

射电脉冲星搜寻工作的进展

潘 炼 德

(中国科学院陕西天文台 临潼 710600)

摘 要

评述了射电脉冲星搜寻及观测研究的巨大贡献和重要意义,分析了影响脉冲星搜寻工作的几个关键因素(如灵敏度、色散、观测频率及设备),着重介绍和分析了自发现脉冲星(特别是发现第一颗毫秒脉冲星)以来所进行的卓有成效的脉冲星搜寻工作(包括脉冲星的早期搜寻、毫秒脉冲星的初期搜寻、高银纬脉冲星搜寻、定向搜寻以及进一步的广域深空搜寻等)的情况、结果、意义和进展。

关键词 脉冲星—毫秒脉冲星—脉冲星搜寻

分类号 P145.6

1 引 言

自发现第一颗脉冲星^[1]以来,脉冲星的搜寻及观测研究工作一直十分活跃,搜寻和观测的新发现、新结果极大地促进了有关研究的展开。蟹状星云脉冲星及船帆脉冲星的发现推进了关于中子星的产生及其演化、与超新星爆发的关系的研究^[2,3];脉冲星自转突变的发现为研究中子星结构,包括壳层和内部超流体的物理状态、变化及相互之间的耦合等提供了有用的信息^[4];脉冲星的 X 射线、 γ 射线高能辐射的测定有助于人们联合较宽的能谱范围去分析和了解中子星及脉冲星的表面及磁层的结构、状态和辐射机制^[5,6];第一颗双星脉冲星的发现和研究表明,双星脉冲星中伴星产生的强引力场会导致多种相对论效应,特别是引力波辐射。PSRB1913+16 的发现及随后的观测和分析研究提供了引力辐射的存在的首次实验证据。该项成就被授予 1993 年诺贝尔物理学奖^[7];随后,第一颗毫秒脉冲星的激动人心的发现^[8]进一步激起了人们对脉冲星进行搜寻及观测研究的极大兴趣。毫秒脉冲星的发现及研究表明,这一类在周期、周期变化率、特征年龄、磁场等方面都不同于普通脉冲星的快速自转的老年脉冲星是经历过吸积过程而“再加速”的结果。它们的形成看来与 X 射线双星的演化相联系。毫秒脉冲星和双星 X 射线源的发现及研究极大地丰富了人们对恒星演化(特别是双星系统中恒星演化)的最后阶段

的进一步了解。后来,第一颗球状星团脉冲星的发现^[9]使人们认识到脉冲星不仅存在于集中在银道面的年轻星族中,还存在于其它老年星族中,对银河系来说,脉冲星是一种重要的恒星类别。另外,毫秒脉冲星及低质量 X 射线双星都常在球状星团中被发现的事实进一步支持了这两类天体的演化过程的关联。接着,高银纬毫秒脉冲星的发现^[10]使人们对毫秒脉冲星的空间分布范围有了新的认识,毫秒脉冲星的搜寻范围也随之扩展到了原先被忽视的高银纬区。后来,又发现了伴有行星的毫秒脉冲星系统^[11],这是首次在太阳系之外发现的行星系统。总之,这一系列的新发现都极大地推动了脉冲星的搜寻和观测研究工作的进展。通过对射电脉冲星的搜寻及观测研究,人们对脉冲星的成员分布、形成、演化和有关过程有了进一步的认识,激发了人们对中子星特别是对其内部结构的进一步探索。射电脉冲星的研究涉及并可应用于银河系结构、星际介质分布和特性、相对论和引力理论等方面的研究,特别是毫秒脉冲星的快速自转的高度稳定性的观测及研究可以应用于时间计量、太阳系动力学、天体测量、星际介质、广义相对论及宇宙学等领域,并已作出日益增多的贡献。

事实上,为了更好地分析研究脉冲星,需要得到更多的脉冲星(特别是毫秒脉冲星)样本,以便了解脉冲星的成员类别及其随位置、周期、流量密度、偏振度、速度等参数的分布,并对其特性及有关物理过程和机制加以研究。为此,必须首先对脉冲星作完整而深入的搜寻。同时,毫秒脉冲星在各种不同课题研究中的应用也迫切要求得到更多的、满足各种不同应用要求的毫秒脉冲星。例如,就时频应用而言,希望找到更多的自转稳定度好、流量密度高、定时噪声小的毫秒脉冲星。就引力的相对论效应的研究而言,希望找到更多的相对论性双星系统。在过去的 30yr 左右的时间里,虽然脉冲星的搜寻工作取得了长足的进步,然而,据分析,目前已发现的普通脉冲星及毫秒脉冲星的数量只是其总数的极小部分^[12],并且可能存在着周期短于已发现的最短周期 1.56ms 的脉冲星^[13]。可以预期,随着射电望远镜的功能、射电接收技术、数据采集存储和处理计算能力等方面的提高,脉冲星的搜寻工作必将取得更多可喜的成果。

2 射电脉冲星搜寻工作简况

第一颗脉冲星的发现引发了人们对发现新的脉冲星的极大兴趣,搜寻脉冲星的工作随之展开。搜寻的空间愈来愈广泛,愈来愈深入,搜索的目标愈来愈多样,搜索的技术也愈来愈进步,得到不断发展和提高。

2.1 影响脉冲星搜寻工作的关键因素

2.1.1 灵敏度

由于大部分射电脉冲星的流量密度很低,特别是毫秒脉冲星的流量密度的典型值约 10 mJy,因此为得到较好的搜寻效果,改进观测系统的灵敏度是至关重要的。灵敏度(即可测的最低辐射流密度)可表达为^[14~16]:

$$S_{\min} = \frac{\alpha\beta T_{\text{sys}}}{G(N_p \Delta\nu)(t_{\text{int}})^{1/2}} \left(\frac{w}{p-w} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中, α 是信噪比阈值, β 是代表数字化及其它处理过程的损失因子, T_{sys} 是系统噪声温度, 主要包括接收机系统噪声温度及天空背景温度, G 是天线增益, N_p 是偏振数, $\Delta\nu$ 是频带宽度, t_{int} 是累计时间, p 是脉冲周期, w 是有效脉冲宽度, 可表达为:

$$w = (w_0^2 + \delta t^2 + \delta t_{DM}^2 + \delta t_{\text{scatt}}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其中, w_0 是固有的脉冲宽度, δt 是采样间隔, δt_{DM} 是由星际色散量 DM 引起的色散致宽量, δt_{scatt} 是星际散射引起的致宽量。

为了得到更好的搜寻效果, 人们为提高灵敏度作了不懈的努力, 取得不断的进步。

2.1.2 色散效应

星际介质对于脉冲星信号的到达时间有频率色散效应, 对于中心频率为 ν 、带宽为 $\Delta\nu$ 的信号在经过星际介质的传播后, 信号到达时间的频率色散量可表示为^[14~16]

$$\delta t_{DM} = 8.3 \times 10^3 DM \times \nu^{-2} \times \delta\nu/\nu \quad (3)$$

式中, δt_{DM} 单位是 s, ν 及 $\delta\nu$ 的单位是 MHz, DM 是星际介质色散量, 单位是 $\text{pc}\cdot\text{cm}^{-3}$, 它可表达为 $\int n_e dl$, 其中, n_e 及 l 分别是星际介质电子密度及信号传播路径。这种色散效应对脉冲信号的污染严重影响了对脉冲信号(特别是短周期脉冲信号)的检测, 导致灵敏度下降。为此, 在脉冲星搜寻和观测中, 必须采用消色散接收技术。目前一般采用滤波式消色散接收机, 并不断取得进展, 一种 13(馈源) \times 2(偏振) \times 96(通道) \times 3 MHz(单通道带宽)的滤波器组消色散接收机系统已用于 Parkes 64m 射电望远镜的多馈源脉冲星搜寻中^[17], 另一种单个通带为 60kHz 的滤波器组消色散系统也已研制成功^[18]。另外, 可用数字式相关器等方法进行消色散处理^[19,20], 在消色散处理中也有应用声光频谱技术^[21]、其它硬件方法^[22]及数学方法^[23]的。事实上, 消色散是研制脉冲星射电接收机的一个重要课题。

2.1.3 观测频率

在搜寻脉冲星的工作中, 很多方面与观测频率有关, 如: (a) 射电脉冲星的频谱较陡, 典型的谱指数约在 -1.5 至 -2.0 之间, 因此流量密度随频率升高而快速下降; (b) 星际介质对脉冲信号的色散效应如 (3) 式所示, 它与信号频率的三次方成反比, 与带宽 $\delta\nu$ 成正比。或者也可理解为它与频率的平方 ν^2 成反比, 与频谱分辨率 $\delta\nu/\nu$ 成正比。(c) 星际介质的散射引起的脉冲致宽与信号频率的 4 次方 ν^4 成反比, 与脉冲星距离的平方成正比。这种脉冲致宽效应与色散致宽一样会影响灵敏度。(d) 银河背景辐射的谱指数为 -2.7 , 比典型的脉冲星的谱指数更陡, 因此, 与脉冲星相比, 银河背景辐射随频率升高而更快地下降。(e) 射电望远镜的波束尺度与射电频率 ν 成反比。

综合考虑以上这些因素, 可以看到, 用高频或低频作搜寻工作各有利弊: (1) 高频搜寻工作: (a) 受星际散射影响较小; (b) 在消色散接收中对通道宽度 $\delta\nu$ 及频谱分辨率 $\delta\nu/\nu$ 的要求比对低频的要求相对较小; (c) 相对于低频段, 流量密度更低, 不利于搜寻频谱较陡的脉冲星; (d) 射电望远镜的波束宽度较小。(2) 低频搜寻工作: (a) 相对于高频而言, 脉冲星的流量密度比较高, 在搜索观测具有较陡的谱指数的脉冲星时具有优越

性; (b) 射电望远镜的波束宽度较大; (c) 受到银盘的散射的限制较大; (d) 为消色散, 对频谱分辨率 $\delta\nu/\nu$ 的要求较高。由此可见, 搜寻工作中应该结合科学目标, 选择恰当的观测频段。观测频率的不同选择会带来相应的不同效果。

2.1.4 其它有关问题

由于脉冲星信号的流量密度很低, 直接观测记录到单个脉冲的可能性极小。为此, 常采用较长的观测累积时间。同时, 为了保证足够的时间分辨率, 常采用较短的采样间隔时间, 加上普遍采用多通道消色散接收机, 因此采样和记录的数据量十分可观^[24]。对于庞大数据量的处理、分析计算工作更是繁重, 因为被搜寻的脉冲星的周期、脉冲宽度、星际介质导致的信号色散量等都是未知的, 因此, 必须对这些参量的一系列可能值(对于密近双星系统中高度加速的脉冲星, 则还需要考虑加速度这一因素), 结合观测数据运用各种数学方法进行分析计算和判定。这些庞大的数据量及计算量对数据存储介质的容量、数据的记录和传输能力及计算机运算速度等都要求极高, 这些方面相对于脉冲星搜寻工作的需求的滞后与否往往成为制约或推进脉冲星搜寻工作的重要因素。

另外, 天线增益及接收系统噪声温度是影响灵敏度及搜寻效果的重要因素。努力提高天线效率及天线有效面积是十分有益的。至于降低接收机系统内部噪声, 一直是射电天文技术的一个重要课题, 在低噪声馈源系统、制冷式放大等方面都取得了显著进展。例如, GBT—Green Bank 100m 射电望远镜系统中采用的 HEMT 放大器的噪声温度仅 $5 \sim 7\text{K}$ ^[25], Parkes 64m 射电望远镜在多波束高频搜巡中, 系统噪声温度降至约 25K ^[26]。

2.2 脉冲星的早期搜寻

这类搜寻基本上是在第一颗脉冲星发现之后、毫秒脉冲星发现之前进行的。当时观测条件有限, 主要目的是搜寻普通脉冲星, 基本上没考虑快速脉冲星的情况。观测中心频率大多在 400MHz 附近, 采样时间间隔的典型值是 $10 \sim 20\text{ms}$ 。这类搜寻对周期短于 100ms 的脉冲星而言灵敏度较差。所得的脉冲星样本是很不完整的, 但还是为研究脉冲星的空间分布、周期分布及光度分布等提供了大量的样本。这类搜寻主要有: 利用 Molonglo 射电望远镜进行的覆盖了 3 球面度的南天天区的搜寻^[27,28]、利用 Jodrell Bank 76m 射电望远镜进行的覆盖了银道面附近约 1 球面度的天区的搜寻^[28~30]、利用 Arecibo 305m 射电望远镜对银道面附近的 0.05 球面度的天区进行的搜寻^[7,32]、用 Molonglo 射电望远镜进行的覆盖赤纬 22° 以南的全部天区的又一次脉冲星搜寻^[33]、利用 Green Bank 92m 射电望远镜在 1977~1978 年间进行的覆盖赤纬 $+20^\circ$ 以北的天区的搜寻^[34] 以及利用 Green Bank 的 92m 射电望远镜在 1982 年至 1983 年间进行的覆盖约 2 平方弧度天区的再次搜寻(这次搜寻虽然是在毫秒脉冲星发现之后进行的, 但它的搜索目标仍然是普通脉冲星, 对毫秒脉冲星不灵敏)^[35]。

2.3 毫秒脉冲星的初期搜寻

第一颗毫秒脉冲星 PSRB1937+21(周期 1.56ms) 的发现及它的稳定的快速自转的特性引起了人们极大的关注和研究兴趣, 并引发了对毫秒脉冲星的搜寻。对此, 普遍采用较短的采样时间间隔、较高的频谱分辨率 $\delta\nu/\nu$, 努力提高灵敏度, 改变了过去的搜寻普遍对周期小于 30ms 的脉冲星不灵敏的状况。观测中心频率除在 400MHz 附近外, 也开始采

用在 1400~1500MHz 之间的高频。对短周期脉冲星的初期搜寻范围集中于银道面附近。在发现高纬毫秒脉冲星之前对毫秒脉冲星的几次重要搜寻是:

(1) 利用 Jodrell Bank 的 76m 射电望远镜在 1983 年至 1984 年间进行的搜寻采用了较高的观测中心频率 ($\approx 1400\text{MHz}$), 接收机总通带宽度 40MHz, 分成 8 个带宽为 5MHz 的通道, 采样间隔是 2ms, 双圆偏振接收。覆盖在 ($-4^\circ < \text{银经} < 105^\circ$ 、 $-1^\circ < \text{银纬} < 1^\circ$) 范围内的 220 平方度天区。这次观测极大地改善了过去大范围搜寻中所受到的来自银河背景辐射、星际色散及多径散射等方面的影响。这次搜寻对远距离的、短周期的脉冲星比较灵敏。共测得 61 颗脉冲星, 其中 40 颗是新发现的, 大多数较年轻, 相应的星际色散量较大 ($DM \geq 400\text{pc} \cdot \text{cm}^{-3}$)。新发现者中包括 1 颗周期为 85ms 的及 3 颗特征年龄为 20000yr 的脉冲星^[36,37]。

(2) 利用 Green Bank 92m 射电望远镜自 1983 年 11 月开始进行的脉冲星的搜寻, 观测中心频率是 390MHz, 双偏振观测, 总通带宽度为 8MHz, 分为 32 个带宽 0.25MHz 的通道。采样时间间隔是 2ms。灵敏度 2~100mJy(随周期、色散量及天空背景等变化)。该搜寻首次对 30ms 这样的短周期脉冲星有较好的灵敏度, 并且对直至 4ms 周期的脉冲星仍较灵敏。覆盖了 $-15^\circ < \text{银纬} < 15^\circ$ 、 $15^\circ < \text{银经} < 230^\circ$ 范围内的 3725 平方度的天区。共测得 87 颗脉冲星, 其中 20 颗是新发现的, 周期均大于 100ms^[38,39]。

(3) 利用 Arecibo 305m 天线在 1984 年至 1985 年间进行的快速脉冲星的搜寻^[39,40], 中心频率 430MHz, 总带宽 0.96MHz, 分成 16 个带宽 0.06MHz 的通道。采样间隔 0.3ms, 对周期短至 5ms 的脉冲星仍保持较好的灵敏度。这次搜寻覆盖了在 $-10^\circ < \text{银纬} < 10^\circ$ 、 $40^\circ < \text{银经} < 60^\circ$ 范围的 289 平方度天区。共测得 24 颗脉冲星, 包括 5 颗新发现的, 其中 PSRB1855+09 是一颗处于双星系统中的毫秒脉冲星, 自转周期 $p = 5.362\text{ms}$, 轨道周期 12.3d, 基本为圆轨道, 伴星质量仅 $0.26M_\odot$, 该脉冲星的发现极大地支持了毫秒脉冲星的“再加速”模式且其极小的定时不确定度有利于对背景引力波的研究及在时频方面的应用。它是当时所发现的第三颗周期小于 10ms 的脉冲星及第六颗双星脉冲星。

(4) 利用 Parkes 64m 射电望远镜自 1988 年开始进行的搜寻^[41]采用两个系统: 系统 1 总通带 80MHz, 分成 80 个带宽 1MHz 的通道, 中心频率 1434MHz, 双偏振接收。采样时间间隔 0.3ms, 该系统对快速脉冲星灵敏度较好, 可达 1.2mJy; 系统 2 总通带 320MHz, 分成 64 个带宽 5MHz 的通道, 中心频率 1520MHz, 双偏振接收, 采样间隔 1.2ms, 对较慢的脉冲星灵敏度较好, 可达 2.5mJy。这次搜寻覆盖了 800 平方度天区, 其银纬在 -4° 至 $+4^\circ$ 之内, 银经在 270° 至 360° 及 0° 至 20° 之间。共测得 100 颗脉冲星, 其中 46 颗是新发现的, 它们的周期范围是 47ms 至 2.5s, 其中 6 颗脉冲星的周期小于 150ms, 其中之一 PSRB1259-63 处于轨道周期为 1236.81d 的长周期双星系统中, 其伴星是 Be 星^[42]。另外, 这 6 颗脉冲星之中, 3 颗的特征年龄小于 30000yr。所发现的 PSRB1706-44, 同时是一颗 γ 射线脉冲星^[43]。这次高频搜寻是对前面 (1) 中所述在 Jodrell Bank 所作的高频搜寻的补充。这两次搜寻发现了不少具有较高的星际色散量及较短周期的较年轻的脉冲星, 但缺少毫秒脉冲星。这似表明: 位于银盘的明亮的毫秒脉冲星也许是较少的。事实上, 对毫秒脉冲星的观测灵敏度还有待改善和提高。

(5) 利用 Arecibo 305m 射电望远镜在 80 年代后期作的搜寻^[44]的总带宽是 10MHz, 分为 128 个带宽 0.078MHz 通道, 中心频率 430MHz, 采样间隔 0.517ms。系统噪声温度降至 50~75K, 灵敏度优于过去所有的搜寻工作, 具有测到短至 1ms 或更短周期的脉冲星的可能性。这次搜寻共覆盖 $-8^\circ < \text{银纬} < 8^\circ$ 、 $35^\circ < \text{银经} < 80^\circ$ 范围内的 260 平方度天区。共测到 61 颗脉冲星, 其中 24 颗是新发现的。在所测到的 4 颗毫秒脉冲星中, 2 颗是新发现的。其中之一 PSRB1957+20, 自转周期 $p = 1.6\text{ms}$ 仅稍大于 PSRB1937+21 的周期 (1.56ms), 非常接近由核物质的“非弹性”状态方程所预言的中子星的极限自转周期 1.5ms。PSRB1957+20 处于双星系统, 其伴星质量仅约 $0.03M_\odot$, 被认为是毫秒脉冲星的辐射导致蒸发的结果, 一般认为这是形成单星毫秒脉冲星的一种可能机制。

2.4 高银纬脉冲星 (包括毫秒脉冲星) 搜寻

由上述可见, 对毫秒脉冲星的初期搜寻集中于银道面附近。1990 年 Walszczan^[10,45] 利用 Arecibo 的射电望远镜所作的约 150 平方度高纬区搜寻中发现了两个较近的 (距离 $< 1\text{kpc}$) 毫秒脉冲星 (PSRB1257+12 和 PSRB1534+12), 分析表明, 低光度的毫秒脉冲星有可能是基本各向同性地分布的^[46]。同时, 计算机技术的飞速进步及 2GB 容量的 8mm 磁带的问世又解决了运算速度及大量数据的记录、存储、传输的问题。于是大范围的高纬区脉冲星 (包括毫秒脉冲星) 的搜寻也就得以实施了。考虑到在银盘之外, 色散和散射的效应较小, 天空背景温度较低, 再考虑到脉冲星的较陡的频谱导致其低频段信号的流量密度远大于高频段, 加上在低频段能得到较宽的望远镜波束, 有利于提高大范围搜寻的速度。因此, 普遍选择低频段来作包括高银纬区的脉冲星 (包括毫秒脉冲星) 搜寻, 近年来进行了几次重要的搜寻。

(1) 利用 Arecibo 305m 射电望远镜自 1991 年开始对 ($-2^\circ < \delta < 38^\circ$) 天区进行了脉冲星搜寻。先后有五个小组参加^[26,47~49]。开始, 有三个小组 (Princeton、Caltech、Penn-State/NRL) 参加, 分别承担的赤经范围是 $21.5\text{h} \leq \alpha \leq 1\text{h}$ 、 $8\text{h} \leq \alpha \leq 13\text{h}$ 及 $13\text{h} \leq \alpha \leq 18\text{h}$ 。1994 年另两个小组 (Cornell/Berkeley 及 STSci/Arecibo) 参加进来, 这五个小组各自承担 8 个赤纬固定的窄带范围的搜寻。每个窄带的赤纬范围为 1° 、赤经范围自 0h 至 24h, 观测中心频率 439MHz, 总通带 8MHz, 分成 32 个带宽 0.25MHz 的通道, 双偏振观测, 采样间隔 0.25ms, 极限灵敏度可达 0.5mJy , 非常适于毫秒脉冲星的观测。但是大面积的天线尺寸所相应的波束较窄: $10'$ (在 430MHz 处), 从而制约了天区覆盖速度, 这次搜寻已测定脉冲星 100 多颗, 包括十几颗毫秒脉冲星。新发现的毫秒脉冲星中包括至今所发现的第 9 颗单星毫秒脉冲星 PSRJ0030+0451, 其周期 4.8ms。这类单星毫秒脉冲星的演化史至今尚未得到完全满意的分析研究结果, 有待进一步的观测和研究^[50~52]。

(2) 用 Parkes 64m 射电望远镜对毫秒脉冲星及其它低光度的脉冲星进行的覆盖整个南天的搜寻在 1991~1995 年间完成^[14,24,53,54], 总频带宽度 32MHz, 分成 256 个带宽 125MHz 的通道, 观测中心频率 436MHz, 双偏振观测, 采样间隔 0.3ms, 极限灵敏度可达 3mJy 。与上述 Arecibo 搜寻相比, 在 $DM \approx 10\text{pc} \cdot \text{cm}^{-3}$ 处, 灵敏度差不多, 但在较大 DM 处, 则灵敏度优于 Arecibo^[55]。这次庞大工作量的搜寻取得了极大成功。共测得了 298 颗脉冲星, 其中 101 颗是新发现的, 17 颗是毫秒脉冲星, 包括 J0437-4715 和 J2051-0827,

前者与太阳系的距离仅 150pc, 平均流量密度 600mJy, 是最近、最亮的毫秒脉冲星, 十分适于研究毫秒脉冲星辐射机制、双星伴星及定时稳定度^[56], 后者所在的交食双星系统的轨道周期仅为 0.099d! 是一个值得进一步观测研究的目标^[57]。另外, 这次南天搜寻的结果已经极大地推进了对普通脉冲星及毫秒脉冲星在成员总数、分布、诞生速率的分析^[53]和脉冲星定时等方面的研究^[54]。

(3) 利用 Green Bank 43m 射电望远镜进行较快速北天搜寻的主要目的是搜索北天的较明亮的的毫秒脉冲星, 同时弥补 Arecibo 搜寻不能覆盖整个北天, 且搜寻速度较慢的不足。总通带带宽 40MHz, 中心频率 378MHz, 单通道带宽 78kHz, 采样间隔 0.25ms, 极限灵敏度 8mJy。这次搜寻共测定了 84 颗脉冲星, 其中 8 颗是新发现的, 包括 J1022+1001 及 J1518+4904, 前者周期 16.5ms, 处于接近圆形的双星轨道中, 伴星是一白矮星, 后者周期 40.9ms, 处于相对论性双星系统中。这次北天搜寻与 Parkes 南天搜寻都表明, 像 PSRJ0437-4715 那样距离较近又明亮的脉冲星是很少的^[15]。

(4) 利用 Jodrell Bank 76m 天线进行的北天搜寻范围 $35^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$, 是 Arecibo 搜寻范围以北的天区。搜寻技术及参数接近于 Parkes 南天搜寻, 是 Parkes 南天搜寻的北天补充。总通带带宽 8MHz, 中心频率 408MHz, 单个通道带宽 125kHz, 双偏振观测, 采样间隔 0.3ms, 极限灵敏度约 4mJy。毫秒脉冲星 J1012+5307 是在该搜寻中发现的, 其自转周期 5.3ms, 处于轨道周期 14.5h 的双星系统中, 其伴星与脉冲星特征年龄相比而言很年轻。这伴星很亮, 可作详细的测光及光谱观测^[58]。

2.5 定向搜寻

对可能是脉冲星的候选目标或可能存在脉冲星的候选天区进行定向搜索, 由于缩小了搜寻范围, 有可能对单个的候选目标作较长时间的较深入的观测, 已取得不少可喜的成果。

2.5.1 毫秒脉冲星候选体

毫秒脉冲星的候选者应该具有以下基本特点: (a) 角直径较小, (b) 射电频谱较陡, (c) 线偏振度较高。例如, 射电源 4c21.53 具有以上三个特点, 后来通过观测分析, 发现了毫秒脉冲星 PSRB1937+21^[8]。毫秒脉冲星 PSRJ0218+4232 也是先被测定为一个具有以上三个特点的连续射电源, 随后才经观测发现其脉冲星的辐射特点的^[59]。这类搜寻不少, 如近年有人对从 NVSS 及 WENSS 巡天星表中选择的 14 个毫秒脉冲星候选体作了观测, 结果是: 对 $200\text{pc} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以内的色散量而言, 没有得到毫秒脉冲星的观测证据^[60]。也有人从 VLA 巡天和 WSRT 巡天结果中选择得到了高银纬脉冲星侯选体的样本^[61]。

2.5.2 超新星遗迹

超新星遗迹作为脉冲星可能的诞生地是脉冲星定向搜寻中的传统目标。如 PSRB0531+21, PSRB1951+32, PSRB0540-69, PSRB1509-58……都是通过对超新星遗迹的观测而发现的^[62~64]。一直有人利用 Arecibo、Jodrell Bank 及 Parkes 等处望远镜作这类定向搜寻。例如, 用 Jodrell Bank 的 76m 射电望远镜在 606MHz 处以 1mJy 左右的灵敏度对北天的 33 个超新星遗迹作了定向搜寻。当对超新星遗迹 G132.7+13 及 G65.1+0.6 作搜寻时, 分别发现了脉冲星 PSRJ0215+6218 及 PSRJ1957+2831。目前约有十几颗脉冲星与

超新星遗迹有关^[65~67]。

2.5.3 球状星团

毫秒脉冲星的形成和演化理论涉及双星系统中的吸积和自转加速,与低质量 X 射线双星密切相关。观测和分析表明,低质量 X 射线双星分布于球状星团中的比例相当大。因此,球状星团成了搜索毫秒脉冲星的重要目标。例如,PSRB1821-24 及 PSRB1744-24A……都是在球状星团中发现的^[68,69]。利用 Arecibo、Parkes 及 Jodrell Bank 等处的射电望远镜所作的这类定向搜寻取得了很多有益的结果^[70,71]。例如,近年用 Parkes 射电望远镜对球状星团 47 Tuc 的搜寻,除观测到了已经发现的 11 颗毫秒脉冲星(其中 4 颗在双星系统中)外,还新发现了都处于双星系统中的 9 颗毫秒脉冲星,其中一颗的轨道周期 96min,是至今发现的射电脉冲双星轨道周期最短的。对该星团的 14 颗脉冲星得到了定时解。这 14 颗脉冲星都位于星团中心 1.5' 范围内,其中 9 颗脉冲星的周期变化率为负值,表明它们在星团引力势场中向着地球方向加速^[72]。已在球状星团中发现几十颗脉冲星,大部分的周期小于 30ms^[73]。

2.5.4 其它定向目标

蟹状脉冲星 PSRB5031+21 及船帆脉冲星 PSRB0833-45 辐射中的 γ 射线辐射表明,一些尚未被证认的 γ 射线源有可能是年轻的高能的脉冲星,从而引发了对 γ 射线星表中的 γ 射线源位置误差范围作脉冲星的搜寻^[74]。另外,处于双星系统中的射电脉冲星 PSRB1259-63 及 PSRJ0045-7319 的伴星分别是 OB 星及 B 型星,这一发现又导致了将 OB 星作为搜寻脉冲星的观测目标^[75,76]。

2.6 进一步的广域深空搜寻

尽管上述脉冲星搜寻工作取得了丰硕的结果,但是所发现的脉冲星中,年轻脉冲星及毫秒脉冲星较少。年轻脉冲星具有较强的磁场及中短的周期($p \leq 100\text{ms}$),这类脉冲星相对较少发现的原因除它们演化较快,被发现的几率相对较小外,与受到观测系统灵敏度的限制也有关系。所发现的年轻脉冲星大多在低银纬处,受较高的背景温度和色散及星际闪烁导致的脉冲致宽的影响较大。年轻脉冲星常表现出自转突然变化,反映了中子星内部结构的状态及变化。它们很可能是 X 及 γ 射线源,它们还常与超新星遗迹相联系。总之,进一步搜寻和研究它们是十分必要和有意义的。毫秒脉冲星是年老的再加速脉冲星,周期短,磁场已衰减,流量密度也较低,过去的搜寻(特别是高频搜寻)中较少发现这类脉冲星的原因主要是受观测系统灵敏度的限制,而且,这方面的搜寻努力也不够。事实上,在非定向搜寻中发现的毫秒脉冲星中,(由色散推得的)距离大多很近,超过 2kpc 的仅有几颗。另外,过去的搜寻对处于密近双星系统中高度加速的脉冲星的灵敏度较差。正因为毫秒脉冲星的研究具有重大的意义和广阔的应用前景,这就有必要以更好的时间分辨率、更好的频谱分辨率及更好的灵敏度,对脉冲星,特别是毫秒脉冲星进行广域深空搜寻。

(1) 用 Parkes 64m 天线于 1997 年 8 月开始进行的多波束高频搜寻工作在 1374MHz, 13 个馈源,消色散接收机总通带 288MHz,分成 96 个带宽为 3MHz 的通道,双偏振观测,采样时间间隔 0.25ms,累积时间 35min,系统噪声温度约 25K,极限灵敏度 0.15mJy,

与前面提到的用该天线在 1434MHz 进行的搜寻相比, 极限灵敏度提高了 8 倍, 对年轻的脉冲星及毫秒脉冲星, 特别是位于银盘深处的年轻脉冲星及毫秒脉冲星的搜寻能力得到了极大提高。这次搜巡的覆盖范围是在 $-5^\circ < \text{银纬} < 5^\circ$ 及银经在 260° 至 50° 之间的天区。数据的处理、计算量十分大, 仅在 35min 的累积时间里就产生 10^{10} 个数据样本! 目前已经对 50% 以上的计划中的搜寻天区作了观测。已经发现 500 颗左右的脉冲星。这些新发现的脉冲星中, 有很多周期小于 100ms 的年轻脉冲星。大部分新发现的脉冲星处于较远的距离, 推得的平均色散量 DM 约为 $400\text{pc}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。新发现的脉冲星中, 至少有 8 颗十分年轻, 它们的特征年龄小于 10^5yr 。发现至少两个射电脉冲星具有迄今发现的最高表面磁场强度, 其中之一 (PSRJ1119-6127), 非常年轻, 其特征年龄约 1600yr! 表面磁场强度达 $4.1 \times 10^9\text{T}$ 。其制动指数 $N = 3.0 \pm 0.1$ 。过去的射电成像资料表明其位置处存在一个超新星遗迹。还有好几颗新发现的脉冲星位于超新星遗迹的边界内, 但周期都大于 200ms, 还须仔细测定和研究。至今, 这次搜寻已经至少发现了 8 个新的双星脉冲星系统, 其中之一, PSRJ1811-1736, 周期 $p = 104.18\text{ms}$, 特征年龄很大, 约 $9.5 \times 10^8\text{yr}$, 其轨道偏心率很高, 约 0.83, 伴星质量约 $0.87M_\odot$ 。该双星系统很可能是一双中子星系统, 即可能是南天的第一个双中子星系统。另一双星脉冲星系统 PSRJ1740-3052 的显著特点是其伴星质量极大, 约达 $11M_\odot$! 该伴星是大质量的非简并恒星还是黑洞, 有待进一步的观测和分析^[77~79]。

(2) 用北十字 (Northern cross) 射电望远镜在 408 MHz 频段上进行的大范围搜寻的时间分辨率和频谱分辨率是前所未有的。其采样间隔 $64\mu\text{s}$, 单个消色散通带带宽 $\Delta\nu = 32\text{kHz}$, 旨在探索中子星的极限自转周期, 根据最流行的状态方程, 中子星的理论自转周期比目前已知的脉冲星最短周期 1.56ms 短得多。这次搜寻是对周期 $p < 1.5\text{ms}$ 的极短周期脉冲星的首次大范围搜寻。预期能有很多精彩的发现。该系统总通带 4MHz, 累积时间 67s, 系统噪声的等值流量密度是 45Jy。对 $DM = 70\text{pc}\cdot\text{cm}^{-3}$ 而言, 相应于周期 0.4ms、1ms 及 10ms 的灵敏度分别约为 80mJy、20mJy 及 8mJy。至今已观测了 $4^\circ < \delta < 42^\circ$ 范围内 80% 的天区, 测定了 35 颗已知的普通脉冲星和 5 颗已知的毫秒脉冲星, 发现一颗新的毫秒脉冲星 PSRJ0031+0451, 周期 $p = 4.86\text{ms}$, 色散量 $DM = 4.3\text{pc}\cdot\text{cm}^{-3}$, 正对它作进一步观测, 以测定与星际介质有关的闪烁参数及闪烁速度^[80]。

(3) 用 Effelsberg 100m 射电望远镜在观测频率 1430 MHz 处对 $28^\circ < \text{银经} < 130^\circ$ 、银纬绝对值 $< 0.5^\circ$ 的 2 平方度天区搜寻中发现 4 颗新的脉冲星之后, 已经开始了在 4.85GHz 处对银心部分作脉冲星搜索。使用了一种高灵敏度的双馈源系统 (温度约 25K), 接收机带宽 480MHz, 由 8 个通道组成。对于 12min 的累计时间, 灵敏度好于 0.1 mJy。无疑, 与搜寻工作通常用观测频率 1430MHz 或 430MHz 相比, 用观测频率 4.85GHz 的搜寻在降低星际介质的不规则性引起的脉冲信号的散射方面是有益的^[81,82]。

(4) Nancay 天文台用大型射电望远镜对 $-15^\circ < \text{银经} < 180^\circ$ 、银纬绝对值 $< 3^\circ$ 的约 1170 平方度天区进行的搜寻, 中心频率是 1380MHz, 已完成 80% 以上的观测, 已发现至少 3 颗新的脉冲星。

(5) Arecibo 305m 射电望远镜系统经改进后, 在有效孔径面积、系统噪温、极限灵敏

度、高频覆盖范围、指向精度、滤波器通带等方面都有改善。该望远镜系统对原来覆盖范围的新的搜寻采用 60kHz 的单通道带宽及 $100\mu\text{s}$ 内的采样时间间隔, 有利于对极短周期的毫秒脉冲星的搜寻, 可望推进对 neutron star 极限自转周期的认识。

(6) 此外, Green Bank 100m 射电望远镜 (GBT)、大米波射电望远镜 (GMRT)、未来的平方公里大型射电望远镜 (LT) 以及我国计划中的 500m 球面射电望远镜 (FAST) 等都可望是进行深空搜索及观测的有力工具。

3 结 语

自发现第一颗脉冲星以来, 脉冲星的搜寻取得了丰硕的成果, 极大地推动了天文学、天体物理学乃至物理学等相关领域的发展。脉冲星的发现使 neutron star 从理论概念转为能对其观测研究 (包括内部结构的研究) 的有形天体。通过对脉冲星的观测研究, 可以检验 neutron star 产生于超新星爆发及其演化的理论, 脉冲星的观测和研究推进了对恒星, 特别是对双星系统的形成、演化、相互作用等的了解。脉冲星提供了高密度、高强磁场及高温等极端物理状态的实验条件。双星脉冲星中的引力场可用来验证相对论。毫秒脉冲星的高度稳定的自转速率展现了在时频领域的应用前景。对脉冲星信号的相位、强度、法拉第旋转及变化的测量还提供了一种研究星际介质的新手段。如今, 脉冲星的观测研究在天文学及天体物理学中占有了十分重要的位置。并且, 不仅限于射电, 还成了 γ 射线、X 射线及光学观测天文学的重要课题, 很多大型光学望远镜及 γ 射线和 X 射线空间探测器的观测目标中都包括了脉冲星, 脉冲星的多波段联合观测研究成了全面了解 neutron star 及脉冲星的物理状态和辐射机制等的重要手段。

目前已发现的脉冲星及毫秒脉冲星只是这类天体家族中的一小部分。除天文学研究外, 有关应用研究也期待着更多的各种类型的脉冲星, 例如, 更多的可应用于时频研究的高稳定度的毫秒脉冲星、更多的适于引力辐射背景及强引力场理论检验的双星脉冲星系统等。同时, 一些受到高度关注的问题也等待着答案, 例如是否存在周期短于 1.5ms 的脉冲星? 能否发现以黑洞为伴星的脉冲星? 是否存在更多的带有行星的脉冲星系统? 因此, 进一步展开脉冲星搜寻工作是迫切需要和十分重要的。

参 考 文 献

- 1 Hewish A, Bell S J, Pilkington J H D *et al.* *Nature*, 1968, 217: 709
- 2 Staelin D H, Reifenstein III E C. *Science*, 1968, 162: 1481
- 3 Large M I, Vaughan A E, Mills B Y. *Nature*, 1968, 220: 340
- 4 Radhakrishnan V, Manchester R N. *Nature*, 1969, 222: 228
- 5 Fritz G, Henry R C, Meekins J F *et al.* *Science*, 1969, 164: 709
- 6 Hillier R R, Jackson W R, Murray A *et al.* *Ap. J.*, 1970, 162: L177
- 7 Hulse R A, Taylor J H. *Ap. J.*, 1975, 195: L51
- 8 Backer D C, Kulkarni S R, Heiles C *et al.* *Nature*, 1982, 300: 615
- 9 Lyne A G, Brinklow A, Middleditch J *et al.* *Nature*, 1987. 328: 399
- 10 Wolszczan A. *Nature*, 1991, 350: 688

- 11 Wolszczan A, Frail D A. *Nature*, 1992, 355: 145
- 12 Lyne A G. *Adv. Space Res.*, 1998, 21(1-2): 149
- 13 Possenti A, Colpi M, D'Amico N et al. *Ap. J.*, 1998, 497: L97
- 14 Manchester R N, Lyne A G, D'Amico N et al. *M.N.R.A.S.*, 1996, 279: 1235
- 15 D' Amico N. *Adv. Space Res.*, 1998, 21(1/2): 125
- 16 Lyne A G, Graham-smith F. *Pulsar Astronomy*, Cambridg: Cambridge University press, 1998
- 17 Manchester R N et al. *Memorie Della Societa Astronomical Italiana*, 1998, 69 (4): 801
- 18 Bailes M. *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*, 1996, 105: 3
- 19 Backer D C. In: Ogelman H, van den Heuvel E P J eds. *Timing Neutron Stars, Proceedings, NATO Advanced Study Institute on Timing Neutron Stars, Cesme, Izmir, Turkey, 1988*, Dordrecht: Kluwer, 1989: 3
- 20 Jenet F A. *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1997, 109: 707
- 21 Hanado Y. *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.* 1996, 105: 27
- 22 Hankins T H, Stinebring D R, Rawleg L A. *Ap. J.*, 1987, 315: 149
- 23 刘学峰, 吴鑫基. *天体物理学报*, 1999, 19(1): 68
- 24 Manchester R N. *Journal of the Korean Astronomical Society*, 1996, 29: S209
- 25 吴盛殷. *天文学进展*, 1997, 15(1): 174
- 26 Vaughan A E, Large M I. *Nature*, 1970, 225: 167
- 27 Large M I, Vaughan A E. *M.N.R.A.S.*, 1971, 151: 277
- 28 Davies J G, Lyne A G, Seiradakis J H. *Nature*, 1972, 240: 229
- 29 Davies J G, Lyne A G, Seiradakis J H. *Nature*, 1973, 244: 84
- 30 Davies J G, Lyne A G, Seiradakis J H. *M.N.R.A.S.*, 1977, 179: 635
- 31 Hulse R A, Taylor J H. *Ap. J.*, 1974, 191: L59
- 32 Manchester R N, Lyne A G, Taylor J H et al. *M.N.R.A.S.*, 1978, 185: 409
- 33 Damashek M, Taylor J H, Hulse R A. *Ap. J.*, 1978, 225: L31
- 34 Dewey R J, Taylor J H, Weisberg J M. *Ap. J.*, 1985, 294: L25
- 35 Clifton T R, Lyne A G. *Nature*, 1986, 320: 43
- 36 Clifton T R, Lyne A G, Jones A W et al. *M.N.R.A.S.*, 1992, 254: 177
- 37 Stokes G H, Taylor J H, Weisberg J M et al. *Nature*, 1985, 317: 787
- 38 Stokes G H, Segelstein D J, Taylor J H et al. *Ap. J.*, 1986, 311: 694
- 39 Segelstein D J, Rawley L A, Stinebring D R et al. *Nature*, 1986, 322: 714
- 40 Johnston S, Lyne A G, Manchester R N et al. *M.N.R.A.S.*, 1992, 255: 401
- 41 Johnston S, Manchester R A, Lyne A G et al. *Ap. J.*, 1992, 387: L37
- 42 Thompson D J et al. *Nature*, 1992, 359: 615
- 43 Nice D J, Fruchter A S, Taylor J H. *Ap. J.*, 1995, 449: 156
- 44 Wolszczan A. *IAU Circ.*, 1990, No.5073
- 45 Johnston S, Bailes M. *M.N.R.A.S.*, 1991, 252: 277
- 46 Camilo F, Nice D J, Taylor J H. *Ap. J.*, 1996, 461: 812
- 47 Ray P S, Thorsett S E, Jenet F A et al. *Ap. J.*, 1996, 470: 1103
- 48 Camilo F, Nice D J, Shrauner J A et al. *Ap. J.*, 1996, 469: 819
- 49 Foster R S, Cadwell B J, Wolszczan A et al. *Ap. J.*, 1995, 454: 826
- 50 Arecibo Observatory. *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1999, 31(1): 343
- 51 Mclaughlin M, Arzoumanian Z A, Cordes J M. In: Kramer M, Wex N, Wielebinski R eds. *Pulsar Astronomy-2000 and Beyond, Proceedings, IAU Colloq. 177, Bonn, Germany, 1999*, San Francisco: ASP, *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*, 2000, 202: 41
- 52 Lommen A N, Zepka A, Backer D C et al. Accepted by *Ap J.*
- 53 Lyne A G, Manchester R N, Lorimer D R et al. *M.N.R.A.S.*, 1998, 295: 743

- 54 D'Amico N, Stappers B W, Bailes M *et al.* M.N.R.A.S., 1998, 297: 28
- 55 Camilo F. In: Jackson N, Davis R J eds. High-sensitivity Radio Astronomy, Proceedings, Macclesfield, Cheshire, UK, 1996, Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1997: 14
- 56 Johnston S *et al.* Nature, 1993, 361: 613
- 57 Stappers B W *et al.* Ap. J., 1996, 465: L119
- 58 Nicatrol L, Lyne A G, Lorimer D R *et al.* M.N.R.A.S., 1995, 273: L68
- 59 Navarro J, de Bruyn G, Frail D *et al.* Ap. J., 1995, 455: L55
- 60 Tian W W, Strom R G, Stappers B W *et al.* In: Kramer M, Wex N, Wielebinski R eds. Pulsar Astronomy-2000 and Beyond, Proceedings, IAU Colloq. 177, Bonn, Germany, 1999, San Francisco: ASP, Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 2000, 202: 45
- 61 田文武, 吴鑫基, 张喜镇. 天体物理学报, 1999, 19(4): 375
- 62 Clifton T R, Backer D C, Foster R S *et al.* IAU circ., 1987, No. 442
- 63 Manchester R N, Mar D, Lyne A G *et al.* Ap. J., 1993, 403: L29
- 64 Manchester R N, Tuohy I R, D'Amico N. Ap. J., 1982, 262: L31
- 65 Gorham P W, Ray P S, Anderson S B *et al.* Ap. J., 1996, 458: 257
- 66 Kaspi V M, Manchester R N, Johnston S *et al.* A. J., 1996, 111: 2028
- 67 Lorimer D R *et al.* Astron. Astrophys., 1998, 331 (3): 1002
- 68 Lyne A G, Brinklow A, Middleditch J *et al.* Nature, 1987, 328: 399
- 69 Lyne A G, Johnston S, Manchester R N *et al.* IAU Circ., 1990, No.4974
- 70 Biggs J D, Lyne A G. M.N.R.A.S., 1996, 282(2): 691
- 71 Lyne A G, Manchester R N, D'Amico N. Ap. J., 1996, 460: L41
- 72 Freire P C, Camilo F, Lorimer R *et al.* In: Kramer M, Wex N, Wielebinski R eds. Pulsar Astronomy- 2000 and Beyond, Proceedings, IAU Colloq. 177, Bonn, Germany, 1999, San Francisco: ASP, Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 2000, 202: 87
- 73 Kulkarni S R, Anderson S B, In: Hut P, Makino J eds. Dynamical Evolution of Star Clusters-Confrontation of Theory and Observations, Proceedings, IAU Symposium 174, Tokyo, 1995, Dordrecht: Kluwer, 1996:181
- 74 Lundgren S C, Zcpka A F, Cordes J M. Ap. J., 1995, 453: 419
- 75 Sayer R W, Nice D J, Kaspi V M. Ap. J., 1996, 461: 357
- 76 Phil C J, Evans C R, Leonard P J T *et al.* A. J., 1996, 111: 1220
- 77 Camilo F, Lyne A G, Manchester R N *et al.* In: Kramer M, Wex N, Wielebinski R eds. Pulsar Astronomy-2000 and Beyond, Proceedings, IAU Colloq. 177, Bonn, Germany, 1999, San Francisco: ASP, Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 2000, 202: 3
- 78 Manchester R N, Lyne A G, Camilo F *et al.* In: Kramer M, Wex N, Wielebinski R eds. Pulsar Astronomy-2000 and Beyond, Proceedings, IAU Colloq. 177, Bonn, Germany, 1999, San Francisco: ASP, Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 2000, 202: 49
- 79 D'Amico N, Lyne A G, Manchester R N *et al.* To be published in Proceedings of X-ray Astronomy 1999: Stellar Endpoints, AGN and the X-ray Background, Bologna, Italy, 1999
- 80 D'Amico N. In: Kramer M, Wex N, Wielebinski R eds. Pulsar Astronomy-2000 and Beyond, Proceedings, IAU Colloq. 177, Bonn, Germany, 1999, San Francisco: ASP, Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 2000, 202: 27
- 81 Lorimer D R, Kramer M, In: Kramer M, Wex N, Wielebinski R eds. Pulsar Astronomy-2000 and Beyond, Proceedings, IAU Colloq. 177, Bonn, Germany, 1999, San Francisco: ASP, Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 2000, 202: 11
- 82 Kramer M, Klein B, Lorimer D R *et al.* In: Kramer M, Wex N, Wielebinski R eds. Pulsar Astronomy- 2000 and Beyond, Proceedings, IAU Colloq. 177, Bonn, Germany, 1999, San Francisco: ASP, Astron. Soc. Pac. Conf. Ser., 2000, 202: 37

Progress on Radio Pulsar Search

Pan Liande

(Shaanxi Observatory, Chinese Academy of Science, Lintong 710600)

Abstract

The great contribution and important significance of the radio pulsar search as well as related observations and studies are reviewed, some key factors in the pulsar search, such as sensitivity, dispersion effect, observing frequency and instrumentation, are analyzed, and the situation, achievement, significance and progress on the successful pulsar search conducted after the discovery of pulsars, especially after the discovery of the first millisecond-pulsar, including the high-latitude- pulsar search, the directed millisecond-pulsar search and the deep wide-range search, are mainly introduced and analyzed in this paper.

Key words pulsar—millisecond-pulsar—pulsar search