

脉冲星B0329+54的S/X双频CVN观测*

陈 文^{1,2†} 江 悟^{2,3} 李志玄^{1,2} 徐永华^{1,2} 汪 敏¹

(1 中国科学院云南天文台 昆明 650011)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

(3 中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘要 利用CVN(Chinese VLBI Network)对脉冲星B0329+54进行了首次S/X双频观测,观测采用相位参考模式,频段为S/X双频16通道观测,数据采集终端是CDAS(Chinese Data Acquisition System),单通道带宽16 MHz. 使用上海VLBI(very long baseline interferometry)中心的DiFX(Distributed FX)相关处理机对数据进行相关处理. 利用DiFX特有的Pulsar Binning模式,以提高数据信噪比. 对观测数据处理后得到了S/X两波段的高分辨率图像和位置信息,与前人VLBI 结果对比显示观测结果较为符合.

关键词 仪器: 高角分辨率, 仪器: 干涉仪, 技术: 高角分辨率, 技术: 干涉, 脉冲星: 普通
中图分类号: P164; 文献标识码: A

1 引言

1934年, Baade和Zwicky指出, 超新星爆发后可能会遗留一个由中子构成的天体, 即中子星^[1]. 但直到30 yr后天文学界才发现这种特殊的天体. Hewish为了研究小角径射电源经过太阳日冕时发生的闪烁现象, 建造了一个高时间分辨率, 频率只有81 MHz的低频天线. Hewish的研究生Bell小姐在排除掉人为干扰和其他的噪声后, 于1967年11月28日发现天线记录了一种奇怪的、周期为1.337 30 s的射电信号^[2]. 随后Gold和Pacini分别证实了该射电源就是高速旋转的中子星^[3-4], 这种周期性的射电源被命名为脉冲星(Pulsar). Hewish和Bell发现脉冲星的工作荣获了1974年诺贝尔奖.

脉冲星是由中等质量恒星经超新星爆发而形成的高速自转的中子星, 其典型质量为 $1.44 M_{\odot}$, 半径约为10 km, 具有非常强的引力场和磁场, 是验证极端条件下物理规律的理想空间实验室. 脉冲星具有极高的自转速度, 其自转轴与磁极轴具有夹角, 两个磁极各有一个辐射波束. 当脉冲星自转时辐射波束扫过地球及观测者时, 就能接收到辐射脉冲. 脉冲星的自转周期很短, 一般为1 ms到10 s的量级, 且周期极其稳定, 周期变化率为 10^{-19} 到 10^{-21} , 被誉为自然界最精准的天文时钟^[5].

2015-04-21收到原稿, 2015-05-18收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11303093、U1431113)资助

†chenwen@ynao.ac.cn

超新星爆发时喷射物质的速度高达10 000 km/s, 但并非各向同性, 微小的非中心对称爆炸就可以将脉冲星加速, 且由于其是致密天体, 几乎不受星际介质影响而减速, 所以脉冲星通常具有很高的自行速度, 大部分不低于100 km/s^[6]. 因此经过一段时间就可能脱离超新星遗迹的范围. 对脉冲星观测得到精确位置信息可以了解其自行的速度和方向, 为寻找与之成协的超新星遗迹提供帮助. 精确的位置信息可以更新脉冲星星历, 为脉冲星观测提供更准确的位置信息, 以修正脉冲星观测的各种模型参数, 提高模型准确度, 同时也可以为脉冲星导航提供精确的位置参考^[7-8]. 绝大部分脉冲星的辐射只能在射电波段观测到, 而且十分微弱, 在1.4 GHz(L 波段)的平均流量仅为0.8 mJy, 脉冲星的辐射成幂律谱, 主要能量集中在低频波段, 随频率增加辐射能量迅速下降^[9-11]. 脉冲星的辐射信号在一个周期内仅占不到10%的比例, 因此可以利用其明显的色散效应和星际闪烁现象来探测星际空间的电子分布; 脉冲星的辐射具有高度的偏振特性, 因此可以利用其探测星际磁场^[12-13].

脉冲星的研究非常重要, 对脉冲星进行观测可以获得许多重要的信息, 位置信息就是其中之一.

1.1 脉冲星的VLBI观测

VLBI是Very Long Baseline Interferometry的简称, 是由连线干涉仪发展而来的. 与连线干涉仪采用同一频率源“公共本振”不同, VLBI系统的各个测站采用各自的本机振荡器, 即“独立本振”, 现在采用氢原子钟作为频率源, 可将基线长度增加到上千公里^[14]. 进行VLBI观测时, 各测站将记录下来的数据存储在容量磁盘中(早期使用的是磁带媒介), 待观测结束后, 将磁盘通过邮寄的方式, 发往VLBI数据处理中心; 或者利用高速网络, 将数据直接传回VLBI数据处理中心进行实时处理, 即实时VLBI或eVLBI.

在给定的观测波长 λ 下, VLBI的空间分辨率 θ 和基线长度 D 服从关系:

$$\theta \sim \lambda/D, \quad (1)$$

因此基线长度 D 越长, 观测波长越短(频率越高), VLBI的空间分辨率越高, 目前的VLBI网最长的基线距离达到几千甚至几万公里, 其空间分辨率可以达到亚毫角秒量级. 由于VLBI观测具有高分辨率和高灵敏度的特点, 目前被广泛应用于天文和测地观测中.

我国VLBI网现已初具规模, 主要用于嫦娥工程等深空探测项目的测轨任务和天文测地观测. 包括上海佘山25 m、新疆乌鲁木齐25 m、北京密云50 m、云南昆明40 m和去年投入使用的上海天马65 m共5台望远镜, 以及上海佘山VLBI数据处理中心共同构成中国VLBI网(Chinese VLBI Network, 简称CVN). CVN网的建成为开展VLBI脉冲星观测提供了重要的途径.

1.2 DiFX软件相关处理机

相关处理机是整个VLBI系统最核心的单元. 本次观测使用了上海天文台VLBI数据处理中心搭建的DiFX(Distributed FX)平台, 平台配备有2个头节点共20个CPU核心, 20个计算节点共400个CPU核心; 配备6台Mark5设备和432 TB磁盘阵列; 安装了DiFX-2.3和后处理软件HOPS-3.9/3.10; 本次相关处理在200核CPU上运行, 处理速率达到每台站2 048 Mbps.

脉冲信号会因为星际间介质在到达时产生色散, 将脉冲宽度拉长. 为了改正星际间介质产生的展宽, DiFX在进行脉冲星数据处理的过程中, 可以根据脉冲星数据处理软件tempo2生成的脉冲到达多项式文件提供参数, 进行非相干消色散. DiFX在处理脉冲星观测数据时, 可以使用Pulsar Binning模式, 将脉冲星的相位分成一段段的相位窗(bin). 传统的硬件相关器可以设置一个on/off bin或者2的 N 次方个固定宽度的bin, 来提高数据信噪比. 不同于前者, DiFX可以设置任意数目、任意间距的bin, 每个bin可以配置不同的权重, 每个bin都可以根据脉冲相位的效果分别输出FITS格式的文件, 或者通过脉冲profile信息过滤掉. 在一个脉冲周期内, 增大脉冲峰值宽度时段的信号权重, 降低非脉冲峰值宽度时段的信号权重. 由于在一个脉冲周期内脉冲峰值宽度占整个周期为10%左右, 但是能量却占90%以上^[15], 所以这样的操作可以提高脉冲信号的信噪比.

考虑观测单个的脉冲周期, 把它分为等间距的 M 个bin. 令脉冲星的信号强度为 $S(m)$, 令噪声为 $Z \times \sqrt{M}$, 其中 Z 是单个脉冲周期内的基线灵敏度. 所以所有的bin(有效的bin)的信噪比为:

$$\frac{\sum_{m=0}^M S(m)}{Z}, \quad (2)$$

信号的增加也会伴随着噪声的增加. 对于一个简单的on/off bin来说, 计算 m_1 到 m_2 的bin, 信噪比为:

$$\frac{\sum_{m=m_1}^{m_2} S(m)}{\sqrt{\sum_{m=m_1}^{m_2} (Z \times \sqrt{M})^2}}, \quad (3)$$

对于有脉冲信号强度加权的每个bin来说, 信噪比为:

$$\frac{\sum_{m=0}^M S^2(m)}{\sqrt{\sum_{m=0}^M (S(m) \times Z \times \sqrt{M})^2}}. \quad (4)$$

虽然on/off开关可以提高信号信噪比, 但是显然bin脉冲门提高信号信噪比的效果比前者更加显著: 一个简单的高斯拟合脉冲轮廓的脉冲星, 用bin脉冲门处理比采用on/off开关处理的信号信噪比提高6%. 对于一个更复杂脉冲轮廓, 由多个高斯脉冲叠加而成的脉冲轮廓的脉冲星, 用bin脉冲门处理能比采用on/off开关处理的信号信噪比提高21%^[16]. 因为绝大多数脉冲星的流量都比本次观测目标源B0329+54弱得多, 所以在观测其他更弱脉冲星时, 必须采用DiFX的Pulsar Binning模式下的脉冲门技术才能获得比较好的效果. 为了计算在给定频率和时间对应的bin, 添加脉冲门需要提供脉冲星信息的星历表, 即包含脉冲到达描述多项式的“polyco”文件, 是用脉冲星处理程序tempo2生成的预报文件.

本文使用CVN网对脉冲星B0329+54进行观测, 采用新疆天文台提供的星历预报文件生成脉冲到达多项式, 基于DiFX相关处理机, 利用Pulsar Binning模式进行相关处理, 以提高信噪比, 得到其高角分辨率图像和精确位置. 文章第2节将介绍观测参数设置、源的选择、脉冲门的设置和数据处理过程; 第3节是对结果的分析 and 讨论.

2 CVN观测及数据处理

本次观测详细参数设置如表1. VLBI相位参考模式观测是采取目标源和临近参考源交替观测的一种观测模式, 目的是使用参考源来校准目标源. 所选取的参考源要求与目标源相距较近, 以往的观测曾经选取J035929.7+505750和J0302+5331, 它们与目标源相距分别为 4.37° 和 5.3° , 绝对位置精度误差为 $2\sim 3\text{ mas}^{[17-18]}$. 为了更精确的校准效果, 我们选取了J0347+5557, 距离目标源 2.53° . 该源的绝对位置精度误差为东西方向 0.31 mas , 南北方向 0.48 mas , 位置精度均高于前面两个参考源. 每个scan中目标源观测时间为 180 s , 参考源观测时间为 80 s , 因为两源相距较近, 故换源时间设为 20 s .

表1 观测详细参数设置

Table 1 The parameter setting of observation

Name of parameters	Setting
Observation code	psrf02
Observation mode	Phase reference
Observation date	Start=2015y046d08h00m00s
	Stop=2015y046d14h05m01s
Station	KM, SH, UR
Target source	B0329+54
Reference source	J0347+5557
Calibration source	J1044+719, 3C273
Number of scans	147
Observation frequency band	S, X
Data collector	CDAS
Polarization mode	Right circular polarization
Channel	6 in S band, 10 in X band
Bandwidth of single channel	16 MHz
Sampling frequency	32 MHz
Quantization digit	2 bit
Recording data rate	1024 Mbps

DiFX相关处理机完成的输出格式为.difx, 需要利用DiFX的子程序将其转换为所需文件, 可以转换为天文数据处理FITS和测地数据格式Mark4.

2.1 添加脉冲门

本次观测目标源选取的是北天最强的脉冲星之一—PSR B0329+54, 其流量在 2.3 GHz (S波段)上约为 $100\text{ mJy}^{[10]}$. 本次申请到的观测首次利用了CVN进行S/X双频观测, 并且在此基础上利用Pulsar Binning模式来对比添加脉冲门的前后结果. 添加脉冲门之前需要使用tempo2软件得到脉冲到达多项式^[19-20].

图1为用gnuplot程序读取profile.out文件得到的B0329+54粗略轮廓, 横坐标为1个周期内的40个bin, 纵坐标为相对幅度. 可以看到其脉冲峰值在第1个bin左右.

将脉冲门添加好后, 将脉冲门应用到所有scan上, 执行stardifx -n *.input命令, 进行最终的相关计算, 将输出的结果用difx2fits命令转换为FITS文件, 使用AIPS软件进行

数据校准.

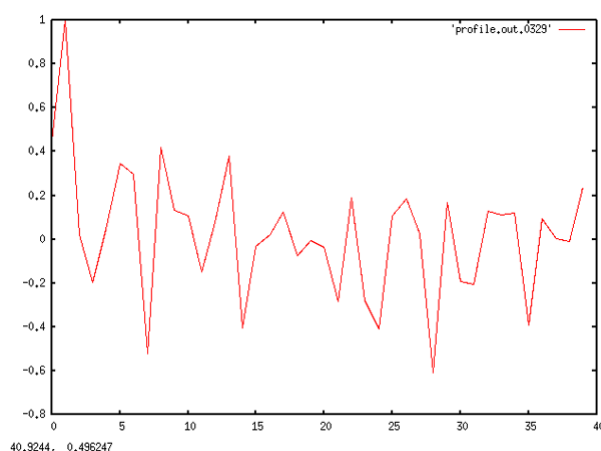


图 1 在Pulsar Binning模式下得到的B0329+54的轮廓

Fig. 1 The profile of B0329+54 in Pulsar Binning mode

2.2 数据处理

将DiFX相关处理机生成的FITS文件导入到AIPS中即可进行数据校准操作. 首先使用ANTAB和APCAL对系统温度计算进行幅度校准; 低频的脉冲星观测通常由于电离层的变化而产生系统误差, 因此要进行电离层改正^[17]. 运行VLBATECR子程序, 程序会自动联网访问美国海军天文台数据库, 选取观测时段的电离层数据进行电离层改正校准; 随后运行CLCOR进行PANG修正; 然后运行FRING条纹拟合, 进行精确的幅度校准; 每次FRING之后运行CLCAL, 分别将参考源1044+719、J0347+5557校准的解插值到B0329+54中, 最后输出校准过后的FITS文件.

使用difmap处理参考源数据, 得到图2左边为参考源J0347+5557 S波段图像, 图2右为X波段图像. 在本次观测中, 相位参考源在两个波段基本上都为点源. 其中S波段图像相对较为致密, X波段中, 源在南北方向有一定分解, 所以后期又将参考源X波段CLEAN的图像模型代入AIPS中的FRING, 在条纹拟合中加入参考源的结构, 并在最后将所得的解插值到目标源X波段数据中.

使用difmap对校准过后的FITS文件进行进一步处理, 利用SELFAL进行自校准, 得到B0329+54的S波段图像如图3左, 设置contours的最低流量是rms的3倍, 动态范围约为25:1, 较普通模式下动态范围17:1有显著提高; 由于脉冲星的辐射流量随频率增长急速下降, 导致B0329+54在X波段的流量过弱, 以至于在普通模式下因为信噪比太低无法得到图像, 但在Pulsar Binning模式下可以得到, 设置contours的最低流量是rms的1倍, 动态范围约为65:1, 如图3右. 由于S波段的干扰比X波段更多, 所以X波段图像的动态范围会比S波段高.

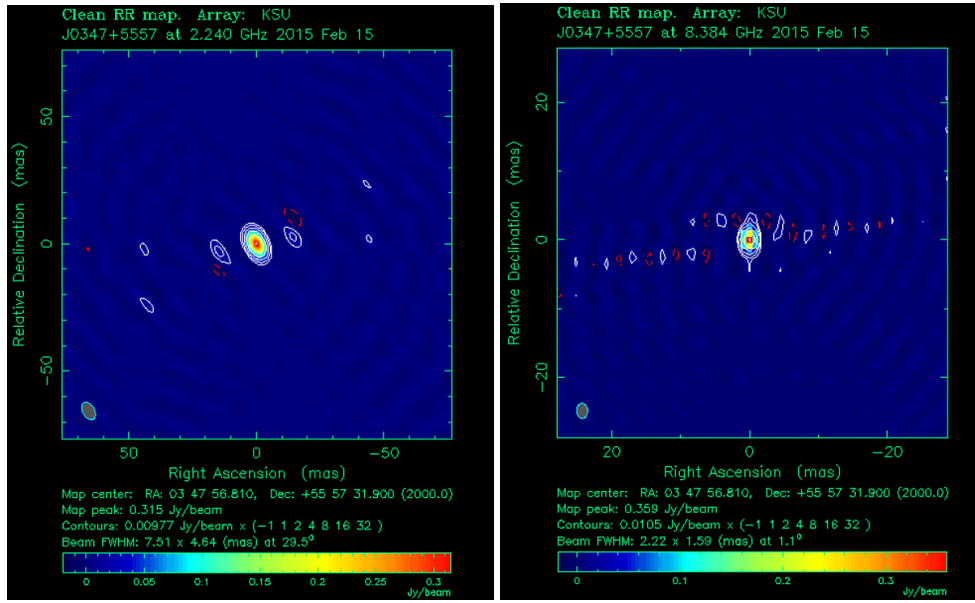


图 2 参考源J0347+5557的图像: 左边为S波段, 右边为X波段

Fig. 2 The figure of calibrator J0347+5557: left one is S band, and right one is X band

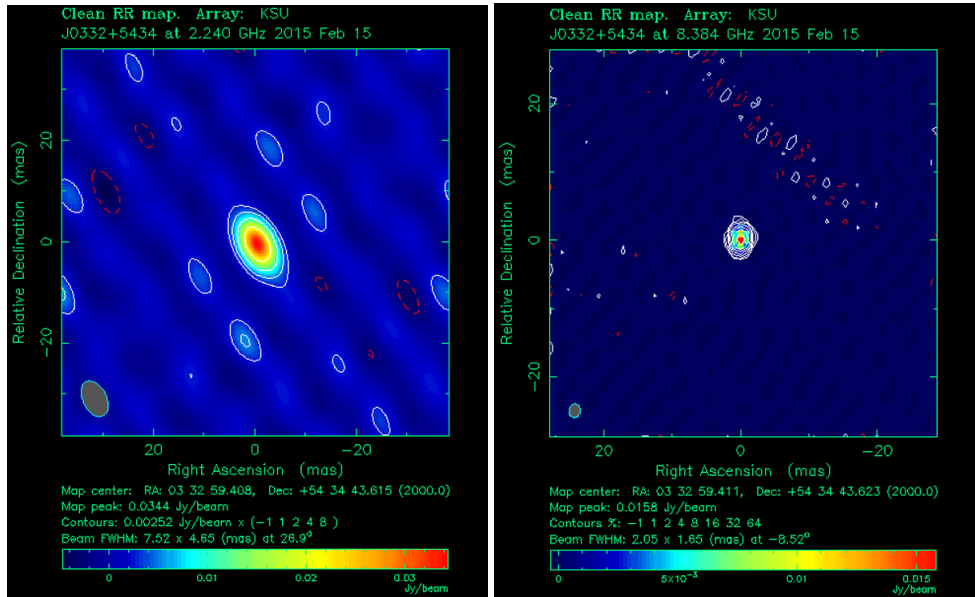


图 3 B0329+54的图像: 左边为S波段, 右边为X波段

Fig. 3 The figure of B0329+54: left one is S band, and right one is X band

根据VLBI分辨率计算公式:

$$\theta = \frac{\lambda}{B_p}, \quad (5)$$

其中 λ 为观测波长, B_p 为基线长度, 在基线长度一定的情况下, 观测波长越短, VLBI的分辨率越高, 因此X波段的图像分辨率几乎是S波段分辨率的4倍.

因为脉冲星是一个点源, 所以我们利用AIPS的子命令IMFIT对图像中流量最强点进行高斯模型拟合, 解算得到的S波段位置是RA(J2000下同): 03 32 59.40797(hms), Dec(J2000下同): 54 34 43.61457($^{\circ}$ ' ' '), 拟合误差约为0.2 mas; X波段的位置是RA: 03 32 59.41116(hms), Dec: 54 34 43.62292($^{\circ}$ ' ' '), 拟合误差约为0.02 mas.

3 总结与讨论

本次观测利用CVN, 在脉冲星观测中首次使用了S/X双频观测模式, 而且在数据相关处理过程中添加脉冲门使得S、X波段均能得到良好的结果.

由于S波段干扰较大, 虽然进行了加入脉冲门的过程, 但时域干扰用此法并不能有效消除. 而昆明站在对B0329+54这颗源的单天线平均脉冲观测中就常常遇到很强的时域干扰. 同时, 由于昆明站在观测中并未进行精确的系统温度测量(观测系统硬件原因), 而参与观测的台站只有3个, 无法对幅度进行自校准, 加之外来的干扰, 导致脏图中与最大流量相当的虚假成分较多. 实际处理数据过程中, 与当前S波段数据中peak相当的位置有4个, 弥散在约80 mas范围内, 处理数据时使用difmap的peakwin命令, 选取最强的位置做了高斯拟合, 最终得到S波段结果, 所以导致S波段数据与X波段有一定差异.

我们利用DiFX相关处理机的Pulsar Binning模式和普通模式, 对观测数据分别进行相关处理, 发现普通模式下X波段数据质量不足以成图, S波段带通条纹质量明显提高, 图像动态范围由17:1提升到了25:1, 而且只有在Pulsar Binning模式下才能输出X波段图像, 说明Pulsar Binning模式对脉冲星观测结果质量有明显提升. 由于B0329+54是北天最强的脉冲星之一, 因此如果观测其他脉冲星, Pulsar Binning模式能有效提升数据处理的成功率. 表2将其他人的结果按照Briskin等^[17]在2002年得到的自行(赤经方向 $(17.00 \pm 0.27) \text{ mas} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、赤纬方向 $(-9.48 \pm 0.37) \text{ mas} \cdot \text{yr}^{-1}$)、视差 $((0.94 \pm 0.11) \text{ mas})$ 归算到与我们观测的同一历元(MJD 57396):

表2 与他人结果对比(归算到MJD 57396)

Table 2 Compared with other works (normalized to MJD 57396)

Year	Author	RA(hms)	Dec(deg)	Frequency/GHz	Observation method
2002	Briskin et al. ^[17]	03 32 59.4034	54 34 43.3609	1.5	VLBA
2009	Guo et al. ^[21]	03 32 59.4099	54 34 43.3028	2.2	CVN
2011	Wayth et al. ^[22]	03 32 59.399	54 34 43.723	1.546	VLBA
2015	This paper	03 32 59.40797	54 34 43.61457	2.240	CVN
2015	This paper	03 32 59.41116	54 34 43.62292	8.384	CVN

对比发现我们与2002年Briskin等^[17]和2009年Guo等^[21]的结果, 赤经方向比较符合, 但赤纬方向差距较大; 但是和2011年Wayth等^[22]的VLBI结果相似. 要修正与他人结果的差异, 得到更精确的位置, 需要申请后续观测以验证. 未来会有更多的望远镜加入CVN, 提高UV覆盖效果和观测灵敏度, 这将有助于获得更精确的位置结果.

致谢 感谢上海天文台、新疆天文台和云南天文台的工作人员认真组织观测. 感谢新疆天文台袁建平老师提供的脉冲星星历数据. 特别感谢上海天文台VLBI数据处理中心DiFX相关处理平台提供对本课题的软硬件支持. 感谢上海天文台的舒逢春老师对观测的大力支持.

参 考 文 献

- [1] Baade W, Zwicky W. PNSA, 1934, 20: 254
- [2] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, et al. Nature, 1968, 217: 709
- [3] Gold T. Nature, 1968, 218: 731
- [4] Pacini F. Nature, 1968, 219: 145
- [5] Taylor J H. Proceedings of the IEEE, 1991, 7: 1054
- [6] 陈浩, 吴鑫基. 天文学进展, 1985, 4: 158
- [7] 杨树启, 陈鼎, 蔡宏兵, 等. 天文学报, 2012, 53: 411
- [8] Yang S Q, Chen D, Cai H B, et al. ChA&A, 2013, 37: 195
- [9] Manchester R N. Science, 2004, 304: 542
- [10] Lorimer D R, Yates J A, Lyne A G, et al. MNRAS, 1995, 273: 411
- [11] Lorimer D R, Kramer M. Hadnbook of Pulsar Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 13
- [12] Rickett B J. ARA&A, 1990, 28: 561
- [13] Han J L. Tuerbulence, Dynamos, Accretion Disks, Pulsars and Collective Plasma Processes. New York: Springer, 2008: 99
- [14] 钱志瀚, 李金岭. 甚长基线干涉测量技术在深空探测中的应用. 北京: 中国科学技术出版社, 2012: 34
- [15] Fritz G, Henry R C, Meekins J F, et al. Science, 1969, 164: 709
- [16] Deller A T, Tingay S J, Bailes M, et al. PASP, 2007, 119: 318
- [17] Briskin W F, Benson J, Goss W M. ApJ, 2002, 571: 906
- [18] Chatterjee S, Cordes J M, Vlemmings W H T, et al. ApJ, 2004, 604: 339
- [19] Hobbs G B, Edwards R T, Manchester R N. MNRAS, 2006, 369: 655
- [20] Hobbs G B, Edwards R T, Manchester R N. MNRAS, 2006, 372: 1549
- [21] Guo L, Zheng X W, Zhang B, et al. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2010, 53: 1559
- [22] Wayth R B, Briskin W F, Deller A T, et al. ApJ, 2011, 735: 97

VLBI Observation of Pulsar B0329+54 with CVN in S/X Bands

CHEN Wen^{1,2} JIANG Wu^{2,3} LI Zhi-xuan^{1,2} XU Yong-hua^{1,2} WANG Min¹

(1 Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(3 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

ABSTRACT A VLBI (very long baseline interferometry) observation of pulsar B0329+54 was carried out with CVN (Chinese VLBI Network) in February 2015. It is the first time for CVN to observe the pulsar B0329+54 in S/X dual frequency bands. The observation was performed in phase referencing mode. The observation data, including 16 channels and 16 MHz bandwidth of each channel, were collected by CDAS (Chinese Data Acquisition System). The correlation was made by the DiFX (Distributed FX) correlator at Shanghai Astronomical Observatory. The pulsar binning mode in DiFX was used to increase the signal to noise ratio of the pulsar fringes. We obtained the accurate position of pulsar B0329+54 through the VLBI image. Our results are in good agreement with the previous VLBI results.

Key words instrumentation: high angular resolution, instrumentation: interferometers, techniques: high angular resolution, techniques: interferometric, pulsars: general