

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.03.09

山体对于宇宙低频总功率实验的影响

沈廷燕^{1,2}, 余赞², 顾俊骅³, 黄滢³, 郭铨²

(1. 贵州师范大学, 贵阳 550001; 2. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 3. 中国科学院 国家天文台, 北京 100080)

摘要: 该文主要分析实验天线所在周围山体对低频全天总功率实验提取中性氢 21cm 信号的影响。基于涵盖山体的高度、倾斜角、山体的组成成分及其一致性和山体到天线的距离等多种因素的模型, 利用基于矩量法的混合数值模拟算法对山体影响进行一系列的电磁场传播的模拟计算, 并进一步分析这些因素对天线增益和中性氢信号提取的影响。研究表明, 山体的特征, 包括其高度、与观测点的距离、倾斜角、构成材质和表面成分的一致性, 不仅对天线的增益产生影响, 而且会对后续中性氢信号的多项式拟合提取产生影响。当山体相对于天线的视角越小, 则对天线增益的影响越小; 山体错落排列比规则环状山体对天线增益扰动更大。而对于再电离信号的提取, 各向异性的山体成分和山体错落排列都会影响多项式前景扣除的精度, 进而干扰再电离信号的提取。

关键词: 天线增益; 山体特征; 低频总功率信号

中图分类号: P161 **文献标识码:** A

1 引言

在宇宙大爆炸之后大约 38 万年, 由于宇宙膨胀导致宇宙温度下降, 宇宙中的质子与电子结合在一起形成中性氢原子; 光子能在宇宙中自由运动, 最终形成宇宙微波背景辐射 (cosmic microwave background, CMB)。这一时期, 宇宙中的发光天体尚未形成, 宇宙进入了漫长的黑暗时期, 通常被称为宇宙“黑暗时代” (dark ages, DA)。根据现有宇宙大爆炸模型, 当宇宙年龄约为 1 亿年时 (对应的红移约为 30)^[1], 宇宙中的第一代恒星和星系开始形成, 所产生的紫外和 X 射线辐射逐渐电离了周围的中性氢, 形成电离氢区, 这些电离氢区逐渐增大、并合, 最终导致整个宇宙的大部分区域都被电离, 这个时期被称为宇宙黎明和再电离时期^[2]。在这个时期结束前, 宇宙中仍然含有大量的中性氢, 特别是宇宙黎明和再电离时期早期, 发光天体较少, 观测中性氢信号 21 cm 辐射是研究此阶段的唯一直接手段。

收稿日期: 2023-11-09; 修回日期: 2023-11-17

资助项目: SKA 专项 (2020SKA0110100); 国家自然科学基金重点项目 (12433012)

通讯作者: 余赞, yuyun@shao.ac.cn

目前宇宙黎明和再电离时期中性氢 21 cm 辐射探测的研究方法主要有三种：宇宙黎明和再电离信号的全天总功率测量；宇宙黎明和再电离信号的统计测量，即功率谱测量；直接对再电离区域实施成像观测。目前，国际上已经开展了众多以宇宙黎明和再电离信号的全天总功率为目标的实验（见表1），如 REACH^[3] (Radio Experiment for the Analysis of Cosmic Hydrogen) 实验；坐落于印度 Bangalore 以北 80 km 处的 Gauribidanur 天文台的 SARAS^[4] (Shaped Antenna measurement of the background Radio Spectrum) 实验，工作频段是 87.5 ~ 175 MHz；位于墨西哥 Isla Guadalupe 的单天线实验 SCI-HI^[5] (Sonda Cosmologica de las Islas para la Detecion de Hidrogeno Neutro) 实验，工作频段为 40 ~ 130 MHz；位于美国新墨西哥州 VLA 台址的 LWA1 (the first station of the Long Wavelength Array) 阵列 LEDA^[6] (Large-aperture Experiment to detect the Dark Ages)，工作在 30 ~ 88 MHz 频段；位于西澳大利亚的一处偏远地区的 BIGHORNS^[7] (Broadband Instrument for Global HydrOgen ReioNization Signal) 实验，工作频率范围为 50 ~ 200 MHz；位于亚南极的 Marion 岛上的 PRIZM^[8] (Probing Radio Intensity at high-z from Marion) 实验，两个天线的中心频率分别为 70 MHz 和 100 MHz。Experiment to Detect the Global Epoch of Reionization Signature (EDGES) 实验声称检测到宇宙黎明时期的吸收槽，但其形状和大小与基于标准宇宙学模型预言的^[9]明显不同，因此相关结果的真实性的真实性有待进一步确认。

来自宇宙黎明和再电离时期的信号本身非常微弱，红移到现在对应的波长落在 50 ~ 200 MHz 的射电波段，在这个波段，以银河系同步辐射为主导的前景比信号本身高 5 个数量级，信号本身所处数量级为 0.1 K。观测中性氢 21 cm 全天总功率，由于观测天区较大，达到相应灵敏度所需的观测积分时间相对较短，理论上只需要单天线就能完成观测，所需要的仪器设置相对简单。另外，以银河系同步辐射为主导的前景辐射经过大尺度平均后，在频率上呈现为一个较为光滑的幂律谱，可以用多项式拟合的方法来扣除。但是，单天线的实验更容易受到系统硬件、电磁环境等外界因素的影响，包括地面情况、周围山体、距离达几倍波长的灌木和人造结构等。这些环境特征会导致信号在山体、树木和建筑物上经过一系列的反射和散射后到达天线，形成复杂的多径效应；而这些近距离环境物体本身的热辐射波动也可能造成干扰。这些因素都需要在实验中加以考虑。2021 年，Bassett 等人^[10]就讨论了视界及其对全天 21 cm 观测和分析的影响，他们考虑了位于国家射电宁静区的 Green Bank Observatory 视线内的山体以及周围树木对辐射的遮挡问题。在这个视线方向上，树木高度超过山体，导致山体遮挡的辐射完全被屏蔽。使用国际电信联盟无线电通信部门提供的指数衰减模型，他们对穿过植被的辐射进行修正，证实视线轮廓对低频全天总功率的影响不可忽略。实际上辐射信号不仅会被遮挡，也会在传播途径中与障碍物发生散射。Rogers 和 Barrett^[11]模拟测试了距离 EDGES 的 lowland-1 天线约 50 m 的电子房屋对银河系中心区域散射的结果。利用 FEKO 软件模拟距天线 50 m 处有电子房屋的天线波束，假设一个无限大的完全导电地平面，将 FEKO 软件模拟的数据与 EDGES 的 lowland-1 天线真实观测数据进行对比并分析了其影响。另外，Spinelli 等人^[12]利用 FEKO 对不同情况的地面进行建模，考虑了地面的材质、湿度和地网大小形状对天线波束的影响，证明不同地面情况会造成不同程度的波束色散问题。

表 1 测量全天总功率的相关实验

实验名称	工作频段/MHz	简单介绍
REACH	50 ~ 170	REACH 旨在通过解决当前仪器面临的与数据中剩余系统信号相关的问题来改进当前观测, 采用两个不同的天线, 一个超宽带系统和一个基于现场测量的接收器校准器同时进行观测, 模拟观测预测了天体物理参数的百分比限制。
SARAS	87.5 ~ 175	SARAS 坐落于印度 Bangalore 以北 80 km 处的 Gauribidanur 天文台, SARAS 采用一种倍频胖偶极子天线, 提供了 110 ~ 175 MHz 波段的绝对天空亮度和谱指数。
SCI-HI	40 ~ 130	SCI-HI 是墨西哥 Isla Guadalupe 的单天线实验, 该实验采用一种芙蓉型 (Hibiscus) 天线, 它在四方形天线的基础上通过将方形板分割成斜梯形面构建而成。在 60 ~ 88 MHz 范围内给出 1 K 均方根残差的限值。
LEDA	50 ~ 100	LEDA 使用的是位于美国新墨西哥 VLA 台址的 LWA1 阵列。该阵列由 258 个双极化偶极子组成。这些偶极子被数字化并组合成 4 个独立可控的双极化波束瓣。对 500 ~ 1000 MHz 之间的中性氢 21 cm 信号吸收槽进行了限制。
BIGHORNS	20 ~ 200	BIGHORNS 位于西澳大利亚的一处偏远地区, 采用双锥形天线, 指向东—西方向, 可以接收大天区范围内 20 ~ 200 MHz 频段的射电波。
PRIZM	50 ~ 90, 70 ~ 130	PRIZM 由两个中心频率为 70 MHz 和 100 MHz 的双极化天线组成, 实验地点位于亚南极的 Marion 岛。初步数据证明 Marion 岛提供了一个非常干净的观测环境, 在调频 (FM) 波段内基本上没有可见的污染。
EDGES	50 ~ 100, 100 ~ 200	EDGES 位于西澳大利亚默奇森射电天文台 (Murchison Radio-astronomy Observatory), 由两块矩形薄片状平板构成, 对宇宙再电离模型进行了约束, 提出疑似宇宙黎明信号。

在本工作中, 我们将采用数值模拟算法研究山体对电磁波传播的影响, 尝试定量讨论实验天线周围山体对再电离中性氢信号提取的影响。在此工作中, 我们对山体的不同特性进行电磁仿真建模, 分析其造成的影响, 由于仿真地点周围没有高于山体轮廓的植被树木, 故本文暂时未考虑辐射衰减问题。整篇文章基本结构如下: 第 2 章介绍全天总功率实验理论基础以及讨论分析山体对拟合前景造成的误差; 第 3 章介绍如何利用高程数据所得到的三维坐标建立山体模型的过程; 第 4 章分别考虑山的高度、倾角、离观测点的距离、组成材质和

成分不均匀程度, 分析不同的山体情况对天线增益所造成的影响; 第 5 章讨论山体各方面对宇宙再电离时期中性氢信号的提取产生的影响; 最后, 我们讨论和总结这些因素对低频总功率实验分析的影响, 同时指出需要改进和提高的方面。

2 低频全天总功率实验理论基础

前景辐射一直是提取宇宙再电离时期中性氢信号的一大难题。我们利用 GSM^[13] (global sky model) 模拟包括银河系在内的低频前景辐射, 尽可能高精度地还原前景的复杂度, 再加入模拟的宇宙再电离时期的信号, 结合上述各种山体和仿真天线对低频天空辐射进行模拟观测。得到模拟观测数据后, 我们通过尝试利用多项式拟合法来去除前景, 并提取之前加入的宇宙再电离信号。最后, 我们对比提取的再电离信号的情况, 来研究山体对低频全天总功率的影响。

在实验观测中, 天线测量的亮温度 T_{ant} 由天空温度 T_{sky} 和天线波束的连续函数 B 的积分给出:

$$T_{\text{ant}}(\nu) = \frac{\int B(\nu, \theta, \varphi) T_{\text{sky}}(\nu, \theta, \varphi) d\Omega}{\int B(\nu, \theta, \varphi) d\Omega} . \quad (1)$$

我们假设模拟的天空温度 T_{sky} 包括两部分:

$$T_{\text{sky}} = T_{\text{F}} + T_{21} , \quad (2)$$

其中, T_{F} 、 T_{21} 分别为银河前景温度、21 cm 信号温度。然而, 在实际观测中, 因为观测分辨率的原因, 必须用有限和近似连续积分模拟波束加权前景, 在 HEALPix4 格式^[14]中, 天图中每个像素覆盖同样的表面积, 因此式 (2) 的离散化版本为:

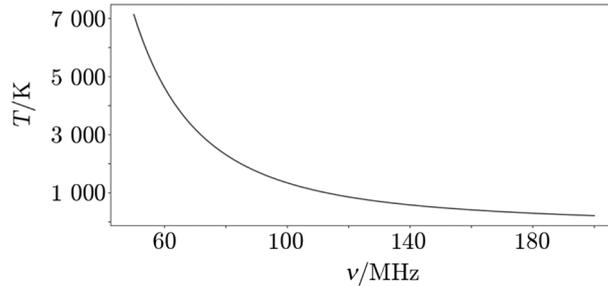
$$T_{\text{ant}}(\nu) = \frac{\sum_i^{N_{\text{pix}}} B(\nu, i) T_{\text{sky}}(\nu, i)}{\sum_i^{N_{\text{pix}}} B(\nu, i)} , \quad (3)$$

其中, N_{pix} 是银河前景图中像素的总数。

当包含视界时, 这种像素化会引入数值误差, 从而加剧整体误差。HEALPix 映射中的像素数量由 N_{side} 参数决定, 必须是 2 的幂。当使用 HEALPix 地图计算具有视界的波束卷积前景时, 必须确保视界在离散像素化中得到充分表示。利用银河前景模型 GSM 模拟视线完全平坦情况下 (即无山体的情况) 的半个天空的前景辐射。假设我们要在 $\theta = 90^\circ$ 处施加一个完全平坦的视界, 则须将视界以上的像素设置为 1, 将视界以下的像素设置为 0。HEALPix 格式造成了一个障碍, 因为存在以 $\theta = 90^\circ$ 为中心的一行像素。无论 N_{side} 的值是多少, 这都是正确的。但是, 如果我们选择将其中所有像素的值设为 1, 地平线将遮挡小于 50% 的天空。

通过使用具有较高 N_{side} 值的映射, 可以任意减小这种离散化误差, 但由于服务器的内存限制, 映射计算很快变慢。虽然可以通过选择布尔数据类型而不是浮点数据类型来减少给定地图所需的内存, 但使用视界地图进行模拟, 通常需要涉及其他地图 (如天空温度和增

益)的计算,要求更高的精度。虽然不能用离散的地图完美地模拟真实的视界,即使视界完全阻挡了传入的辐射,我们可以允许视界地图中的像素在 $[0, 1]$ 范围内取中间值使误差最小化。在平坦地平线的情况下,我们可将以 $\theta = 90^\circ$ 为中心的像素值设为 0.5,而不是 0 或 1。模拟 1 min 采集一次观测数据,共计观测时间为 24 h,计算出 50 ~ 200 MHz 范围内 LST 24 h 全天平均的 T_F (见图 1)。



注: 利用 GSM 前景模型模拟的 LST 24 h 全天平均的 T_F 。

图 1 完全平坦地平线时的前景频谱

图 2 表示考虑山体模型后的前景与不考虑山体的情况(完全平坦地平线)的前景频谱残差。这些前景温度差值均在 1 ~ 8 K 之间,表示全天中性氢 21 cm 信号的亮度温度所处数量级为 0.1 K,这比全天 21 cm 信号高一个数量级,所以山体对低频全天总功率实验的影响必须考虑;并且它不是幂律的,所以在拟合前景时不能忽略。

理论上预言的宇宙再电离时期中性氢信号的频率结构,可以用高斯分布模型来生成^[15]:

$$T_{21}(\nu) = A \exp \left[-\frac{(\nu - \nu_{21})^2}{2\sigma^2} \right], \quad (4)$$

其中, $A = -0.15$ K, $\nu_{21} = 78.3$ MHz, $\sigma = 5$, 分别是吸收槽的振幅、峰值、标准差。

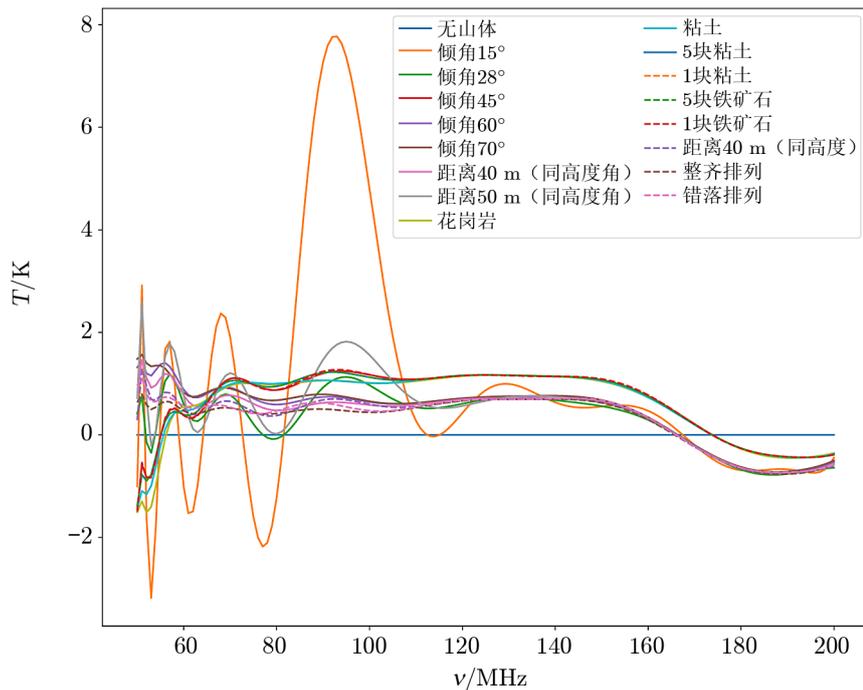
天空温度可以分解为前景贡献 T_F (包括银河系和河外源),以及来自宇宙再电离时期中性氢信号的贡献 $T_{21\text{cm}}$,后者是实验中希望探测到的信号。对于以同步辐射为主的在大尺度上无特征的银河系前景,可以采用对数空间中的多阶多项式拟合算法找到合适的前景拟合。

为了构建模拟数据的模型,前景扣除法采用对数空间多项式拟合,我们假设银河系前景可以描述为 n 项对数多项式^[16]:

$$\lg(T_F(\nu)) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \left(\lg \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right) \right)^n, \quad (5)$$

其中, $\nu_0 = 125$ MHz, N 是项数, a_n 是多项式拟合数据的系数,拟合时取 $n = 15$ 。我们可以从中提取全天中性氢信号:

$$T_{21\text{cm}} = T_{\text{ant}} - T_F. \quad (6)$$



注：蔚蓝色实线是值为零的参考线，橙色、绿色、红色、紫色、褐色实线分别表示山体材质为砾岩且倾角为 15° 、 28° 、 45° 、 60° 、 75° 时拟合得到的前景与不考虑山体情况的前景温度残差，粉色、灰色实线分别表示山体材质为砾岩且离观测天线的距离为 40 m、50 m 时拟合得到的前景与不考虑山体情况的前景温度残差（山体的高度角相同），黄色、湖蓝色实线分别表示山体材质为花岗岩、粘土时拟合得到的前景与不考虑山体情况的前景温度残差，黛蓝色实线和橙色、绿色、红色虚线分别表示把 5 个和 1 个约为 4° 方向的山体材质换成粘土和铁矿石时拟合得到的前景与不考虑山体情况的前景温度残差，紫色、褐色虚线表示山体整齐排列且离观测天线的距离为 40 m、50 m 时拟合得到的前景与不考虑山体情况的前景温度残差（山体的高度角相同），粉色虚线表示山体呈错落排列时拟合得到的前景与不考虑山体情况的前景温度残差。

图 2 考虑山体与不考虑山体（完全平坦地平线）的前景频谱残差

3 低频实验模拟设置

低频全天总功率实验装置通常由一个低频宽波束的接收天线和一个带有校准系统的数字接收机组成。其观测频率一般在 50 ~ 200 MHz 之间。首先，通过接收并测量来自足够大天区平均后的低频射电天空辐射 (50 ~ 200 MHz) 频谱；然后，扣除来自银河系等其他前景辐射的干扰，理论上可以测得宇宙黎明和再电离时期中性氢的辐射相对于宇宙微波背景的平均变化随频谱的关系（如 EDGES 实验）；最后，将实验结果与标准宇宙学模型进行比较，可以检测与宇宙黎明和再电离过程相关的一些重要物理参数。这样的实验设备通常被放置在远离人类活动的区域，以避免来自调频广播、无线电通信等人造的无线电射电干扰 (radio frequency interference, RFI)。

3.1 低频接收天线设置

在本工作中, 我们采用平板偶极子天线作为模拟天线, 类似的天线已经在 EDGES 实验和 MIS (Mapper of the IGM Spin Temperature) 实验中得到应用。该天线由长 1.1 m、宽 0.79 m、厚 0.002 m 的两块金属板组成, 距离地面 0.5 m; 此天线的 S11 参数如图 3 所示。可见天线的有效工作频率范围在 60 ~ 150 MHz 之间, 正好对应宇宙黎明和再电离时期可能信号所在的频率范围。另外天线的反射系数整体比较光滑, 有利于后续多项式拟合进行平滑前景扣除, 避免天线反射系数不光滑导致所测全天总功率频谱存在人为的吸收谷结构与真正的宇宙再电离信号产生混淆。

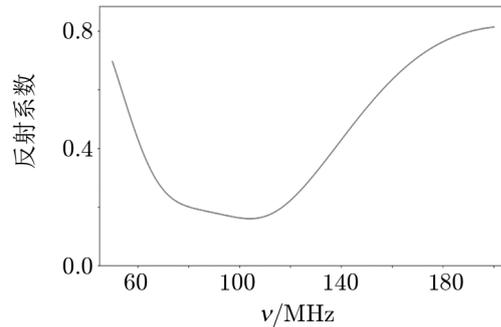
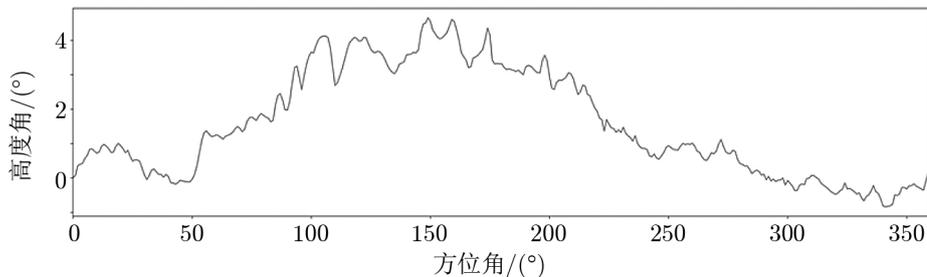


图 3 天线的 S11 参数示意图

3.2 低频实验周围山体模型设置

模拟实验设在位于甘肃省敦煌戈壁上一射电环境较宁静的地点。前期我们已对该地点进行过电磁环境测量。除了卫星通信信号外, 该地点在 50 ~ 200 MHz 频段基本没有人干扰。该地点的经纬度坐标是 (94.251 111°E, 39.719 444°N)。该地点处于山区, 周边有较多的小山丘, 电磁环境好, 因此我们选此地点作为模拟实验的观测地点。图 4 是利用网络高程数据计算得到的地平剖面图, 计算该剖面图可以通过公开代码 SHAPES (simulating horizon angle profile from elevation sets) 实现。SHAPES 代码通过 SRTM^[17](Shuttle Radar Topography Mission) 和 LOLA^[18](Lunar Orbiter Laser Altimeter) 提供的数据计算地球和月球上大多数位置的地平线。在本工作中选取的模拟位置看到山体的最大仰角是 4.6°, 与实际地形相符, 视野周围基本没有植被, 地面为沙土地质。



注: 横轴是方位角, 0° 方位角对应北方; 纵轴是高度角, 角度顺时针增加。模拟选用观测点的地形最大张角为 4.6°。

图 4 由高程数据计算模拟观测位置所得地平剖面图

利用高程数据计算得到的地平剖面图可以得到山体二维轮廓中每个方位角所对应的张角, 设置山体距观测点的距离, 就可以根据所设距离计算山体的高度, 再设置山体的倾角即可获得山体表面的三维坐标。计算地平剖面图时以方位角 1° 为步长, 共 360 个点, 再以每

3 个方位角点为一个单位建立一个山体面元, 上一块曲面的最后一个点为下一块的起始点, 所以山体正面共有 179 块面元。再以同样的方式建立山体的另一面, 最终山体由 358 块面元组成。面元的凹凸程度是系统随机的。由于模型是由两个曲面组成, 所以还要借助集肤深度^①设置山体曲面的厚度 (详见第 3 章)。由模拟观测点的平面剖面图计算结果构建出山体 CAD 模型 (见图 5), 图中仰角小于 0° 的忽略不计, 故该模型由 298 块面元组成。

模型构建完成后, 我们利用矩量法 (method of moments, MOM)^[19] 计算山体后的实验天线与电磁场的相互作用。电磁场作用的模拟地面为复介电常数和电导率表征的单一均匀半无限层, 山体表面为复介电常数和电导率表征的单一均匀的有限曲面层, 即:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_0 \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega}, \quad (7)$$

其中, ϵ_0 是真空的介电常数, ϵ_r 为无量纲的相对介电常数, ω 是电导率, 单位为 $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$, j 为电流密度。本次工作所用到的材料有砾岩、花岗岩、粘土、铁矿石, 我们使用不同材质电导率和相对介电常数表征其特性 (见表 2)。



注: 根据高程数据得到的平面剖面图建立山体 CAD 模型, 忽略山体仰角小于 0° 的部分, 该模型由 298 块面元组成。

图 5 山体 CAD 模型示意图

表 2 建模中所用材料的参数

材质	$\sigma / (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	ϵ_r
砾岩	0.005	4
花岗岩	1×10^{-8}	5
粘土	0.5	15
铁矿石	0.1	33.7

MOM 是基于电磁场积分的数值方法, 其基本思路是将几何目标剖分离散, 在其上定义合适的基函数, 然后建立积分方程, 用权函数检验从而得到一个矩阵方程, 求解该矩阵方程即可得到几何目标的电流分布。得到电流分布后, 根据格林函数进行数值积分, 即可得到求解空间任何点的场分布。MOM 可以认为是加权余量法的一种特许形式, 即内域积分形式的加权余量法, 要求近似解 $U^{[n]}(x)$ 满足边界条件。矩量法的求解可以分为三个过程。

(1) 离散化过程

这一过程的目的是将算子方程化为代数方程。具体步骤为:

- 1) 在算子的定义域内选择一组基函数, $\{\varphi_\nu | \nu = 1, 2, \dots, N\}$, 要求线性无关、完备。
- 2) 将未知函数 $U(x)$ 表示为该函数的线性组合, 即:

$$U(x) \approx U^{[n]}(x) = \sum_{\nu=1}^n C_\nu \varphi_\nu \quad (8)$$

^①集肤深度是指导体中电流密度减小到导体截面表层电流密度的 $1/e$ (e 为自然底数 $e=2.718\ 281\ 83$) 处的深度。

3) 将 $U^{[n]}(x)$ 的展开式代入算子方程, 利用算子的线性性质, 将算子方程转化为代数方程。

$$LU = f \rightarrow \sum_{\nu=1}^n C_{\nu} L_{\varphi_{\nu}} = f \quad (9)$$

其中, L 是线性算子, C 是函数的线性组合的系数。

(2) 取样检验过程

取样检验的目的是使近似解 $U^{[n]}(x)$ 与准确解 $U(x)$ 之间的误差 (在某种意义上) 极小化, 具体步骤为:

1) 在算子 L 的值域内选择一组权函数 (又称检验函数) $\{\omega_u | u = 1, 2, \dots, N\}$, 他们也彼此线性无关的、完备的。

2) 将权函数 ω_u 与离散化的算子方程求内积进行抽样检验。因为要确定 n 个未知数, 需要进行 n 次抽样检验。

3) 利用算子的线性和内积的性质, 将上述内积检验方程化为矩阵方程, 即:

$$\sum_{\nu=1}^n C_{\nu} L_{\varphi_{\nu}} = f \rightarrow \sum_{\nu=1}^n C_{\nu} \langle \omega_u, L_{\varphi_{\nu}} \rangle = \langle \omega_u, f \rangle, \quad u = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

令 $\langle \omega_u, L_{\varphi_{\nu}} \rangle = Z_{u\nu}$, $\langle \omega_u, f \rangle = V_u$, 则有 $[Z_{u\nu}][C_{\nu}] = [V_u]$ 。更一般地, 可表示为:

$$[Z_{u\nu}][I_{\nu}] = [V_u] \quad (11)$$

式中, $[Z_{u\nu}]$ 为广义阻抗矩阵, $[I_{\nu}]$ 为广义电流矩阵, $[V_u]$ 为广义电压矩阵。

(3) 矩阵求解过程

得到矩阵方程后, 就可以通过常规的线性方程求解方法得到展开函数的系数, 即:

$$\begin{cases} [C_{\nu}] = [Z_{u\nu}]^{-1}[V_u] \\ [I_{\nu}] = [Z_{u\nu}]^{-1}[V_u] \end{cases} \quad (12)$$

则

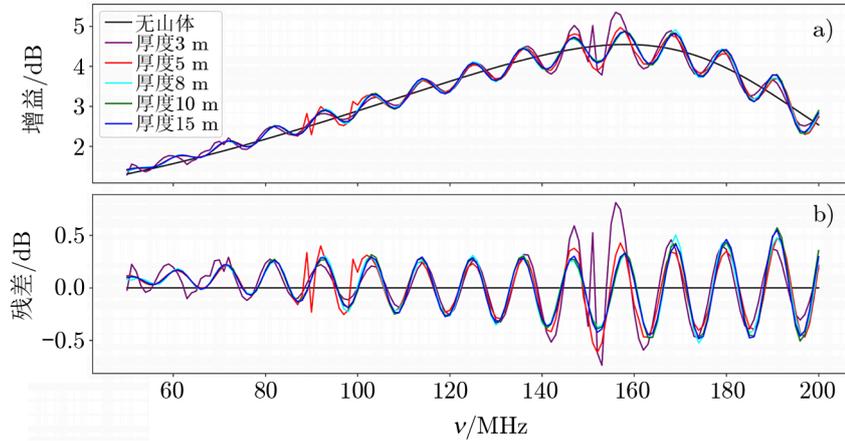
$$U^{[N]} = [\varphi]^T [C_{\nu}] \quad (13)$$

4 山体对实验天线增益的影响

利用完成的山体 CAD 模型的计算结果, 我们讨论山体的吸收、反射和散射等效应对实验天线接收信号的影响。首先确定模拟仿真需要的山体厚度, 然后讨论山体相对天线仰角 (高度角) 对天线增益的影响。

为了研究山体的厚度对实验天线在 50 ~ 200 MHz 频率范围内的影响, 山体单个曲面建模采用几个不同的厚度, 分别为 3 m、5 m、8 m、10 m、15 m。不同模型对天线增益影响的结果模拟如图 6 所示。图中的增益取对称振子天线最大指向, 即天顶方向的增益。可以

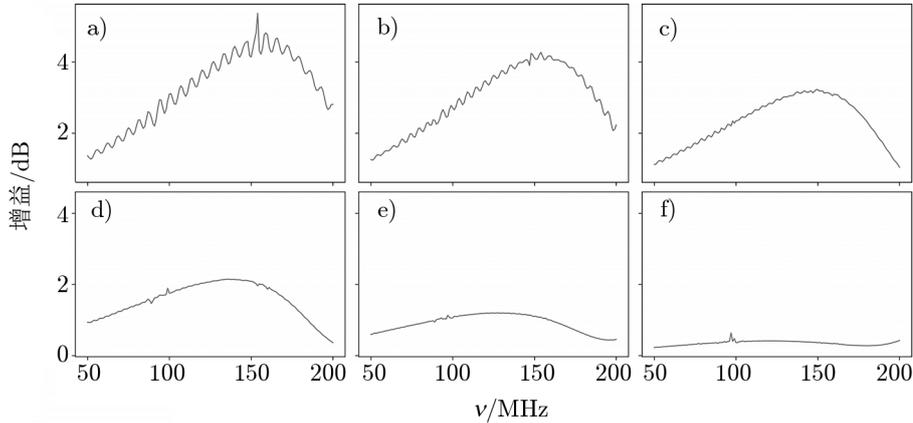
看出, 除单个山体曲面厚度为 3 m 时的结果, 其他厚度的山体对天线增益的影响没有太大的差别。因此, 对于我们所关心的频率范围, 我们认为山体厚度超过 10 m 后, 其对天线增益的影响不再有区别。在后续的所有模拟中, 我们以单个山体曲面厚度为 5 m, 山体离天线的距离为 30 m, 山体倾角为 45° , 山体的基础材质为砾岩, 地面设为沙地, 作为一个基准设置。不同的模拟会在此基准设置上, 改动 1 或 2 个参数, 并保持其他参数不变。



注: a) 天线增益; b) 天线增益残差。紫色、红色、湖蓝色、绿色和蓝色实线分别表示山体模型单面厚度为 3 m、5 m、8 m、10 m 和 15 m 时天顶方向的增益或残差, 黑色实线表示不考虑山体的情况。

图 6 不同山体厚度的天线增益效果

在确定山体表面厚度后, 接着讨论不同角度对天线增益的影响。计算结果如图 7 所示, 距离实验天线 30 m 的山体对天线增益影响最大的方向集中在天顶方向。不论是天线增益本身的幅度, 还是增益变化的震荡形式, 都显示天线天顶方向增益受山体的影响最大。



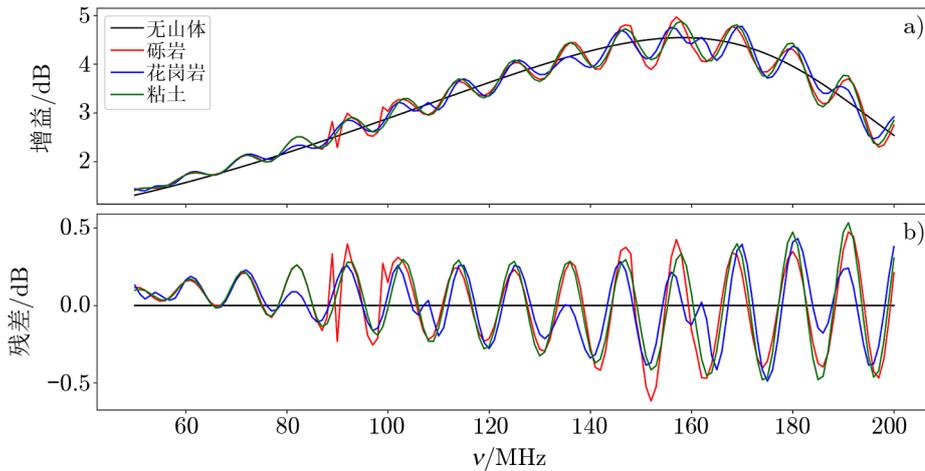
注: a)、b)、c) 分别表示天线高度角为 0° 、 15° 、 30° 时随频率变化的天线增益, d)、e)、f) 分别表示高度角为 45° 、 60° 、 75° 时随频率变化的天线增益。

图 7 不同高度角的天线增益效果

我们将讨论不同山体材质在不同情况下对实验天线的影响。

4.1 均匀材质的山体模型

首先, 我们假设组成山体材质是均匀的, 材质分别设置为砾岩、花岗岩和粘土。在考虑山体材质后的天线增益与不考虑山体情况的天线增益相减后, 发现砾岩材质产生的影响比其他材质稍大 (见图 8), 但与不考虑山体的情况相比, 三种材质都会对天线增益产生明显的扰动。山体材质为砾岩、花岗岩和粘土与不考虑山体情况的增益相减后的残差 (residual) 的最大幅值分别为 0.61 dB、0.49 dB 和 0.53 dB, 标准差 (standard deviation, SD) 分别为 $\sigma = 0.241$ dB、0.194 dB 和 0.236 dB (见表 3)。由数据看, 花岗岩的影响最小, 原因可能是花岗岩对辐射的吸收率比其他两者都低。



注: a) 天线增益; b) 天线增益残差。红色、蓝色、绿色实线分别表示山体模型的组成材质为砾岩、花岗岩、粘土时天顶方向的天线增益或其残差, 黑色实线表示不考虑山体的情况。

图 8 不同山体材质的天线增益效果

表 3 不同山体材质的天线增益残差与标准差 dB

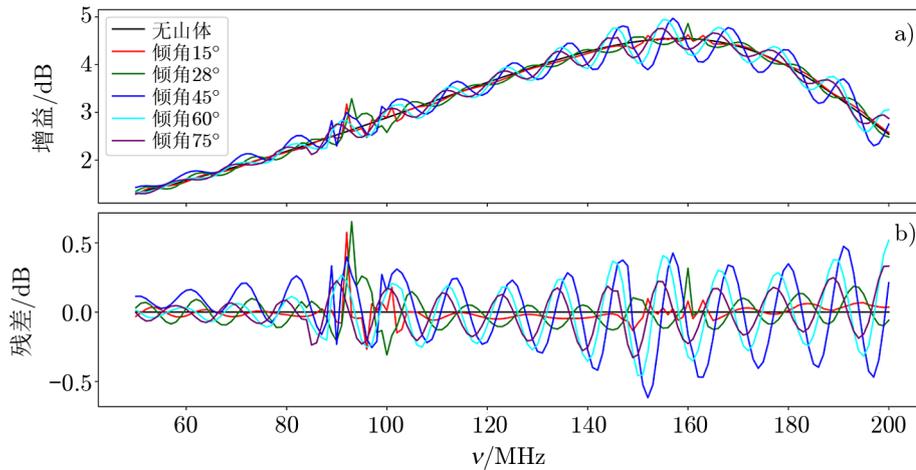
材质	残差	标准差
砾岩	0.61	0.241
花岗岩	0.49	0.194
粘土	0.53	0.236

其次, 我们考虑山体倾角不同的情况, 取山体倾角分别为 15° 、 28° 、 45° 、 60° 、 75° , 山体组成成分都假设为均匀的砾岩, 通过模拟得到的天线增益扰动最大幅值和标准差见表 4。由表可知, 倾角为 45° 时影响最大, 其残差最大幅值为 0.65 dB, 标准差为 $\sigma = 0.241$ dB; 倾角为 15° 时影响最小, 其残差最大幅值为 0.21 dB, 标准差为 $\sigma = 0.067$ dB。因此当山体倾角为 45° 时, 其对天顶方向的天线增益影响是最大的, 其他倾角的山体对天线增益的影响会减弱。由图 9a) 和 b) 可知, 不同倾角的山体影响的衰减速度不同, 由 45° 至角度增

大方向, 影响减小的衰减速度较缓; 由 45° 至角度减小方向, 影响减小的衰减速度较快。

表 4 不同山体倾角的天线增益残差和标准差 dB

倾角	残差	标准差
15°	0.21	0.067
28°	0.26	0.109
45°	0.65	0.241
60°	0.49	0.196
75°	0.37	0.138



注: a) 天线增益; b) 天线增益残差。红色、绿色、蓝色、湖蓝色、紫色实线分别表示山体倾角为 15° 、 28° 、 45° 、 60° 、 75° 时在天顶方向的天线增益或其残差, 黑色实线表示不考虑山体的情况。

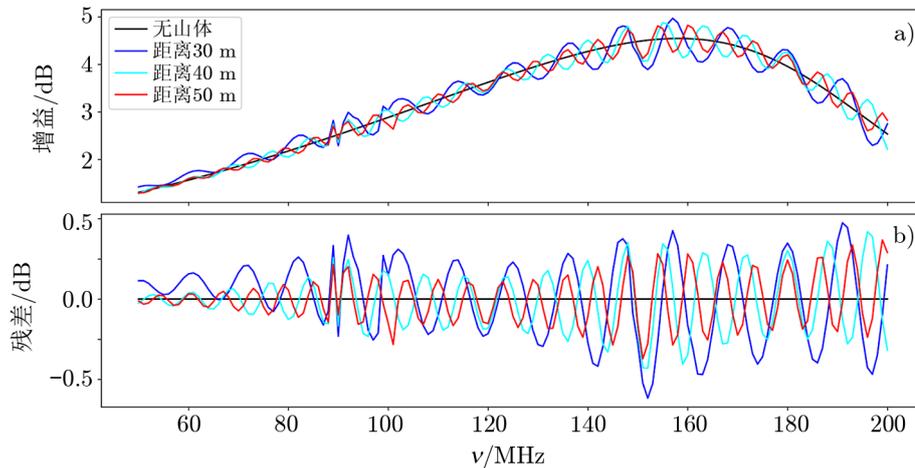
图 9 不同山体倾角的天线增益效果

接着, 我们假设山体组成成分均为砾岩, 并且山体倾角均为 45° ; 将山体高度均设为其距观测天线 30 m 远时的高度, 且这个高度保持不变, 也不改变山体的地形轮廓; 然后我们研究三种不同的情况, 即山体距离观测天线分别为 30 m、40 m、50 m 的情况。不同的山体距离对实验天线增益的扰动与不考虑山体情况下的区别见表 5, 此处我们计算残差最大幅值时除去了数值计算造成的突变点。与不考虑山体的情况相比, 扰动较大的是距离天线最近的, 较小的情况是距离天线最远的情形。由图 10 可以明显看出, 当山体的高度不变时, 距离观测天线位置越远, 相应天线增益扰动幅度越小; 反之, 距离观测天线位置越近, 相应天线增益扰动幅度越大。

假设山体组成材质均为砾岩, 倾角均为 45° ; 山体的高度角不变, 山体的高度随距离的变化成正比, 总的地形轮廓不变; 我们研究距离天线位置分别为 30 m、40 m、50 m 的情况。考虑不同距离山体影响的天线增益与不考虑山体情况的差值最大幅度和标准差见表 6。在这种情况下, 对天线增益影响最大的情况是山体距离天线最近的情况; 虽然山体的距离设

表 5 高度相同但山体离观测点距离不同的天线增益残差与标准差

距离/m	残差/dB	标准差/dB
30	0.62	0.241
40	0.43	0.179
50	0.37	0.146



注: a) 天线增益; b) 天线增益残差。该组三个山体模型的高度均为距观测点 30 m 远的高度。蓝色、湖蓝色、红色实线分别表示山体距观测点 30 m、40 m、50 m 远时在天顶方向的天线增益或其残差, 黑色实线表示不考虑山体的情况。

图 10 同高度但山体离观测点距离不同的天线增益效果

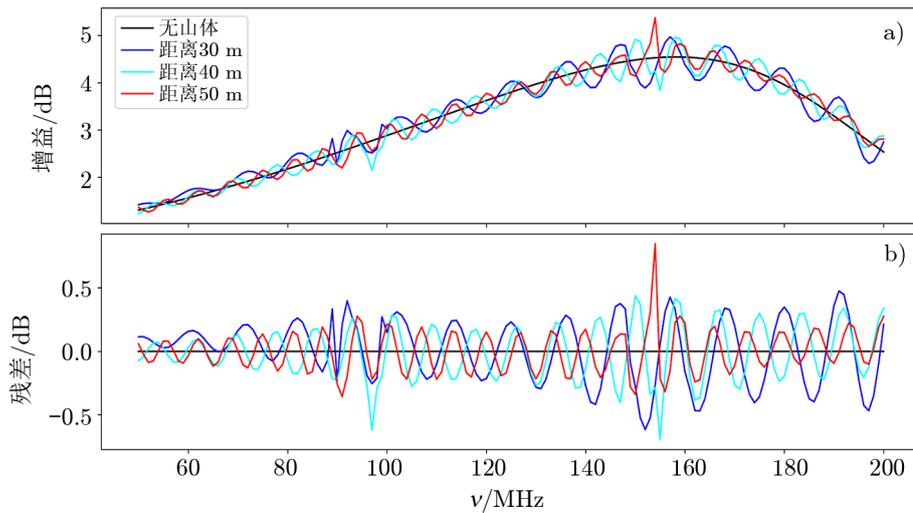
得越远, 高度越高, 面积也随之增加, 但是在我们的模拟下, 山体距离天线位置远近仍然是主导因素 (见图 11)。

表 6 高度角相同但山体离观测点距离不同的天线增益残差与标准差

距离/m	残差/dB	标准差/dB
30	0.62	0.241
40	0.48	0.204
50	0.39	0.160

最后, 假设山体组成材质均为砾岩, 倾角均为 45° ; 山体分段呈错落无规则排列, 山的高度也随着距离的远近而变化, 更接近真实的情况; 我们研究距离分别为 50 m、70 m 和 80 m 的情形。山体是不连贯的, 并且有很多突兀的断节, 但因为高度角不变, 距离越远其高度越高, 以天线中心位置为起点, 山体投影到远处的轮廓不会改变。我们假设被高山挡住的山不会产生影响, 所以没有对高山后面的矮山进行建模。

与之前距离相同整齐排列的山体 (距离观测天线 50 m 远的山体) 相比, 其总距离相对



注: a) 天线增益; b) 天线增益残差。该组三个山体模型的高度角不变, 高度随着距离的增大而增大。蓝色、湖蓝色、红色实线分别表示山体距观测点 30 m、40 m、50 m 远时在天顶方向的天线增益或其残差, 黑色实线表示不考虑山体的情况。

图 11 同高度角但山体离观测点不同距离的天线增益效果

更远, 总面积也相对更大, 所以影响自然也会随之变大, 考虑错落排列和整齐排列山体后的天线增益与不考虑山体情况的残差最大幅值和标准差见表 7。由表可知, 错落无规则排列的山体模型在实际情况下将会对天线增益造成更大的影响 (见图 12)。

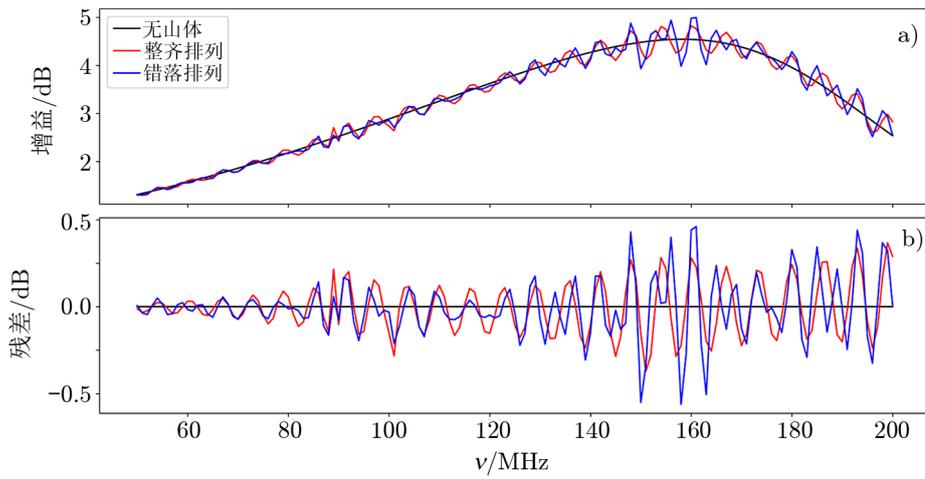
表 7 不同排列方式的山体天线增益残差与标准差 dB

排列方式	残差	标准差
整齐排列	0.37	0.146
错落排列	0.56	0.168

4.2 非均匀材质山体模型

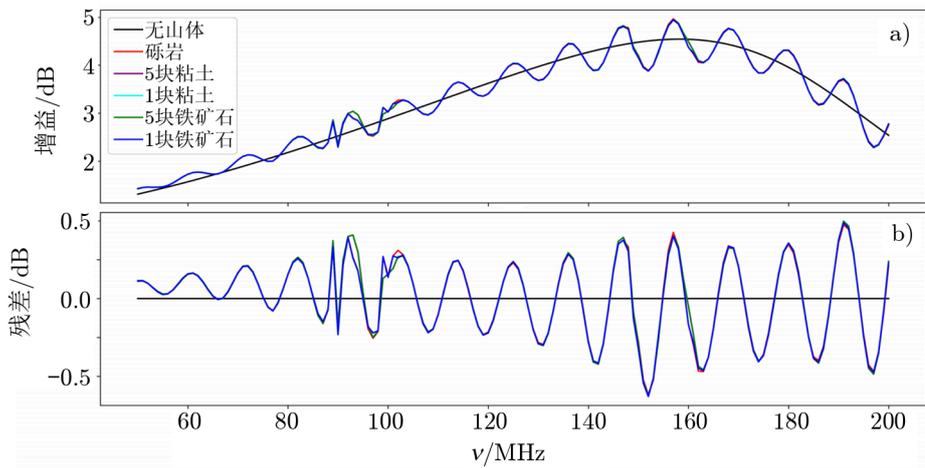
在现实情况下, 山体的组成材质往往不是均匀单一的。这种不均质性对以测量天体平均温度为主的总功率实验, 可能会引入额外的干扰。因此, 我们将通过模拟来研究不均匀的山体成分对天线增益的影响。

在基础模型上, 根据方位角, 在某一个方向上或者某五个方向上取角度约为 4° 的山体, 将其组成材质改为花岗岩或粘土。由图 13 可知, 该组所有模型得到的结果几乎都是重合的, 无论不均匀程度如何, 即取一个约为 4° 的方向还是在多个方向上改变组成材质, 对于天线增益都会产生影响, 而且影响的程度几乎都相同。考虑不均匀材质山体的天线增益与不考虑山体情况的残差最大幅值均为 0.62 dB, 在一个约为 4° 的方向上改变其组成材质, 标准差为 $\sigma = 0.241$ dB; 在五个约为 4° 的方向上改变其组成材质, 标准差为 $\sigma = 0.243$ dB (参见表 8)。可见, 山体材质组成的不均匀性几乎不会影响到天线增益。



注: a) 天线增益; b) 天线增益残差。红色和蓝色实线分别是山体模型呈整齐排列和错落排列时在天顶方向的情况, 黑色实线表示不考虑山体的情况。

图 12 山体错落排列与山体整齐排列的天线增益效果



注: a) 天线增益; b) 天线增益残差。红色实线表示山体材质为均匀的砾岩时在天顶方向的情况, 紫色和湖蓝色实线分别表示把五个和一个约为 4° 方向的山体模型花岗岩材质变为粘土时在天顶方向的天线增益或其残差, 绿色和蓝色实线分别表示把五个和一个约为 4° 方向的山体模型材质变为铁矿石时在天顶方向的天线增益或其残差, 黑色实线表示不考虑山体的情况。

图 13 不均匀材质的山体对天顶方向天线增益的影响

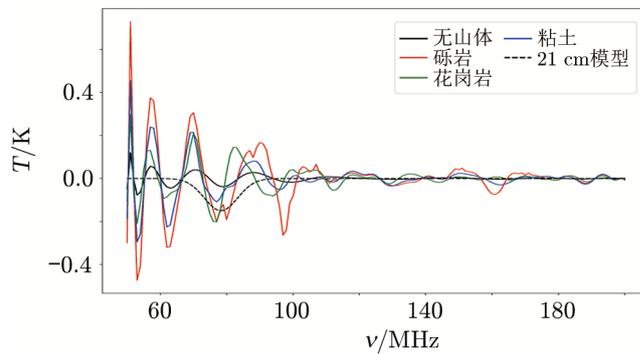
表 8 不同均匀程度材质的山体的天线增益残差与标准差 dB

不均匀程度	残差	标准差
5 块 4° 的粘土或铁矿石	0.62	0.243
1 块 4° 的粘土或铁矿石	0.62	0.241

5 山体对宇宙再电离时期中性氢信号提取的影响

我们在前文讨论了不同山体情况对实验天线增益的影响。然而我们更想知道，山体对实验天线增益的扰动是否会影响低频全天总功率实验中再电离信号的分离。

在前面的章节讨论过三种不同材质但均匀的山体，它们对天线增益的影响并不大，但是对我们利用多项式拟合前景以提取再电离信号的影响不能忽视。山体材质为砾岩时对信号提取产生的影响最大（见图 14），计算其标准差值得得 $\sigma = 0.111$ K，而花岗岩和粘土的分别为 $\sigma = 0.054$ K、 0.060 K（见表 9），天线增益偏离最大的也是砾岩。山体材质对实验产生影响的大小取决于材质本身特性，该标准差的数量级已经达到全天 21 cm 信号的数量级，说明山体材质所产生的影响值须进一步研究。



注：黑色实线为不考虑山体时天线温度与拟合前景温度的残差，红色、绿色、蓝色实线分别是天线温度与山体材质为砾岩、花岗岩、粘土时拟合前景温度的残差，黑色虚线为 21 cm 信号理论模型。

图 14 不同均匀材质的山体对提取 21 cm 信号的影响对比

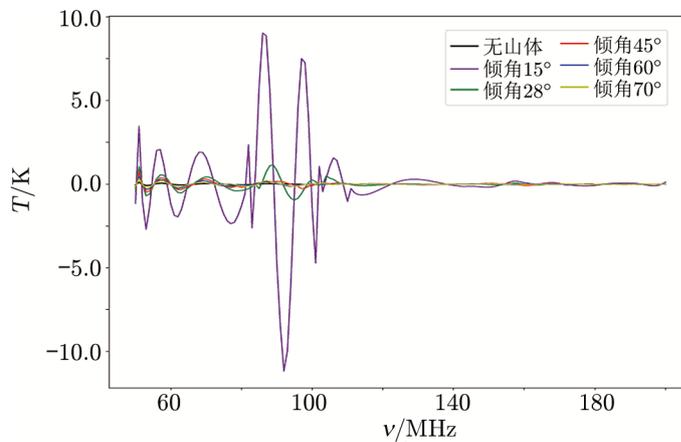
对于材质均匀但倾角不同的山体，倾角为 45° 时对天线增益影响最大；对 21 cm 信号提取的影响最大的不是倾角为 45° ，而是倾角为 15° （见图 15）。各山体倾角与其标准差见表 9。由表可知，山体倾角对信号提取所产生的影响与对天线增益产生的影响并不同（以 45° 为中心向两边衰减），而是倾角越小所产生的影响越大，这是辐射绕射而产生的结果。

对于材质均匀、高度相同但距离不同的山体，山体离天线距离与其标准差见表 9。由表可知，距离观测天线位置越远，对天线增益产生的影响越小，对提取信号的影响也越小，但是这两种影响并非一致（见图 16）。对于材质均匀、高度角相同但距离不同的山体，山体离天线距离与其标准差见表 9。由表可知，距离观测天线越远对天线增益的影响越小，而对 21 cm 信号提取的最大影响发生在距离观测天线最远的 50 m 情况（见图 17）。

将错落排列的山体与整齐排列的山体进行对比。整齐排列的山体距离观测天线均为 50 m。错落排列的山体离观测天线最近的是 50 m，最远的是 80 m；高度也随着距离的增加而增加，以保证山体的轮廓与整齐排列的一致。错落排列的模型也更加接近真实的山体情况，山体呈错落排列时，其标准差 $\sigma = 0.051$ K；而整齐排列时， $\sigma = 0.038$ K（见表 9）。结果显示，错落排列的山体对提取 21 cm 信号的影响更大，这是因为错落排列的山体面积比整齐

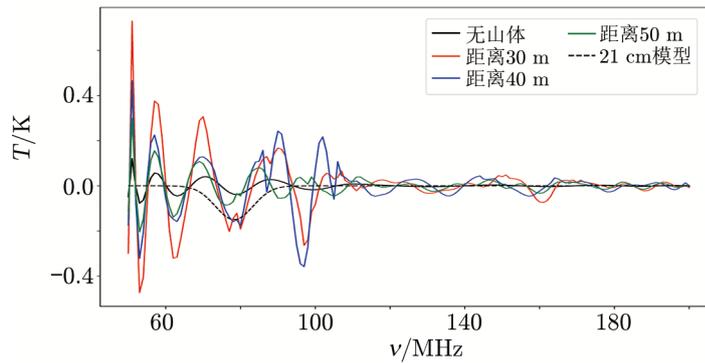
表 9 山体对天线增益和信号提取影响的标准差 $RMSE$ 情况

参数	参数值	天线增益标准差/dB	信号提取标准差/K
材质	砾岩	0.241	0.111
	花岗岩	0.194	0.054
	黏土	0.236	0.060
倾角	15°	0.067	2.380
	28°	0.109	0.278
	45°	0.241	0.111
	60°	0.196	0.070
	75°	0.138	0.050
距离 (高度相同)	30 m	0.241	0.111
	40 m	0.179	0.089
	50 m	0.146	0.038
距离 (高度角相同)	30 m	0.241	0.111
	40 m	0.204	0.062
	50 m	0.160	0.508
排列方式	整齐排列	0.146	0.038
	错落排列	0.168	0.051
不均匀程度	5 块 4° 的粘土或铁矿石	0.243	0.121
	1 块 4° 的粘土或铁矿石	0.241	0.079



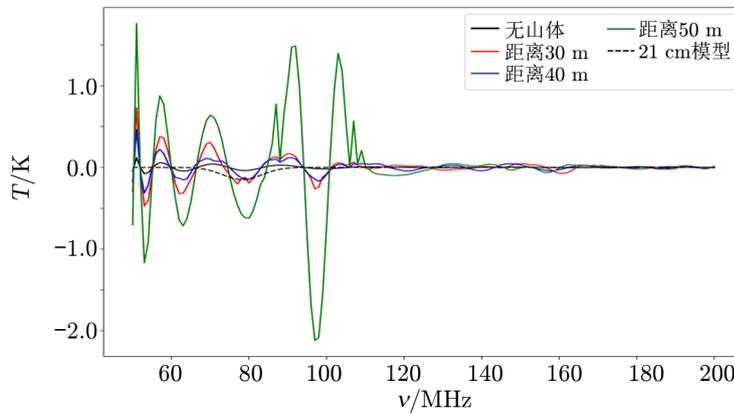
注: 黑色实线为不考虑山体时天线温度与拟合前景温度的残差, 紫色、绿色、红色、蓝色、黄色实线分别是天线温度与山体倾角为 15°、28°、45°、60°、75° 时拟合前景温度的残差, 黑色虚线为 21 cm 信号理论模型。

图 15 不同倾角的山体对提取 21 cm 信号的影响对比



注：该组 3 个山体模型的高度均为距观测点 30 m 远的高度。黑色实线为不考虑山体时天线温度与拟合前景温度的残差，红色、蓝色、绿色实线分别是天线温度与山体距观测点为 30 m、40 m、50 m 时拟合前景温度的残差，黑色虚线为 21 cm 信号理论模型。

图 16 不同距离等高的山体对提取 21 cm 信号的影响对比

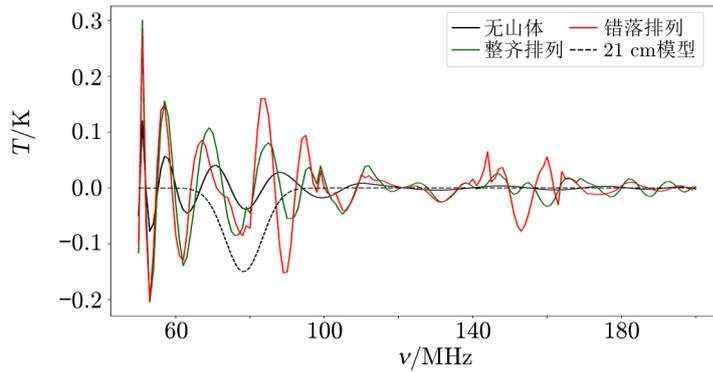


注：该组 3 个山体模型的高度角不变，随距离增大而增大。黑色实线为不考虑山体时天线温度与拟合前景温度的残差，红色、蓝色、绿色实线分别是天线温度与山体距观测点为 30 m、40 m、50 m 时拟合前景温度的残差，黑色虚线为 21 cm 信号理论模型。

图 17 不同距离等高度角的山体对提取 21 cm 信号的影响对比

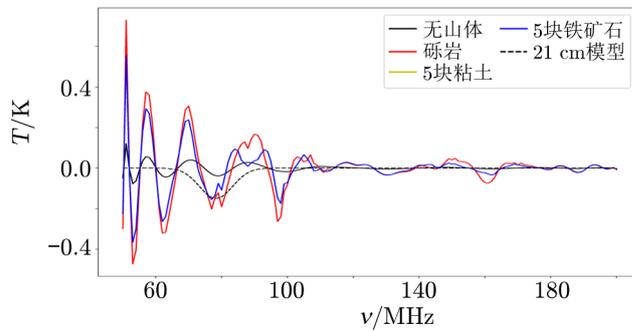
排列的更大，情况也更复杂（见图 18）。

对于非均匀材质的山体，其不均匀程度对天线增益的影响几乎相同，但是对提取信号的影响有区别。把山体的组成材质在五个约 4° 方向上换成粘土或铁矿石后再提取信号的结果一样，其标准差均为 $\sigma = 0.079$ K，在一个约 4° 方向上换成粘土或铁矿石后再提取信号的结果也一样，其标准差均 $\sigma = 0.121$ K，但与山体组成材质为均匀的砾岩时（ $\sigma = 0.111$ K）还是有区别（见表 9）。并且，多个方向换相同山体组成材质比一个方向上换产生的影响更大（见图 19、20）。这说明在均匀程度相同的情况下，不论把山体的组成材质换成什么材质，只要占比不过高，那么对于信号提取的影响就一样。在换取材质相同的情况下，山体材质不均匀的程度越大，影响信号提取的程度就越大；不均匀程度越小，影响程度就越小。



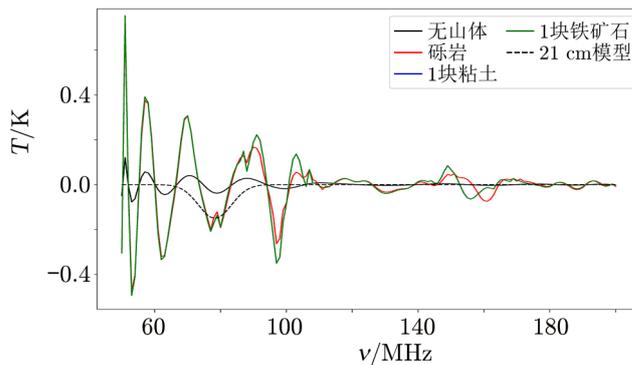
注: 黑色实线为不考虑山体时天线温度与拟合前景温度的残差, 红色实线是天线温度与山体呈错落排列时拟合前景温度的残差, 绿色实线是天线温度与山体呈整齐排列时拟合前景温度的残差, 黑色虚线为 21 cm 信号理论模型。

图 18 不同排列方式的山体对提取 21 cm 信号的影响对比



注: 黑色实线为不考虑山体时天线温度与拟合前景温度的残差, 红色实线表示天线温度与山体材质为均匀的砾岩时拟合前景温度的残差, 黄色、蓝色实线表示天线温度与五个约为 4° 方向为粘土、铁矿石时拟合前景温度的残差, 黑色虚线为 21 cm 信号理论模型。

图 19 多方向非均匀材质的山体对提取 21 cm 信号的影响对比



注: 黑色实线为不考虑山体时天线温度与拟合前景温度的残差, 红色实线表示天线温度与山体材质为均匀的砾岩时拟合前景温度的残差, 蓝色、绿色实线表示天线温度与一个约为 4° 方向上为粘土、铁矿石时拟合前景温度的残差, 黑色虚线为 21 cm 信号理论模型。

图 20 一个方向非均匀材质的山体对提取 21 cm 信号的影响对比

6 总结与讨论

本文主要研究山体环境对于低频全天总功率实验的影响,包括对天线增益的扰动和对扣除前景提取 21 cm 信号的影响。接收天线用双臂为薄板的偶极子单天线,我们利用网络高程数据得到模拟地点位置周围的山体轮廓来构建模型,再基于 MOM 矩量算法对其进行电磁仿真计算。我们考虑了山体的材质、高度、距离、倾角及山体表面成分的均匀程度,搭建了一系列模型进行比较分析,得出如下结论。

(1) 周围山体倾角对低频天线的增益和宇宙再电离时期中性氢信号的提取都会产生一定的影响。对于天线增益,山体倾角为 45° 时产生的影响最大,其标准差为 $\sigma = 0.241$ dB,且以 45° 倾角为中心,往两边影响逐渐减小;影响程度在两个方向的减小速度并不一样,往 0° 方向减小更快, 90° 方向较缓。对于信号的提取,山体倾角越小,山体产生的影响会越大。山体倾角为 15° 时,对信号提取产生的影响最大,其标准差为 $\sigma = 2.380$ K。

(2) 山体的组成材质对天线的增益和宇宙再电离时期中性氢信号的提取也会产生一定的影响。对于天线增益,均匀材质的山体影响的程度取决于材质本身的特性;模拟结果显示,非均匀材质的山体对天线增益的扰动与均匀材质无明显区别。对于信号的提取来说,均匀材质的山体影响的程度也是取决于材质本身的特性,非均匀材质的山体影响的程度取决于山体不均匀的程度。如在均匀材质为砾岩的基础上把五个约为 4° 方向换成铁矿石或粘土,其标准差为 $\sigma = 0.121$ K;而把一个约 4° 方向换成铁矿石或粘土,其标准差为 $\sigma = 0.079$ K;各向异性程度越大,对信号提取的影响也越大。

(3) 对于天线增益,当山体高度不变,而改变山体距实验天线的距离时,距离越远对天线增益的影响越小,距天线 30 m 时其标准差为 $\sigma = 0.241$ dB,而距天线 50 m 时其标准差为 $\sigma = 0.146$ dB;当高度角不变,改变距离时,也是距离越远对天线增益的影响越小,距天线 30 m 时其标准差为 $\sigma = 0.241$ dB,而距天线 50 m 时其标准差为 $\sigma = 0.160$ dB。对于信号的提取,当山体高度不变,改变山体距实验天线的距离时,距离越远对信号提取的影响越小,距天线 30 m 时其标准差为 $\sigma = 0.111$ K,而距天线 50 m 时其标准差为 $\sigma = 0.038$ K。当高度角不变,改变距离时,距离越远对信号提取的影响反而越大,距天线 30 m 时其标准差为 $\sigma = 0.111$ K,而距天线 50 m 时其标准差为 $\sigma = 0.508$ K。

(4) 如果山体错落排列,不论是对天线增益还是信号提取,错落排列山体产生的影响都大于整齐的环形排列山体产生的影响。对于天线增益,错落排列山体产生的影响标准差为 $\sigma = 0.168$ dB,而整齐排列时 $\sigma = 0.146$ dB。对于信号提取,整齐排列山体产生的影响标准差 $\sigma = 0.051$ K,而错落排列时 $\sigma = 0.038$ K,所以实际情况产生的影响远比整齐排列的山体模型得到的结果大。

总而言之,山体环境会对低频全天总功率单天线实验造成一定的影响,但是影响大小不同,方式也不同。对于表征天线温度的亮温度,山体所带来的影响已经达到甚至超过全天 21 cm 信号的数量级,要想提高信号提取的精确度,最好避免实验天线离山体太近。如果确实无法避免,可能需要进一步仔细研究山体对低频全天总功率单天线实验的影响。

在本工作中, 对天线增益的仿真都是基于矩量法的电磁数值模拟。在模拟山体计算天线增益时, 采用三角形划分网格, 但选用的三角形边长尺寸不是最优; 如果选择最优边长则会非常耗时, 占太多储存空间, 同时也会耗费过多的计算资源。虽然网格划分选择并不是最优的, 但选用的 MOM 矩量法非常精确, 所以得到的结果精确度也比较高。但是, 建模过程中, 山体由许多小块的曲面围成, 与实际山体相比, 其表面的凹凸情况被简化, 这将导致一定的误差, 建模则不够精确, 所以模拟结果可能与真实的情况有一定的差别。

本工作利用多项式拟合来扣除前景, 但即使在没有山体的情况下, 去除前景的效果也不太好。因此, 后续工作还需要进一步优化目前的多项式拟合扣除前景的算法, 并再次测试山体对于提取宇宙再电离中性氢信号的影响。此外, 本工作没有考虑仪器噪声和其他 RFI 干扰对于实验的影响, 所以实际情况可能比本文所讨论的问题更复杂。未来研究中, 只有全面排除这些干扰因素, 我们才能进一步提高实验的精度, 从而满足测量宇宙再电离中性氢信号所需的精度要求。

参考文献:

- [1] Yoo J, Miralda-Escude J. *ApJ*, 2004, 614: 25
- [2] Barkana R, Loeb A. *Physics Reports*, 2001, 349(2): 125
- [3] de Lera Acedo E. *Nature Astronomy*, 2022, 6: 984
- [4] Patra N, Subrahmanyan R, Sethi S, et al. *ApJ*, 2014, 801(2): 138
- [5] Voytek T C, Natarajan A, Jauregui-Garcia J M, et al. *ApJ*, 2014, 782(1): 9
- [6] Price D C, Greenhill L J, Fialkov A, et al. *MNRAS*, 2018, 478(3): 4193
- [7] Sokolowski M, Tremblay S E, Wayth R B, et al. *PASA*, 2015, 32: e004
- [8] Philip L, Abdurashidova Z, Chiang H C, et al. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2019, 8(02): 1954
- [9] Yoshida N, Omukai K, Hernquist L, et al. *ApJ*, 2008, 652(1): 6
- [10] Bassett N, Rapetti D, Tauscher K, et al. *ApJ*, 2021, 923(1): 3
- [11] Rogers Alan E E, Barrett John P. <https://arxiv.org/abs/2212.04526>, 2023
- [12] Spinelli M, Kyriakou G, Bernardi G, et al. *MNRAS*, 2022, 515(2): 1508
- [13] De Oliveiracosta A, Tegmark M, Gaensler B M, et al. *MNRAS*, 2008, 388: 247
- [14] Gorski K M, Hivon E, Banday A J, et al. *ApJ*, 2004, 622(2): 759
- [15] Bowman J D, Rogers A, Monsalve R A, et al. *Nature*, 2018, 555(7694): 67
- [16] Bowman J D, Rogers A E E. *Nature*, 2010, 468(7325): 796
- [17] Farr T G, Rosen P A, Caro E, et al. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2): 361
- [18] Smith D E, Zuber M T, Jackson G B, et al. *Space Science Reviews*, 2010, 150(1): 209
- [19] Davidson D B. *Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2006, 20(12): 27

Effects of the Surrounding Mountains on the Extraction of Signals from the Global 21 cm Signal Experiment

SHEN Ting-yan^{1,2}, YU Yun², GU Jun-hua³, HUANG Yan³, GUO Quan²

(1. School of Physical and Electronic Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

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

3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: In this paper, we examine the influence of the surrounding mountains around the experimental antenna on the extraction of signals in the global 21 cm experiment. The change in antenna gains introduced by varying the height of the mountain, the angle of slope, the composition of the mountain, the consistency of the composition of the mountain, the distance from the mountain to the antenna, and other factors of the model is simulated using the moment hybrid numerical algorithm. We further analyze the impact of these factors on the antenna in obtaining neutral hydrogen signals. The results show that the characteristics of the mountain, including its height, distance from the observation point, inclination angle, composition material, and surface composition consistency, not only affect the antenna gain, but also further affect the polynomial fitting subtraction of the foreground in the experiment. Specifically, for antenna gain, when the mountain height remains unchanged, the farther the mountain is from the antenna, the smaller the effect on antenna gain.

Key words: antenna gain; the characteristics of the mountain; global 21 cm signal