声源关闭时，测得的噪声温度就是 –20分贝衰减器的物理温度。关闭状态代表环境负载，我们用热敏电阻监测其物理温度。噪声源开启时，注入的噪声温度相较环境负载的噪声温度，会按噪声源的超额噪声比（ENR）所给出的倍数升高。结合这两项校准测量，可以得到天线温度的一阶估计（见 Monsalve 等人 2017a中的方程 1）。该估计未考虑天线与接收机接口处因阻抗失配而产生的反射，也未考虑噪声注入位置与接收机输入端所处的开关位置不同这一因素。校准这些效应，需要测量天线和接收机的反射系数，以及接收机噪声波参数（Meys 1978）。噪声波参数是五个随频率变化的参数，用来表示低噪声放大器（LNA）的噪声在天线与接收机接口处的反射，以及对环境负载和噪声源假定注入噪声温度所作的修正。我们将按照 Monsalve 等人 (2017a)中的流程，在实验室测量四个外部校准标准，以确定这些参数。

在我们的校准形式体系中，我们已将天线和接收机的反射系数、天线辐射效率以及巴伦的损耗隐含地吸收到 $g_{\rm rx}$和 $T_{\rm rx}$ 中。虽然反射系数是在现场测量的，但我们依靠天线的电磁仿真来确定辐射效率。巴伦的效率将通过仿真以及在实验室中对 S 参数进行表征相结合的方式来确定，遵循Monsalve 等人 (2024a)。

4.3 反射系数测量

EIGSEP 使用 Copper Mountain Technologies R60 单端口矢量网络分析仪测量天线和接收机的反射系数。这些系数会定期进行原位测量。矢量网络分析仪按照 EDGES 和 MIST 所采用的流程进行校准（Monsalve 等人，2017a，2024a；Bowman 等，2018）。每次测量天线反射系数之前，都会立即使用矢量网络分析仪测量内部的开路、短路和负载（OSL）校准标准件。这组测量可在接收机内部的参考平面上提供一阶校准。为避免低噪声放大器饱和，测量接收机的反射系数时使用较低的电源功率。测量接收机反射系数之前，我们会在此功率水平下重复进行矢量网络分析仪的 OSL 校准。为将测量的参考平面移至接收机输入端，需要去嵌接收机内部电缆和开关相关的 S 参数。这些 S 参数是在实验室中使用 Copper Mountain Technologies 提供的 S911T 校准标准件测得的。

4.4 干涉测量

在 SNAP 中，EIGSEP 的辅助地面天线与悬挂天线进行互相关处理。地面天线沿南北方向布置在峡谷中，得益于光纤电缆的长度，彼此间距最多可达 300 米。天线便于携带，如需采用其他基线，也可以移动天线。

互相关测量有助于观测明亮的天体源并表征系统增益。具体而言，天鹅座 A 会经过该观测点的 ~ 1。5° 天顶位置，并且其频谱已得到充分表征和绝对校准（Baars 等，1977；Perley 和 Butler，2017年），因此是 EIGSEP 良好的外部校准参考。

地面天线的测量结果还用于识别射频干扰并评估地形耦合。

4.5 天线波束测绘

为校准具有方向依赖性和频率依赖性的天线波束，EIGSEP 将结合数值电磁仿真与现场测量。仿真在 HFSS 中进行，并同时生成天线反射系数和天线方向图的预测结果。

EIGSEP 旨在使用放置在正下方地面上的发射天线，测量悬置天线的方向图。所使用的发射天线为电短偶极天线；首次实现采用的是 RTL-SDR Blog 偶极天线[3]，，总长度为 46 厘米。该天线使用数模转换器（DAC）在赛灵思射频片上系统（RFSoC）2x2[4]上生成的信号，在频带内每隔 16 个信道发射一系列狄拉克 δ 函数。RFSoC 发射板的时钟与 SNAP 相关器的时钟同步，从而确保发射信号准确呈现为无频谱泄漏的狄拉克梳状谱。发射机的图片见图 10。

观测期间，发射天线持续发射。由于狄拉克梳状谱没有频谱泄漏，发射功率仅分布在指定的 64 个频率通道中。对于其他通道，方程 4 仍适用于我们的测量模型，此时测量不受发射信号污染。我们将发射功率电平 $P_{\rm tx}$ 设得足够高，使其在发射机频率通道中压过所有其他辐射；此时，我们的测量模型变为（而非方程 4 和5）

$$P_{\rm ant}(\nu_{\rm tx}) \propto A(\nu_{\rm tx}, \theta_{\rm tx}, \phi_{\rm tx}) P_{\rm tx}, \tag{6}$$

其中 $\nu_{\rm tx}$ 表示发射机的频率通道，发射机位于天线局部坐标系定义的位置 $(\theta_{\rm tx}, \phi_{\rm tx})$。在这里，我们将发射机视为点源。比例常数取决于发射天线的特性，例如辐射效率、增益和反射系数；悬挂式接收天线的系统误差则已进行校准（第 4.2节）。未来的工作将探索发射天线的校准方案。由于我们确切知道

[3] https://www.rtl-sdr.com/[4] https://xilinx.github.io/RFSoC2x2-PYNQ/

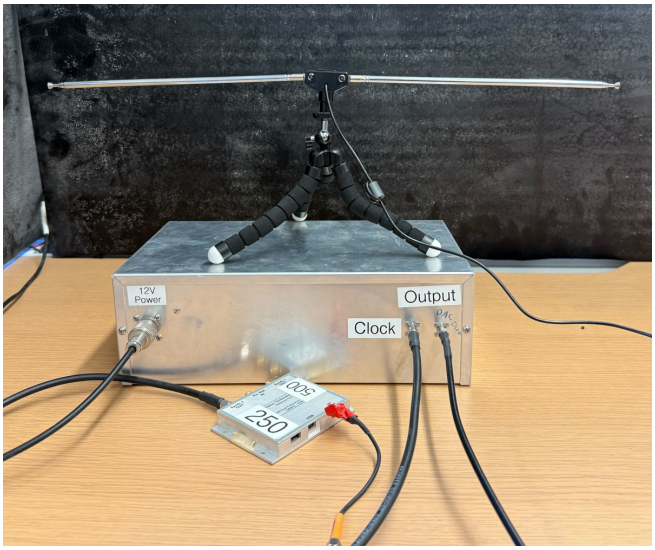

图10. 用于向蝴蝶结天线发射信号的短偶极天线。天线连接至 RFSoC 板，该板放置在天线下方的金属箱内，用于生成发射的狄拉克梳状谱。时钟位于 RFSoC 箱体前方。现场测量期间，金属箱与天线分开放置，以尽量减少其对天线性能的影响。

数模转换器中生成的信号，因此可以在输出端用光谱仪测量该信号，以校准模拟信号链。主要挑战在于表征发射天线自身随频率变化的系统误差。我们将探索多种方法来尽量减少这些系统误差，例如使用可通过解析方法描述的电短天线（例如 Balanis 1982），或使用多个具有不同系统误差的发射天线。此外，可以悬挂发射天线或为其配备接地板，以减少地面耦合。旋转悬挂的天线时，发射机的位置 $(\theta_{\rm tx}, \phi_{\rm tx})$ 会随之改变，这一位置以天线的地平坐标表示。因此，对于每种朝向，我们都会探测 A 的不同空间方向。通过旋转两个轴，我们可以描绘出天线波束完整的空间依赖关系。

在观测期间发射信号的另一项好处是可以监测接收机增益的稳定性。如果能够对发射机进行绝对校准，还可以独立测量接收机增益。

4.6 天线波束调制

通过旋转天线平台，EIGSEP 可以在观测期间改变天线方向图在天空和地形上的投影。天线悬置于一处峡谷中，该处的地平线轮廓随方位角显著变化，如图 11所示。该轮廓表示方程 $\Omega_{\rm below}$ 中的积分域 4。随着天线旋转，来自天空和地面的辐射权重也会发生变化。时间尺度远快于地球自转的旋转会引起方程 A 中的 4发生变化，而 $T_{\rm sky}$ 和 $T_{\rm gnd}$ 则基本保持不变。这些相互独立的调制有助于我们将天线波束的影响与天空辐射本身区分开来。

此外，我们还计划通过旋转天线来测量并投影掉空间前景模式。天线旋转时，会对天空的不同区域产生敏感响应。由于 21厘米单极信号

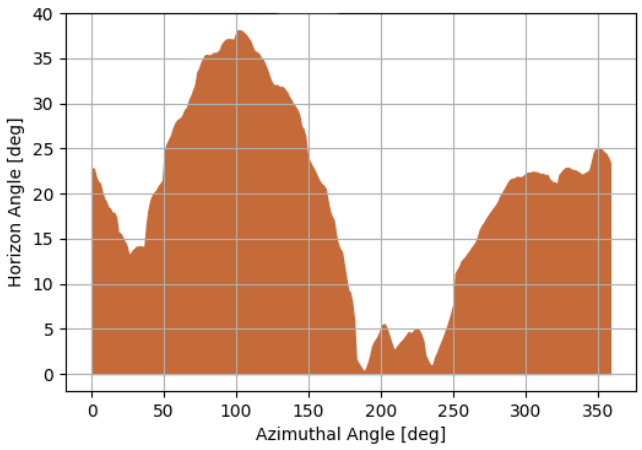

图11。天线站点的地平线轮廓随方位角的变化。棕色区域表示峡谷地形（$\Omega_{\rm below}$），白色区域表示天空视野（$\Omega_{\rm above}$）。

在整个天空中保持恒定，我们可以利用这种调制来去除前景。需要指出的是，频谱的部分变化源于天空和地面所占权重不同（公式 4），但可以通过天线方向图的模型和测量来估算这一影响 A 以及地面温度 $T_{\rm gnd}$；我们假设经过反射滤波后，地面温度接近黑体温度。这种技术类似于拟合不同恒星时分箱的频谱，以改进前景建模和扣除（Liu 等，2013；Tauscher 等，2020；Anstey 等，2023），但额外的优势是，旋转的方向和时间不必固定为地球自转。对于 EIGSEP，我们计划同时利用这两种方式来改进约束。

4.7 天空模拟

随着人们日益重视对低频下弥散同步辐射和点源辐射进行精确建模（de Oliveira- Costa等人，2008年；Sathyanarayana Rao等人，2017a；Zheng等人，2017年），将数据与直接天空模拟进行比较正逐渐成为验证校准数据的可行方法。EIGSEP使用CROISSANT模拟程序包[5]，根据前景和天线波束模型生成合成数据集。虽然当前模型的精度尚不足以单独校准仪器，但它们仍可为校准提供额外的交叉检验，用于验证。具体而言，只要能够从测量结果获得足够精确的波束模型（第4.5节），就可以利用EIGSEP数据求解天空辐射，并将其与天空模型进行比较。

5 部署

EIGSEP 仪器的早期版本于2023年和2024年部署到野外，主要用于在仪器开发期间对仪器和站点进行表征。本文所述版本的 EIGSEP 仪器于2025年7月部署。部署地点位于美国西部犹他州的 Marjum Pass（39.2477° N，113.4033° W）。该地点偏远，地形起伏陡峭，远离无线电发射机。经过宽带巡天，在十多个候选站点中选定了该地点

[5] https://github.com/christianhbye/croissant

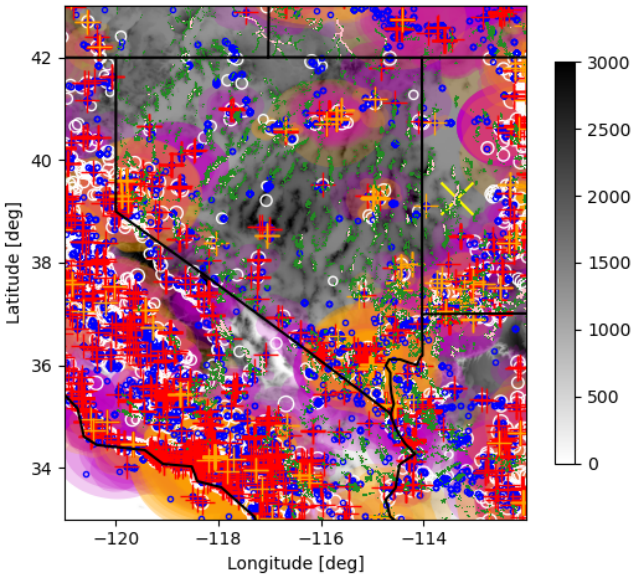

图12。美国西部的数字高程图（灰度，米）；绿色区域表示公共土地上两侧地形特征高度均为 > 100 米的区域，粉色区域表示最深的 > 95 百分位范围。美国联邦通信委员会注册的 FM 和电视台分别以洋红色和橙色标示，发射机位置用十字标出，建模的 60 dBu 等值线内以阴影表示。蓝色圆圈表示已注册但可能不活跃的 FM 和电视天线。白色圆圈表示市中心。黄色 X 标记所选的 EIGSEP 站点。

结果显示，该地点的射频干扰（RFI）水平极低。这些部署已证明，该地点适合作为 EIGSEP 的观测站点，也适用于仪器的开发和测试。本节概述该地点及迄今为止的部署情况。

5.1 站点选择

部署 EIGSEP 的合适地点需要射频干扰水平较低，并具有足够大的峡谷，以便为悬挂天线提供 100 米的空气间隙。此外，在仪器仍由加州大学伯克利分校积极开发期间，地点最好便于从加利福尼亚州伯克利前往。因此，搜索范围限定在美国西部。为寻找候选站点，我们将美国联邦通信委员会提供的无线电发射机地图[6]与美国地质调查局提供的数字高程图[7]结合起来。合并后的地图见图12。根据此地图，所选站点位于已注册发射机的 60 dBu 等值线之外，同时具有深度超过 100 米的峡谷。

选定了十几个候选站点后，我们于2022年开展了射频干扰勘测和地形勘察。我们使用盘锥天线和Keysight FieldFox手持式射频分析仪测量射频干扰水平[8]。根据这些现场测量结果，Marjum Pass被选为一个很有希望的候选站点。该地点还设有多个可供天线悬挂的候选悬挂点。2023年，我们使用EIGSEP 仪器的原型在Marjum Pass进行了补充测量，确认该地点在射频干扰、地形和可达性之间实现了良好折中，适合部署EIGSEP。

5.2 射频干扰

Marjum Pass 的现场测量表明，反射调频广播信号是射频干扰的主要来源，主要由飞机反射，其次是由流星轨迹反射。图 13显示了该地点两副地面天线的互相关测量值随时间和频率的变化。调频广播频段（88–108兆赫）内通常始终有五个频率通道受到射频干扰。

飞机飞过天线上方时，会反射附近发射机发出的射频干扰，从而造成整个调频广播频段受到干扰。例如，在图 13中，13:30 之前不久可以看到这种飞机反射射频干扰的特征：调频广播频段内的功率约有两分钟持续升高。类似现象也会出现，但持续时间更短，通常不到五秒，例如 14:00 时的情况。我们认为，这是调频广播信号被电离层中由电子形成的流星轨迹反射所致；这一现象几十年来一直为人所知（例如 Hey等（1947）；Ellyett与Davies（1948）），近来亦有相关研究，例如Helmboldt等 (2014年)。

由于场址存在与航空器传输相关的低占空比射频干扰，我们结合地平线模型（图 flightradar24.com11）和 航班数据，对从天线位置观察时地平线上方飞机的可见情况进行建模。图 14所示结果表明，夜间的航班相对较少，因此保守估计每晚可观测 ≈ 7小时，期间地平线上方没有航空器。

除了与调频广播相关的射频干扰外，我们还观测到较低水平的数字电视传输射频干扰。这在图 13中并不明显，但在低于调频频段的频率上进行更长时间的积分时可以观测到。

5.3 场址地形与地质

Dome Canyon南北向穿过犹他州中西部（米勒德县）的House Range山脉，北起Howell Peak，南至Sawtooth山。在天线所在位置，峡谷东侧边缘高出峡谷底部约200米，西侧边缘则高约380米。基岩主要由形成峭壁的石灰岩构成，其中夹有形成斜坡的页岩（Hintze 1974）。该地层序列中的沉积岩层在峡谷所在位置缓缓向东南倾斜（≈ 15°），但由于与总体呈南北走向的陡倾正断层相关的基岩块体变形和旋转，其倾斜方向和幅度在区域范围内有所变化。

我们未能找到任何已发表的、关于本站点探地雷达勘测的研究，因而无法直接测量这些特定石灰岩和页岩层的介电特性。不过，在 0.3–1000 MHz 的频率范围内，已发表的石灰岩介电常数和电导率数值通常分别为 7–9.2（Parasnis（1956））和 0.003–0.3 mS m^{-1} (Fechner等（2004））。这些特性的取值范围取决于石灰岩成分、杂质的存在以及含水量（Fechner等（2004））。例如，干燥纯石灰岩的电导率为 0.003mS m^{-1}，而孔隙饱和度为 50% 的纯石灰岩，其电导率会增至 ≈ 5 mS m^{-1}（见 Fechner等（2004）中的图4）。同一图中，Fechner等 (2004年) 显示，干燥石灰岩的介电常数为 ≈ 4，而孔隙饱和度为 50% 时则为 ≈ 17。

[6] https://www.fcc.gov/media/radio/fm-query调频广播发射机的信息请参阅 https://www.fcc.gov/media/television/tv-query 数字电视发射机的信息请参阅。[7] https://www.usgs.gov/3d-elevation-program[8] https://www.keysight.com/us/en/products/network-analyzers/fieldfox-handheld-rf-microwave-analyzers.html

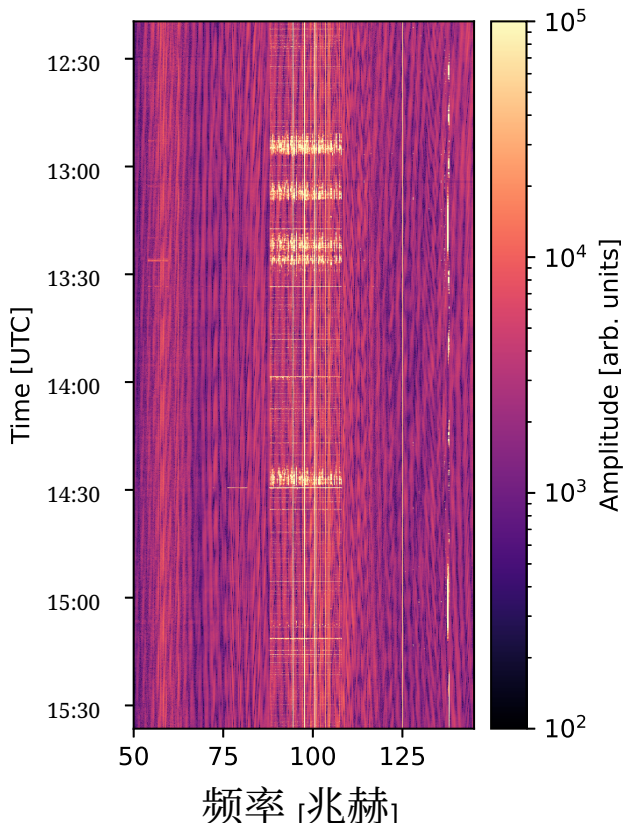

图13。 这些测量是在2024年7月21日从相关器获取的原始互相关数据，并以对数单位表示。每个频谱的积分时间为1.07秒。当天空中没有反射体时，即使在调频广播频段，频谱中的射频干扰也很低。若有飞机或微流星体飞过上空，则会出现显著的射频干扰。调频广播频段中持续时间较长的射频干扰（例如13:30之前的特征）与航空器有关，而短暂的干扰脉冲（例如14:00时）则与微流星体有关。137兆赫处的发射信号来自Orbcomm卫星。

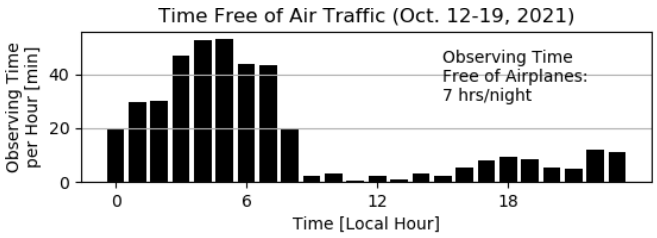

图14。 根据地平线模型和 flightradar24.com 提供的每周航班信息计算得出的无飞机交通观测时间。该网站保守估计，每晚可提供七小时不受飞机干扰的观测时间。

页岩的介电特性与石灰岩一样具有类似的变化幅度，这在很大程度上同样归因于含水量。在 100 MHz 下，干燥页岩的介电常数约为 5，而饱水页岩的介电常数为 8。此外，Josh等人测得的页岩电导率（Josh等人(2016年）具有频率依赖性：50 MHz 信号对应的数值为 10mS m^{-1}，在 100 MHz 下则增至约 13 mSm^{-1}。

土壤电导率和介电常数在空间与频谱上的复杂变化，再次说明了

对于 EIGSEP，将天线与地面隔离的重要性。尽管有些观测Sutinjo 等（2015）；Mahesh 等（2021）；Spinelli 等（2022）；Hendricksen 等（2026）地点的土壤可以用较简单的模型进行准确建模，但仍可能在天线波束中产生谱伪影，因此必须充分了解并校准这些伪影。

5.4 悬挂系统

天线通过一条架设在峡谷东、西侧边缘之间的高空绳索悬挂。高空绳索两端分别锚固在两侧的树木上。锚固点的选择决定了高架天线的位置。利用场地的数字高程模型，根据可达性以及天线所见的地平线轮廓确定了锚固点。不同锚固点处的地平线轮廓差异很大。由于峡谷壁能够显著屏蔽射频干扰，且射频干扰的主要来源是飞机反射，因此，尽管这会使地面辐射在天线温度中的占比更高，EIGSEP 仍应尽可能缩小天空视场。

另一个关键考量是绳索中的张力。张力的垂直分量需要平衡作用在天线平台上的重力。如果天线相对于峡谷壁顶部升得过高，总张力就会急剧增加。可以从一个假设的极端情形直观地看出这种增幅：当天线接近峡谷壁顶部时，张力的垂直分量将趋于零，为了补偿，总张力则需要趋于无穷大。因此，必须使用高度远高于目标悬挂高度的锚固点。

最终锚点的位置根据地平线轮廓、张力要求和可达性确定。高空绳索由 Sea to Sky 探险者协会[9]的一支专业登山队架设并固定。初步架设完成后，使用滑轮系统将天线从地面升起。该系统便于更换电池或对仪器进行必要的维修，无需攀至峡谷顶部。此外，还可以在观测期间调整高度，以评估地平线轮廓变化的影响或评估地形耦合。

5.5 现场测量

EIGSEP 仪器的三个版本曾被悬挂起来。2024年7月，一台原型平台在附近地点被悬挂于离地面约20米处。这次测试首次实现了 EIGSEP 在地面上方进行测量，并展示了旋转天线的使用。2024年10月，首次在当前地点使用高空绳索和滑轮系统进行悬挂，采用了与地面天线同类型的 Vivaldi 馈源。该馈源悬挂在离地面约95米处。

新型蝴蝶结天线和天线平台于2025年7月悬挂了四天。在此期间，天线被反复降下和升起。天线每天连续旋转约五小时，同时由短偶极天线持续发射外部校准信号。此外，EIGSEP首次进行了反射系数测量和校准测量。

对现场采集数据的分析正在进行中，尤其是2024年10月和2025年7月部署期间的数据。初步结果

[9] https://www.stsea.org/

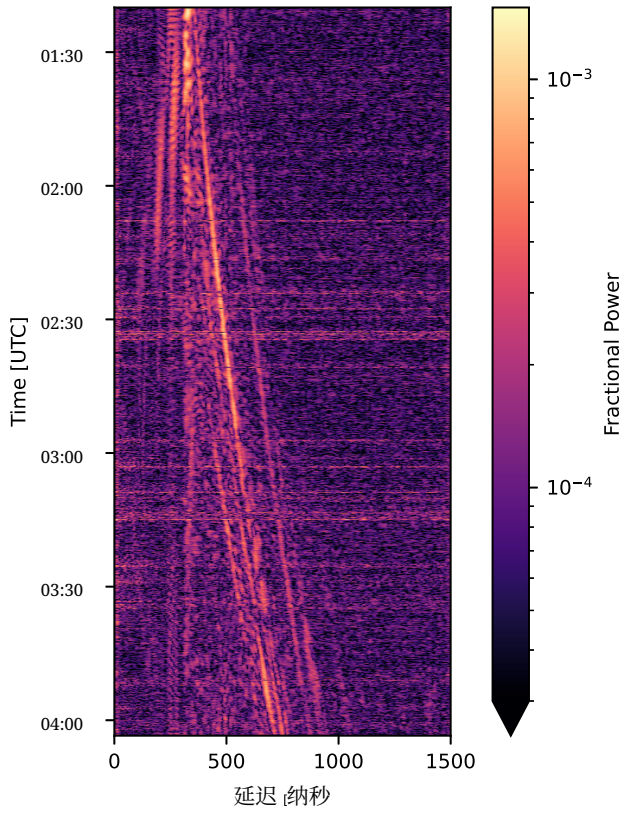

图15. 地面 Vivaldi 馈源的离散长球序列滤波自相关数据的延迟谱。数据采集于2024年10月19日。频谱按每个时刻接收的总功率进行了归一化。对角线显示了室女座A的辐射，以及信号在地形中不同特征上的散射。请注意，颜色刻度采用对数标度，并在 3×10^{-5} 处截断以抑制噪声。

2024年10月数据集揭示了来自室女座A的多径散射证据，这是在其中一个地面Vivaldi 馈源的延迟变换自相关数据中探测到的。为分离该点源，我们在原始自相关数据中标记射频干扰，并使用基于离散长球序列（离散长球序列；Slepian 1978）以去除频谱平滑前景。正如Ewall-Wice等人（2021年）所指出的，这些序列对于抑制傅里叶空间中有限频带内的功率是最优的。图15 显示了对数据经离散长球序列滤波后残差的延迟谱，并按各时刻测得的总功率进行了归一化。这些残差中出现了对角轨迹，对应于室女座A中天时随时间变化的几何延迟。多条轨迹的出现是由于峡谷不同部位的反射。我们将这些轨迹归因于室女座A，因为在整个观测期间，它是峡谷壁上方唯一的明亮点源。这些结果与观测期间室女座A的已知位置一致，假设主要散射体为东侧峡谷壁。

5.6 正在进行的工作与未来工作

继2025年部署之后，目前正在开展工作，以识别并表征数据中的仪器系统误差。具体而言，正在进行测试，以评估仪器的时间稳定性以及仪器对热变化的敏感程度。这些测试将为现场接收机校准策略提供依据。工作也在实验室中开展，以识别自身诱发的射频干扰，这是现场测量中的主要系统误差。将对仪器进行必要升级，以减轻自身射频干扰和仪器系统误差。此外，我们正在实施第4.2 节所述的绝对接收机校准，并分析4.5中所述的波束测绘数据。

2026年，改进后的仪器将再次部署到野外进行更长时间的观测，重点是获取绝对校准的天空频谱、从天线的不同朝向独立测得的天空波束权重，以及测量天线波束，以便与仿真结果进行比较并验证仿真。

6 结论

我们介绍了 EIGSEP 实验，该实验用于测量宇宙黎明时期的全球 21 厘米信号。EIGSEP 使用一根悬挂天线和两根地面天线，在 50–250 MHz 频段进行观测。EIGSEP 设计中的关键考量，是尽量减少仪器系统误差及其频谱结构，因为这些误差与明亮的前景耦合后，可能会模拟宇宙学信号。为尽量减少这类问题系统误差，EIGSEP 在峡谷中使用一根旋转蝴蝶结天线，并在天线周围形成一个 ~ 100米的空气气泡。我们介绍了蝴蝶结天线的设计，以及利用地面发射机表征天线波束的方法。随后，我们介绍了仪器的校准计划，包括内部校准器的现场测量、外部信号注入、反射系数测量、干涉测量以及实验室表征。

EIGSEP 实验已在 Marjum Pass 部署四次，最近一次是在2025年7月，使用定制蝴蝶结天线和旋转天线平台。该地点的射频环境纯净，发射机信号经飞机反射造成的瞬态干扰是主要的外部干扰源。初步数据分析显示，地形会散射室女座A的辐射。

未来工作将聚焦于数据分析、接收机的实验室表征以及自干扰抑制。这些工作的成果将用于识别并消除仪器系统误差。与此同时，正在对发射机数据进行分析，以尝试表征天线波束并验证数值模拟。借助表征更为完善的仪器，我们计划于2026年开展更长时间的天空测量。

致谢

我们感谢来自Sea to Sky Explorers Association的Khaled Allen、Sam Cipriani、Chris Gill、Yongsheng Li、Sam Ludwig、Ashlie Reott、Elon Smith、Grant Syllaba和Sean Taylor在仪器悬挂系统方面提供的帮助。我们感谢Ken Parsons在选址方面的帮助以及在部署期间的贡献。我们感谢Judah、Elena和Greta Spiegel在部署方面的帮助。我们感谢Kiran Shila以及DSA-2000合作团队分享射频光纤板的设计。本研究由Gordon and Betty Moore Foundation资助，资助编号为GBMF12211。

数据可用性

用于生成图表的数据、模拟结果和代码已公开发布于 Zenodo: https://doi.org/10.5281/zenodo.18383267。代码也可在 GitHub 上获取: https://github.com/christianhbye/eigsep_paper_notebooks。该

射频光纤板的设计可在 GitHub 上获取：https://github.com/liuweiseu/rfof-ftx/tree/cefad78。

参考文献

Abdurashidova, Z. 等，2022年。HERA 第一阶段对宇宙21厘米信号的限制：再电离时期天体物理学和宇宙学的约束，《天体物理学杂志》，924(2)，51。Agrawal, Y., Kavitha, K., & Singh, S., 2024年。全天21厘米探测中的方向依赖效应，《天体物理学杂志》，974(1)，137。Altamirano, C. 等，2025年。利用天线阻抗估算 MIST全天21厘米实验的土壤电参数，《太平洋天文学会刊》，137(8)，085002。Anstey, D., de Lera Acedo, E., & Handley, W., 2021年。全球21厘米实验前景建模和色散校正的通用贝叶斯框架，MNRAS，506(2)，2041–2058。Anstey, D., de Lera Acedo, E., & Handley, W., 2023年。在贝叶斯全球21厘米前景和信号建模中使用时间相关数据，MNRAS，520(1)，850–865。Artuc, K. & de Lera Acedo, E., 2025年。CosmoCube 光谱仪的研制：探测宇宙黑暗时代21厘米氢信号的月球轨道卫星，RAS Techniques and Instruments，4，rzae061。Baars, J. W. M., Genzel, R., Pauliny-Toth, I. I. K., & Witzel, A., 1977年。Cas A 的绝对频谱：精确的流量密度标度和一组次级校准源，A&A，61，99–106。Balanis, C. A., 1982年。《天线理论：分析与设计》，John Wiley & Sons，纽约，第1版。Bale, S. D. 等，2023年。LuSEE“夜”：月球表面电磁学实验，arXiv 预印本，页码 arXiv:2301.10345。Barkana, R., 2016年。第一代恒星的兴起：超声速流、辐射反馈与21厘米宇宙学，Phys. Rep.，645，1–59。Barkana, R., 2018年。第一代恒星揭示重子与暗物质粒子之间可能存在的相互作用，《自然》，555(7694)，71–74。Bassett, N., Rapetti, D., Tauscher, K., Nhan, B. D., Bordenave, D. D., Hibbard, J. J., & Burns, J. O., 2021年。失落的地平线：量化局部地形对全球21厘米宇宙学数据分析的影响，《天体物理学杂志》，923(1)，33。Becker, G. D., Bolton, J. S., Madau, P., Pettini, M., Ryan-Weber, E. V., & Venemans, B. P., 2015年。来自六以下红移处极端 Lyα 波谷的斑块状氢再电离证据，MNRAS，447(4)，3402–3419。Berkhout, L. M. 等，2024年。氢再电离时期阵列（HERA）第二阶段的部署与调试，《太平洋天文学会刊》，136(4)，045002。Bernardi, G., McQuinn, M., & Greenhill, L. J., 2015年。测量 z∼20 处天空平均 λ21 厘米信号时的前景模型和天线校准误差，《天体物理学杂志》，799(1)，90。Bevins, H. T. J., Handley, W. J., Fialkov, A., de Lera Acedo, E., Greenhill, L. J., & Price, D. C., 2021年。MAXSMOOTH：快速拟合最大平滑函数及其在全球21厘米宇宙学中的应用，MNRAS，502(3)，4405–4425。Bosman, S. E. I., Fan, X., Jiang, L., Reed, S., Matsuoka, Y., Becker, G., & Haehnelt, M., 2018年。利用 z > 5.7 处的62个类星体样本对莱曼-α 不透明度的新约束，MNRAS，479(1)，1055–1076。Bosman, S. E. I. 等，2022年。氢再电离在 z = 5.3 之前结束：XQR-30样本测得的莱曼-α 光学深度，MNRAS，514(1)，55–76。Bowman, J. D., Rogers, A. E. E., Monsalve, R. A., Mozdzen, T. J., & Mahesh, N., 2018 年。天空平均频谱中以 78 兆赫为中心的吸收轮廓，《自然》，555(7694)，67–70。Bradley, R. F., Tauscher, K., Rapetti, D., & Burns, J. O., 2019年。一种会在全球21厘米测量的平均频谱中产生吸收轮廓的接地板伪影及其在 EDGES 中的潜在应用，《天体物理学杂志》，874(2)，153。Bull, P. 等，2025年。RHINO：用于探测21厘米全局信号的大型喇叭天线，RAS Techniques and Instruments，4，rzaf046。Cappallo, R. C. 等，2025年。EDGES-3：仪器设计与调试，《太平洋天文学会刊》，137(12)，125002。Castellano, M. 等，2022年。GLASS-JWST 的早期结果。III. z 9–15 处的星系候选体，《天体物理学杂志》，938(2)，L15。Chen, X., Yan, J., Deng, L., Wu, F., Wu, L., Xu, Y., & Zhou, L., 2021年. 用月球轨道阵列探索最长波长的天空，《伦敦皇家学会哲学汇刊A辑》，379(2188), 20190566. Cumner, J. 等，2022年. 全天平均21厘米宇宙学实验的射电天线设计：REACH案例，《天文仪器学杂志》，11(1), 2250001–2058. Cumner, J., Pieterse, C., de Villiers, D., & de Lera Acedo, E., 2024年. 天线功率方向图不确定性对全球21厘米实验的影响，MNRAS, 531(4), 4734–4745. Datta, A., Bradley, R., Burns, J. O., Harker, G., Komjathy, A., & Lazio, T. J. W., 2016年. 电离层对地基探测宇宙黎明和黑暗时代全球21厘米信号的影响，《天体物理学杂志》，831(1), 6. de Lera Acedo, E. 等，2022年. 用于探测红移 z 处 21 ≈ 7 5 28, **6**, -厘米氢信号的 REACH 辐射计——《自然·天文学》，–. de Oliveira-Costa, A., Tegmark, M., Gaensler, B. M., Jonas, J., Landecker, T. L., & Reich, P., 2008年. 10 MHz至100 GHz弥散银河系射电辐射模型，MNRAS, 388(1), 247–260. DeBoer, D. R. 等，2017年. 氢再电离时期阵列（ HERA ），《太平洋天文学会刊》，129(974), 045001. Dewdney, P. E., Hall, P. J., Schilizzi, R. T., & Lazio, T. J. L. W., 2009年. 平方公里阵列，IEEE Proceedings, 97(8), 1482–1496. Di Matteo, T., Perna, R., Abel, T., & Rees, M. J., 2002年. 高红移中性星际介质21厘米断层成像的射电前景，《天体物理学杂志》，564(2), 576–580. Eastwood, M. W. 等，2019年. 宇宙黎明的21厘米功率谱：OVRO-LWA的首批结果，《天文学杂志》，158(2), 84. Eilers, A.-C., Davies, F. B., & Hennawi, J. F., 2018年. 沿 z ∼ 6类星体视线测得的星系际介质不透明度，《天体物理学杂志》，864(1), 53. Ellyett, C. D. & Davies, J. G., 1948 年 . 通过无线电波在流星轨迹形成期间的衍射测量流星速度，《自然》，161(4094), 596–597. Ewall-Wice, A. 等，2016年. 再电离时期X射线加热阶段21厘米功率谱的首批限制，MNRAS, 460(4), 4320–4347. Ewall-Wice, A., Chang, T.-C., Lazio, J., Doré, O., Seiffert, M., & Monsalve, R. A., 2018年. 对宇宙黎明第一代黑洞射电背景的建模：对21厘米吸收振幅的影响，《天体物理学杂志》，868(1), 63. Ewall-Wice, A., Chang, T.-C., & Lazio, T. J. W., 2020年. 宇宙黎明黑洞发出的射电尖啸：射电响亮黑洞对21厘米全局信号影响的半解析模型，MNRAS, 492(4), 6086–6104. Ewall-Wice, A. 等，2021年. DAYENU：用于强度映射功率谱的平滑前景简易滤波器，MNRAS, 500(4), 5195–5213. Fagnoni, N., de Lera Acedo, E., Drought, N., DeBoer, D. R., Riley, D., Razavi-Ghods, N., Carey, S., & Parsons, A. R., 2021 年 . HERA 射电望远镜第二阶段新型宽带 Vivaldi馈源的设计，IEEE天线与传播汇刊，69(12), 8143–8157. Fan, X. 等，2006年. 利用 z∼6 类星体约束电离背景的演化和再电离时期。II. 19个类星体样本，《天文学杂志》，132(1), 117–136. Fechner, T., Börner, F. D., Richter, T., Yaramanci, U., & Weihnacht, B., 2004年. 石灰岩频谱介电特性的岩性解释，《近地表地球物理学》，2(3), 151–159. Feng, C. & Holder, G., 2018年. 宇宙黎明额外辐射导致中性氢全球信号增强，《天体物理学杂志》，858(2), L17. Fialkov, A. & Loeb, A., 2016年. 考虑宇宙加热，利用全球21厘米信号精确测量再电离光学深度，《天体物理学杂志》，821(1), 59. Finkelstein, S. L. 等，2023年. CEERS关键论文。I. 利用詹姆斯·韦布空间望远镜初探星系形成的最初5亿年，《天体物理学杂志》，946(1), L13. Fraser, S. 等，2018年. EDGES 21厘米异常与暗物质特性，Physics Letters B, 785, 159–164. Furlanetto, S. R., Oh, S. P., & Briggs, F. H., 2006年. 低频宇宙学：21厘米跃迁与高红移宇宙，Phys. Rep.,

433(4-6), 181–301. Ghara, R. 等，2020年. 利用LOFAR再电离时期观测约束z ≈ 9.1处的星系际介质，MNRAS, 493(4), 4728–4747. Ghara, R. 等，2025年. 利用LOFAR红移21厘米观测约束z~8 -10处星系际介质的状态，A&A, 699, A109. Greig, B. 等，2021年. 在高红移星系和再电离观测背景下解读z ≈ 9.1处LOFAR的21厘米信号上限，MNRAS, 501(1), 1–13. Hallinan, G. 等，2019年. DSA-2000——一台射电巡天相机，载于《美国天文学会通报》，第51卷，第255页。van Harleem, M. P. 等，2013年. LOFAR：低频阵列，A&A, 556, A2. Helmboldt, J. F., Ellingson, S. W., Hartman, J. M., Lazio, T. J. W., Taylor, G. B., Wilson, T. L., & Wolfe, C. N., 2014年. 利用长波阵列首个台站在55.25 MHz对流星轨迹进行全天成像，《无线电科学》，49(3), 157–180. Hendricksen, I. 等，2026. 根据地表上方MIST天线的阻抗测量估算加拿大高北极地区的土壤电参数，《地球物理研究快报》，53(2), e2025GL116618, e2025GL116618 2025GL116618. HERA合作组等，2023年. 利用HERA第一阶段观测改进对21厘米再电离时期功率谱和星系际介质X射线加热的约束，《天体物理学杂志》，945(2), 124. Hey, J. S., Parsons, S. J., & Stewart, G. S., 1947. 1946年贾可比尼流星雨的雷达观测，MNRAS, 107, 176. Hickish, J. 等，2016年. 使用CASPER开源技术开发射电天文仪器的十年历程，《天文仪器学杂志》，5(4), 1641001–12. Hills, R., Kulkarni, G., Meerburg, P. D., & Puchwein, E., 2018年. 关于EDGES数据建模的疑虑，《自然》，564(7736), E32–E34. Hintze, L. F., 1974. 犹他州米勒德县诺奇峰四边形区初步地质图，美国地质调查局，地图。Jishnu Nambissan, T. 等，2021年. SARAS 3 CD/EoR辐射计：接收机的设计与性能，《实验天文学》，51(2), 193–234. Josh, M., Clennell, B., & Cauchefert, M., 2016. 完整多重饱和有机质页岩的介电常数与各向异性，载于SPWLA第57届年度测井研讨会，冰岛雷克雅未克，发表于SPWLA第57届年度测井研讨会的论文。Kern, N. S., Parsons, A. R., Dillon, J. S., Lanman, A. E., Fagnoni, N., & de Lera Acedo, E., 2019. 缓解21厘米宇宙学中的内部仪器耦合。I. 仿真中的时间与频谱建模，《天体物理学杂志》，884(2), 105. Kulkarni, G., Keating, L. C., Haehnelt, M. G., Bosman, S. E. I., Puchwein, E., Chardin, J., & Aubert, D., 2019. 大型中性氢岛延伸至z < 5.5的晚期再电离模型中，Ly α 不透明度的大幅波动和较低的宇宙微波背景 τ，MNRAS, 485(1), L24–L28. Liu, A. & Parsons, A. R., 2016. 结合21厘米功率谱和全球信号测量约束宇宙学与电离历史，MNRAS, 457(2), 1864–1877. Liu, A. & Shaw, J. R., 2020年. 精密21厘米宇宙学的数据分析，《太平洋天文学会刊》，132(1012), 062001. Liu, A., Pritchard, J. R., Tegmark, M., & Loeb, A., 2013. 全球21厘米信号实验：设计者指南，《物理评论D》，87(4), 043002. Liu, A., Pritchard, J. R., Allison, R., Parsons, A. R., Seljak, U., & Sherwin, B. D., 2016a. 利用21厘米宇宙学消除宇宙微波背景中的光学深度干扰参数，《物理评论D》，93(4), 043013. Liu, C., Mutch, S. J., Angel, P. W., Duffy, A. R., Geil, P. M., Poole, G. B., Mesinger, A., & Wyithe, J. S. B., 2016b. 黑暗时代再电离与星系形成模拟——IV. 高红移星系的紫外光度函数，MNRAS, 462(1), 235–249. Madau, P., Meiksin, A., & Rees, M. J., 1997. 高红移星系际介质的21厘米断层成像，《天体物理学杂志》，475(2), 429–444. Mahesh, N., Bowman, J. D., Mozdzen, T. J., Rogers, A. E. E., Monsalve, R. A., Murray, S. G., & Lewis, D., 2021. EDGES低频段天线波束模型的验证，《天文学杂志》，162(2), 38. Mason, C. A., Trenti, M., & Treu, T., 2015. 星系紫外光度再电离时期之前的函数，《天体物理学杂志》，813(1), 21。McKay, L., Subrahmanyan, R., Chippendale, A., Bolli, P., Kyriakou, G., Dunning, A., & Ekers, R., 2025年。60至350 MHz绝对天空亮度的精确测量，arXiv电子预印本，p. arXiv:2509.11846。McLeod, D. J., McLure, R. J., Dunlop, J. S., Robertson, B. E., Ellis, R. S., & Targett, T. A., 2015年。哈勃前沿场中的新红移z ≃ 9 星系：对紫外光度密度早期演化的意义，MNRAS，450(3), 3032–3044。McQuinn, M., Hernquist, L., Zaldarriaga, M., & Dutta, S., 2007年。利用Lyα 发射体研究再电离，MNRAS，381(1), 75–96。Meyer, R. A., Roberts-Borsani, G., Oesch, P. A., & Ellis, R. S., 2025年。利用詹姆斯·韦布空间望远镜探测斑块再电离：从遗留河外场星系的莱曼α 森林限制星系际介质不透明度，《皇家天文学会月报》，542(3), 1952–1968。Meys, R. P., 1978年。线性微波器件噪声特性的波动方法，《IEEE微波理论与技术汇刊》，26(1), 34–37。Mirocha, J. & Furlanetto, S. R., 2019年。首次高红移21厘米探测能告诉我们什么关于早期星系的信息？，MNRAS，483(2), 1980–1992。Mirocha, J., Furlanetto, S. R., & Sun, G., 2017年。高红移星系光度函数背景下的全球21厘米信号，MNRAS，464(2), 1365–1379。Mondal, R. 等，2020年。来自LOFAR的z = 9.1处超额射电背景的严格限制，MNRAS，498(3), 4178–4191。Monsalve, R. A., Rogers, A. E. E., Bowman, J. D., & Mozdzen, T. J., 2017a。EDGES高频段接收机校准：观测再电离时期的全球21厘米特征，《天体物理学杂志》，835(1), 49。Monsalve, R. A., Rogers, A. E. E., Bowman, J. D., & Mozdzen, T. J., 2017b。EDGES高频段的结果。I. 全球21厘米信号现象学模型的限制，《天体物理学杂志》，847(1), 64。Monsalve, R. A. 等，2024a。星系际介质自旋温度测绘仪：仪器概述，MNRAS, 530(4), 4125–4147。Monsalve, R. A. 等，2024b。利用MIST模拟不同土壤模型和波束方向性下的全球21厘米信号探测，《天体物理学杂志》，961(1), 56。Mozdzen, T. J., Bowman, J. D., Monsalve, R. A., & Rogers, A. E. E., 2016年。全球红移21厘米测量中由色差波束效应导致的前景减除限制，MNRAS，455(4), 3890–3900。Muñoz, J. B. & Loeb, A., 2018年。少量微荷暗物质即可冷却早期宇宙中的重子，《自然》，557(7707), 684–686。Munshi, S. 等，2024年。利用NenuFAR一夜观测首次获得的宇宙黎明21厘米信号功率谱上限，A&A，681, A62。Naidu, R. P. 等，2022年。詹姆斯·韦布空间望远镜揭示的z ≈ 10-12处两颗极其明亮的星系候选体，《天体物理学杂志》，940(1), L14。Oh, S. P. & Mack, K. J., 2003年。高红移中性气体21厘米观测的前景，MNRAS，346(3), 871–877。Ota, K. 等，2017年。通过深度普查至0.3L *的z = 7.0 Lyα 发射体候选体，利用z ∼ 6-7处Lyα 光度函数的演化对再电离提出的新限制，《天体物理学杂志》，844(1), 85。Parasnis, D. S., 1956年。若干硫化物和氧化矿物及其矿石的电阻率，《地球物理勘探》，4(3), 249–278。Parsons, A. R. 等，2010年。探测再电离时期精密阵列：八站观测结果，《天文学杂志》，139(4), 1468–1480。Pattison, J. H. N., Anstey, D. J., & de Lera Acedo, E., 2024年。对全球21厘米实验前景中的热地平建模，MNRAS，527(2), 2413–2425。Perley, R. A. & Butler, B. J., 2017年。从50 MHz到50 GHz的精确流量密度标度，《天体物理学杂志增刊》，230(1), 7。Philip, L. 等，2019年。来自马里恩的高红移射电强度探测：2017年仪器，《天文仪器学杂志》，8(2), 1950004。普朗克合作组等，2020年。普朗克2018年结果。VI. 宇宙学参数，A&A，641, A6。Pospelov, M., Pradler, J., Ruderman, J. T., & Urbano, A., 2018年。宇宙微波背景瑞利-金斯尾中存在新物理的空间，《物理评论快报》，121(3), 031103。

Price, D. C. 等，2018年。探测黑暗时代的大口径实验（LEDA）辐射计系统的设计与表征，MNRAS，478(3), 4193–4213。Pritchard, J. R. & Loeb, A., 2010年。通过观测全球21厘米信号限制黑暗时代与再电离之间尚未探索的时期，《物理评论D》，82(2), 023006。Raghunathan, A. 等，2021年。用于探测宇宙黎明的浮动八度带宽锥盘天线，《IEEE天线与传播汇刊》，69(10), 6209–6217。Reichardt, C. L. 等，2021年。来自SPT-SZ + SPTpol巡天的次级宇宙微波背景各向异性改进测量，《天体物理学杂志》，908(2), 199。Rogers, A. E. E. & Bowman, J. D., 2012年。宽带天线和光谱仪的绝对校准，以精确测量天空噪声温度，《无线电科学》，47(4), RS0K06。Sathyanarayana Rao, M., Subrahmanyan, R., Udaya Shankar, N., & Chluba, J., 2017a。GMOSS：基于物理成分及相关辐射过程的全天空射电谱亮度模型，《天文学杂志》，153(1), 26。Sathyanarayana Rao, M., Subrahmanyan, R., Udaya Shankar, N., & Chluba, J., 2017b。为探测宇宙黎明和再电离时期的宇宙微波背景谱畸变而建立射电前景模型，《天体物理学杂志》，840(1), 33。Sathyanarayana Rao, M. 等，2023年。PRATUSH实验概念与设计概述，《实验天文学》，56(2-3), 741–778。Saxena, A., Meerburg, P. D., de Lera Acedo, E., Handley, W., & Koopmans, L. V. E., 2023年。使用奇异值分解框架和多天线提取全天平均21厘米信号：REACH案例，MNRAS，522(1), 1022–1032。Shaver, P. A., Windhorst, R. A., Madau, P., & de Bruyn, A. G., 1999年。能否将再电离时期作为宇宙背景中的全球特征探测到？，A&A，345, 380–390。Shen, E., Anstey, D., de Lera Acedo, E., Fialkov, A., & Handley, W., 2021年。全球21厘米观测中的电离层效应量化，MNRAS，503(1), 344–353。Sikivie, P., 2019年。轴子暗物质与21厘米信号，《暗宇宙物理学》，24, 100289。Sims, P. H. & Pober, J. C., 2020年。使用贝叶斯模型选择检验EDGES低频段数据中的校准系统误差，MNRAS，492(1), 22–38。Singh, S. & Subrahmanyan, R., 2019年。EDGES低频段频谱中的红移21厘米信号，《天体物理学杂志》，880(1), 26。Singh, S. 等，2022年。关于射电背景中宇宙黎明信号的探测，《自然·天文学》，6, 607–617。Slatyer, T. R. & Wu, C.-L., 2018年。关于暗物质-重子散射的早期宇宙限制及其对全球21厘米信号的影响，《物理评论D》，98(2), 023013。Slepian, D., 1978年。长旋转椭球波函数、傅里叶分析与不确定性。V——离散情形，《AT&T技术期刊》，57, 1371–1430。Spinelli, M., Kyriakou, G., Bernardi, G., Bolli, P., Greenhill, L. J., Fialkov, A., & Garsden, H., 2022年。全球21厘米实验LEDA的天线波束表征及其对信号模型参数重建的影响，MNRAS，515(2), 1580–1597。Sutinjo, A. T. 等，2015年。西澳大利亚低频射电天文学原型阵列的表征，《IEEE天线与传播汇刊》，63(12), 5433–5442。Switzer, E. R. & Liu, A., 2014年。消除变量：全球21厘米频谱实验的经验前景发现，《天体物理学杂志》，793(2), 102。Tang, M., Stark, D. P., Topping, M. W., Mason, C., & Ellis, R. S., 2024年。詹姆斯·韦布空间望远镜近红外光谱仪对$6.5 \lesssim z \lesssim 13$处恒星形成星系中莱曼 α 发射的观测，《天体物理学杂志》，975(2), 208。Tauscher, K., Rapetti, D., & Burns, J. O., 2020年。从前景和仪器效应中提取全球21厘米信号。III. 利用漂移扫描时间依赖性和全斯托克斯测量，《天体物理学杂志》，897(2), 175。Tingay, S. J. 等，2013年。默奇森宽视场阵列：平方公里阵列的低射电频率先导阵列，《澳大利亚天文学会出版物》，30, e007。Tozzi, P., Madau, P., Meiksin, A., & Rees, M. J., 2000年. 高红移中性氢的射电特征：绘制“黑暗时代”终结的图景，《天体物理学杂志》，**528**(2), 597–606。Umeda, H. 等，2025年。SILVERRUSH。XIV. 来自 z 2 2 7 3 24 ^{2} 的 20,000 个 Lyα 发射体的 Lyα 光度函数和角相关函数。–。来自 HSC-SSP 和 CHORUS巡天覆盖的最高达 deg 区域：连接再电离后时期与再电离核心，《天体物理学杂志增刊》，**277**(2)，37。Vedantham, H. K., Koopmans, L. V. E., de Bruyn, A. G., Wijnholds, S. J., Ciardi, B., & Brentjens, M. A., 2014年. 宇宙黎明时期21厘米全局信号中的色度效应，*MNRAS*，**437**(2)，1056–1069。Wayth, R. B. 等，2018年。二期默奇森宽场阵列：设计概述，《澳大利亚天文学会出版物》，**35**，e033。Whitler, L. 等，2025年。来自詹姆斯·韦布空间望远镜先进深场河外巡天的 $z \gtrsim 9$ 星系紫外光度函数：对早期星系演化和再电离的启示，《天体物理学杂志》，**992**(1)，63。Witstok, J. 等，2025年。通过红移 13 处的莱曼-α 辐射见证再电离的开始，《自然》，**639**(8056)，897–901。Yang, Y., 2018年。暗物质湮灭对 EDGES实验观测到的全局21厘米频谱的贡献，《物理评论*D*》，**98**(10)，103503。Zheng, H. 等，2017年。10 MHz 至 5 THz 弥散银河系射电辐射的改进模型，*MNRAS*，**464**(3)，3486–3497。

本文由作者准备的 TEX/LATEX 文件排版而成。