doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2017.05.009

低频射电望远镜阵列宽视场 成像技术研究*

劳保强^{1†} 安 涛^{1,2‡} 陈 骁¹ 伍筱聪¹ 陆 扬¹

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)(2 中国科学院射电天文重点实验室 南京 210008)

摘要 低频射电望远镜阵列宽视场成像正面临着一系列难点问题,其中最关键的问题是 非共面基线效应.它的存在使得忽略w项将导致最终图像出现畸变,且随着视场的增大而 加重.综述并剖析了几种w项改正算法及其技术原理,并分析了它们的计算成本和计算复 杂度,进而分析比较了它们的优缺点.以平方公里阵(Square Kilometre Array, SKA)射 电望远镜第1阶段低频阵列为研究对象,选取faceting和w-projection成像算法进行了仿真 实验.与传统的二维傅立叶变换成像算法进行对比,分析了它们的成像质量和正确性,结 果表明这两种算法在宽视场成像方面均明显优于二维傅立叶变换方法.还具体分析了分 面(facet)的数目对faceting成像质量和运行时间的影响,以及w步数对w-projection成像质 量和运行时间的影响,表明facet数目和w步数的选择必须合理.最后,分析了数据量大小 对这两种成像算法运行时间的影响,表明这两种算法在进行海量数据处理前,需要作算法 优化改进.研究结果为后续进一步综合分析宽视场成像技术以及这些技术的实用性研究 提供了有价值的参考.

关键词 仪器: 干涉仪, 方法: 观测, 技术: 干涉测量, 技术: 图像处理, 射电连续谱: 普通 中图分类号: P164; 文献标识码: A

1 引言

为了探索宇宙再电离和引力波等宇宙学中最具吸引力和发展前途的前沿领域, 国际上先后投入巨资建设了许多大型低频(小于400 MHz)射电望远镜阵列,包括荷兰 的低频阵列(Low Frequency Array, LOFAR)^[1];美国-澳大利亚联合建成的默奇森广 角阵列(Murchison Widefield Array, MWA)^[2-3];中国在新疆地区建设的21 cm阵列(21 Centimeter Array, 21CMA)^[4];美国在南非建成的探测再电离时代精密阵列(Precision

[†]lbq@shao.ac.cn [‡]antao@shao.ac.cn

²⁰¹⁷⁻⁰³⁻²²收到原稿, 2017-07-06收到修改稿

^{*}政府间科技合作项目(2016YFE0100300)、中国科学院天文财政专项、中国科学院青年创新促进 会资助

Array to Probe Epoch of Reionization, PAPER)^[5]、在新墨西哥州建设的长波长阵列(Long Wavelength Array, LWA)^[6].还有预计2019年开始建造的平方公里射电望远镜阵列(Square Kilometre Array, SKA)^[7].这些低频射电望远镜阵列观测时具有大视场、高动态范围和高灵敏度等共同特点.阵列的几何结构是非共面的,阵列中的非东西基线与地球赤道平面形成非共面,当阵列进行大视场观测时,*w*方向的相位值(*w*项)将远远大于1.

因此,在低频大视场情况下,传统的二维傅立叶变换近似不再成立^[8].相反,成 像算法在反演的过程中需要考虑w项,这个w项描述了非共面阵列引起的误差^[9].忽 略w项引起的图像质量下降会随着射电干涉阵列观测视场(Field of View, FOV)宽度 的增大而放大,因此能否解决这个问题在低频射电望远镜阵列成像中极为重要.目 前,有几种处理w项的成像方法: faceting^[10-11]、三维傅立叶变换^[9]、w-projection^[12]、 w-stacking^[13]和warped snapshots^[9].除此之外,混合方法也非常实用,如w-snapshots方 法^[14],这种方法既能够克服原方法的缺陷又能继承它们的优点.

三维傅立叶变换方法虽然理论上最简单,但效率最低,计算量最大,在实际应用中使用不多^[9].通用天文应用软件(Common Astronomy Software Applications, CASA)有效实现了faceting和w-projection算法^[15-16].在faceting的成像方面,主要是将视场分割成多个小视场,然后每个小视场使用二维傅立叶变换方法成像,最后把所有小视场得到的图像拼接起来.这是目前比较常用的宽视场成像方法,但这种方法将使得以巡天为目的的观测效率急剧下降,且边界效应严重.在w-projection的成像方面,拥有许多有用的特征,如在去卷积过程中的多尺度洁化(Multi-Scale Clean)和频谱形状拟合.然而,对于偏离天顶观测得到的数据,w项较大,该方法需要花费大量的时间.例如,使用CASA中的w-projection方法对MWA 2 min "快拍" (snapshot)模式观测得到的数据进行成像需要消耗几十个小时.此外,该方法对较大尺度的图像或较高天顶角观测数据的成像几乎是不可能的,因为在这种情况下需要缓存在内存里的w核的数量和大小都将非常大.

针对w-projection中存在的问题,Offringa等人提出了面向MWA的w-stacking成像 算法即WSCLEAN^[17].首先按照w值的不同将可见度数据划分为不同的w层并分别进行 栅格化,对每个w层的可见度数据进行二维快速傅立叶变换(2-Dimensional Fast Fourier Transform, 2-D FFT)得到脏图.然后分别进行移相,最后将所有w层的图像进行累 加.在低俯仰的宽视场成像时,这种方法比w-projection成像方法更快.一旦SKA开 始运作,科学数据预处理部分就需要约每秒25亿次浮点运算即250 PFLOPS (Peta FLoating point Operations Per Second)的计算能力^[18].这一计算能力约为超级计算 机天河二号的4.7倍,约为超级计算机神威太湖之光的2.3倍,因此作为科学数据预处 理的重要组成部分宽视场成像在计算能力方面将面临一个巨大的挑战.Cornwell认为 对于SKA, w-snapshots算法是最有效的方法,但是目前尚未给出相应的可靠验证性结 果,因此是否适用于整个SKA有待进一步研究.这种方法的主要思路是先进行warped snapshots成像,然后再进行w项校正,这里的w项校正技术是w-projection.这种混合 方法同时是ASKAP (Australian Square Kilometre Array Pathfinder)成像的最终方案. 与w-projection相比, w-snapshots所需的内存和运行时间更少.与warped snapshots相 比, w-snapshots除了所需的内存少外,还更加精确.warped snapshots是将阵列观测得 到的所有可见度数据按时间进行分割,使得每个时段的可见度数据分布在一个平面或 接近一个平面.因此,每个时段的可见度数据就可以通过二维傅立叶变换方法进行成 像,但是这里的图像坐标不再是原来的观测方向在(*u*,*v*,*w*)坐标上的方向余弦.因为 在观测时,天空相对阵列是移动的,所以得到的snapshot图像需要进行重投影.该方法 在时间上作分割有许多优点,例如这种分割方式是自然分割,不需要进行排序或者多 次读取可见度数据文件.并且它可以处理许多不同时间的方向依赖效应(即主波束和 电离层扭曲),特别适用于小型阵列如SKA第1阶段的低频综合孔径阵列(SKA1-low)核 心阵.此外,该方法在MWA实时系统(Real-Time System, RTS)中得到广泛应用,尤其 是在电离层的改正问题上^[19].目前,w-snapshots的实现代码封装在ASKAP软件包(简 称ASKAPsoft)中.warped snapshots的实现代码有两个版本,一个是MWA RTS中使用 世界坐标系统库(WSCLIB)实现的C语言代码,一个是在ASKAPsoft中使用casacore实 现的C++代码.

本文首先详细介绍了几种宽视场成像算法,并给出了主要的理论公式推导过程. 然后分析了三维傅立叶变换方法、图像域faceting方法和w-projection方法的计算成本,还分析了所有成像算法的计算复杂度,从而比较分析了它们的优缺点. 最后使用faceting成像方法和w-projection成像方法开展SKA1-low宽视场成像仿真实验,并作了数据分析得出了相应的结论.

2 宽视场成像算法

2.1 三维傅立叶变换成像算法

文献[20]中目标源的亮度分布和可见度函数之间的二维傅立叶关系可以通过乘 以e^{-2πiw}改写成一个三维傅立叶变换关系,表示为:

$$V'(u,v,w) = \iiint \left[\frac{I(l,m)\,\delta\left(\sqrt{1-l^2-m^2}-n\right)}{\sqrt{1-l^2-m^2}} \right] e^{-2\pi i(ul+vm+wn)} dl dm dn \,, \qquad (1)$$

其中, V'是可见度函数与e^{-2πiw}的乘积; (u, v, w)为坐标系, w轴为从地心指向目标源相位 中心方向, v轴垂直于w轴的平面与w轴和北极轴所在平面的交线, u轴可根据右手定则确 定; I是目标源亮度分布; l、m和n是观测方向的单位矢量分别在u轴、v轴和w轴上的方 向余弦; δ是单位脉冲函数; e是指数函数.注意,这里及全文使用的I(l, m)为主波束校正 前的目标源亮度分布函数, 即文献[20]的目标源亮度分布与主波束函数的乘积.本文不 讨论数据校准方面的内容, 并且假设可见度函数已经作了校准.

理论上,(1)式分别通过三维傅立叶逆变换和对n积分即可得到I(l,m):

$$\frac{I(l,m)}{\sqrt{1-l^2-m^2}} = \int \iiint V'(u,v,w) e^{2\pi i(ul+vm+wn)} du dv dw dn.$$
⁽²⁾

这里的三维傅立叶变换可以考虑使用直接傅立叶变换(3-Dimensional Direct Fourier Transform, 3-D DFT)和快速傅立叶变换(3-Dimensional Fast Fourier Transform, 3-D FFT).

由于V'(u,v,w)与I(l,m,n)并不是完全的傅立叶变换关系.因此上式得到的脏图不能使用传统的方法进行去卷积.为了得到卷积关系,我们需要将上式变为真实傅立叶变

换. 首先构造一个新的三维图像空间:

$$F(l,m,n) = \frac{I(l,m)\delta(n-\sqrt{1-l^2-m^2})}{\sqrt{1-l^2-m^2}}.$$
(3)

此时, F(l,m,n)便是V'(u,v,w)的傅立叶变换. 最终脏图 $\hat{F}(l,m,n)$ 的表达式为:

$$\widehat{F}(l,m,n) = \int B^{3D}(l-l',m-m',n-n') F(l',m',n') dl' dm' dn', \qquad (4)$$

其中, *B*^{3D}是三维脏束, 即三维采样函数*S*(*u*,*v*,*w*)的傅立叶变换. 这里三维采样函数表示为单位脉冲函数的线性组合:

$$S(u, v, w) = \sum_{r} W_r \delta(u - u_r) \,\delta(v - v_r) \,\delta(w - w_r) \,, \tag{5}$$

其中, u_r、v_r和w_r分别是u、v和w的采样点; W_r是权重函数, 是人为加入的一项, 通过改变权重可以改变图像的分辨率和灵敏度水平.这里的权重函数分为自然权重、均匀权重、稳健(robust)权重和锥形函数(tapering) 4种.自然权重的使用能够产生一个相对较大的综合束,可以优化图像噪声,最大化弱源探测的可能性.均匀权的使用能够产生一个相对较小的综合束,但是图像噪声会相对增加.稳健权重的功能介于自然权和均匀权之间.锥形函数利用一个高斯函数降低长基线的可见度数据权重, 将产生一个较大的综合束,可以提高数据对延展结构的灵敏度.综上,权重需要根据目标源的特点和图像分析目的来进行选取.

从(4)式可以看出: 脏图是B^{3D}与F(l', m', n')作三维卷积的结果,因此根据卷积特性, 脏图又可以由三维采样函数与新的可见度函数相乘后再进行三维傅立叶变换得到. 所以(4)式可以改写为离散傅立叶变换形式:

$$\widehat{F}(l,m,n) = \sum_{r} W_{r} V'(u_{r},v_{r},w_{r}) e^{2\pi i (u_{r}l+v_{r}m+w_{r}n)}.$$
(6)

2.2 faceting成像算法

如图1所示,一个宽视场被分为一个拼图,由多个小分面视场组成.每个分面视场 都有各自的相位中心,这些分面视场满足二维傅立叶变换近似方法.每个分面视场具体 的成像流程如图2所示.首先对原始可见度数据进行相位旋转,从而改变它们的相位中 心.由于分面视场比全视场小得多,因此每个分面的数据在栅格化前要对时间和频率做 平均.由于视场半径不同,所以它们的模糊(smearing)效应也将不同.这里的模糊效应包 括时间平均时(Time average)和带通(Bandwidth)模糊效应.平均时模糊效应是由于地 球的旋转所导致的图像轴向模糊.带通模糊效应是由于色差效应引起的径向的图像模 糊.最后进行常规的成像处理得到脏图.faceting成像算法的优势:小视场几乎不需要考 虑w项;小视场允许使用栅格化和FFT进行成像.



Fig. 1 The principle of facet split for faceting imaging



Fig. 2 Facet field imaging

faceting成像按照不同相位旋转方式又分为:图像域faceting成像和uv域faceting成 像.图像域faceting成像使用的分面均位于天球的切平面,主要通过旋转(u,v,w)坐标 同时对复数可见度数据进行相移实现.由于每个分面的切平面都不同,所以这些 分面将有不同的投影.最后需要进行重投影到同一个二维平面上.天文图像处理 系统(Astronomical Image Processing System, AIPS)的成像部分包含图像域faceting. uv域faceting成像是通过旋转复数可见度数据的相位从而改变图像的相位中心,这个 相位中心是沿着天球移动的.因此所有分面在同一个平面,这个平面是原始视场中 心天球的切平面.这个方法没有改变切平面的投影,w项没有像图像域faceting那样 减少.uv域faceting成像算法在AIPS++ (即APIS的升级版)和CASA中均有实现.图像 域faceting成像原理相对较容易理解,但是涉及多个分面图像处理,在合成一个拼图时存 在边缘效应.uv域faceting成像所有的分面都是在同一个平面进行处理,没有边缘效应. 同时避免了大量分面图像的处理,因此它比图像域faceting成像更加快速. 2.2.1 图像域faceting成像算法

1992年, Cornwell和Perley提出了一种多面体faceting方法^[10].如图3所示,将三维 目标源亮度分布I(l,m,n)看作是由半径为1的天球表面上离散的点组成,天球表达式 为 $l^2 + m^2 + n^2 = 1$.通常二维图像是通过将天球表面的点投影到相位中心方向的切平 面(tangent plane)上得到的.每个分面视场位于其相位中心(l_i,m_i)天球的切面上,我们 用这些切面组成的多面体近似地表示这个天球.由于每个分面平躺在各自的切面上,分 面图像都是在各自的切面上完成的,所以又称为非共面faceting成像.



Fig. 3 Polyhedron imaging method

对于给定分面相位中心为(*l*₀, *m*₀, *n*₀)的视场,它的可见度函数可以通过原始可见度 函数*V*(*u*, *v*, *w*)移相得到:

$$V^{\rm PR} = V(u, v, w) e^{2\pi i [u(l_0 - l) + v(m_0 - m) + w(n_0 - n)]}.$$
(7)

这个分面的视场足够小,因此上式可以采用传统的二维傅立叶变换方法进行成像.然而, 分面视场的相位中心在天球切点上,如果按照常规的方法进行成像,最后得到的图像将 投影到这个切点的切平面上.因此,不同的分面视场得到的图像平面将不同.如图4所 示,点*A、B、C和T*都是天球上的点.点*T*同时是主投影平面即平面1 (Plane 1)的切点, 主投影平面是原相位中心的天球切平面.点*A*是天球上的任意点,*A*'是点*A*在主切平面 上的投影.以点*B*为相位中心的分面视场,如果不进行(*u*,*v*,*w*)坐标重投影的话,结果 图像将投影在平面2 (Plane 2).在成像之前先使用一个旋转矩阵**R**将(*u*,*v*,*w*)坐标转换 为(*u*',*v*',*w*'):

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} = \boldsymbol{R}(\alpha_0, \beta_0) \, \boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}(\alpha, \beta) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}, \qquad (8)$$

其中, (α, β) 是原相位中心的赤经和赤纬; (α_0, β_0) 是第0个分面相位中心的赤经和赤纬; **R**^T是**R**的转置, **R**表达式为:

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} -\sin\alpha & \cos\alpha & 0\\ -\sin\beta\cos\alpha & -\sin\beta\sin\alpha & \cos\beta\\ \cos\beta\cos\alpha & \cos\beta\sin\alpha & \sin\beta \end{bmatrix}.$$
 (9)

然后再进行成像,得到的分面图像将投影到平面1. 点*B*将投影到*B*'. 然而,我们可以看 到在分面图像的边缘点*C*投影到了点*C*',而正确的投影应该是在点*C*''. 因此,这种方法 在图像边缘出现了投影误差. 这个投影误差ε表示为:

$$\varepsilon = \sin \theta_1 (1 - \cos \theta_2)$$

$$\approx \frac{1}{2} \theta_1 \theta_2^2,$$
(10)

其中, θ₁是切点*B*相位中心与原始相位中心点*T*之间的夹角; θ₂是分面视场边缘与其相位 中心的夹角. 值得注意的是: 这个误差的影响远远小于w项的存在带来的影响.



图 4 图像域faceting成像的不同投影结构

Fig. 4 Geometry of various projections involved in the image domain of faceting imaging

上述算法的分面数N_{facets}是决定图像域faceting成像质量的关键因素.分面数太大, 所需的运行时间过长;分面数太小,分面视场不能满足二维傅立叶变换近似.因此,文 献[10]给出了最佳分面数公式:

$$N_{\text{facets}} = \theta_{\text{beam}}^2 \frac{B_{\text{max}}}{\lambda} = B_{\text{max}} \frac{\lambda}{D^2} \,, \tag{11}$$

其中, D是台站的直径, B_{max} 是阵列的最大基线, θ_{beam} 是波束宽度, λ 为波长.

2.2.2 uv域faceting成像算法

下面介绍的这种faceting成像方法,所有的分面都在同一个平面.这个平面是原视场相位中心的球切面,因此又称为共面faceting成像.

原始可见度函数去除第j个分面相位中心,有:

$$V(u, v, w) \cdot e^{2\pi i \left[ul_j + vm_j - w\left(1 - \sqrt{1 - l_j^2 - m_j^2}\right)\right]} = \int I(l, m) e^{2\pi i \left[u(l_j - l) + v(m_j - m) - w\left(\sqrt{1 - l_j^2 - m_j^2} - \sqrt{1 - l - m}\right)\right]} dl dm,$$
(12)

其中, l_j和m_j是第j个分面中心的方向余弦.

令 $\Delta l_j = l - l_j 和 \Delta m_j = m - m_j 为 第 j 个 分 面 中 心 位 置. 将上式 w 项 的 平 方 根 系 数 作 泰 勒 级 数 展 开, 这 里 我 们 是 对 <math>\Delta l_j 和 \Delta m_j$ 进 行 第 1 阶 展 开. 因 此, 得:

$$\sqrt{1 - l_j^2 - m_j^2} - \sqrt{1 - l - m} = \frac{\partial \sqrt{(j)}}{\partial l} \Delta l_j + \frac{\partial \sqrt{(j)}}{\partial m} \Delta m_j$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 - l_j^2 - m_j^2}} (l_j \Delta l_j + m_j \Delta m_j), \qquad (13)$$

其中, ∂ 是求导符号, $\sqrt{()}$ 表示 $\left(\sqrt{1-l_j^2-m_j^2}-\sqrt{1-l-m}\right)$. 将(13)式代入(12)式, 我们得到第j个分面的亮度分布函数和可见度函数的关系式:

$$V(u, v, w) \cdot e^{2\pi i \left[ul_j + vm_j - w\left(1 - \sqrt{1 - l_j^2 - m_j^2}\right)\right]} = \int I(\Delta l_j, \Delta m_j) e^{2\pi i \left(u' \Delta l_j + v' \Delta m_j\right)} dl_j dm_j, \qquad (14)$$

其中

$$u' = u - w \frac{l_j}{\sqrt{1 - l_j^2 - m_j^2}},$$

$$v' = v - w \frac{m_j}{\sqrt{1 - l_j^2 - m_j^2}}.$$
(15)

从(14)式可以看出, faceting是在uv平面上完成, 原始可见度数据将分为多个小的可见度数据. 这些分面的可见度数据可以合在一起进行去卷积, 每个分面的可见度数据可以使用二维傅立叶变换方法进行成像. 这种方法产生的误差与图像域faceting成像相同, 但是没有边缘效应.

2.3 w-projection成像算法

w-projection算法的核心思想是将三维可见度数据从(u, v, w)空间映射到(u, v, w = 0)平面,从而将w项问题隐藏起来,其数学基本思想是通过与卷积核函数进行卷积可以实现(u, v, w)数据到(u, v, w = 0)的双向转换.

首先将文献[20]中的二维傅立叶成像公式改写为:

$$V(u, v, w) = \int \frac{I(l, m)}{\sqrt{1 - l^2 - m^2}} G(l, m, w) e^{-2\pi i(ul + vm)} dl dm, \qquad (16)$$

其中,

$$G(l,m,w) = e^{-2\pi i \left[w\left(\sqrt{1-l^2-m^2}-1\right)\right]}.$$
(17)

根据傅立叶变换卷积特性, (16)式又可以改写为

$$V(u, v, w) = G(u, v, w) \times V(u, v, w = 0) , \qquad (18)$$

其中, $\tilde{G}(u, v, w)$ 是G(l, m, w)的二维傅立叶变换; V(u, v, w = 0)是V(u, v, w)在w = 0平面上的投影.

因此实现w-projection算法的基本步骤如图5所示.首先,由(18)式将三维可见度函数V(u,v,w)的每个坐标(u,v,w)上的点投影到(u,v,w=0)平面上,然后通过二维傅立叶变换得到目标源的亮度分布.



图 5 w-projection成像流程

Fig. 5 The flow diagram of w-projection imaging

2.4 w-stacking成像算法

w-stacking算法是将可见度数据栅格化到不同的w层上, 然后每个w层进行二维傅立 叶变换成像, 最后进行w校正. 重写文献[20]中的二维傅立叶变换成像公式有:

$$V(u, v, w) = \iint \frac{I(l, m) e^{2\pi i w \left(\sqrt{1 - l^2 - m^2} - 1\right)}}{\sqrt{1 - l^2 - m^2}} e^{-2\pi i (ul + vm)} dl dm.$$
(19)

从上式可以看出,这是一个从u、v空间到l、m空间的普通二维傅立叶变换,互为颠倒得:

$$\frac{I(l,m)}{\sqrt{1-l^2-m^2}} = e^{2\pi i \left[w\left(\sqrt{1-l^2-m^2}-1\right)\right]} \iint V(u,v,w) e^{2\pi i (ul+vm)} du dv.$$
(20)

对上式两边进行wmin到wmax的积分,得:

$$\frac{I(l,m)(w_{\max} - w_{\min})}{\sqrt{1 - l^2 - m^2}} = \int_{w_{\min}}^{w_{\max}} e^{2\pi i \left(\sqrt{1 - l^2 - m^2} - 1\right)} \iint V(u,v,w) e^{2\pi i (ul + vm)} du dv dw,$$
(21)

其中, w_{max}和w_{min}分别是w的最大值和最小值.

最后一步是将变量u、v和w离散化,所以对u和v进行积分变成了一个FFT逆变换, 对w积分变成了求和.w-stacking成像流程如图6所示:首先将具有相同w值的可见度数 据栅格化到一个统一的栅格里;其次将同一个栅格里的可见度数据进行FFT变换得到脏 图;然后每个w层乘以e^{2πi[w(√1-l²-m²-1)]}进行相移;最后将所有w层的结果累加起来.



Fig. 6 The flowchart of w-stacking imaging

2.5 warped snapshots和w-snapshots成像算法

warped snapshots成像的主要思路是将阵列观测得到的所有可见度数据按照时间进行划分,使得每份可见度数据在(*u*,*v*,*w*)坐标上形成一个二维平面或者接近一个二维平面.因此每份可见度数据可以通过传统的二维傅立叶变换方法进行成像,最后将所有时段的图像拼接起来.

阵列在某个短时间内观测得到的可见度数据,在成像时如果忽略w项会导致图像坐标系统的扭曲,但是这个坐标扭曲可以通过在图像平面进行插值来修正.在此短时间内, 阵列认为是精确共面的.此时,w是(u,v)的函数,它们的关系式如下:

$$w = au + bv, (22)$$

其中, *a*和*b*为拟合系数.从上式可以看出: *w*项在瞬时观测时,可以被消除.这里通过引入扭曲坐标(*l*",*m*"),我们得到可见度函数和目标源亮度分布的二维傅立叶变换关系:

$$V(u, v, w) = \int \frac{I(l, m)}{\sqrt{1 - l^2 - m^2}} e^{-2\pi i (ul'' + vm'')} dl dm, \qquad (23)$$

其中,

$$l'' = l + a \left(\sqrt{1 - l^2 - m^2} - 1\right), \qquad (24)$$

$$m'' = m + b\left(\sqrt{1 - l^2 - m^2} - 1\right) \,. \tag{25}$$

系数*a*和*b*可以通过*u*、*v*和*w*坐标的线性拟合得到,如下式的最小二乘拟合,能够获得最佳的拟合结果.

$$a = \left(\sum_{k} v_k^2 \sum_{k} u_k w_k - \sum_{k} u_k v_k \sum_{k} v_k w_k\right) / \left[\sum_{k} u_k^2 \sum_{k} v_k^2 - \left(\sum_{k} u_k v_k\right)^2\right],$$

$$b = \left(\sum_{k} u_k^2 \sum_{k} v_k w_k - \sum_{k} u_k v_k \sum_{k} u_k w_k\right) / \left[\sum_{k} u_k^2 \sum_{k} v_k^2 - \left(\sum_{k} u_k v_k\right)^2\right].$$
(26)

或者,当阵列的观测天顶角Z和星位角 χ 已知时,系数a和b又可以表示为:

$$a = \tan Z \sin \chi,$$

$$b = -\tan Z \cos \chi.$$
(27)

星位角 χ 和天顶角Z的定义分别为:

$$\tan \chi = \frac{\cos \phi \sin H}{\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos H},$$
(28)

$$\cos Z = \sin \phi \sin \beta + \cos \phi \cos \beta \cos H \,, \tag{29}$$

其中, H为时角, β 是赤纬, ϕ 是纬度.

然而,在实际的观测中,某个瞬时阵列难以确保完全共面,这时进行warped snapshots成像时得到的图像将会出现伪影.所以warped snapshots成像存在着一定 的误差.因此,Cornwell等人提出了warped snapshots与w-projection结合使用的新方 法即w-snapshots成像,从而提高成像的准确度^[14].首先,在(22)式的右边加上一个偏 差 Δw 有:

$$w = au + bv + \Delta w \,. \tag{30}$$

当前最佳平面由(u, v, w)坐标的最小二乘拟合得到,使用w-projection把所有可见度数据 投影到这个平面,从而修正 Δw . 当某个平面的偏差大于指定公差时,重复执行warped snapshots成像和平面拟合.具体的实现步骤如下:

(1)设定 Δw 的最大允许临界值;

(2)分别初始化一个累积世界坐标(World Coordinate System, WCS)和累积数组;

(3)确定下一个snapshot平面即w = au + bv;

(4)给该snapshot平面初始化一个扭曲WCS;

(5)检查下一时间片段的(u,v,w)坐标;

(6)如果所有的 Δw 值均小于设定的临界值,使用w-projection对该snapshot的可见度数据进行栅格化,从而消除 Δw 偏移,然后返回到步骤(5);

(7)如果任意一个 Δw 大于设定的临界值,将得到的栅格化数据进行FFT变换,重新 投影图像到步骤(2)的WCS,使用任意权重和偏振转换,并且添加到累积数组中.注意累 积数组可能也需要记录权重和偏振转换;

(8)返回到步骤(3).

3 计算成本、计算复杂度及优缺点分析

本文主要提供三维傅立叶变换方法、图像域faceting和w-projection的计算成本分析,计算公式主要来源于文献[21].这里的计算成本 C_{cost} 主要由数据率 D_{rate} 、计算强度 $C_{\text{intensity}}$ 和并行计算效率 η 计算得到,计算公式如下式:

$$C_{\rm cost} = D_{\rm rate} \times C_{\rm intensity} \times \eta^{-1} \,, \tag{31}$$

其中, 计算强度的单位是每字节运算次数. 这里计算强度定义为: $C_{\text{intensity}} = \frac{O_{\text{total}}}{P_{\text{in,out}}} \left(\frac{O}{P} \right)$, 其中, O_{total} 为运算的总次数; $P_{\text{in,out}}$ 为输入和输出的数据点数; O是运算次数; P是数据 点数.

可见度数据的数据率V为:

$$V \approx 10^{-13} \left(\frac{N_{\rm ant} B_{\rm max}}{D}\right) \left(\frac{\Delta f}{f}\right) \quad {\rm TB \cdot s^{-1}},$$
 (32)

其中, N_{ant} 是观测台站个数; Δf 是观测频率带宽; f是观测频率.

上述三维傅立叶变换成像方法可以使用3-D DFT和3-D FFT实现. 当不考虑去卷积 运算时, 3-D DFT方法的计算成本是(单位: FLOPS, 下同):

$$C_{\rm DFT} \approx 4 \times 10^{-2} N_{\rm ant}^2 \left(\frac{\Delta f}{f}\right) \frac{\lambda B_{\rm max}^5}{D^6} \times \eta^{-1} \,. \tag{33}$$

3-D FFT成像的计算成本(包括卷积核栅格化,但是不包括去卷积和并行计算效率)为:

$$C_{\rm FFT} \approx \left(\frac{N_{\rm ant}B_{\rm max}}{D}\right)^2 \left(\frac{\Delta f}{f}\right) N_{\rm GCF, points}^2 \frac{\lambda B_{\rm max}}{D} + \frac{4\lambda B_{\rm max}^2}{D^4} \log_2\left(\frac{4\lambda B_{\rm max}^3}{D^4}\right) , \quad (34)$$

其中, $N_{GCF,points}$ 是栅格化中卷积核函数1个轴的support大小,通常为7或9. 图像 域faceting成像方法的计算成本为:

$$C_{\text{faceting}} \approx 10 \left(\frac{N_{\text{ant}} B_{\text{max}}}{D}\right)^2 \left(\frac{\Delta f}{f}\right) \times \left(\frac{\lambda B_{\text{max}}}{D^2}\right)^2 N_{\text{GCF,points}}^2 + \left(\frac{10\lambda B_{\text{max}}}{D^2}\right)^2 \left[\left(\frac{0.4B_{\text{max}}}{\lambda}\right) \log_2\left(\frac{0.4B_{\text{max}}}{\lambda}\right)\right] .$$
(35)

w-projection成像方法的计算成本为:

58卷

$$C_{\text{w-projection}} \approx 10^{-1} \left(\frac{N_{\text{ant}} B_{\text{max}}}{D}\right)^2 \left(\frac{\Delta f}{f}\right) \left[\left(\frac{\lambda B_{\text{max}}}{D^2}\right)^2 + N_{\text{GCF,points}}^2 \right] + \left(\frac{\lambda B_{\text{max}}}{D^2}\right)^2 \left[\left(\frac{4B_{\text{max}}}{\lambda}\right) \log_2\left(\frac{B_{\text{max}}}{\lambda}\right) \right].$$
(36)

图7是根据SKA1-low天线阵列设计参数^[22]得到的随着台站直径增大成像计算成本的变化曲线. 具体的参数设置为: f为100 MHz, Δf 为300 MHz, $N_{GCF,points}$ 为9, B_{max} 为65 km, N_{ant} 为512. 从图7可以看出: 3-D FFT的计算成本最小, 3-D DFT的计算成本最高. 图像域faceting的计算成本仅次于3-D DFT, 是w-projection的10⁴倍左右. 为方便对比, 我们在图7中同时用虚线标注了太湖之光的持续计算速度(93.015 PFLOPS).

下面结合计算成本和计算复杂度(见表1)分析上述5种宽视场成像算法的优缺点:

(1)基于3-D DFT的三维傅立叶变换方法: 当总的可见度数据点数为*M*时,最终得到的图像是 $N_l \times N_m \times N_n$ 的立体图像, $N_l \times N_m \pi N_n$ 分别是 $l \times m \pi n$ 坐标轴上的总像素点数. 令 $N_l = N_m = N_n = N_{\text{pix}}$,我们得到计算复杂度约为 MN_{pix}^3 . 该方法的计算成本和计算复杂度均很高,因此实际应用中很少使用.

(2)基于3-D FFT的三维傅立叶变换方法: 3-D FFT的计算复杂度为3N³_{pix} log₂ N_{pix}, 栅格化的计算复杂度MN²_{kern}, 其中N_{kern}是栅格化卷积核的大小. 该方法在宽视场方面的使用是相当浪费的, 因为在n轴方向大多数的点是空的, 而且内存的消耗远远大于2-D FFT方法. 此外, 当n轴上的点数量很少时, 将会产生严重的混叠效应. 因此, 虽然这个方法概念上很简单并且分析精确, 但是实际应用中也是很少用.

(3)图像域faceting成像方法: 令l和m方向的分面数均为 N_{facets} ,因此图像域的总分面数为 N_{facets}^2 .每个分面都要进行卷积核栅格化,栅格化的总计算复杂度为 $N_{facets}^2 N_{kern}^2$.其次,每个分面需要进行2-D FFT, 2-D FFT的计算复杂度为: $2N_f^2 \log_2 N_f$.因此这一步的总复杂度为: $N_{facets}^2 (2N_f^2 \log_2 N_f)$,其中 N_f 是分面的一个轴上的像素大小.最后加上重投影的计算复杂度 $N_{facets}^2 M$.该方法原理简单,易于实现.但是由于该方法需要处理大量的分面图像,计算成本较高.并且需要进行重投影,存在边缘效应.混叠的性能和残差的计算次数都与分面的面数呈线性增长.



Imaging computational cost curves of the SKA1-low array parameters

表 1 宽视场成像算法计算复杂度比较 Table 1 Comparison of computational complexity among the wide-field imaging

algorithms								
Imaging algorithm	Computational complexity							
3-D DFT	$MN_{ m pix}^3$							
3-D FFT	$MN_{\rm kern}^2 + 3N_{\rm pix}^3 \log_2 N_{\rm pix}$							
Image plane faceting	$N_{\text{facets}}^2 M N_{\text{kern}}^2 + N_{\text{facets}}^2 (2N_{\text{f}}^2 \log_2 N_{\text{f}}) + N_{\text{facets}}^2 M$							
uv plane faceting	$N_{\rm facets}^2 M N_{\rm kern}^2 + N_{\rm facets}^2 (2N_{\rm f}^2 \log_2 N_{\rm f})$							
w-projection	$MN_{\rm kern}^2 + MN_{\rm w-kern}^2 + 2N_{\rm pix}^2 \log_2 N_{\rm pix}$							
w-stacking	$MN_{\rm kern}^2 + N_{\rm w-lay}N_{\rm pix}^2 + N_{\rm w-lay}(2N_{\rm pix}^2\log_2 N_{\rm pix})$							
warped snapshots	$MN_{\rm kern}^2 + N_{\rm step}(2N_{\rm s}^2\log_2 N_{\rm s})$							
w-snapshots	$MN_{\rm kern}^2 + N_{\rm step}N_{\rm s}^2 + N_{\rm step}(2N_{\rm s}^2\log_2 N_{\rm s})$							

(4) uv域faceting成像方法:该方法与图像域faceting方法的不同之处在于不需要进 行重投影,所有分面都在同一个平面进行处理.每个分面只有栅格化和2-D FFT的计算 复杂度,总的计算复杂度为: $N_{\text{facets}}^2 M N_{\text{kern}}^2 + N_{\text{facets}}^2 (2N_{\text{f}}^2 \log_2 N_{\text{f}})$.因此,该方法比图像 域faceting更快速.在低动态范围下,与w-projection性能基本相同.uv域faceting成像失 真减少了,但是每个分面图像仍然存在偏离该分面相位中心的现象.在获得相同动态范 围下,uv域faceting需要花费的成本较高.

(5) w-projection成像方法: 主要的运算包括栅格化、w投影和2-D FFT, 计算复杂度 分别是: MN_{kern}^2 、 $MN_{w-kern}^2 \ln 2N_{pix}^2 \log_2 N_{pix}$, 其中, N_{w-kern} 是w投影卷积核的大小. 对 于某些特定情况, 该方法计算速度约是标准二维傅立叶变换方法的1/20^[12]. 该方法在牺 牲较大内存的情况下, 具有优越的计算速度和误差控制. 这些优势随着非共面影响的严

Fig. 7

重性的增大而变得更加重要. 该方法不仅仅可以使用传统的洁化(CLEAN)方法进行去卷积, 还可以选择多尺度洁化或最大熵方法. 在高动态范围下, 有较大的优势, 相位中心基本不失真.

(6) w-stacking成像方法:该方法同样需要进行栅格化,计算复杂度为 MN_{kern}^2 .并 且每个w层需要进行校正,所有w层校正的计算复杂度为 $N_{w-lay}N_{pix}^2$.每个w层还需要 进行2-D FFT,所有w层进行2-D FFT的计算复杂度为 $N_{w-lay}(2N_{pix}^2 \log_2 N_{pix})$,其中, N_{w-lay} 为w层个数.在计算速度方面该方法比w-projection快,比较适合用于MWA成 像.在LOFAR、MWA和SKA1全规模的成像中有较大的优势,分别是w-projection的7、 8和12倍^[13].但是,在LOFAR和SKA1全规模的成像方面还没有实际的测试结果.

(7) warped snapshots成像方法:该方法每个时段的可见度数据都要进行栅格 化和2-D FFT,栅格化的计算复杂度是 MN_{kern}^2 ,所有时段2-D FFT的计算复杂度 为 $N_{step}(2N_s^2\log_2 N_s)$,其中 N_{step} 是时段的总数; N_s 是每个时段图像一个轴上的像素 大小.从计算复杂度上看,该方法比w-projection的计算速度快.但是,实际应用中会出 现伪影,因为每个时段很难确保阵列精确共面.

(8) w-snapshots成像方法:该方法在计算复杂度上比warped snapshots多了一步 即w校正,所有时段进行w校正的计算复杂度为 $N_{\text{step}}N_s^2$.该方法在避免形状扭曲和后 期的偏差方面比w-projection和warped snapshots有更好的拓展性.如果我们让可见度 数据的数量和像素的总数都相同时,w-snapshots比w-projection快3/4个菲涅耳因子^[14].另外,w-snapshots在少量可见度数据、大像素和高精度要求下优于warped snapshots成像,并且在小像素、大量可见度数据下优于w-projection.

4 宽视场成像实验

本文主要针对faceting成像和w-projection成像算法开展SKA1-low宽视场成像实验.本实验采用的是目前最新的SKA1-low基线设计方案(第2版本)^[22].SKA1-low由大约131072个对数周期双极化天线组成,每256个天线构成一个台站,每个台站的直径约为35 m,共512个台站,其中多数台站非常紧凑地排列在直径大约为1 km的区域,即核心阵.所有台站的分布近似为3个等距螺旋臂的构型^[23].本实验主要模拟了SKA1-low核心阵,共166个台站,直径约700 m,核心阵台站分布图如图8所示.所有实验均在一台服务器上完成,服务器型号是宝德PR2716KY,主要硬件配置如表2所示.



Fig. 8 Distribution of 166 stations for the core array of SKA1-low baseline design with version 2

Tal	ble 2 Hardware configuration of Baode PR2716KY
Configuration	Description
CPU	$2\times$ Intel Xeon Processor E5-2698V3 16C2.30 GHz 40 MB
	L39.6 GB/s 135 W
Memory	$16{\times}16~\mathrm{GB}/\mathrm{DDR4}/2133/\mathrm{MHZ}/\mathrm{ECC}/\mathrm{REG}/2\mathrm{RANK}$
Hard disk	$2\times$ 300 GB/SAS/10000 RPM/2.5 inches/enterprise-class
SAS RAID card	$1\times$ SAS high speed 12 Gb/1 GB cache/ultracapacitor protection
Storage tank	$24\times$ HGST enterprise-class 7200 r 12 Gb SAS 4TB hot plug hard disk

表 2 宝德PR2716KY硬件配置 a 2 Hardward configuration of Baada PB2716KV

本次实验观测数据点的积分时间是1 s, 通过改变时角完成观测模拟, 设置的时角分 别是(-3.0,-2.0,-1.0,0.0,1.0,2.0,3.0) × $\frac{\pi}{12}$. 观测参考频率为100 MHz, 相位中心为(赤 经, 赤纬)=(15°, -45°), 视场范围为23.34°(赤经宽度)×13.1°(赤纬宽度). 最终产生的模 拟可见度数据共95865行, 大小为0.116 GB. uv覆盖如图9所示, 图中显示通过基线转换 得到的uv值及其对称部分(即基线转换得到的uv值同时取反). 实验采用模拟的天空模 型, 如图10所示. 该模型由44个点源组成, 整体形状为"SKA"字样, 图像大小是256×256, 网格大小(cellsize)为0.001弧度. 为了降低仿真数据的计算量使其能在单机上运行, 我们 设置频率带宽为10 MHz, 中心参考频率为100 MHz.

使用图9中的uv覆盖对上述天空模型进行采样得到模拟观测可见度数据,然后采用 传统的二维傅立叶变换成像方法,得到的脏图结果如图11所示.图12是采用faceting成像 得到的结果,facets=8,即分面数=8×8=64.经过计算我们得到观测数据的菲涅耳系 数为65.5,最大w值为169.6,推荐使用的w步数为0.2倍波长.当采用10倍波长的w步数进 行w-projection成像时,得到的脏图如图13所示.通过与图11模型的对比,我们得出二维 傅立叶变换得到的脏图质量最差,相位中心附近的点源模型能够得到很好的重构,距离 相位中心较远视场噪声多,点源模型较模糊.w-projection成像得到的脏图可以再现天空







transform imaging

好,同样可以再现天空模型.



为了进一步评估上述3种方法的成像质量,我们做了一些数据分析,得到的数据如表3所示.表中,中值(Median)主要描述图像流量的中间值,反映图像流量的大体范围; IS表示图像大小; PS_N表示识别的点源个数; RMS表示均方根植; Min表示图像流量的最小值; Max表示图像流量的最大值; Median abs是绝对中值; Time表示运行时间.从表3我们可以看出,w-projection与faceting的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)基本相同,二维傅立叶变换的信噪比相对较低.这一项数据也表明了二维傅立叶变换成像质量最差.我们采用相同的点源识别程序进行点源识别,faceting成像和w-projection成像得到的脏图识别的点源个数与模型原图的点源数相同,二维傅立叶变换得到的脏图识别的点源数比模型原图的点源数少6个.但是,在运行时间上,w-projection和faceting成像方法需要花费的时间比二维傅立叶变换方法要长得多,特别是faceting成像方法可以考虑并行加速方案.

			т	able 3	Image di					
_	Type	Min	Max	RMS	IS Median abs	TC	CND	DC N	Time	
		/Jy	/Jy			abs	15	SINT	ro_n	/s
	Sky model	0	174.9	4.93	0.0	0.0	256×256	35.7	44	_
	2D FT	-7.8	115.8	6.9	-1.1	1.7	256×256	16.8	38	1.48
	faceting	-8.0	173.7	8.9	-1.1	1.7	256×256	19.5	44	100.45
	w-projection	-8.7	170.3	8.8	-1.1	1.7	256×256	19.4	44	14.99

表 3 成像质量评估

下面我们分析随着相对相位中心距离增大图像的恢复情况,我们将采用两种形式进行评估:成像结果流量与期望位置的直接傅立叶变换(Direct Fourier Transform,

DFT)结果流量的重合情况,成像结果流量与期望位置的DFT结果流量的线性相关性.如图14所示,图中分别显示二维傅立叶变换成像(五角星)、faceting成像(圆点)和w-projection成像(上三角)点源的成像结果流量和DFT流量之差的绝对值.这里DFT流量是指原始可见度数据在期望位置作DFT得到的结果,因为可见度和亮度分布是傅立叶变换关系,所以这些结果可以作为原始可见度数据理想情况下的图像结果.如果成像结果流量与DFT流量在某个点重合或者接近重合,说明这个点的点源恢复正确.图中二维傅立叶变换成像明显不重合(绝对大于1)的点源共有33个,faceting成像共有9个,w-projection成像有8个.这些明显不重合的点源都是分布在距离相位中心2°以外,表明二维傅立叶变换对于大于2°的视场成像误差较大,同时表明了二维傅立叶变换不适合用于宽视场成像.faceting成像和w-projection成像这两种方法的误差相对较小.为了更直观地显示成像结果流量与DFT流量的关系,我们相应给出了图15、图16和图17,如果图像能够完全正确恢复成像结果流量,它与DFT流量的关系应是线性关系.图15由于有较多的非重合点,因此显示的点比较杂乱无章,基本没有显示出线性关系.图16和图17除了少数点凌乱外,能够明显看到成像结果流量和DFT流量之间的线性关系.



Fig. 14 Distribution of the absolute value difference between imaging resulted flux and DFT flux



下面我们分析分面数目对faceting成像质量的影响和w步数对w-projection成像 质量的影响.faceting成像的总分面数(分面s的平方)应是2的N次幂(N ≥ 0 ,整数). 当N = 0时,faceting成像与二维傅立叶变换成像相同,如图18圆点线所示,得到的信 噪比值与表3中二维傅立叶变换成像得到的相同.从2.2节可知,理论上随着分面数的 增大SNR值会随着增大,成像质量会越高.当分面由1上升到8的过程中,SNR值逐渐增 大;但是当facets=16时,分面数和模型原图的像素大小相同,每个分相位中心只包含 一个像素点,边缘效应影响比较大,所以SNR值没有继续增大,因此在facets=8时,达 到峰值.在w-projection成像方面,w步数就相当于该方向的采样间隔,步数越小误差 越小,SNR值越大.如图19黑色线所示,最小的步数为0.1倍波长,SNR最大;最大的步 数是170倍波长,这个值与w最大值相等,得到的SNR值与二维傅立叶变换相同,SNR最

50 - 18

低. 步数越低需要的计算量和计算复杂度就越大, 所以在对比3种方法的时候, 我们采用 了10倍波长步数, 此时的SNR值与推荐步数相差不大. 综上所述, 表明faceting成像需要 选择合理的分面, w-projection成像需要选择合适的w步数, 才能获得质量较高的图像. 图18和图19同时分别使用三角点线显示了相应的运行时间的变化曲线. 图18的结果表 明: 随着分面数目的增大, 运行时间也随之增大. 图19的结果表明: w步数越小, 需要的 运行时间越长.



图 16 faceting成像结果流量与DFT流量关系图

Fig. 16 The relation between faceting imaging resulted flux and DFT flux



图 17 w-projection成像结果流量与DFT流量关系图

Fig. 17 The relation between w-projection imaging resulted flux and DFT flux



图 18 faceting成像质量和运行时间随分面数量的变化 图 19 w-projection成像质量和运行时间随w步数的变化 曲线 曲线

Fig. 18 Faceting imaging quality and running time Fig. 19 w-projection imaging quality and running curves varying with the number of facets time curves varying with the w step

最后,我们探讨原始可见度数据大小对faceting和w-projection成像算法运行时间的 影响.如图20所示,可见度数据由1.157 GB递增到10.4 GB,在此过程运行时间近似线性 增长,其中,faceting成像的最大运行时间约为2小时24分.这进一步说明了这两种算法 在运行效率方面的提高非常迫切,特别是faceting成像方法.



图 20 faceting和w-projection运行时间随可见度数据增大的变化曲线



5 总结与展望

本文详细介绍了目前几种较常用的宽视场成像算法,并从计算成本和计算复 杂度的角度进行分析比较,总结出了它们的优缺点.选取了faceting和w-projection开 展SKA1-low成像仿真实验,并与二维傅立叶变换方法做对比,分别分析了它们的成像 质量、DFT流量与成像结果流量的差值分布及DFT流量与成像结果流量的关系.然 后分析了分面数目对faceting成像的影响和w步数对w-projection成像的影响.这些分 析均表明: faceting成像和w-projection成像能够进行SKA1-low (小数据量)宽视场成像, 但在分面数目和w步数的选择上要合理.最后,分析了可见度数据大小对faceting和wprojection成像运行时间的影响.表明faceting和w-projection成像耗时相对较长,所需的 时间会随着数据量的增大而增大.当处理的可见度数据较大时(如EB量级以上),所消耗 的时间之巨大是无法通过调整计算机的性能来缓解的,因此它们的实用性将急剧降低. 目前算法并行是提高计算速度的主要途径之一,也是射电天文软件的发展趋势,例如射 电天文主流数据处理软件CASA目前有部分功能已经作了基于信息传递接口(Message Passing Interface, MPI)的并行优化.

下一步我们将在此工作的基础上,研究这两种算法的并行优化技术,提高它们的运行效率,增加它们在海量数据处理方面的实用性.此外,将考虑增加其他成像算法(如WSCLEAN)的对比分析.并行优化之后,我们将在大规模机群(如上海天文台超级计算平台)上开展多节点仿真实验,逐步开发面向高性能计算平台的GPU版本的软件系统以及完整的成像流水线系统.最终将使用真实的观测数据对上述技术方法和软件系统进行实测.

参考文献

- [1] Van Haarlem M P, Wise M W, Gunst A W, et al. A&A, 2013, 556: A2
- [2] Lonsdale C J, Cappallo R J, Morales M F, et al. Proceedings of the IEEE, 2009, 97: 1497
- [3] Tingay S J, Goeke R, Bowman J D, et al. PASA, 2013, 30: e007
- [4] Wu X. BAAS, 2009, 41: 474
- [5] Ali Z S, Parsons A R, Zheng H, et al. AJ, 2015, 809: 61
- [6] Clarke T E, Kassim N E, Hicks B C, et al. MmSSI, 2011, 82: 664
- [7] Mellema G, Koopmans L V E, Abdalla F A, et al. ExA, 2013, 36: 235
- [8] Cornwell T J, Golap K, Bhatnagar S. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Philadelphia: IEEE, 2005, 5: v/861
- [9] Perley R A. Synthesis Imaging in Radio Astronomy II ASP Conference Series, San Francisco: N-RAO/NMIMT, 1999, 180: 383.
- [10] Cornwell T J, Perley R A. A&A, 1992, 261: 353
- [11] Kogan L, Greisen E. AIPS Memo, 2009
- [12] Cornwell T J, Golap K, Bhatnagar S. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2008, 2: 647
- [13] Humphreys B, Cornwell T. SKA Memo, 2011: 132
- [14] Cornwell T J, Voronkov M A, Humphreys B. arXiv:1207.5861
- [15] McMullin J P, Waters B, Schiebel D, et al. adass, 2007, 376: 127
- $[16]\,$ Jaeger S. adass, 2008, 394: 623
- [17] Offringa A R, McKinley B, Hurley-Walker N, et al. MNRAS, 2014, 444: 606
- [18] Vermij E, Fiorin L, Jongerius R, et al. The International Journal of High Performance Computing Applications, 2015, 29: 37
- [19] Ord S M, Mitchell D A, Wayth R B, et al. PASP, 2010, 122: 1353
- [20] Thompson A R, Moran J W, Swenson G W. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. New York: Wiley, 1986: 68-73
- [21] Yashar M, Kemball A. Computational Costs of Radio Imaging Algorithms Dealing with the Noncoplanar Baselines Effect: I. TDP Calibration & Processing Group CPG MEMO # 3, 2009
- [22] Dewdney P, Turner W, Braun R, et al. Document number SKA-TEL- SKO-0000308, 2015
- [23] Lao B Q, An T, Guo S G, et al. Telecommunication Engineering, 2016, 56: 956

Research on Wide-field Imaging Technologies for Low-frequency Radio Array

LAO Bao-qiang¹ AN Tao^{1,2} CHEN Xiao¹ WU Xiao-cong¹ LU Yang¹ (1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030) (2 Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

ABSTRACT Wide-field imaging of low-frequency radio telescopes are subject to a number of difficult problems. One particularly pernicious problem is the non-coplanar baseline effect. It will lead to distortion of the final image when the phase of w direction called w-term is ignored. The image degradation effects are amplified for telescopes with the wide field of view. This paper summarizes and analyzes several w-term correction methods and their technical principles. Their advantages and disadvantages have been analyzed after comparing their computational cost and computational complexity. We conduct simulations with two of these methods, faceting and w-projection, based on the configuration of the first-phase Square Kilometre Array (SKA) low frequency array. The resulted images are also compared with the two-dimensional Fourier transform method. The results show that image quality and correctness derived from both faceting and w-projection are better than the two-dimensional Fourier transform method in wide-field imaging. The image quality and run time affected by the number of facets and w steps have been evaluated. The results indicate that the number of facets and w steps must be reasonable. Finally, we analyze the effect of data size on the run time of faceting and w-projection. The results show that faceting and w-projection need to be optimized before the massive amounts of data processing. The research of the present paper initiates the analysis of wide-field imaging techniques and their application in the existing and future low-frequency array, and fosters the application and promotion to much broader fields.

Key words instrumentation: interferometers, methods: observational, techniques: interferometric, techniques: image processing, radio continuum: general