利用默奇森大视场阵列旁瓣探寻北天脉冲星

龚宏宇^{1,2,3}, 张仲莉^{1,4*}, 薛梦瑶⁵, 洪晓瑜^{1,2,3,4}, 安涛^{1,4}, 胡旭志^{1,2,3}, 徐志骏¹, 郭绍光¹, 劳保强¹, 伍筱聪¹, 吕唯佳¹, 余婷¹

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;
2. 上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 200031;
3. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049;
4. 中国科学院射电天文重点实验室, 南京 210008;
5. 国际射电天文研究中心(ICRAR), 澳大利亚科廷大学, 珀斯 6102, 澳大利亚

*联系人, E-mail: zzl@shao.ac.cn

收稿日期: 2020-03-11; 接受日期: 2020-05-14; 网络出版日期: 2020-08-14

国家重点研发计划(编号: 2018YFA0404602)资助项目

摘要 探索新的方法对发现和观测脉冲星具有重要意义. 本文利用澳大利亚的默奇森大视场阵列望远镜MWA (Murchison Wide-field Array)中心频率185 MHz的观测数据进行脉冲星搜寻, 探测到了两颗高纬度北天脉冲星, 经分析认定为J0332+5434和J2219+4754. 它们位于MWA主波束视场以外赤纬30°以北, 而落在MWA非相干波束的北天旁瓣. 虽然射电望远镜旁瓣的灵敏度远低于主瓣, 但大多数脉冲星的低频流量更高, 因而仍然可以利用低频望远镜旁瓣对它们进行搜寻与观测. 本文将对低频脉冲星的搜索流程和结果进行阐述, 并讨论利用MWA射电望远镜旁瓣进一步搜寻和观测北天脉冲星的可能性. 通过对已知射电脉冲星的统计和MWA探测灵敏度的模拟, 预计有30颗已知北天脉冲星可以在MWA旁瓣中被探测到. 此工作是未来使用SKA低频阵列搜寻北天脉冲星的有益探索.

关键词 脉冲星, 中子星, 射电源

PACS: 97.60.Gb, 97.60.Jd, 07.57.Hm

1 引言

脉冲星的研究在近现代天文学中有着重要地位. 主流观点认为脉冲星是具有高密度、强磁场的中子星, 其典型质量为 $1.4M_{\odot}$, 半径为10–12 km, 平均密度

为 $6.7 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$ ^[1]. 脉冲星有着地球实验室无法创造的环境, 对脉冲星的观测, 有助于验证引力理论, 探测引力波, 研究中子星结构、星际介质模型和建立脉冲星时间系统等^[1].

1967年, 脉冲星首次被发现于低频(81.5 MHz)射

引用格式: 龚宏宇, 张仲莉, 薛梦瑶, 等. 利用默奇森大视场阵列旁瓣探寻北天脉冲星. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 109501
Gong H Y, Zhang Z L, Xue M Y, et al. Search and detection of northern pulsars in the side lobes of the murchison wide-field array (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 109501, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0064](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0064)

电观测中^[2], 迄今已有超过2800颗射电脉冲星被发现^[1]. 观测和理论表明, 脉冲星的能谱为幂律谱或截断幂律谱, 谱指数在 -1.5 – -2 之间. 除了部分被证实存在低频反转的脉冲星之外, 多数脉冲星在低频具有更高的流量密度^[3]. 因此, 理论上脉冲星在低频存在更多的探测机会. 然而, 由于低频信号受到星际介质效应的强烈干扰, 迄今对脉冲星的观测和巡天大多利用中频. 通过澳大利亚Parkes望远镜对大量脉冲星的观测统计, 银河系内约 (30000 ± 1100) 颗脉冲星^[4]可被探测. 因此, 改进脉冲星搜寻方法, 尤其是补充低频脉冲星搜寻结果, 是未来脉冲星研究工作的重点.

目前, 国际上已有一些以北天为主的低频脉冲星的搜寻工作. 例如, 美国的GBNCC(GBT North Celestial Cap)脉冲星巡天项目在350 MHz发现了超过150颗脉冲星, 其中包括20颗毫秒脉冲星(MSP)和11颗旋转射电暂现源(RRAT)^[5]. 印度的GHRSS(GMRT High Resolution Southern Sky)项目在322 MHz对赤纬 -40° – -54° 的天区进行了脉冲星搜寻, 发现了10颗新脉冲星, 其中包括1颗MSP^[6]. 荷兰的低频阵列望远镜(Low Frequency Array, LOFAR^[7]) 在135 MHz进行了3次脉冲星巡天, 其中LPPS(LOFAR Pilot Pulsar Survey)通过非相干波束叠加数据对65颗已知脉冲星进行了搜索检验; LOTAS(LOFAR Tied-Array Survey)在相干波束中发现了两颗新脉冲星, 并对27颗已知脉冲星进行了搜索检验^[8]; LOTAAS(LOFAR Tied Array All-Sky Survey)则采用部分相干与非相干叠加数据结合的方式, 截至2017年12月, 已成功发现了66颗新脉冲星, 其中包括5颗RRAT^[9]. 而中国的500 m口径球面射电望远镜FAST也在前期的低频(270–850 MHz)巡天中发现了约60颗脉冲星, 占其累计发现的脉冲星数量的1/2以上(参见FAST的CRAFT巡天项目²⁾).

正在建设中的平方公里阵列射电望远镜(Square Kilometre Array, SKA)^[10]是位于南天的21世纪大型综合孔径阵列望远镜. SKA将有着比世界上现有的所有射电望远镜更高的灵敏度和分辨率, 通过它有望发现大量辐射束扫过地球的新脉冲星. 模拟结果显示, SKA-LOW预期可以发现11000颗脉冲星^[11], 这将极大地补充南天低频射电脉冲星的数量. 本文利用SKA的

低频先导项目——澳大利亚的默奇森大视场阵列望远镜(Murchison Widefield Array, MWA)^[12] 探寻低频脉冲星, 也同时为SKA脉冲星项目的开展做好准备.

MWA位于西澳大利亚的默奇森射电天文台, 台址坐标纬度 -26.703° , 经度 116.671° . MWA观测的总带宽为30.72 MHz, 可以覆盖70–300 MHz的频率区间^[13]. MWA的高时间分辨率观测采用128组天线的电压捕获系统(Voltage Capture System, VCS), 分为3072个频率通道, 可以达到10 kHz的频率分辨率和0.1 ms的时间分辨率^[14]. 在运行的最初两年里, MWA-VCS在185 MHz进行了约84 h的观测. Xue等人^[14]在2017年利用MWA射电望远镜在185 MHz对南天区的已知脉冲星进行探测, 在26次观测的非相干叠加数据中成功探测到50颗脉冲星, 其中包含6颗MSP. 其正在进行中的南天快速两米巡天项目(Southern-sky MWA Rapid Two-metre, SMART)将采用相干波束进行脉冲星搜索, 从而极大提高信噪比, 有利于搜索较暗的脉冲星.

本文重点介绍了MWA旁瓣的搜寻结果. 综合孔径阵列射电望远镜对脉冲星探测的灵敏度随天顶角的增大而衰减, 因此人们通常选择在天顶附近主瓣功率较大的区域进行脉冲星观测. 但由于地理位置的限制, 望远镜都有其探测极限, 比如LOFAR的探测区域极限在赤纬 $\text{DEC} \geq -10^\circ$, MWA的探测极限通常认为在 $\text{DEC} \leq 30^\circ$. 如果能通过它们的旁瓣进行脉冲星探测, 将显著扩大射电望远镜的探测范围, 有效利用射电望远镜获得更多有意义的科学成果.

2 脉冲星的搜寻方法

我们在MWA-VCS的中心频率为185 MHz的观测数据中, 根据天空的覆盖面积选取了50次共约46 h的漂移扫描观测, 进行非相干叠加数据的脉冲星搜索, 搜寻结果将在后续文章中详细说明. 本文针对性地介绍了其中两次观测的搜寻结果, 用以讨论脉冲星搜寻和探测中容易被忽视的旁瓣作用. 观测信息如表1所示. 射电阵列的非相干叠加数据具有很大的天空响应面积, 每1 h的MWA-VCS数据可以形成约 600 deg^2 的主瓣面积, 对比于相干模式, 非常适合大天区的首次

1) <https://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat/>

2) <https://crafts.bao.ac.cn/pulsar/>

表 1 观测数据信息

Table 1 Information of observations

观测编号	赤经RA (°)	赤纬DEC (°)	观测时长 (s)
1129464688	328.82	-55.09	5075
1091309464	33.60	-55.08	2922

盲搜. 根据Xue等人^[14]在2017年的结果, MWA-VCS的非相干模式只可能探测到已知的脉冲星. 我们第一次在MWA的非相干模式下搜寻, 旨在和探测结果进行对比, 从而针对MWA改进低频脉冲星的搜索方式.

我们的脉冲星搜索是基于PRESTO软件^[15]进行的. PRESTO是现今常用的脉冲星搜索软件之一. 科学家通过该软件已发现超过600颗脉冲星, 其中包括230多颗双星系统中的脉冲星. 我们的搜索流程如图1所示, 在接下来的章节将对它们进行详细的介绍.

2.1 去除射频干扰

射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI)对脉冲星的搜索与观测有着严重影响. 射频干扰主要来源于人造射电源, 如果观测中受到很强的射频干扰, 会影响脉冲星信号的明显性, 以至于无法被搜索到. 根据不同的环境, 有不同的降低射频干扰的方法, 但目前还没有一种通用的去除射频干扰的方法^[16,17].

脉冲星的观测数据为时频数据. 去除RFI常常分为时域和频域两方面. 时域上容易识别突发的强干扰信号并予以去除. 同时, 电磁干扰可近似地视为高斯噪声, 在经过傅里叶变换前后的宽度是逆相关的. 因此, 时域上难以识别的较宽的干扰, 经过傅里叶变换, 在频域上会表现为窄的尖峰, 从而得以识别, 但想要将其去除仍然是一个有待探索的难题.

利用PRESTO的rfifind程序, 我们在自动化搜索程序中, 将时域分为12 s一个的区间, 可以找出数据文件中的RFI并生成标记文件. 后续的搜索过程中, 标记的部分将被区间的中位数替代. 事实上, 对于同一台观测设备来说, 经过长期的观测与分析记录, 可以得到该台站的电磁干扰谱表, 直接进行频率通道切除或对脉冲频率进行标记. 对于零色散的周期性信号, 通常也会对其脉冲频率进行标记.

2.2 消色散

不同频率的电磁波在星际介质中的传播速度不

图 1 基于PRESTO软件的脉冲星搜索流程图

Figure 1 Flow chart of pulsar search based on PRESTO.

同, 接收到的不同频率的信号会有时间差, 导致脉冲展宽. 频带越宽的射电望远镜在观测脉冲星时灵敏度越高, 但星际介质引起的色散影响也越大. 我们需要对观测到的数据进行消色散处理. 色散量定义为

$$DM = \int_0^d n_e dl, \quad (1)$$

其中 d 为观测者到脉冲星的距离, n_e 为电子数密度. 色散引起的信号延迟与DM和频率有关, 可以用下式来表示:

$$t_{DM} = 4.15 \times 10^3 DM / \nu_{\text{MHz}}^2, \quad (2)$$

其中 ν_{MHz} 为观测频率. 可见频率越低的观测, 受到色散的影响越大, 对色散量大的脉冲星灵敏度越低. 我们利用非相干消色散的方法, 按照一定的步长划分搜索范围内的DM, 在每个DM下分为512个频率通道组, 分别进行色散修正, 再将修正后的各频率通道信号叠加, 得到当前DM的时间序列. 通常在低银纬区域, DM值会较大, 而高银纬区域的DM值相对较小. 考虑到低频信号受到星际介质散射致宽的效应随DM的增大而增大, 根据MWA射电望远镜的观测能力, 以及已有的观测资料^[14]预估, 我们选取的DM搜索范围为 $DM < 200 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$.

我们采用针对MWA低频数据的消色散方案(表2所示), 利用prepsubband程序进行消色散处理, 生成不同DM的时间序列. 在这个过程中, 上一步被标记的射频干扰将会被去除. 对于信号较强的脉冲星, 消色散之后便会显现出脉冲信号, 若数据中存在DM在搜索范围中的脉冲星信号, 可以在后续搜索过程中确定其周期.

表 2 消色散方案

Table 2 De-dispersion plan

色散量下限 ($\text{cm}^{-3} \text{ pc}$)	色散量上限 ($\text{cm}^{-3} \text{ pc}$)	步长 ($\text{cm}^{-3} \text{ pc}$)	步数
0.0	22.9	0.02	1143
22.9	45.7	0.05	457
45.7	91.5	0.11	415
91.5	183.0	0.21	435
183.0	200.0	0.43	39

2.3 用加速搜索算法搜索

加速搜索是频域上的搜索算法. PRESTO软件的accelsearch程序提供了脉冲星的加速搜索算法, 可同时用于对普通脉冲星和双星系统中的脉冲星进行搜索. 经过傅里叶变换, 如果某个DM的时间序列中有周期为 P 的脉冲星信号, 就能在频域中得到其基频和谐波信号. 对于较弱的脉冲星信号, 非相干相加方法可以有效提高信噪比. 由于噪声不具有谐波, 利用这一特点, 通过在频域上将信号周期乘以2的倍数进行叠加, 可以加强基频和谐波幅度. 叠加次数并非越高越好, 而是取决于周期与脉冲宽度, 合适的谐波叠加次数可以有效提高搜索灵敏度^[18]. 我们在自动化搜索流程中分别进行了2, 4, 8, 16次谐波叠加, 以便提高搜索的成功率.

对于双星系统中的脉冲星, 由于高速轨道运动带来的多普勒频移, 会导致直接观测到的脉冲周期不断变化. 解决办法是假设不同的常数轨道加速度进行修正, 从而找出最接近准确值的信号周期. 这正是加速搜索算法的优势所在. 我们用参数 $z_{\text{max}}=200$ 进行加速搜索之后, 得到上万个候选体, 有待进一步筛选.

2.4 候选体的程序筛选

首先通过程序去进行候选体的筛选. 由于脉冲星信号必然会受到星际介质色散的影响, DM值过小的周期性信号极有可能是干扰信号, 而目前星表上色散量最小的已知脉冲星是 $\text{DM}=2.38 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$ 的PSR J0108-1431, 因此我们将 $\text{DM}<2 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$ 的候选体全部去除. 在周期上, 为了缩小候选体范围, 我们采用软件默认筛选条件将所有周期 $P<0.5 \text{ ms}$ 和 $P>15 \text{ s}$ 的候选体去除. 同时谐波等复杂因素也是筛选候选体的条件. 我们用PRESTO软件中的ACCEL_sift.py程序按照一系列

条件实现候选体的自动筛选, 从而将一个观测的上万个候选体缩减为约100个, 但最终的判定仍然需要人工筛选的过程.

2.5 人工筛选与折叠

由于目前尚无针对MWA观测的自动识别脉冲星的方法, 我们仍需要通过人工识别最终判定一个候选体是否为脉冲星. 我们对程序筛选出来的候选体, 在搜索到的DM和周期 P 上对它们的时间序列进行折叠, 分析其折叠后的轮廓.

PRESTO软件在折叠脉冲轮廓的时候有两种方式: 一种是在输入的DM和 P 值的附近进行小范围搜索后折叠, 目的是找到更精确的DM和 P 值. 另一种方式是直接采用输入的DM和 P 值进行折叠. 对每个候选体, 我们在原始数据中同时用两种方式进行折叠, 对比选择其中更好的一个作为结果. 如果如图2所示, 折叠后能得到明显的脉冲轮廓, 时间-相位图上可以看到明显的周期性信号, 频率-相位图上每个单独的频率通道都在同相位处有明显信号, 则可判定为脉冲星.

2.6 单脉冲搜索

部分脉冲星的信号在对脉冲轮廓进行叠加之前, 没有表现出明显的周期性, 例如存在零脉冲、巨脉冲等现象的脉冲星^[1]. 这类脉冲星很难在频域上被搜索到. 单脉冲搜索是时域上的搜索算法, 不少脉冲星是通过这种方法被发现的, 例如LOFAR射电望远镜利用单脉冲搜索方法发现了5颗RRAT^[9]. PRESTO软件提供了单脉冲搜索程序, 可以得到不同DM时间序列中较明显的单脉冲信号. 这些单脉冲信号大多是射频干扰, 其余可能包含了脉冲星、RRAT和快速射电暴的信号. 由于经过多频率通道叠加, 来自大气层外的脉冲信号的信噪比应是DM的函数, SNR在其实际的DM处应有峰值^[19]. 如果信噪比SNR对DM的峰值在 $\text{DM}=0$ 处, 或SNR随DM变化不明显, 则该信号应为射频干扰. 如果出现周期稳定, 信噪比峰值位于 $\text{DM}>0$ 处, 且SNR-DM关系一致的信号群, 则极大可能是脉冲星信号.

3 结果与讨论

3.1 脉冲星搜寻结果

在这两次观测中我们仅搜索到两颗脉冲星的候选

图 2 (网络版彩图) 认定为脉冲星候选体的PRESTO输出图像。(a) J0332+5434; (b) J2219+4754. 其中, (1) 两个周期相连的脉冲轮廓图像; (2) 按照周期折叠后的时间-相位图, 图上灰度与信号强度成反比; (3) 频率通道组-相位图, 图上灰度与信号强度成反比; (4) 对色散量DM的卡方检验; (5) 对周期 P 的卡方检验; (6) 对周期变化率 $\dot{P}$ 的卡方检验; (7) 该脉冲星的周期和周期变化率概率分布

Figure 2 (Color online) Output figures of candidates identified to be pulsars in search by PRESTO. (a) J0332+5434; (b) J2219+4754. (1) Pulse shape of connected 2 periods. (2) Diagram of time-phase after folding. The gray scale is inversely proportional to signal strength. (3) Diagram of sub-band-phase. The gray scale is inversely proportional to signal strength; (4) Chi-square test of DM; (5) Chi-square test of P ; (6) Chi-square test of $\dot{P}$; (7) probability distributions of P and $\dot{P}$ of the pulsar.

体, 搜索结果如图2所示. 经过与星表和已有观测比分析, 没有已知的北纬30°以南的脉冲星与之相符. 然而, 这两个候选体分别与已知北天脉冲星J0332+5434和J2219+4754的色散DM和周期 P 均吻合(参见表3). 同时, 通过图3所示脉冲轮廓计算得到两个候选体的半高全宽FWHM约为 $0.019P$ 和 $0.024P$, 相似于Białkowski等人^[20]在2018年和Bilous等人^[21]在2016年对J0332+5434和J2219+4754的观测结果. 综上可以认为, 这两颗脉冲星极有可能是J0332+5434和J2219+4754. 通过天线功率分布(图4)可知, 这两颗已知脉冲星超出了MWA北纬30°的探测极限, 处于观测的旁瓣中, 响应分别仅为天线天顶响应的约1%和5%, 因此判定为高流量的已知脉冲星J0332+5434和J2219+4754而非新脉冲星. 表3列出了搜索结果与星表已知参数的对比.

我们将MWA的探测结果与北半球的低频阵列LOFAR早期对它们的探测^[20,21]进行了对比. 其中, PSR J0332+5434是北天已知最亮的脉冲星, 同时是一颗被证实的模式变换脉冲星^[20]. LOFAR在低频上观测到了它的两种模式, 但由于我们的数据来自非相干波束, 具有较低的信噪比, 无法判断其处于何种模式. PSR J2219+4754的搜索结果折叠轮廓与LOFAR相比略宽, 我们认为可能也是由于噪声的影响. 将来如果通过相干波束的方式, 可以极大地提高信噪比, 从而捕捉到它们的脉冲轮廓细节.

我们得到的PSR J2219+4754脉冲轮廓信噪比相对较高, 因而对其进行试探性的流量密度估算, 采用的计算方法如下^[1,14]:

$$S_{\text{mean}} = \frac{(S/N)_{\text{peak}} T_{\text{sys}}}{G \sqrt{n_p t_{\text{int}} \Delta f}} \sqrt{\frac{W}{P-W}}, \quad (3)$$

其中系统温度 T_{sys} , 增益 G 为MWA系统性能参数, 在该次观测对于该源位置而言, $T_{\text{sys}}=205$ K, $G=1.371 \times 10^{-3}$ K/Jy, $n_p=2$ 是总极化数, $\Delta f=30.72$ MHz是频带宽度, $P=538.47$ ms是脉冲周期. 由图2可估测该脉冲星存在视场中的时间约为 $t_{\text{int}}=4400$ s. 通过积分脉冲轮廓可以计算出峰值信噪比 $(S/N)_{\text{peak}}=14.982$, 等效宽度 $W=0.0139$ s. 由此可得该脉冲星的平均流量 $S_{\text{mean}}=(703.875 \pm 432)$ mJy. 其中仅考虑了由干扰造成的信噪比误差, 而搜索过程中脉冲星周期 P 的误差, 以及周期随时间变化 $\dot{P}$ 产生的误差, 经计算二者之和为 10^{-4} mJy数量级, 可以忽略不计. 因为我们是试探性估算, 其他

图3 (网络版彩图)MWA在185 MHz搜索到的已归一化的脉冲轮廓. (a) J0332+5434; (b) J2219+4754

Figure 3 (Color online) Normalized pulse shapes searched by MWA at 185 MHz. (a) J0332+5434; (b) J2219+4754.

图4 (网络版彩图)两次观测的功率覆盖天区及脉冲星分布示意图. 图中灰色等高线的位置标记响应度占天顶响应度的比例, 由最外侧的1%, 向内依次1%递增. 蓝点是目前认为MWA可探测区域内所有已知射电脉冲星, 灰点为超出MWA探测极限的已知射电脉冲星, 红点为我们搜索到的两颗超出MWA探测极限的脉冲星(左为J0332+5434, 右为J2219+4754). 两次观测的指向中心都在北纬-55°, 搜索到的两颗脉冲星分别位于旁瓣1%和5%天顶响应的区域内

Figure 4 (Color online) Distribution of pulsars and areas of the power of the observations. The grey contours represent the ratio of power to zenith power, increasing from 1% of the outermost with a step of 1% towards the inside. Blue points are all the known pulsars within the previous expectation to be detected by MWA. Gray points are pulsars beyond MWA detection limit. Red points are 2 pulsars we detected beyond MWA detection limit (J0332+5434 and J2219+4754 from left to right). The pointing centers of these 2 observations both are -55° . The 2 detected pulsars are at side lobe areas with 1% and 5% zenith power.

表3 搜索结果与ATNF星表已知参数的对比

Table 3 Comparison between search results and the known parameters in the ATNF pulsar catalogue

脉冲星名称	搜寻色散量 (cm^{-3} pc)	搜寻周期 (ms)	星表色散量 (cm^{-3} pc)	星表周期 (ms)
PSR J0332+5434	26.42	714.49	26.76	714.52
PSR J2219+4754	43.57	538.44	43.50	538.47

误差来源, 如脉冲星自身流量的变化、星际介质闪烁引起的流量变化等复杂情况则没有纳入计算. 我们将 PSR J2219+4754 在 185 MHz 的流量计算结果与其他频率的历史观测做比较, 采用最小二乘法进行无权重光谱拟合, 结果如图 5 所示, 流量密度谱指数为 $\alpha = -2 \pm 0.17$, 与历史观测数据^[21]很好地吻合, 说明了利用阵列望远镜旁瓣对脉冲星进行观测的结果是准确的.

另一颗脉冲星 PSR J0332+5434 由于存在模式变换, 流量不稳定, 且位于仅 1% 的天线天顶响应区域内, 信噪比过低, 无法进行有意义的流量计算.

由于这两颗脉冲星在 MWA 观测中的信号比较微弱, 在单脉冲搜索中没有获得交叉验证.

3.2 MWA 旁瓣探寻脉冲星能力估计

射电天线旁瓣功率小于主瓣, 但如果也充分利用旁瓣所获得的数据进行分析研究, 则很大程度上拓宽了望远镜的探测区域. 在 MWA 数据的搜索中发现两颗旁瓣中的脉冲星, 使得利用旁瓣探测与搜寻脉冲星成为可能. 通过对 MWA 全天灵敏度分布模拟计算, 得到探测灵敏度是赤纬的函数. 图 6 所示为 MWA 在中心频率 184.96 MHz 的 10σ 灵敏度全天分布图, 依据为 MWA-VCS 最长观测 1.5 h 的相干波束灵敏度. 对于综合孔径射电阵列, 相干波束的探测信噪比相比于非相干叠加

图 5 (网络版彩图) J2219+4754 光谱图. 黑色点和误差棒代表已有观测流量密度和误差(来源于文献^[21–36]), 红色点和误差棒是我们 MWA 的 185 MHz 的旁瓣搜寻结果. 蓝色实线是最小二乘法无权重光谱拟合结果, 谱指数为 $\alpha = -2 \pm 0.17$.

Figure 5 (Color online) The spectrum of J2219+4754. Black points and error bars are literature flux densities (the data are referenced from refs. [21–36]). Red point and error bar show our result from the side lobe of MWA observation at 185 MHz. Blue line is the least square method fitting result with no weights, which obtains a spectral index of $\alpha = -2 \pm 0.17$.

波束, 从 $\text{SNR} \propto \sqrt{N}$ 提升到 $\text{SNR} \propto N$ (N 为天线组数). 由于 MWA-VCS 采用 128 组天线, 非相干的探测流量阈值为相干阈值的 11.3 倍.

我们对 MWA 旁瓣区域 ($30^\circ < \text{DEC} < 63.3^\circ$) 内的所有已知射电脉冲星在 400 MHz 的流量 S_{400} 进行了统计, 并利用 LOFAR 观测得到的谱指数^[21]估算其 184.96 MHz 的流量. 对于未知谱指数的脉冲星, 则采用 -1.4 的平均谱指数^[3,14]进行估算, 最终得到图 7 所示结果, 其中 J0332+5434 的流量估算为 4416.40 mJy, J2219+4754 的流量按照上节计算结果为 703.88 mJy. 根据图 6 的

图 6 (网络版彩图) MWA-VCS 在中心频率 184.96 MHz 观测 1.5 h 相干波束的 10σ 灵敏度分布模拟图

Figure 6 (Color online) Simulation of 10σ sensitivity distribution that MWA observe for 1.5 h at the center frequency of 184.96 MHz with coherent beam form.

图 7 (网络版彩图) MWA 旁瓣区域内已知射电脉冲星在 185 MHz 的流量与赤纬分布图. 红点为预估 MWA 旁瓣相干波束可探测到的脉冲星, 黑点为区域内其他已知射电脉冲星. 红圈标记为 PSR J2219+4754 和 PSR J0332+5434. 上方蓝色虚线为非相干波束探测阈值, 下方蓝色虚线为相干波束探测阈值

Figure 7 (Color online) Distribution of flux and declination of known pulsars in MWA side lobe area at 185 MHz. Red dots show pulsars are predicted to be detected in MWA side lobe. Black dots are other known pulsars in the area. Red circles sign the PSR J2219+4754 and PSR J0332+5434. The blue dashed lines are detection threshold of incoherent beam (up) and coherent beam (down).

MWA-VCS全天探测灵敏度分布, 可以得出探测阈值随赤纬变化的函数, 如图7中蓝色虚线所示. 考虑到色散量较大时低频信号受到星际介质散射效应明显, 因而排除色散量大于 $200 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$ 的脉冲星. 由此估算出MWA旁瓣区域内通过非相干成波束可探测4颗已知脉冲星, 分别为J0332+5434, J2219+4754, J1948+3540和J2113+4644. 相干波束可探测30颗已知脉冲星.

3.3 计算资源

本工作由中国SKA区域中心原型机提供计算资源. 中国SKA区域中心原型机于2019年11月研制成功^[37]. 原型机现有存储2PetaByte, 计算平台包括16个Intel x86架构的CPU计算节点、3个Nvidia的GPU(Tesla V100)计算节点和12个Huawei ARM架构(鲲鹏920)的计算节点, 总计算能力接近200 Tflops.

在本工作中, 我们使用一个Intel x86的计算节点(共28核), 采用单核结合部分流程10核并行的方式, 对1 h MWA-VCS观测的非相干叠加数据的搜寻时间约为96 h.

4 结论

我们利用MWA射电望远镜在185 MHz的两次观

测数据进行脉冲星盲搜, 发现了两颗超出MWA主波束视场范围以外的脉冲星J0332+5434和J2219+4754, 经分析得知这两颗脉冲星是在旁瓣中探测到的, 从而提出了利用MWA旁瓣探寻北天脉冲星的可能性. 对MWA旁瓣探寻脉冲星的能力进行预估, 如果将来采用相干波束的方法, 望远镜灵敏度将会提高一个量级, 并由此估计将有30颗已知北天脉冲星可能在MWA旁瓣中观测到.

实际情况下, 影响脉冲星搜寻成功率和探测效果的因素很多, 例如观测受到干扰的情况, 脉冲星自身的特点等. 有的脉冲星低频散射非常明显, 以至于难以在低频观测到它的本征脉冲轮廓. 有的脉冲星周期很长, 在搜索中容易受红噪声的影响. 还有一些周期短、脉冲窄的毫秒脉冲星, 搜索也较为困难. 利用旁瓣进行脉冲星探寻能够突破地域限制, 扩展望远镜的探测范围. MWA未来的脉冲星观测和巡天, 都将使用相干波束的方法, 这将使观测灵敏度提高, 但会使视场明显变小, 巡天数据量大增, 对数据处理的计算机资源要求更高^[38]. 原型机主要优势在于异构并行多任务处理, 我们将在后续开展presto软件的并行优化及GPU尝试. 中国SKA区域中心原型机经过低频脉冲星搜索测试, 具备高性能处理脉冲星数据的能力, 将能对脉冲星的科学产出做出重要贡献.

致谢 由衷感谢澳大利亚默奇森射电天文台提供观测数据, 以及科廷大学Nick Swainston博士提供MWA灵敏度分布图. 感谢科廷大学Ramesh Bhat教授的建设性意见. 本工作由中国SKA区域中心原型机提供计算资源.

参考文献

- 1 Lorimer D R, Kramer M. Handbook of Pulsar Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 2012
- 2 Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, et al. Observation of a rapidly pulsating radio source. *Nature*, 1968, 217: 709–713
- 3 Bates S D, Lorimer D R, Verbiest J P W. The pulsar spectral index distribution. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 431: 1352–1358, arXiv: 1302.2053
- 4 Lorimer D R, Faulkner A J, Lyne A G, et al. The parkes multibeam pulsar survey-VI. Discovery and timing of 142 pulsars and a Galactic population analysis. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 372: 777–800, arXiv: astro-ph/0607640
- 5 Lynch R S, Swiggum J, Stovall K, et al. The green bank north celestial cap pulsar survey: New pulsars and future prospects. *AAS*, 2018, 231: 243
- 6 Bhattacharyya B, Roy J, Stappers B W, et al. The GMRT high-resolution southern sky survey for pulsars and transients. II. New discoveries, timing, and polarization properties. *Astrophys J*, 2019, 881: 59, arXiv: 1906.09574
- 7 van Haarlem M P, Wise M W, Gunst A W, et al. LOFAR: The low-frequency array. *Astron Astrophys*, 2013, 556: A2, arXiv: 1305.3550
- 8 Coenen T, van Leeuwen J, Hessels J W T, et al. The LOFAR pilot surveys for pulsars and fast radio transients. *Astron Astrophys*, 2014, 570: A60, arXiv: 1408.0411
- 9 Tan C M. The LOFAR tied-array all-sky survey for pulsars and fast transients. *Proc IAU*, 2017, 13: 9–12

- 10 Dewdney P E, Hall P J, Schilizzi R T, et al. The square kilometre array. *Proc IEEE*, 2009, 97: 1482–1496
- 11 Keane E, Bhattacharyya B, Kramer M, et al. A cosmic census of radio pulsars with the SKA. In: *Proceedings of Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14)*, 2015. 40
- 12 Tingay S J, Goke R, Bowman J D, et al. The murchison widefield array: The square kilometre array precursor at low radio frequencies. *Publ Astron Soc Aust*, 2013, 30: e007, arXiv: [1206.6945](#)
- 13 Wayth R B, Tingay S J, Trott C M, et al. The phase II murchison widefield array: Design overview. *Publ Astron Soc Aust*, 2018, 35: 33, arXiv: [1809.06466](#)
- 14 Xue M, Bhat N D R, Tremblay S E, et al. A census of southern pulsars at 185 MHz. *Publ Astron Soc Aust*, 2017, 34: e070, arXiv: [1711.08933](#)
- 15 Ransom S M. *New Search Techniques for Binary Pulsars*. Dissertation for Doctoral Degree. Cambridge: Harvard University, 2001
- 16 An T, Chen X, Mohan P, et al. Radio frequency interference mitigation. *Acta Astron Sin*, 2017, 58: 20–41, arXiv: [1711.01978](#)
- 17 Fridman P A, Baan W A. *RFI mitigation methods in radio astronomy*. *Astron Astrophys*, 2001, 378: 327–344
- 18 Ransom S M, Eikenberry S S, Middleditch J. Fourier techniques for very long astrophysical time-series analysis. *Astron J*, 2002, 124: 1788–1809, arXiv: [astro-ph/0204349](#)
- 19 Cordes J M, McLaughlin M A. Searches for fast radio transients. *Astrophys J*, 2003, 596: 1142–1154, arXiv: [astro-ph/0304364](#)
- 20 Białkowski S, Lewandowski W, Kijak J, et al. Mode switching characteristics of PSR B0329+54 at 150 MHz. *Astrophys Space Sci*, 2018, 363: 110
- 21 Bilous A V, Kondratiev V I, Kramer M, et al. A LOFAR census of non-recycled pulsars: Average profiles, dispersion measures, flux densities, and spectra. *Astron Astrophys*, 2016, 591: A134, arXiv: [1511.01767](#)
- 22 Downs G S. Integrated pulse profiles and mean fluxes of 24 pulsars at 2.388 gigahertz. *Astrophys J Suppl Ser*, 1979, 40: 365–369
- 23 Davies J G, Lyne A G, Seiradakis J H. The galactic distribution of pulsars. *Mon Not R Astron Soc*, 1977, 179: 635–650
- 24 Fomalont E B, Goss W M, Lyne A G, et al. Positions and proper motions of pulsars. *Mon Not R Astron Soc*, 1992, 258: 497–510
- 25 Izvekova V A, Kuz'min A D, Malofeev V M, et al. Radio flux density and pulse profile of pulsars at 102.5 and 61 MHz. *Soviet Ast*, 1979, 23: 179
- 26 Izvekova V A, Kuzmin A D, Malofeev V M, et al. Radio spectra of pulsars. *Astrophys Space Sci*, 1981, 78: 45–72
- 27 Lane W M, Cotton W D, van Velzen S, et al. The very large array low-frequency sky survey redux (VLSSr). *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 440: 327–338, arXiv: [1404.0694](#)
- 28 Lorimer D R, Yates J A, Lyne A G, et al. Multifrequency flux density measurements of 280 pulsars. *Mon Not R Astron Soc*, 1995, 273: 411–421
- 29 Morris D, Graham D A, Sieber W, et al. Observations of the polarization of average pulsar profiles at high frequency. *Astron Astrophys*, 1981, 46: 421
- 30 Malofeev V M, Malov I F. Mean spectra for 39 pulsars, and the interpretation of their characteristic features. *Soviet Ast*, 1980, 24: 54
- 31 Malofeev V M, Malov O I, Shchegoleva N V. Flux densities of 235 pulsars at 102.5 MHz. *Astron Rep*, 2000, 44: 436–445
- 32 Stinebring D R, Condon J J. Pulsar flux stability and refractive interstellar scintillation. *Astrophys J*, 1990, 352: 207
- 33 Seiradakis J H, Gil J A, Graham D A, et al. Pulsar profiles at high frequencies. I. The data. *Astron Astrophys*, 1995, 111: 205
- 34 Stovall K, Ray P S, Blythe J, et al. Pulsar observations using the first station of the long wavelength array and the LWA pulsar data archive. *Astrophys J*, 2015, 808: 156, arXiv: [1410.7422](#)
- 35 Shrauner J A, Taylor J H, Woan G. The second cambridge pulsar survey at 81.5 MHz. *Astrophys J*, 1998, 509: 785–792, arXiv: [astro-ph/9801059](#)
- 36 Taylor J H, Manchester R N, Lyne A G. VizieR online data catalog: Catalog of pulsars (Taylor+1995). *VizieR Online Data Catalog*, 2000, 7189
- 37 An T, Wu X P, Hong X. SKA data take centre stage in China. *Nat Astron*, 2019, 3: 1030
- 38 An T. Science opportunities and challenges associated with SKA big data. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 989531

Search and detection of northern pulsars in the side lobes of the Murchison wide-field array

GONG HongYu^{1,2,3}, ZHANG ZhongLi^{1,4*}, XUE MengYao⁵, HONG XiaoYu^{1,2,3,4},
AN Tao^{1,4}, HU XuZhi^{1,2,3}, Xu ZhiJun¹, GUO ShaoGuang¹, LAO BaoQiang¹,
WU XiaoCong¹, LV WeiJia¹ & YU Ting¹

¹ Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

² School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 200031, China;

³ School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴ Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

⁵ The International Centre for Radio Astronomy Research (ICRAR), Curtin University, Perth 6102, Australia

New pulsar searching methods can significantly enhance the discovery of new pulsars and observations of single pulsars. This paper searches for pulsars among the observations centered at 185 MHz collected by the Murchison Wide-field Array (MWA). The declinations of two high-latitude northern sky pulsars, identified as J0332+5434 and J2219+4754, exceeded the commonly considered detection limit of MWA (declination $\leq 30^\circ$), and appeared in the side lobes of MWA's incoherent beams. Although the sensitivity is substantially lower in the side lobes than in the main lobe, pulsars are generally very bright at low frequencies, so are observable in the side lobes of low-frequency, wide field of view telescopes. This article describes the search for pulsars with the MWA, and discusses the possibility of further searching and observing the northern sky pulsars in the MWA side lobes. In a simulation study, the MWA detection sensitivity was evaluated at several flux densities of known radio pulsars. We estimated that approximately 30 known northern sky pulsars can be detected in the MWA side lobes. This work promises future pulsar searching by the Square Kilometer Array at low frequencies.

pulsar, neutron stars, radiowave sources

PACS: 97.60.Gb, 97.60.Jd, 07.57.Hm

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0064](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0064)