

脉冲星观测与研究

2000 年喀纳斯湖脉冲星观测与研究学术讨论会文集

主编 张晋

新疆人民出版社

图书在版编目(CIP)数据

脉冲星观测与研究:2000年喀纳斯湖脉冲星观测与研究学术讨论会论文集/
张晋主编.——乌鲁木齐:新疆人民出版社,2001.12
ISBN7-228-06842-4

I.脉… II.张… III.①脉冲星—天文观测—学术会议—文集②脉冲星—
研究—学术会议—文集 IV.P145.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第089494号

脉冲星观测与研究

——2000年喀纳斯湖脉冲星观测与研究学术讨论会论文集

张晋 主编 王娜 马路 副主编

出版 新疆人民出版社
地址 乌鲁木齐市解放南路348号
邮编 830001
印刷 新疆新华印刷厂
发行 新疆人民出版社
开本 787×1092 1/16
印张 13
字数 200千字
版次 2001年12月第1版
印次 2001年12月第1次印刷
印数 1—2000

ISBN 7-228-06842-4/P·28

定价:58.00元



科学委员会

王绶琯（主席）

汲培文、汪璟琇（副主席）、吴鑫基（副主席）、

陆琰、张家铝、张晋、杨廷高、郑广生（副主席）

（按姓氏笔画为序）

编辑委员会

主 编：张 晋

副主编：王 娜 马 路

编 委：艾力·玉素甫 艾力·伊沙木丁

张洪波

序

20 世纪 70 年代开始,天体物理学的成就被纳入诺贝尔物理学奖的授奖范围,迄今获奖的共七项,其中脉冲星的观测成果占了两项。

脉冲星,在发现之后三十多年仍吸引着众多天文学家的追求。这除了因为它本身的特异性质之外,还因为它在天文世界中结合面如此之广,以至于能够分别与不同学科在许多前沿领域上交叉,如:

(一)在天体演化学上:

- 它被证认为中子星,这是 20 世纪天文学的一个里程碑式的成就;
- 它启动了包括中子星、黑洞在内的致密天体的“强研究”;
- 它把演化的线索延伸到了高能天体物理学领域;
- 对它本身的探索带来了对天文观测能力和观测方法的挑战。(迄今探测到的脉冲星数目远远不及演化模型的推测,此外目前仅观测到很少一些光学以及其他辐射的对应体,而与超新星遗迹的对应则一直是一个观测难题)。

(二)在天体物理学与物理学上:

• 作为一种有着极其致密的内部结构,极强的表面磁场,非常高而稳定的自转速度,以及偶而会发生“星震”的恒星,它的动力学行为、辐射机制、与周围物质的相互作用等等的研究,都为恒星物理学带来了新的开拓。

• 这些开拓要求结合到相应的基础物理研究。研究结果用以帮助建立脉冲星的结构模型、动力学模型、辐射模型。针对性的天文观测既用以验证和开拓这些模型,也包含了对物理学结果的验证。

• 20 世纪 80 年代初毫秒脉冲星的发现,使脉冲星的研究和“应用”登上了更高一层楼。脉冲双星作为一个新的搜索和研究的目标,不但联系到了毫秒脉冲星研究的孕育,而且成功地测定了引力辐射效应,并以此而著称。

(三)在时间计量和研究上:

• 毫秒脉冲星以其极其稳定的脉冲周期(P)(已包含极其稳定的周期变化率 $\dot{P}$ 的改正)可望用以监测(和改正)原子时的“长期稳定度”(一个时间基准

的长期稳定度是它作为基准的基本特性)。关键技术为精确测量脉冲星的“脉冲到达时刻”。这包括要求尽可能高的“信噪比”，并改正了已知的各种系统影响。目前“脉冲到达时刻”的测量精度约为 $0.1\sim 1$ 微秒。当先后两次测量的时间间距以年计(例如三年)时，监测到的时标“长期稳定度”可达 $10^{-14}\sim 10^{-15}$ 。目前原子时的“长期稳定度”亦约为 $10^{-14}\sim 10^{-15}$ ，两者“可比”。在这种稳定度极限上的误差除了来自各种测量的随机噪音外，主要来源为原子时的“长周期变化”和“脉冲星时”的内因和外因“长周期变化”以及地球轨道运动的微小扰动等。

- 进行毫秒脉冲星“脉冲到达时刻”的常规、持续、系统的多星测量相当于产生一种“脉冲星时”，而用以实施这种测量的设备可以称之为“脉冲星钟”。当前，建立和不断改善“脉冲星钟”的努力正处在一个“学科交叉点”上：(1)时间计量学前沿上的交叉：引进“脉冲星时”，以达到与“原子时”同时发展、交叉比对的新格局；(2)脉冲星物理研究前沿上的交叉：通过长时间监测脉冲星时间特性的变化(特别是“长周期变化”)，用以深入到内在物理；(3)宇宙学前沿上的交叉：通过测量“脉冲星时”的长周期(年、十年)变化，用以探测宇宙极早期引力事件(导致引力波背景，其周期为年、十年级)。这三者均以“脉冲星钟”的建立和提高为基本手段。这就是说，在当前科学进展的前沿上，“脉冲星钟”的建立将可望做到“一箭三雕”。

(四)周期高度稳定的脉冲作为一种探测手段：

脉冲星的周期脉冲可以看作是加在它发射的电波上的调制信号，提供了周期性的时间信息。凡是能够影响电波到达时间的外在因素，都可以反过来看作可以通过“脉冲到达时刻”的测量加以探测的因素：脉冲星电波传播经过星际介质，介质的色散可从不同频率的“脉冲到达时刻”的先后来测出，从而可以建立介质的物理模型，或通过已知的模型估计辐射源(脉冲星)的距离。

- 地球在太阳系空间中的运动，使“脉冲到达时刻”(相对于原子时)有着周年起伏。反过来，通过测量“脉冲到达时刻”可以发现地球位置对计算位置的偏差，从而探究其起因。

- 宇宙原初引力波的探测前已述及。银河系内引力事件及河外星系引力事件(如致密体双星并合等)产生的引力波经过地球时同样可以通过“脉冲到达时刻”的测量来发现。

- 除了“脉冲到达时刻”的应用外，备受瞩目的还有测量不同频率的脉冲星辐射的闪烁来探测星际介质的尺度和相对于星体的切向速度等。

脉冲星的这些特点决定了多方向交流和合作的有利条件。这次会议除了交流外,还讨论了合作。目前我国几位学者和团组在利用国外观测设备进行脉冲星课题的合作研究上取得了不少进展,理论和一些交叉课题的论文报告也时有所见。最近以乌鲁木齐站 25 米望远镜为基础的“三国五方”合作开始显露效益,实为我们设想种种合作方案提供了实例基础。如前所述,我们可以看出,当前脉冲星研究的发展中,核心问题仍然是观测能力和方法的提高。寻获更多更暗的脉冲星样本仍然是最迫切的课题。目前国际上有几台大型射电望远镜在不同程度上进行脉冲星巡天。澳洲 PARKES 望远镜是其中进行得比较系统的一个,也是我国天文学家最熟悉的一个。拟议中的印度 GMRT 的巡天不久可望启动。可以预计,五年之内将会有成千个新脉冲星被发现。巡天的后续工作是对发现的脉冲星进行复测,然后根据研究课题,对其中的选定目标进行不同频度的监测。到目前,世界上的大型射电望远镜任务饱和,不能容出太多观测时间给脉冲星。规模较大的巡天留下来很多等候后续观测的目标。目前对一个目标的监测一般十几天一次。即使这样,已被发现却未能得到监测研究的脉冲星仍为数甚多。乌站 25 米望远镜的“三国五方”合作引进了澳大利亚 PARKES 和英国 Jodrell Bank 的脉冲星接收技术,开始了对一部分脉冲星进行“复测”,并从中选定一批目标开展研究。目前正在配备多个波段的接收系统以扩大研究能力。25 米望远镜口径虽小,但其工作格局已在国际合作中从单纯的学习、引进、配合,进入到“接力”性质的研究。从与巡天“接力”的复测和监测工作中,发现的将都是第一手的资料,因此将成为与理论研究和进一步的观测研究相结合的开端。正是为此,这次会议把基地设在乌站,邀请了脉冲星实测、理论工作者,邻近学科的学者和管理工作者们,共同检阅我国在这方面初具的实力,并酝酿在这个基础上重点发展我国脉冲星工作的可能性。

文集上的论文,除了缺一些未能到会宣读的理论工作外,相当充分地反映了我国当前脉冲星研究的实力。工作讨论中涉及最多的是广泛的合作。对于像脉冲星这样的学科结合至广的基础研究,团组之间的合作重在自由发挥和自然结合。所谓自由发挥,是团组按自身原有的设计发挥自己的特点,追求自己的计划(包括国际合作项目);而自然结合,则是心里始终放着国内这些新开辟的领域和新形成的合作条件,不失去一切与自己研究前沿结合的机会。只有这种“在进步中出现的结合”才能产生高层次的“合力出击”。至于队伍建设,各个团组当能以自己的工作吸引新生力量,而设备上,最重要的莫过于望远镜观测能力的提高。乌站 25 米望远镜正在执行的多波段接收计划,希望能继续得

到各方面的支持,以保证早日完成。在脉冲星的监测等研究课题上,“三国五方”的合作已形成了一个坚实的研究队伍。进一步的研究工作将能在乌站加速人才的培养。课题的开展将首先依托在 25 米望远镜在自己的力度内发挥多波段观测功能,并覆盖尽可能多的监测目标。密云“天线阵相加”系统近期内完成后当可在一个米波波段上开展选定目标的长期监测,课题应当与乌站配合。几年后密云拟议中的 45 米天线如果建成,则可沿乌站的 25 米天线的技术路线配备接收机系统并选择课题。陕西天文台时间中心和密云站拟议中的“脉冲星望远镜”如果实现,当可对“最精选”的若干毫秒脉冲星进行连续、长期监测(其意义前已述及),选题亦宜与乌站配合。

制定一个常规的信息交流和学术思想交流的制度是有益的,除了上述各种合作的探讨外,应当可以对队伍建设、设备建设等需要全国统筹的问题交流意见。

我衷心希望这本会议论文集能够标志着我国脉冲星研究在国际上占有一席有份量之地的一个开端。

王绶琯

2000 年 8 月 31

目 录

序.....	王绶琯(1)
脉冲星脉冲到达时间.....	王 娜 吴鑫基 张 晋 艾力·玉素甫(1)
脉冲星偏振和银河系磁场	韩金林(11)
乌站 327MHz 脉冲星流量的长期监测	
.....	艾力·伊沙木丁 吴鑫基 张 晋(20)
脉冲星候选者的遴选和观测	田文武 吴鑫基 张喜镇 王 娜(31)
综合孔径射电望远镜脉冲星观测试验	康连生(37)
内间隙结构与脉冲星射电辐射的逆康普顿散射模型	
.....	王洪光 徐仁新 韩金林 乔国俊(41)
脉冲星与星际闪烁	
.....	王 娜 张 晋 吴鑫基 艾力·玉素甫 陈卯蒸(51)
脉冲星 PSR B0329+54 在 610MHz 的模式变化观测及	
327MHz 和 610MHz 上对脉冲星的双频同时观测	
... 艾力·伊沙木丁 吴鑫基 张 晋 张洪波 张喜镇 朴廷彝(59)	
原子时与脉冲星时间尺度的小波分析	
.....	柯熙政 李孝辉 杨廷高 倪广仁(67)
同 II 型超新星爆发相关的重要核物理问题	彭秋和(74)
北京天文台的超新星观测研究	胡景耀(85)
超新星遗迹的壳结构	俞志尧 田凯平(94)
Cir X-1 的快速光变	屈进禄 李惕碛 余文飞(99)
乌鲁木齐 25 米射电望远镜站的射电天文工作与脉冲星的	
观测研究	张 晋 王 娜 刘 祥
张洪波 艾力·玉素甫 艾力·伊沙木丁 董有锁(110)	
关于射电脉冲星的搜巡.....	潘炼德(126)
关于密云望远镜脉冲星观测发展前景	张喜镇 陈宏昇 郑怡嘉

南仁东 吴江华 苏彦 王弘 朴廷彝 彭勃	(139)
乌鲁木齐脉冲星观测系统的状态	艾力·玉素甫 张晋 王娜
吴鑫基 王维侠 张洪波 陈卯蒸 邵明辉 R. N. Manchester	(143)
观察脉冲星专用射电天线电设计的考虑	茅於宽 胡鸿飞 傅德民
时间计量的进展和脉冲星时间尺度	柯熙政 李孝辉 杨廷高
射电脉冲星与时间尺度	潘炼德
毫秒周期脉冲星定时研究进展	杨廷高 潘炼德 倪广仁 柯熙政
毫秒脉冲星计时	倪广仁 杨廷高 赵当丽
跋	叶叔华

脉冲星脉冲到达时间^①

王娜^{1,2,3} 吴鑫基^{2,3} 张晋¹ 艾力·玉素甫¹

(1. 中国科学院国家天文中心乌鲁木齐天文站)

(2. 北京大学天文系)

(3. 中国科学院—北京大学联合北京天体物理中心)

摘 要:乌鲁木齐天文站于 1999 年 5、6 月间建立起了脉冲星到达时间观测系统,消色散采用 $2 \times 128 \times 2.5$ MHz 的多通道滤波器,目前已经对 80 多颗脉冲星进行了将近 10 个月的观测,并探测到了 Crab 于 2000 年 7 月的一次跃变。本文介绍脉冲星的到达时间特性和利用乌鲁木齐 25 米天线进行到达时间研究的进展情况。

关键词:脉冲星

Pulsar Timing Observation

Wang Na^{1,2,3} Wu Xinji^{2,3} Zhang Jin¹ Aili Yusup¹

(1. Urumqi Astronomical Observatory, NAO—CAS)

(2. Astronomy Department, Peking University)

(3. CAS—PKU Joint Beijing Astrophysics Center)

Abstract: A pulsar timing system was developed at the Nanshan 25 m radio telescope operated by Urumqi Astronomical Observatory in mid—1999. De

① 国家自然科学基金和攀登计划资助项目

—dispersing is provided by a $2 \times 128 \times 2.5$ MHz filterbank and digitiser system. Regular timing observations of 80 or so pulsars over the past 10 months have revealed good prospect in science. We detected a glitch in Crab pulsar in July, 2000. In this paper, we introduce the timing characteristics of pulsars and timing project at Nanshan.

Key Words: pulsars

1. 介绍

脉冲星信号是由 Antony Hewish、Jocelyn Bell 和他们的同事们在进行星际闪烁的观测中首先观测到的,此后很快证认脉冲信号是由辐射束指向地球的中子星发射的^[1]。事实上,在中子发现两年后,Walter Baade 和 Fritz Zwicky 就预言在超新星爆发后由于引力塌缩在星体的中心会形成中子星^[2]。由于磁场冻结在塌缩的星体中,磁场可以达到 10^{12} 高斯,角动量守恒又导致了它快速自转。中子星的内部处于极端的物理条件下,密度达到 10^{14}gcm^{-3} 。这个半径只有 10 公里,质量和太阳质量相当的致密天体像灯塔一样不断地用射电波束扫过地球,成为宇宙中可探测到的最为独特的天体。

第一颗脉冲星是 PSR B1919+21,它的周期为 1.3373 秒,说明中子星是快速自转着的,但它的周期并不是常数,而是以 $1.34809 \times 10^{-15} \text{ss}^{-1}$ 的速率减慢。处于 Vela 超新星遗迹中的 Vela 脉冲星^[3]和 Crab 超新星遗迹中的 Crab 脉冲星^[4]进一步证实了脉冲星与超新星是相关的。尤其是 Crab 脉冲星,它的发现揭开了亮度很大的 Crab 星云的能量来源之谜。脉冲星消耗的自转能被注入 Crab 星云中,被加速到相对论速度的电子进而发生同步辐射导致了星云的高亮度。

脉冲星发现后,在不同频率上先后进行了大量的巡天工作,目前已经发现了 1200 颗脉冲星。最成功的巡天有 Molonglo 的 408MHz 巡天^[5],1500MHz 的高频巡天^[6]和 Parkes 在 1400MHz 的多波束巡天^[7]。有一些巡天致力于发现另一类重要的脉冲星:毫秒脉冲星。毫秒脉冲星被认为是在双星演化过程中由伴星物质再加速导致的。它们的磁场只有 10^8 高斯,年龄在 10^{10} 年。由于脉冲星具有很大的自行和较高的年龄,毫秒脉冲星通常分布在较高的银纬上,所以利用大天线在大天区进行的巡天往往取得成功。例如 Arecibo 和 Parkes 的

巡天, PSRs B1913+16, J0437-4715 等都是巡天发现的最佳研究对象^[8,9]。在球状星团 Tuc 47 中搜寻脉冲星的工作也很成功, 目前已经发现了 20 颗毫秒脉冲星^[10,11]。另外基于脉冲星的频谱和极化特性, 一些陡谱和强偏振射电源也作为脉冲星的后选体被观测, Westerbork 做了主要的工作。目前用此方法只发现了几颗脉冲星, 其中包括从射电源 4C21.53 观测到的 PSR B1937+21, 是已知周期最短的脉冲星^[12]。所有这些脉冲星的基本参数都要通过到达时间观测来获得。

中子星的惯量是 10^{45}gcm^2 , 由于其致密特性使得脉冲星成为天空中旋转最为稳定的天体。自转周期的长期减慢是喷射的物质和电磁辐射带走角动量的结果。在磁偶极辐射的情况下, 制动指数是 3, 并且可以表示为 $n = \frac{\dot{\nu} \nu}{\nu^2}$, 所以原则上制动指数是可观测量。但是对于年轻的脉冲星周期噪声通常会影响 $\dot{\nu}$ 的测量, 有些星的自转还受到跃变和恢复过程的影响; 年老的脉冲星自转相对稳定, 但 $\dot{\nu}$ 又太小而难于测量。目前只有四颗脉冲星制动指数小于 3, 它们是 PSRs B0540-69(2.0)^[13], B0531+21(2.5)^[14], B0835-45(1.4)^[15], B1509-58(2.8)^[16]。

假设脉冲星的初始自转速率远远大于现在的速率, 并且 $n \neq 1$, 我们得到脉冲星的特征年龄 $\tau = -\frac{\nu}{(n-1)\dot{\nu}} = \frac{P}{(n-1)\dot{P}}$ 。对于偶极辐射, $n=3$, 则 $\tau =$

$\frac{1}{2} P / \dot{P}$ 。在正交转子情况下, 脉冲星的磁场也是导出量: $B_0 \approx \frac{3Ic^3 P \dot{P}}{8\pi^2 R^6} \approx 3.2 \times 10^{19} (P \dot{P})^{1/2} (\text{Gauss})$ 。以上是导出量, 通过下一节的介绍可以进一步看出到达时间还可以提供给我们其他信息。

2. 脉冲星脉冲到达时间

到达时间即是指脉冲信号到达天线的观测时间。早在脉冲星刚刚发现的时候 Hewish 就指出脉冲到达时间应随地球公转发生变化, 并且与射电频率有关。测量到的到达时间通常首先要归算到太阳系质量中心, 这项改正与脉冲星的位置、速度、质量和太阳系天体有关, 然后要改正星际介质的传播效应的影响, 最后考虑脉冲星本身的轨道运动。从观测到的脉冲星脉冲到达时间 t_{obs}

归算到脉冲星辐射时刻 T 可以归纳在一个公式中^[17]:

$$T = t_{\text{obs}} - t_0 + \Delta_C - D/f^2 + \Delta_{R\theta}(\alpha, \delta, \mu_\alpha, \mu_\delta, \pi) + \Delta_{E\theta} - \Delta_{S\theta} \quad (1) \\ - \Delta_R(x, e, P_b, T_0, w, \dot{w}, \dot{P}_b) - \Delta_E(r) - \Delta_S(r, s) - \Delta_A$$

其中 t_0 是参考历元; Δ_C 是观测站氢钟相对平均参考时钟的改正; D/f^2 是频率为 f 的信号在星际介质传播相对于在真空中传播的延迟; $\Delta_{R\theta}, \Delta_{E\theta}, \Delta_{S\theta}$ 是脉冲星信号在太阳系内传播的延迟效应和相对论时间改正; 类似于太阳系中的改正, $\Delta_R, \Delta_E, \Delta_S$ 和 Δ_A 是对双星系统中的脉冲星信号延迟的改正。下标 R, E, S, A 分别代表 Roemer、Einstein、Shapiro 和光行差改正, 所有的 Δ 项都是时间的函数。Roemer 项的幅度大约为 $(P_b/2\pi)(v/c)$, 其中 P_b 是轨道周期, v 为轨道速度。太阳系中的 Roemer 改正项一年中延迟的最大幅度约为 $\pm 500 \cos \lambda$ 秒 (λ 为脉冲星的黄纬)。Einstein 改正项比 Roemer 改正项要多乘一个小于 1 的因子 ev/c , 其中 e 是轨道偏心率。Shapiro 延迟是由于光线经过大质量天体时发生弯曲而造成的时间延迟, 太阳系内最大可达到 $120 \mu\text{s}$ 。除了太阳系内的 Roemer 改正 $\Delta_{R\theta}$, 其他 Δ 项都比 $\Delta_{R\theta}$ 小几个量级, 有时只能测得它们的综合影响。Taylor 通过对双中子星系统中的脉冲星 PSR B1913+16 的长期观测间接验证了广义相对论预言的引力辐射。Camilo 等人对毫秒脉冲星 PSR J1713+0747 的到达时间测量精度达到 $0.4 \mu\text{s}$, 22 个月的观测测得广义相对论项的 Shapiro 延迟。可以说(1)式也反映了脉冲星的直接可观测量, 例如色散量、位置、自行都可以通过到达时间观测获得, 星际介质、星周介质、脉冲星分布和超新星遗迹的关系等都与到达时间的观测结果相关。

3. 观测系统介绍

乌鲁木齐天文站的 18cm 波段脉冲星脉冲到达时间观测系统分两个阶段完成, 第一阶段的主要任务是建立消色散接收机和计算机数据采集及处理系统。第二阶段, 也就是最终目标是接收机进行制冷双极化改造后系统温度降为 30K, 系统的灵敏度达到 1mJy, 能够观测北天的大多数脉冲星。

第一阶段的系统安装调试于 1999 年 5 月至 6 月间进行, 并成功地进行了试观测。到达时间系统在 25m 天线整体框架中的位置已经在图 1 中说明, 系统由 18cm 馈源、左右旋双圆极化器(OMT)、双极化常温接收机、降频转换

器、多通道滤波器和数字化器等组成。其中馈源和极化器是由信息产业部39研究所生产,它的工作频率为1350~1750MHz,馈源噪声温度为(包括左右旋双圆极化器)30K。两路常温接收机工作频率都为1380~1700MHz,其中右旋极化前置高放噪声温度为30K,系统噪温为85K;左旋极化前置高放噪声温度为40K,系统噪温为95K。本机振荡器设为1300MHz,所以接收机输出中频频率为80~400MHz,带宽覆盖较为理想。

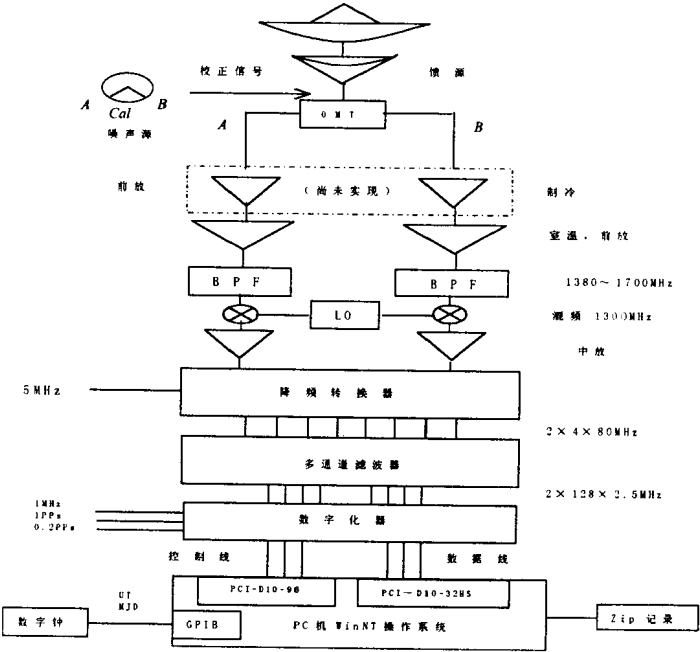


图1 乌鲁木齐天文站18cm脉冲星脉冲到达时间观测系统

我们定义图1中从降频转换器到数字化器部分为消色散系统,这是国际上脉冲星观测常用终端的一种,特点是造价低,性能稳定。实际工作中消色散是由软件完成的,这一部分的硬件主要作用是把信号分为若干个相对比较窄的频率通道,这些通道的信号经过模数转换后提供给计算机进行采样。

256个通道信号分别经过1bit量化,再通过16或32bit数据总线送给计算机进行处理,采样速率和采样通道数由计算机控制。数据采集由安装了WinNT的PC机完成,采集程序是用Visual C++编写的Windows程序,实

时地完成数据采集、脉冲周期计算和周期折叠、消色散、显示、数据保存、天线控制等多个任务。数据处理为标准的 Linux 版本的到达时间处理软件 Treduce 和 TEMPO, 它们是由澳大利亚国家天文台 ATNF、Swinburne 大学和美国 Princeton 大学支持和开发的大型脉冲星资料处理软件, 这些软件原来只在工作站上应用, 现在已经成功地移植到微机上。

4. 观测结果

试观测结果证明系统的工作状态良好, 已经对 80 颗脉冲星进行了十个月左右的观测, 其中最弱的源流量密度为 4mJy 。图 2 为 PSR J1935+1616 在 128 个频率通道内的轮廓和累加后的平均脉冲轮廓。观测采用 1ms 采样速率, 每次观测为 16 分钟或 20 分钟, 平均每个月进行三到四次, 这样的频繁观测对

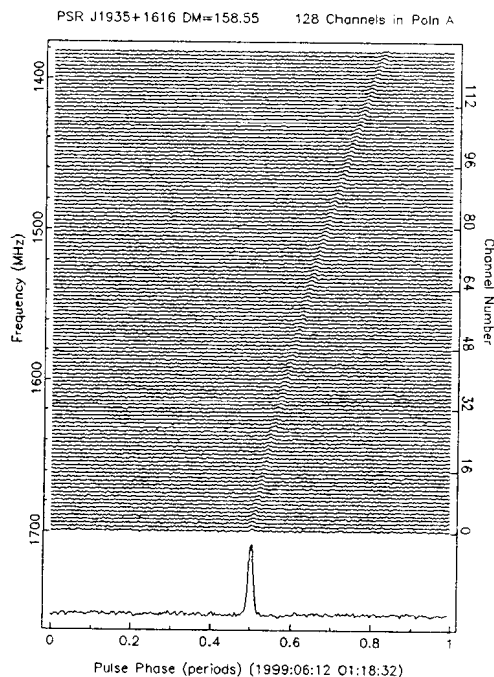


图 2 脉冲星 PSR J1935+1616 在 18cm 频率波段上的平均脉冲轮廓。(上方为各个频率通道的观测结果, 下方为消色散后的结果)

到达时间测量很重要,而国外的大天线设备往往一两个月才能观测一次。从每次观测可以获得一个相对于测站的 TOA (Time of Arrival)。再由 TEMPO 和 DE200 星表归算出相对于太阳系质心的到达时间和改进脉冲星的参数。

正如前面介绍的,脉冲星的自转速率并不是常数,除了长期减慢,自转频率还表现出两种不规则变化。其一是“时间噪声”,表现为频率的准随机变化,时间特征为天、月或年。另外一类是频率的突然变化,即跃变,幅度大小为 $\Delta\nu/\nu$ 在 $10^{-9}\sim 10^{-6}$ 量级。跃变同样不可以预测,但发生的间隔往往是几年。对跃变的统计研究表明跃变多发生在年龄范围 $10^5\sim 10^6$ 年的年轻脉冲星。在我们监测的对象中有几颗就是跃变星。其中 Crab 脉冲星发现于 1968 年,年龄只有约 1300 年。到达时间观测发现 Crab 非常活跃,每隔几年即发生一次跃变,而且跃变后往往造成频率导数的增加,这意味着跃变加快了 Crab 自转速率变慢的过程。

假设脉冲星的自转频率为:

$$\nu(t) = \nu_0 + \dot{\nu}t + \frac{1}{2}\ddot{\nu}t^2 + \dots \quad (2)$$

发生跃变后,脉冲星的自转频率可以用指数函数表示为:

$$\Delta\nu(t) = \Delta\nu_0(t) + \Delta\nu[1 - Q(1 - e^{-t/\tau_d})] + \Delta\dot{\nu}_p t \quad (3)$$

其中, $\nu_0(t)$ 是从跃变前的自转模型得到的频率, $\Delta\nu_g = \Delta\nu_d + \Delta\nu_p$ 是跃变时刻的频率变化量, $\Delta\nu_d$ 是指数衰减, $\Delta\nu_p$ 是未被衰减的频率。 $Q = \Delta\nu_d/\Delta\nu_g$, τ_d 是衰减的时间常数, $\Delta\dot{\nu}_p$ 是跃变导致的 $\dot{\nu}$ 变化。(3)式的中间项是从 Baym 等人^[18]的双重结构模型得到的,频率的突然变化可以是“星震”或壳层涡流的运动导致。跃变的释放可能是由于涡流在壳层晶格内的缓慢移动^[19]或涡流固定于晶格,而晶格本身向外移动造成的^[20]。

图 3 是我们观测到的 Crab 的跃变,到达时间残差的相对于跃变前的参数。利用(2)、(3)式的模型,TEMPO 拟合得到跃变大小为 $\Delta\nu/\nu = 25 \times 10^{-9}$,跃变发生在 2000 年 7 月,释放过程的时间常数仍然在 10 天的量级,详细结果请参考文献[21]。Crab 的跃变一直很特殊,一是因为其年龄极小却频繁跃变,跃变的范围在 $4.7 \sim 85 \times 10^{-9}$,我们观测到的是相对 Crab 来说第三大的跃变。另外 Crab 的跃变释放过程和其他脉冲星不一样,跃变的量最终全部衰减掉。同样是非常年轻的脉冲星,Vela 的跃变却完全不同。

另外对 PSR B1133+16 等脉冲星观测,已经表明它们的位置有明显的改