

低频SKA极化探究I：极化效应对EoR信号的影响

唐远志, 张利*, 王旭, 肖一凡, 陈丽绵, 冉文兵

贵州大学大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2021年12月22日; 录用日期: 2022年1月21日; 发布日期: 2022年1月28日

摘要

探测再电离21 cm信号是存在困难的, 即便在比EoR信号高四至五个数量级的前景干扰信号被去除后, 由于相关仪器效应仍然能够对EoR信号的探测产生很严重影响。本文旨在通过低频SKA阵列探究极化效应对EoR信号的影响进行探究。在这里, 我们在154~162 MHz频段下, 在场中央 $2^\circ \times 2^\circ$ 天区, 通过模拟数据生成在不同极化STOKES参数下的EoR天图, 并生成二维功率谱。通过对比我们发现在各种极化STOKES参数的作用下, 其二维功率谱与总强度具有类似的结构, 该研究可为后续极化效应的消除提供理论认知和实验基础。

关键词

SKA, EoR信号, 极化

Low Frequency SKA Polarization Exploration I: The Influence of Polarization Effect on EoR Signal

Yuanzhi Tang, Li Zhang*, Xu Wang, Yifan Xiao, Limian Chen, Wenbing Ran

College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Dec. 22nd, 2021; accepted: Jan. 21st, 2022; published: Jan. 28th, 2022

Abstract

Detecting the epoch of reionization (EoR) 21-cm signal is still very difficult due to the relevant in-

*通讯作者 Email: lizhang.science@gmail.com

文章引用: 唐远志, 张利, 王旭, 肖一凡, 陈丽绵, 冉文兵. 低频 SKA 极化探究 I: 极化效应对 EoR 信号的影响[J]. 应用物理, 2022, 12(1): 35-45. DOI: 10.12677/app.2022.121005

strument effects, even after the foreground interference that is four to five orders of magnitude higher than the EoR signal is removed. This paper is based on the low-frequency SKA array to explore the influence of polarization effects on EoR signals. In the $2^\circ \times 2^\circ$ sky area in the center of the field, we use simulation data to generate EoR sky map and two-dimensional power spectrum under different polarization STOKES parameters in the 154~162 MHz frequency band. The results indicate that two-dimensional power spectrum has a similar structure to total intensity under various polarization STOKES parameters, which can provide theoretical cognition and experimental basis for the elimination of subsequent polarization effects.

Keywords

SKA, EoR Signal, Polarization

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

宇宙再电离大约开始于宇宙大爆炸后 4 亿年, 那是第一代恒星形成并释放出第一缕曙光的时候, 此时恒星与星系发射出的高能光子被部分透出, 造成了周围星系一个比较微弱的气体电离。随着星系的不断形成, 电离区逐渐扩大并相互连结。当电离区覆盖整个宇宙中的星系际介质时, 再电离完成。因此, 宇宙再电离是星系形成与演化过程中的关键阶段, 是现今宇宙学和天体物理学的一个重要的研究热点。21 cm 线是中性氢原子基态的超精细结构谱线, 直接与宇宙中的中性氢相关联。一方面, 21 cm 线自发跃迁概率尤为低, 在较大甚至完全中性的环境下均很难饱和, 故很适合用于探测宇宙再电离时期的中性结构; 另一方面, 21 cm 谱线频率已知, 在不同射电波段观测 21 cm 谱线对应的是不同红移处的信号, 则可以方便我们得到宇宙结构演化以及星系介质电离过程的三维信息。因此中性氢的 21 cm 线是研究这一时期, 以及再电离前的“黑暗时期”的重要工具[1]。

现今, 新一代的低频、大视场、宽带射电干涉仪具有直接探测 EoR 信号中性氢 21 cm 谱线的可能性, 红移波长范围为 1.5~3 米(对应于 100~200 MHz), 相对于宇宙微波背景辐射(CMB)的亮度差异。这些可用于探测 EoR 信号大型射电望远镜阵列分别为: 巨型米波射电望远镜(GMRT)、低频阵列(LOFAR)、默奇森宽场阵列(MWA)、探测 EoR 的精密阵列(PAPER)以及平方公里射电阵(SKA) [2] [3] [4]。

在低频射电波段(50~200 MHz)探测 EoR 的中性氢 21 cm 谱线是目前已提出的研究该时期的最直接和有效的办法。然而, 由于 EoR 信号非常微弱, 且淹没在比它强约 4~5 个数量级的前景干扰之中, 因此在研究 EoR 时必须深刻理解各个前景干扰成分的性质, 研发具有针对性的前景扣除和 EoR 信号分离算法探测宇宙再电离时代。21 cm 信号最大的挑战是, 当前景干扰成分被去除后, STOKESI 天图的残留成分含有极化辐射泄漏, 它能产生类似信号, 进一步对宇宙再电离信号产生干扰[5]。天线接收到的某一极化成分(STOKES Q 或 U 分量)的强度也依赖于频率, 这种效应能够损坏前景辐射频谱的光滑性。同时, 仪器由于无法完全隔离各极化成分的测量, 因此会有少量(~1%)极化辐射泄漏到总辐射强度里, 从而对前景频谱的光滑性产生破坏, 阻碍前景干扰的准确识别与扣除。Asad 和 Koopmans 等人, 讨论了 LOFAR 的仪器极化和 STOKES 参数之间的泄露, 并使用功率谱对 EoR 信号在不同极化方式下进行了比较[2]; Kohn 和 Aguirre 等人, 从 PAPER 32 成像阵列中在不同 STOKES 参数作用下创建并分析了二维功率谱, 得出 STOKES Q、U 和 V 与 I 具有类似的楔形形状[6] [7]。

在本文中,我们的目的是探究极化效应对 EoR 信号的影响,并量化四个极化 STOKES 参数下的成像效果与对 EoR 信号二维功率谱的影响。本文的结构如下:在第 2 节我们将对理论部分做一个简要说明,主要讲述射电天文成像、二维功率谱生成以及极化的相关背景知识;在第 3 节我们将详细描述我们此处的实验,通过分析 EoR 信号天图和二维功率谱的结果去对比极化效应对 SKAEoR 探测的影响;第 4 节中,我们列出了本文的主要结论。

2. 低频 SKA 极化效应的相关理论

射电干涉阵列的复杂仪器极化效应是制约 EOR 探测的一个重要因素,它会很大程度地干扰前景成分,进而造成二维功率谱上的前景楔形干扰。因此,在模拟成像的过程中,应当充分考虑仪器极化效应。

本文采用目前最新的 SKA1-Low 阵列布局,通过对模拟得到的天图进行观测模拟,进一步获得包含仪器极化效应的 SKA1-Low 观测图像。SKA1-Low 干涉阵列由 512 个站点组成,每个站点包含 256 根天线,合计 131072 根天线。每个站点呈直径 35 m 的圆形区域,256 根天线随机分布其中并且满足最小间隔 $d_{\min} = 1.5$ 米。512 个站点的布局方式分为两种情况:

- 核心区域(半径 $R \leq 500$ m): 随机分布 224 个站点;
- 核心区域之外:余下的 288 个站点构成 48 个站点团(每个团由 6 个站点组成),分布在 3 条半径达 35 km 的螺旋线上形成长达 65 km 的基线。

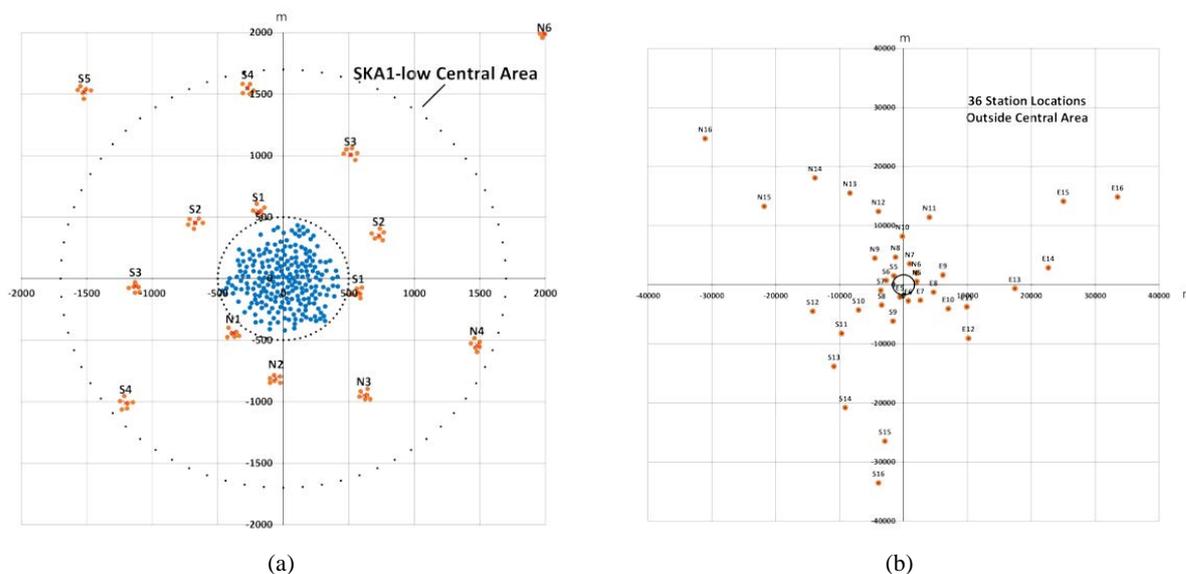


Figure 1. The layout of sites in the central area and the layout of sites outside the central area [1]

图 1. 中央区域的站点布局和中央区域之外的站点布局[1]

图 1(a)为中央区域的站点布局,其半径 d 为 $d \leq 1700$ m,包括 224 个随机分布在核心区域($d \leq 500$ m)的站点,以及 12 个分布在核心区域之外的站点团;图 1(b)为中央区域之外的站点布局,主要由分布在 3 条螺旋线上的 36 个站点团构成[8]。

2.1. 观测成像

单口径射电望远镜分辨率大小受限于望远镜天线的直径大小,也即限制了所观测到的天空相近射电源的分辨能力。我们知道角分辨率与望远镜直径成反比,当望远镜直径越大,角分辨率越小,望远镜的

识别能力就越强。但受限于当前的人类工业水平望远镜的直径的增加难以达到公里级，然而利用多个小口径望远镜进行干涉的方法可以，可以提高角分辨率。

我们可以通过一个三维空间模型表示可见度数据与天空亮度的关系。

$$V(u, v, w) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{A(l, m) I(l, m)}{\sqrt{1-l^2-m^2}} e^{[-2\pi i (ul+vm+w\sqrt{1-l^2-m^2})]} dl dm \quad (1)$$

其中， $A(l, m)$ 是方向相关的效应(Direction Dependent Effects, DDE)主要是极化效应和大气效应， $V(u, v, w)$ 是可见度数据 $I(l, m)$ 是亮度分布。 (u, v, w) 和 (l, m, n) 分别在傅里叶空间和图像空间表示空间频率和方向余弦[9] [10]。

2.2. 极化因素

天文学许多领域，对于研究来自外层空间的极化电磁辐射是非常重要的，极化存在于相干辐射天文源以及非相干源，极化可用于探测星际磁场的法拉第旋转，宇宙微波背景的极化，以及用于研究非常早去的宇宙物理学。电磁波源于麦克斯韦方程组在真空中的非零解，将电磁波电场 E 以光速 C 在欧几里得空间 (x, y, z) 中沿 z 传播，可表示为[11]

$$E(t, z) = E(0, 0) \cos(\omega t - kz - \varnothing) \quad (2)$$

t 为时间， ω 为角频率， $k = \omega/c$ ， \varnothing 为任意相位，由于电场矢量垂直于 z ，可将 $E(t, z)$ 分解为 (x, y) 分量。简单起见，可考虑 $z = 0$ 。即考虑 $E(t)$ 在 xy 平面的位置，然后将 x 和 y 分量

$$E_x(t) = E_x(0) \cos(\omega t - \varnothing_1) \quad (3)$$

$$E_y(t) = E_y(0) \cos(\omega t - \varnothing_2) \quad (4)$$

$\varnothing_{1,2}$ 是两个任意相位， χ 表示 $E(t)$ 与 x 轴之间的夹角(极化角，沿逆时针方向)，波的极化由 $E_x(0)$ ， $E_y(0)$ ， \varnothing_1 和 \varnothing_2 相对值给出。

对于线极化，在 $\varnothing_1 = \varnothing_2$ 时使用 $\varnothing_1 = \varnothing_2 = 0$ ，有

$$E_x(t) = E_x(0) \cos(\omega t) \quad (5)$$

$$E_y(t) = E_y(0) \cos(\omega t) \quad (6)$$

E 方向取决于 $E_x(0)$ 和 $E_y(0)$ 大小，与时间无关，角度 χ 为常量。辐射是线极化，极化角 $\chi \in [0, \pi]$ ，线极化在 xy 平面不是矢量，波所处平面方向(极化平面)由 χ 给出，但没方向。故线性极化在 xy 平面上位置不是矢量[12]。

STOKES 参数

波的极化状态可以通过三个独立的参数来表示，振幅 $E_x(0)$ 和 $E_y(0)$ 以及相位差 $\delta = \varnothing_2 - \varnothing_1$ 。一般而言，天文观测是针对光强度，而不是场振幅。因此，通过特征强度来量化极化更方便，特征强度就是我们常说的斯托克斯(STOKES)参数。一般来说，STOKES 参数可以用 I, Q, U, V 表示[13]。

$$I = \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle \quad (7)$$

$$Q = \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle \quad (8)$$

$$U = 2 \langle E_x E_y \cos \delta \rangle \quad (9)$$

$$V = 2 \langle E_x E_y \sin \delta \rangle \quad (10)$$

I 是波的总强度。参数 Q 量化 x 和 y 中强度的差异，从而提供有关线性极化的信息。参数 U 量化了两个场分量对角线之间的差异，与 x 和 y 坐标成 45° 和 135° 角(与正 x 轴成正角)，从而探测线性极化。最后，参数 V 对应于圆极化强度。

对于单个波，斯托克斯参数间具有如下关系

$$I^2 = Q^2 + U^2 + V^2 \quad (11)$$

因此，将可用参数的数量减少到三个。因为 I 是一个常数，所以波的每个极化状态都对应庞加莱球上的一个点。

极化度可通过下面给出的式子进行描述：

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \quad (12)$$

如果 $P = 1$ ，则 $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$ ，此时可以说我们电磁波是完全极化的；如果 $P < 1$ ，则此波是部分极化。

2.3. 创建二维功率谱

二维功率谱已被证明是用于大型偶极子阵列实验的强大工具，不仅可用于评估宇宙学，而且还用于约束仪器和分析系统(Morales 等人, 2012)。Parsons 等人用基线 ij 的几何延迟 $\tau_g = b(t) \cdot \hat{s}(l, m)/c$ 表示在时间 t 处观察到的可见性 $V_{ij}(v, t)$ 。将延迟变换定义为沿频率轴的可见性的傅立叶变换[6]：

$$\tilde{V}_{ij}(\tau, t) = \int dv V_{ij}(v, t) e^{2\pi i v \tau} \quad (13)$$

我们可以将阵列中每个频率和基线处的功率表示为功率谱，分别用它们的傅立叶分量 k_{\parallel} 和 k_{\perp} 表示。

$$P(k_{\perp}, k_{\parallel}) \approx |\tilde{V}_{ij}(\tau, t)|^2 \frac{X^2 Y}{\Omega B} \left(\frac{c^2}{2K_B v^2} \right)^2 \quad (14)$$

其中 B 是带宽， Ω 是角面积(即与光束面积成比例)， X 和 Y 是 Parsons 等人计算的依赖于红移的标量。

为了形成 $|\tilde{V}_{ij}(\tau, t)|^2$ ，连续积分交叉相乘，将后者的最高点定为前者，即

$$|\tilde{V}_{ij}(\tau, t)|^2 = |V_{ij}(\tau, t) \times V_{ij}(\tau, t + \Delta t) e^{i\theta_{ij,zen}(\Delta t)}|^2 \quad (15)$$

其中 $\Delta t = 10.7$ 秒， $\theta_{ij,zen}(\Delta t)$ 是适当的最高点定相因子。该方法应避免噪声偏置的功率谱，但在非常长的基线(PAPER 配置不包含该基线)上进行采样时，应同时采样基本相同的 k 模式。

3. 实验

我们在一个宽度为 8 MHz (154~162 MHz) 频道上，划分了 101 个频率通道，每个频段对应的分辨率为 80 KHz。如图 2，在每一个频率通道，首先模拟 EoR 信号的天图，再使用 OSKAR 软件模拟每张天图可见性数据，模拟可见性数据后使用 WSclean 软件生成相应的极化观测图像。通过在 OSKAR 观测设置中进行全极化模拟，再使用 OSKAR 软件对各天图加入 SKA 阵列的相关仪器效应，再进一步模拟生成可见性数据。其中，积分时间为 6 h，输入天图中心时角范围为 $[-3 \text{ h}, 3 \text{ h}]$ [14]。

由于 WSclean 成像软件实现了 w 堆叠 CLEAN 成像算法[15] [16]，适用于低频大视场成像，已在 LOFAR 和 MWA 等项目中被广泛使用，因此在模拟得到可见度数据后，我们使用 WSclean 成像软件基于不同的极化 STOKES 参数生成相应的观测图像[17]。在成像过程中采用 Briggs 权重，并且设稳健参数

(robustness)为0, 进一步考虑了成像的噪声水平和空间分辨率的需求[18]。最终生成的图像边缘可能会因为 clean 程度的不同, 而在图像边缘处出现较差的成像质量, 因此我们还需要 WSclean 所生成的图像, 通过截取中央 $2^\circ \times 2^\circ$ 天区进行进一步处理, 进而提高成像的质量, 同时消除一部分仪器效应。

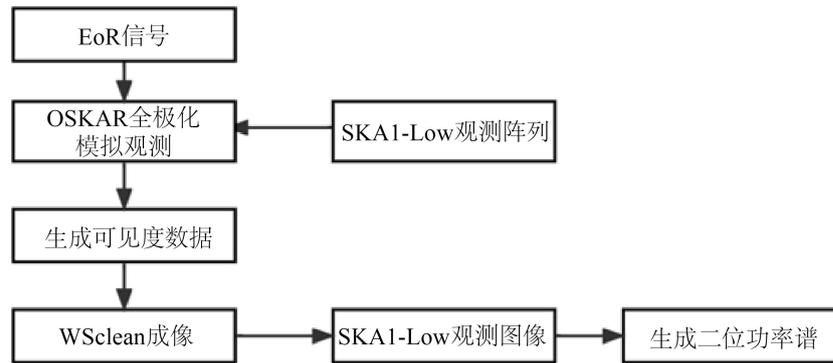


Figure 2. Simulated SKA1-Low observation flow chart

图 2. 模拟 SKA1-Low 观测流程图

3.1. 低频天空极化图像

在模拟得到 EoR 信号的 fits 图像后, 进行 OSAKR 天空模型的转换以及加入 SKA1-Low 观测阵列, 得到我们的可见度数据, 最后通过 WSclean 对得到的可见度数据进行逐一成像, 得到我们 EoR 信号在不同极化 STOKES 参数下的 SKA1_low 观测图像。表 1 提供了模拟低频极化天空 OSKAR 观测的相关参数。

Table 1. Some observation settings for EoR simulation

表 1. EoR 模拟的部分观测设置

参数	值
最大源	52428.8
偶极子长度	0.5
极化模型	Full
相位中心坐标	$(0^\circ, -27^\circ)$
开始频率	154.00
结束频率	162.00
频率间隔	0.08
干涉仪时间平均	150.0

由于区分 EoR 信号和各前景污染的关键是要确保频谱的光滑性, 因此我们在此处用了 WSclean 中的联合通道反卷积(joined-channel deconvolution)技术[17], 将任一成分按照不同的极化 STOKES 参数, 在 154~162 MHz 内的 101 个通道的数据做统一处理, 以得到相应成分的图像立方, 在此基础上再截取各成分的中央天区 $2^\circ \times 2^\circ$ 。同时, 我们可以利用图像立方, 在接续的讨论中生成二维功率谱, 以便做进一步的分析。

3.2. EoR 信号成像结果及分析

我们采用最新的 SKA1-Low 阵列布局模拟了 EoR 信号的射电观测图像, 并在模拟观测的过程中引入

了全极化方式, 通过观测成像进一步分析不同极化 STOKES 参数对 EoR 成像的影响。

在图 3 中, 我们根据模拟观测得到的可见度数据, 进行成像操作, 在成像的过程中我们根据不同极化 STOKES 参数进行单独成像, 在成像完成后对 154 MHz~162 MHz 频段内的 101 张图像按照相同 STOKES 参数进行叠加和切片。其中, 我们线极化(Q、U)成分对 EoR 信号天图相对影响较小, 圆极化(V)成分对我们 EoR 信号天图破坏尤为严重。

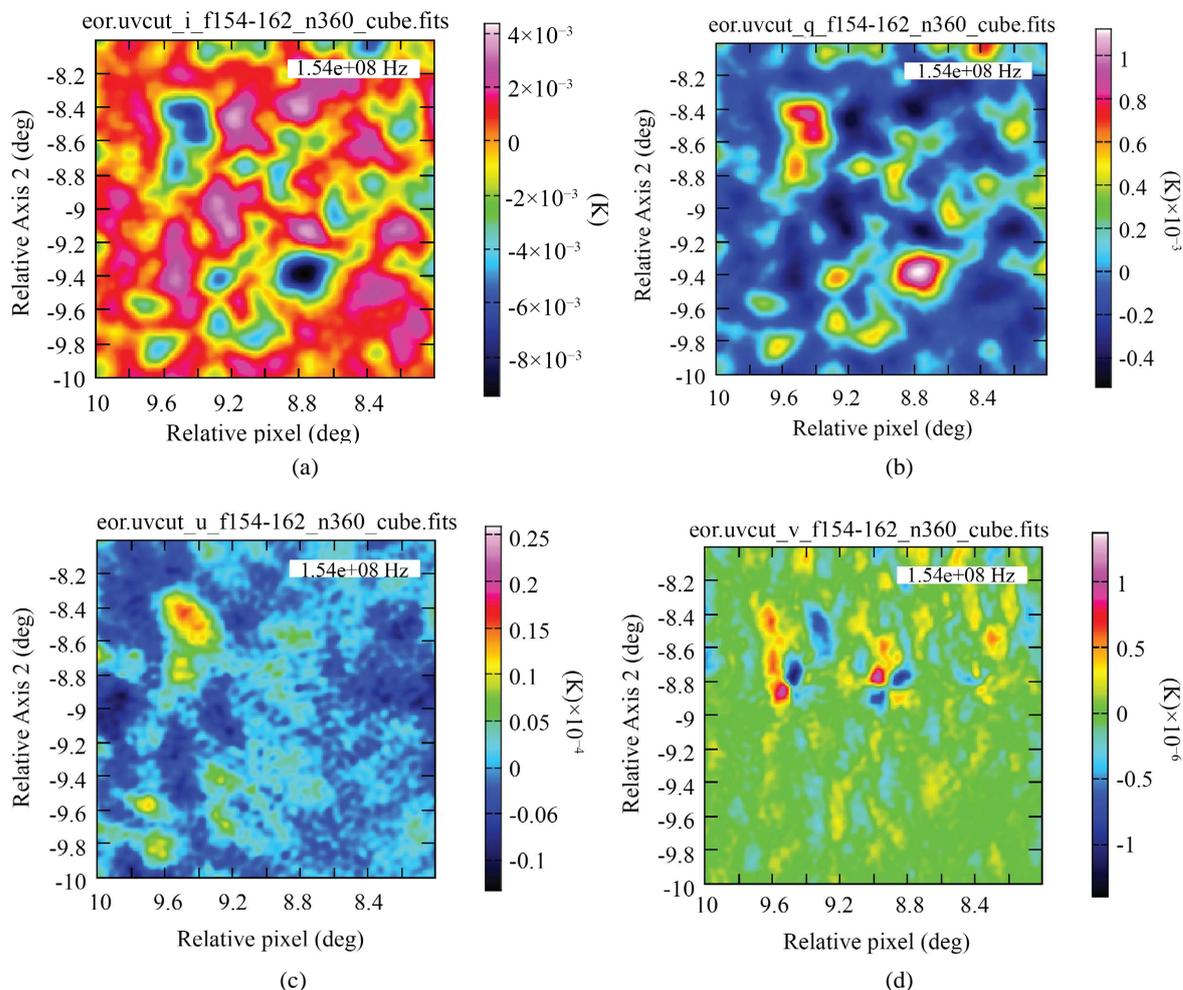


Figure 3. The result of imaging of EoR signal under different polarization STOKES parameters. From top left to bottom right are: (a) Imaging results under the action of STOKES I; (b) Imaging results under the action of STOKES Q; (c) Imaging results under the action of STOKES U; (d) Imaging results under the action of STOKES V. The imaging result under the action. All images are captured in the central $2^\circ \times 2^\circ$ sky area.

图 3. EoR 信号在不同极化 STOKES 参数下成像的结果。从左至右分别为: (a) 在 STOKES I 作用下的成像结果; (b) 在 STOKES Q 作用下的成像结果; (c) 在 STOKES U 作用下的成像结果; (d) 在 STOKES V 作用下的成像结果。所有图像截取中央 $2^\circ \times 2^\circ$ 天区。

同时, 我们利用 CASA 中的 `imstat` 函数计算图像立方的均方根(RMS)、峰值(PEAK)和动态范围(DYNAMIC RANGE), 具体结果见表 2。

表 2 可见, 在总强度作用下的 EoR 信号图像的动态范围相对于其他极化方式要小, 这也符合 CASA 官方的相关介绍。对比信号总强度方式下, 在 STOKES Q 作用下 EoR 信号天图均方根要小一个数量级; STOKES U 作用下 EoR 信号天图均方根要小 2~3 个数量级; 在 STOKES V 作用下 EoR 信号天图均方根

要小 4~5 个数量级。

Table 2. EoR signal RMS, PEAK and DYNRANGE values under different polarization STOKES parameters (unit K)
表 2. 不同极化 STOKES 参数下 EoR 信号 RMS、PEAK 和 DYNRANGE 值(单位 K)

	<i>I</i>	<i>Q</i>	<i>U</i>	<i>V</i>
RMS	1.456e-03	1.697e-04	4.846e-06	6.221e-08
PEAK	1.116e-03	3.373e-04	1.013e-05	1.515e-07
DYN RANGE	0.766	1.986	2.089	2.436

在上面的基础上, 我们统计在不同极化 STOKES 参数作用下, 对 EoR 天图亮温度范围的影响, 并进行可视化操作, 结果如图 4。

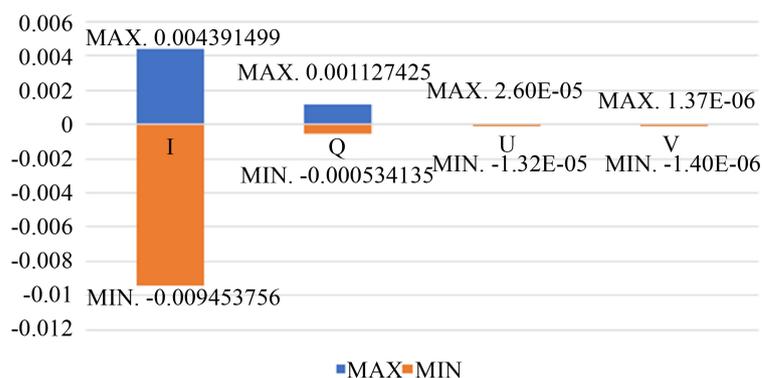


Figure 4. The influence of different polarization STOKES parameters on the brightness temperature range of the EoR signal (unit k)

图 4. 不同极化 STOKES 参数对 EoR 信号亮温度值范围的影响(单位 k)

据图 4 分析, 在不同极化 STOKES 参数的作用下, 从线极化到圆极化方式 EoR 信号亮温度值愈发减弱。在对应 EoR 信号分离实验时, 由于 EoR 信号愈发微弱, 相较于银河系内和河外前景就更加微弱。此外不同极化方式还将影响 EoR 信号的频谱, 由于各前景信号频谱本质上是光滑的, 而 EoR 信号频谱为中性氢在宇宙中不同红移处的分布状态, 会随着频率发生变化, 进而展现出一种不光滑的锯齿状结构。接下来我们将构建二维功率谱, 分析不同极化方式下对 EoR 信号二维功率谱的影响。

3.3. 从二维功率谱角度分析

二维功率谱是大型偶极子阵列(诸如 SKA、LOFAR、MWA 等)实验强有力的工具, 不仅可用于评估宇宙学还可以用于约束仪器和分析系统。我们根据公式 13 去组合可见性, 并根据公式 14 我们在 154~162 MHz 频带内生成 EoR 信号的二维功率谱。对于每个 STOKES 可见性, 我们进行随时间的连续积分, 并以时间平均将结果网格化到 K 空间。为了充分展示不同极化方式对于 EoR 信号提取的污染, 我们采取在不同极化 STOKES 参数作用下进行 EoR 信号成像, 再基于成像的结果生成二维功率谱, 去进一步分析比较在不同极化方式作用下对 EoR 二维功率谱的影响。

我们的 EoR 信号在 8 MHz (154~162 MHz) 的有限宽频带内在频带两端会出现明显跃变, 这会使得经过 Fourier 变换后会出现显著的旁瓣, 即便是我们的信号是频谱非常光滑的前景成分, 也会出现一些较大

的高频成分(旁瓣)。因此我们需要在进行傅里叶变换前对我们所有的信号进行频率维度加窗处理,通过我们的窗函数去抑制旁瓣效果[9][10]。

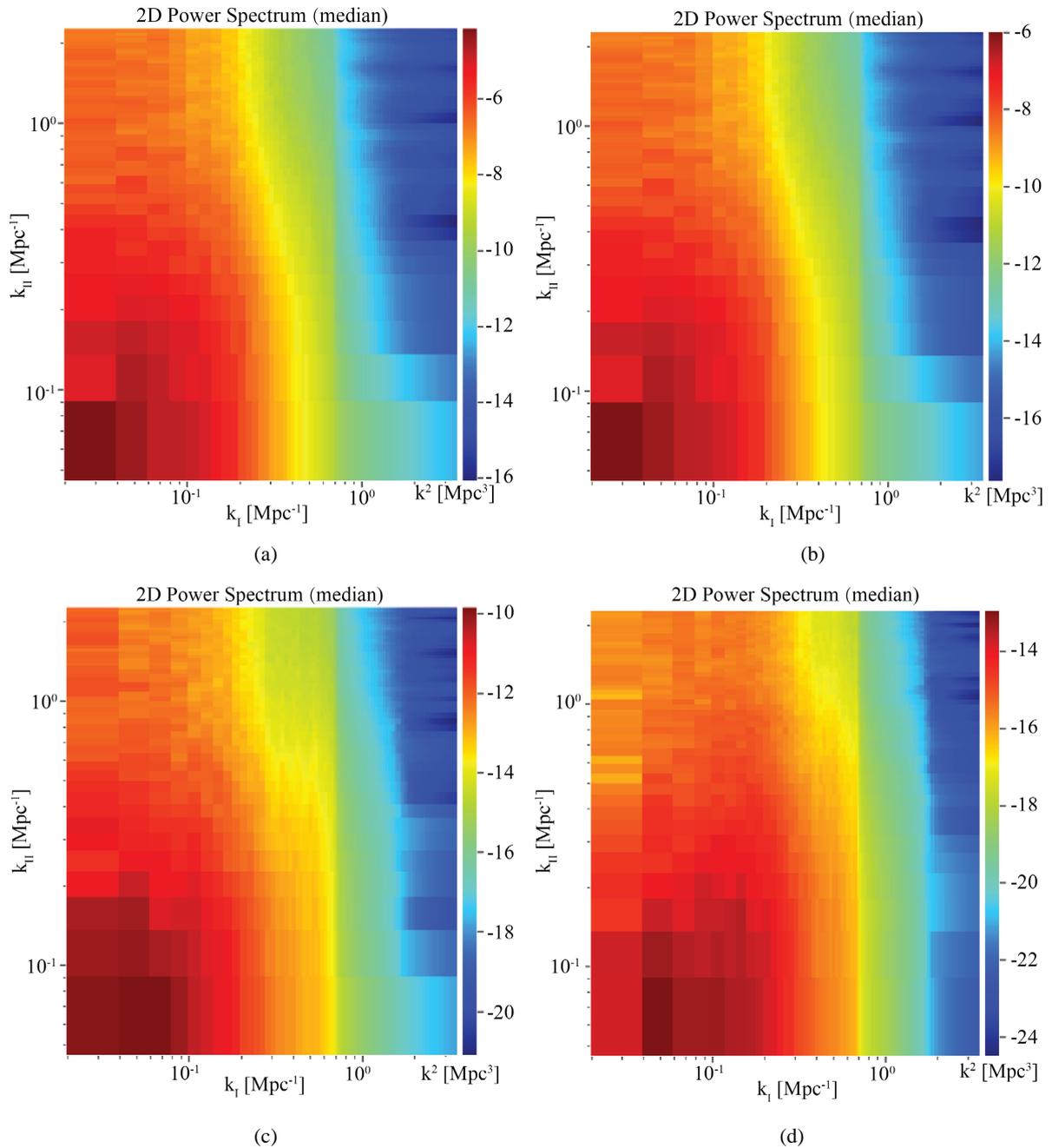


Figure 5. Two-dimensional power spectrum of EoR signal under different polarization modes. From top left to bottom right are: (a) The result under the action of STOKES I; (b) The result under the action of STOKES Q; (c) The result under the action of STOKES U; (d) The result under the action of STOKES V result

图 5. EoR 信号在不同极化方式作用下的二维功率谱。从左至右下分别为: (a) 在 STOKES I 作用下的结果; (b) 在 STOKES Q 作用下的结果; (c) 在 STOKES U 作用下的结果; (d) 在 STOKES V 作用下的结果

我们以 154~162 MHz 频带为例,在图 5 中显示了 EoR 信号在不同极化 STOKES 参数的作用下的 2D

功率谱 $P(k_{\perp}, k_{\parallel})$ 。对比总强度下的结果, 显然我们的线极化(Q, U)的作用下, 对 EoR 信号的二维功率谱破坏较小, 由于极化的泄露 STOKES Q 作用下生成的二维功率谱与总强度下基本一致, 这可能是极化的泄露引起的; 在圆极化方式 V 的作用下, 可见二维功率谱会在 $k_{\perp} \approx 0.7 \text{ Mpc}^{-1}$ 尺度的两端会出现明显跃变, 导致形成较小的一段窄带。

4. 结论

极化前景泄露到总强度信号, 是探测 EoR 信号的一个主要障碍。若泄露的水平 and EoR 信号强度相当或模拟信号频谱泄露, 那将进一步增大了对 EoR 信号探测的障碍, SKA1_Low 阵列主要科学目标为探测 EoR 信号, 因此我们需要去分析极化效应对 EoR 信号的影响, 并最大程度的限制在探测 EoR 信号时的极化泄露。

本文旨在通过模拟 SKA1_Low 阵列观测, 去探究不同极化方式(STOKES I, Q, U, V)对 EoR 信号天图以及二维功率谱的影响。通过此实验, 使我们能够量化限制楔型内 EoR 信号的统计检测的相关仪器效应(主要是极化效应), 以便于在傅里叶空间推断出最相关的 EoR 信号统计检测, 并在此基础上进一步指导我们的后续关于去极化、暗弱的 EoR 信号从强烈前景中分离的相关实验。我们的实验表明, 圆极化成分将是我们探究极化对 EoR 信号探测影响最强的一环。本研究可以作为后续极化效应的清除的相关实验提供理论认知与实验基础。

基金项目

国家自然科学基金(11963003), SKA 专项资助(2020SKA0110300), 国家重点研发计划(2018YFA0404602), 贵州大学引进人才科研基金(贵大人基合字(2018)60 号), 贵州大学培育项目(贵大培育[2020]76 号)。

参考文献

- [1] Furlanetto, S.R., Oh, S.P. and Briggs, F.H. (2006) Cosmology at Low Frequencies: The 21 cm Transition and the High-Redshift Universe. *Physics Reports*, **433**, 181-301. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2006.08.002>
- [2] Asad, K., Koopmans, L., Jelić, V., Pandey, V.N., Ghosh, A., Abdalla, F.B., *et al.* (2015) Polarization Leakage in Epoch of Reionization Windows—I. Low Frequency Array Observations of the 3C196 Field. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **451**, 3709-3727. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv1107>
- [3] Asad, K., Koopmans, L., Jelić, V., Ghosh, A., Abdalla, F.B., Brentjen, M.A., *et al.* (2016) Polarization Leakage in Epoch of Reionization Windows—II. Primary Beam Model and Direction-Dependent Calibration. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **462**, 4482-4494. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw1863>
- [4] Asad, K., Koopmans, L., Jelić, V., de Bruyn, A.G., Pandey, V.N. and Gehlot, B.K. (2018) Polarization Leakage in Epoch of Reionization Windows—III. Wide-Field Effects of Narrow-Field Arrays. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **476**, 3709-3727. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty258>
- [5] Vibor, J., Saleem, Z., Labropoulos, P., Thomas, R. M., Bernardi, G., Brentjens, M.A., De Bruyn, A.G., *et al.* (2010) Foreground Simulations for the LOFAR—Epoch of Reionization Experiment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **389**, 1319-1335. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13634.x>
- [6] Kohn, S.A., Aguirre, J.E., Nunhokee, C.D., Bernardi, G., Poher, J.C., Ali, Z.S., *et al.* (2016) Constraining Polarized Foregrounds for EoR Experiments I: 2D Power Spectra from the PAPER-32 Imaging Array. *Astrophysical Journal*, **823**, Article No. 88. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/823/2/88>
- [7] Nunhokee, C.D., Bernardi, G., Kohn, S.A., Aguirre, J.E., Thyagarajan, N., Dillon, J.S., *et al.* (2017) Constraining Polarized Foregrounds for EoR Experiments. II. Polarization Leakage Simulations in the Avoidance Scheme. *The Astrophysical Journal*, **848**, Article No. 47. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8b73>
- [8] Dewdney, P. and Braun, R. (2016) SKA1-Low Configuration Coordinates—Complete Set. SKA Organization.
- [9] Li, W., Xu, H., Ma, Z., Hu, D., Zhu, Z., Shan, C., *et al.* (2019) Contribution of Radio Halos to the Foreground for SKA EoR Experiments. *The Astrophysical Journal*, **879**, Article No. 104. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab21bc>
- [10] 李维天. SKA EoR 探测实验的射电晕前景建模以及 EoR 信号分离算法的研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2019.

-
- [11] Thyagarajan, N., Shankar, N.U., Subrahmanyam, R., Arcus, W., Bernardi, G., Bowman, J.D., *et al.* (2013) A Study of Fundamental Limitations to Statistical Detection of Redshifted HI from the Epoch of Reionization. *The Astrophysical Journal*, **776**, 1567-1579. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/776/1/6>
- [12] Jagannathan, P., Bhatnagar, S., Rau, U. and Taylor, A.R. (2017) Direction Dependent Corrections in Polarimetric Radio Imaging I: Characterizing the Effects of the Primary Beam on full STOKES Imaging. *Astronomical Journal*, **154**, Article No. 56. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa77f8>
- [13] Hamaker, J.P., Bregman, J.D. and Sault, R.J. (1996) Understanding Radio Polarimetry. I. Mathematical Foundations. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, **117**, 137-147. <https://doi.org/10.1051/aas:1996146>
- [14] Lian, X., Xu, H., Zhu, Z. and Hu, D. (2020) Contribution of Galactic Free-Free Emission to the Foreground for EoR Signal in SKA Experiments. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **496**, 1232-1242. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa1179>
- [15] Cornwell, T.J., Golap, K. and Bhatnagar, S. (2008) The Noncoplanar Baselines Effect in Radio Interferometry: The W-Projection Algorithm. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, **2**, 647-657. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2008.2005290>
- [16] Cornwell, T.J., Golap, K. and Bhatnagar, S. (2005) W Projection: A New Algorithm for Wide Field Imaging with Radio Synthesis Arrays. *Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV ASP Conference Series*. **347**, 86-90.
- [17] Tasse, C., Tol, B., Zwieten, J.V., van Diepen, G. and Bhatnagar, S. (2012) Applying Full Polarization A-Projection to Very Wide Field of View Instruments: An Imager for LOFAR. *Astronomy & Astrophysics*, **553**, 313-326. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220882>
- [18] 张利, 肖一凡, 米立功, 卢梅, 赵庆超, 王蓓, 刘祥, 张明, 谢泉. 基于L-BFGS-B局部极小化的自适应尺度CLEAN算法[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2021, 38(1): 38-44.