

引用格式: 蔡宏兵, 陈荔, 徐劲松, 等. GHz 峰值谱脉冲星统计研究[J]. 时间频率学报, 2023, 46(3): 237-248.

GHz 峰值谱脉冲星统计研究

蔡宏兵¹, 陈荔², 徐劲松¹, 王伟华³, 王贝贝¹

(1. 江苏师范大学 江苏圣理工学院-中俄学院, 徐州 221116;

2. 江苏师范大学 物理与电子工程学院, 徐州 221116;

3. 常州工程学院 计算机信息工程学院, 常州 213022)

摘要: GHz 峰值谱脉冲星是指其射电谱在 1GHz 附近会发生倒转的脉冲星。当前已发现有 33 颗此类脉冲星。这些倒转谱形成的原因可能是由于星际介质对脉冲星的射电辐射所产生的自由-自由吸收引起的。本文对这些脉冲星的倒转谱峰值频率、谱指数、色散量等参数进行了统计研究, 发现 GHz 峰值谱脉冲星的峰值频率主要分布在 0.5~1.0 GHz 之间, 它们的平均谱指数为-1.52, 脉冲星的色散量与自转周期有显著的正相关性, 这种正相关可能表明星际介质是影响 GHz 峰值谱脉冲星自转速度的重要因素。本文也讨论了星际介质对 GHz 峰值谱脉冲星计时的影响。

关键词: 脉冲星; 射电谱; 辐射机制

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-03-0237-12

Statistical research on pulsars with the gigahertz-peaked spectra

CAI Hong-bing¹, CHEN Li², XU Jin-song¹, WANG Wei-hua³, WANG Bei-bei¹

(1. JSNU SPBPU Institute of Engineering & SINO-RUSSIAN Institute, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;

2. School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;

3. School of Computer Science and Information Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China)

Abstract: Pulsars with the gigahertz-peaked spectra (GPS) are named GPS pulsars, which means that the spectra of those pulsars in the radio band will turn over near 1 GHz. There are 33 GPS pulsars discovered so far. The reason causing the turn-over spectra may be due to the free-free absorption of the pulsar's radio radiation by the interstellar medium. We carry out statistical research on the peak frequency of turn-over spectrum, the spectral index, and the dispersion measure of these GPS pulsars. We find that the distribution of peak frequency of these GPS pulsars is between 0.5 GHz and 1.0 GHz, the average spectral index is -1.52. We also find that there is a strong positive correlation between the dispersion measure and the pulsar's rotation period, which suggests that the interstellar medium may be an interfering factor of the rotation of GPS pulsars. At last, the effect of intermedium on timing of GPS pulsar is discussed.

Key words: pulsar; radio spectrum; radiation mechanism

0 引言

自从脉冲星 20 世纪 60 年代被发现以来, 由于脉冲星自身具备独特的物理性质 (强磁场、强引力、稳定的自转周期), 以及脉冲星是人类可直接观测的最近的致密天体之一, 其一直是天文学、物理学的研究热点之一。通过脉冲星的射电辐射谱, 可以探究脉冲星辐射机制; 还可以根据脉冲星的能谱分布, 选择合适的观测频段, 从而在更短的观测时间内获得有较高信噪比的脉冲星计时数据, 对提高脉冲星计时精度有重要作用。研究表明, 大部分脉冲星的流量密度随着频率的降低而升高, 可以用一个幂律谱来表示: $S_\nu = S_0 \nu^\alpha$ ^[1], S_ν 为脉冲星在频率 ν 时的流量密度, S_0 为频率为 1 GHz 时的流量密度, α 为谱指数, 一般为负值, α 越小表示脉冲星在高频的辐射强度下降越快, 这种幂律谱形在射电波段可以一直延伸到 100 MHz 以下。W. Sieber (1973)^[1]还发现有部分脉冲星的谱在低频偏离了这种幂律谱形呈现出向下的转折现象, 这种谱形也被称为倒转 (turn over) 谱, 他用同步自吸收和自由-自由吸收两种辐射机制对倒转谱进行了拟合。由于当时观测数据的限制, 他们的拟合结果还不能说明这种谱的倒转是由哪一种机制主导。B. Koribalski 等人 (1995)^[2]利用澳大利亚的位于 Parkes 的 64 m 射电望远镜对南天的 8 颗脉冲星进行观测, 发现倒转谱脉冲星 PSR B1054-62 处于氢电离区或被氢电离区遮挡, 这为脉冲星倒转谱可能是由于星际介质的自由-自由吸收提供了实测证据。O. Maron 等人 (2000)^[3]发现 B1838-04 和 B1823-13 在 1 GHz 附近就发生了谱的倒转, 而大部分倒转谱脉冲星一般在数百 MHz 附近才发生谱的倒转。随后, J. Kijak 和 O. Maron (2004)^[4]又发现了多个高频倒转谱脉冲星。J. Kijak 等人 (2007)^[5]开启了高频倒转谱脉冲星的测量研究, 他们利用 GMRT 望远镜对一批具有倒转谱的脉冲星进行了观测, 发现有的脉冲星倒转频率在 1 GHz 附近, 他们认为倒转现象可能与脉冲星所处的环境有关。J. Kijak 等人 (2011)^[6]对这些具有高频倒转谱的脉冲星进行了详细的研究, 发现这些脉冲星周围有着丰富的星际介质, 这些星际介质可以吸收脉冲星的射电辐射, 在文中他们把这种射电谱在 GHz 附近发生倒转的脉冲星首次称为 GHz 峰值谱 (gigahertz-peaked spectra, GPS) 脉冲星, 如脉冲星 J1644-4559 (如图 1 所示) 就是一个典型的 GPS 脉冲星。J. Kijak 等人 (2011)^[7]对脉冲星双星系统 B1259-63 进行了多波段观测, 发现这颗脉冲星的谱随着其与伴星的距离而发生规律性的演化, 当接近伴星时, B1259-63 的谱就会发生倒转, 远离伴星时谱就没有倒转。由于双星系统存在吸积现象, 伴星附近有较多的星际介质, 所以该观测结果强有力地证明了脉冲星谱的倒转与其所处的环境有关, 即脉冲星谱的倒转是自由-自由吸收机制所导致。J. Kijak (2018)^[8]认为这些星际介质可能是超新星遗迹, H 电离区, 脉冲星星风云。

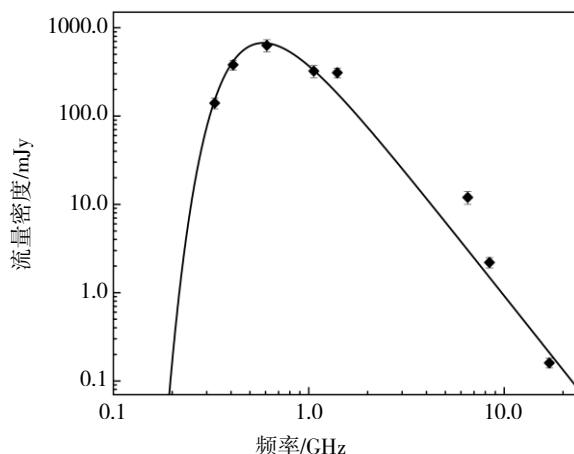


图 1 脉冲星 J1644-4559 的 GHz 峰值谱 (数据和拟合曲线来自参文[9])

自从 W. Sieber (1973)^[1]发现脉冲星射电谱有倒转以来, 对该类脉冲星的研究主要集中在确定射电谱倒转频率, 主要利用的模型是自由-自由吸收机制。目前尚未对此类脉冲星开展系统性的统计研究。

本文通过调研已公开发表的脉冲星谱数据,获得了 33 颗 GPS 脉冲星。本文将对这些 GPS 脉冲星的峰值频率、谱指数、色散量等参数进行统计分析,获得 GPS 脉冲星的统计特征,从而进一步理解 GPS 脉冲星的谱形成机制及其演化规律。

1 GPS 脉冲星的辐射机制

电子在和离子碰撞时,不仅发射光子,发生自由-自由辐射,自由电子从动能较高的自由态转变为动能较低的自由态;当该电子与离子再次碰撞时,还有可能再次吸收光子使自由电子从动能较低的自由态转变为动能较高的自由态,该吸收过程为自由-自由辐射的逆过程,叫做自由-自由吸收。其中被吸收的光子可以是自由-自由辐射出来的光子,也可以是来自外部的光子,如宇宙背景辐射、活动星系的射电辐射。W. Lewandowski 等人(2015)^[10]详细研究了不同电子数密度、温度、吸收区大小对脉冲星倒转谱的影响,还研究了脉冲星发生自由-自由吸收的两种区域:超新星遗迹(supernova remnant, SNR)中的丝状区和脉冲星星风云区(pulsar wind nebula, PWN)。研究表明,假设吸收区尺度为 1.2 pc,当吸收区电子数密度固定为 100 cm^{-3} 时,吸收区电子温度低于 100 K 就可以引起脉冲星的谱在 1 GHz 附近发生倒转,随着电子温度增高,峰值倒转频率向低频移动;当吸收区电子数密度固定为 1000 cm^{-3} 时,100 K 的电子能够引起脉冲星的谱在 9 GHz 附近发生倒转。他们还研究了在假设电子数密度为 300 cm^{-3} 和电子温度为 500 K 时,吸收区的大小的改变对倒转谱的影响,当吸收区长度为 1 pc 时,脉冲星的谱将在 1 GHz 附近发生倒转,随着吸收区长度的减小,当吸收区的长度为 0.01 pc 时,脉冲星的谱将在 0.15 GHz 附近发生倒转。这些研究表明,吸收体内部电子的数密度、温度以及吸收区自身大小都会影响脉冲星的谱发生倒转时的峰值频率,其中电子数密度和电子温度对峰值频率的影响比较大。

J. Kijak 等人(2017)^[9]利用自由-自由吸收模型,假设了 3 种吸收区即 H II 区、脉冲星星风云(PWN)、超新星遗迹中的丝状区,并假设了每个吸收区的特征尺度,如 H II 区为 10 pc, PWN 为 1 pc,超新星遗迹中的丝状区为 0.1 pc,然后他们利用自由-自由吸收模型估算了 15 个脉冲星相关的吸收区的电子数密度和温度。通过这些假设, J. Kijak 等人发现 H II 区要实现对脉冲星射电谱的有效吸收,其温度很低,平均温度只有 114 K,这与其他学者的观测研究结果矛盾,一般认为 H II 区的电子温度为数千 K,所以 H II 区不太可能作为吸收区。R. Basu 等人(2016)^[11]研究了 B1800-21 的谱形随时间的变化,通过自由-自由吸收模型对谱的拟合,他们认为脉冲星周围星际介质的数密度为 $1\,000\sim 20\,000 \text{ cm}^{-3}$,吸收介质的尺寸大约为 220 au。

自由-自由吸收机制也曾被用来研究宇宙中活动星系的射电辐射谱。S. Kameno 等人^[12]在利用 VSOP (Very-long-baseline-interferometry Space Observatory Programme)对射电源 OQ208 进行的观测研究中,对谱的拟合就采用了自由-自由吸收模型,并据此估算了射电辐射所穿过等离子体的温度为 $104 < T_e < 6 \times 10^7 \text{ K}$,电子数密度为 $600 < n_e < 7 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$,这些河外射电源周边的环境温度和电子数密度要一般大于 J. Kijak 等人(2017)^[9]利用自由-自由吸收模型估算的脉冲星所处环境的电子数密度和温度。

脉冲星的陡谱一般认为是由于磁球层中的正负电子对的非热辐射产生的。这种辐射谱的特征与超新星遗迹的射电辐射相似。本文所采用的自由-自由吸收模型将借鉴 S. Kameno 等人(2000)^[12]的表达式,其具体形式为

$$S_\nu = S_0 \nu^{-\alpha} e^{-\tau_f \nu^{-2.1}} \quad (1)$$

式(1)中: S_ν 为脉冲星在频率 ν GHz 时的流量密度, S_0 为频率为 1 GHz 时的流量密度, α 为谱指数。对于倒转谱脉冲星来说,峰值两边的谱指数是不同的,这里的谱指数是高频部分的谱指数。 τ_f 为吸收光深系数,该系数主要由吸收介质的电子数密度、温度、大小所决定。

2 高频倒转谱脉冲星统计研究

本文从文献中选取了有确定倒转谱的脉冲星 33 颗, 如表 1 所示。

表 1 GPS 脉冲星及其参数

脉冲星	色散量 /pc cm ⁻³	特征年龄 /kyr	谱指数	峰值频率 /GHz	周期/s	周期导数	参考文献
J0835-4510	67.97	11.30	-2.90	0.56	0.089 00	1.25×10^{-13}	[1]
J1056-6258	321.00	1 870.00	-1.33	0.59	0.422 45	3.58×10^{-15}	[9]
J1302-6350	146.00	332.00	-1.30	1.60	0.047 76	2.28×10^{-15}	[13]
J1644-4559	479.00	359.00	-2.79	0.58	0.455 08	2.01×10^{-14}	[13]
J1803-2137	234.00	15.80	-1.06	0.76	0.133 67	1.34×10^{-13}	[13]
J1825-1446	357.00	195.00	-0.65	0.60	0.279 20	2.27×10^{-14}	[13]
J1826-1334	231.00	21.40	-0.68	0.90	0.101 49	7.52×10^{-14}	[13]
J1830-1059	160.00	107.00	-2.62	0.83	0.405 07	5.99×10^{-14}	[13]
J1550-5418 (磁星)	830.00	1.41	-0.46	3.23	2.069 83	2.32×10^{-11}	[13]
J1622-4950 (磁星)	820.00	5.57	-0.54	3.73	4.327 02	2.78×10^{-12}	[13]
J1702-4128	367.10	55.10	-0.55	0.55	0.182 14	5.23×10^{-14}	[13]
J1705-3950	207.00	83.40	-0.90	1.10	0.318 90	6.06×10^{-14}	[13]
J1718-3825	247.40	89.50	-0.82	1.03	0.074 67	1.32×10^{-14}	[13]
J1723-3659	254.00	401.00	-1.80	0.56	0.202 72	8.03×10^{-15}	[13]
J1739-3023	170.00	0.16	-1.60	0.54	0.114 37	1.14×10^{-14}	[13]
J1741-3016	382.00	3 340.00	-2.20	0.62	1.893 70	8.99×10^{-15}	[13]
J1743-3150	192.00	320.00	-2.90	0.61	2.414 65	1.21×10^{-13}	[13]
J1745-2900 (磁星)	1 778.00	3.40	-1.50	2.50	3.763 73	1.76×10^{-11}	[13]
J1747-2958	101.50	25.50	-0.85	0.73	0.098 81	6.13×10^{-14}	[13]
J1751-3323	297.00	984.00	-1.40	1.00	0.548 23	8.83×10^{-15}	[13]
J1753-2501	672.00	0.59	-1.34	0.62	0.528 33	1.41×10^{-14}	[13]
J1757-2223	239.00	3 750.00	-1.44	0.64	0.185 31	7.82×10^{-16}	[13]
J1757-2421	179.00	0.29	-1.85	0.60	0.234 11	1.30×10^{-14}	[13]
J1806-1154	122.00	5 880.00	-3.40	0.65	0.522 60	1.41×10^{-15}	[13]
J1809-1917 (磁星)	197.10	51.30	-1.00	1.07	0.082 76	2.55×10^{-14}	[13]
J1832-0827	300.00	0.16	-2.19	0.53	0.647 33	6.39×10^{-14}	[13]
J1835-1020	114.00	810.00	-1.80	0.55	0.302 45	5.92×10^{-15}	[13]
J1841-0345	194.00	55.90	-0.78	0.55	0.204 07	5.79×10^{-14}	[13]
J1845-0743	281.00	4 520.00	-1.40	0.65	0.104 69	3.67×10^{-16}	[13]
J1852-0635	171.00	567.00	-0.69	0.90	0.524 16	1.46×10^{-14}	[13]
J1901+0510	429.00	313.00	-1.80	0.52	0.614 76	3.11×10^{-14}	[13]
J1907+0918	358.00	38.00	-2.80	0.59	0.226 11	9.43×10^{-14}	[13]
J2007+2722	127.00	404 000.00	-0.85	0.79	0.024 50	9.61×10^{-19}	[13]

表 1 中第 4 列谱指数和第 5 列峰值频率来源于第 8 列的参考文献; 表 1 中的其他参数来自于 ATNF (Australia Telescope National Facility) 网站^①。表 1 中有 4 颗脉冲星为磁星。样本中的脉冲星都为非毫秒脉冲星。这些脉冲星都有较明显的倒转谱, 其峰值频率在 GHz 附近。除了 B1259-63 是双星系统外, 其他 GPS 脉冲星尚未发现伴星。本文将对这些 GPS 脉冲星的峰值频率、谱指数分布、色散量分布、脉冲星周期与星际介质的关系等来讨论 GPS 脉冲星的统计性质。虽然 J. Kijak 等人 (2021)^[13]将脉冲星 J1740+1000、J1822-1400、J1833-0827 也作为 GPS 脉冲星来看待, 但通过自由-自由吸收模型拟合获得的这 3 颗脉冲星的峰值频率都小于 0.5 GHz, 如此便与 GPS 脉冲星的定义多有不符。另外, 射电谱在几百 MHz 附近发生倒转的脉冲星为数较多, 这些脉冲星都将在后续的文章中被归类为低频倒转谱脉冲星, 以示与 GPS 脉冲星相区别。所以在本文中, 暂不把这 3 颗脉冲星作为 GPS 脉冲星来讨论。表 1 中所给出的脉冲星谱指数和峰值频率可能与其他文献中数据有差异, 这种差异的原因来自于两个方面, 一是可能这些脉冲星的射电辐射本来就随着时间有变化, 这种射电辐射的变化幅度可能在不同波段上也是不同的, 进而导致了当利用射电望远镜对脉冲星进行多波段测量时获得的射电谱形是变化的, 所得到的谱指数和峰值频率自然就不同; 其次, 谱指数和峰值频率的获得需要多个波段的数据, 而且最好低频和高频都需要有足够的数量, 这样在利用模型进行拟合时获得的谱指数和峰值频率才可能更可靠。但在实际研究中, 由于望远镜硬件、观测时间、可利用波段等因素限制了实际可获得的多波段数据, 不同研究者能够获得的多波段数据是不同的, 所以依据不同质量的数据获得的谱参数显然是有差异的。

2.1 高频倒转谱脉冲星峰值频率统计

本文从文献中选取了有确定倒转谱的脉冲星 33 颗, 这些脉冲星的峰值倒转频率都在 0.5 GHz 以上, 峰值频率统计分布如图 2 所示。从图 2 可以看出在 33 颗脉冲星中, 25 颗脉冲星的峰值频率在 0.5~1.0 GHz 间, 占该样本的 75.8%, 这 25 颗脉冲星的平均峰值频率为 0.64 GHz。峰值频率高于 1 GHz 的脉冲星有 8 颗, 其中有 3 颗峰值频率高于 2 GHz。W. Lewandowski 等人 (2015)^[10]研究 J1745-2900 的倒转频率曾经达到 6.3 GHz, 在已发现的高频倒转谱脉冲星里最高。事实上 J1745-2900 的倒转谱峰值频率不是一直不变的, W. Lewandowski 等人 (2015)^[10]研究发现, J1745-2900 在 2013 年 5 月 1 日的倒转谱其峰值频率为 6.3 GHz, 而在 2013 年 5 月 31 日该磁星的倒转谱峰值频率向低频移动, 峰值频率为 3.5 GHz。J1745-2900 是一颗磁星, 位于银河系中心。2013 年 4 月 J1745-2900 在 X 射线波段被观测到有个爆发, 随后全球众多射电望远镜对该磁星进行了观测, 根据 W. Lewandowski 等人 (2015)^[10]的研究, J1745-2900 的射电谱在 2013 年 4 月后呈现出明显的演化特征, 即 J1745-2900 在 2013 年 5 月 1 日的倒转谱其峰值频率为 6.3 GHz, 而在 2013 年 5 月 31 日该磁星的倒转谱峰值频率向低频移动, 峰值频率为 3.5 GHz, T. T. Pennucci (2015)^[14]的研究显示在该磁星暴发 100 天后, 其峰值频率已经移到了 2~2.5 GHz。W. Lewandowski 等人 (2015)^[10]利用自由-自由吸收模型对该磁星的谱的变化进行了研究, 他们认为倒转谱峰值频率的变小是由于磁星爆发后, 其周围的星际介质在快速地膨胀, 相应的电子数密度在降低, 电子数密度的快速降低导致自由-自由吸收光深的减小, 从而导致倒转谱峰值频率向低频移动。

倒转谱峰值频率的变化在脉冲星双星系统 PSR B1259-63/LS2883 中也被发现^[15], PSR B1259-63 围绕伴星 LS2883 进行轨道运动, 当 PSR B1259-63 靠近 LS2883 时, 由于伴星附近星风中电子数密度较高, 所以当 PSR B1259-63 的射电辐射穿过该星际介质时发生了严重的自由-自由吸收, 其倒转谱峰值频率较大, 随着 PSR B1259-63 远离 LS2883, 峰值频率也向低频移动。

表 1 中有 4 颗磁星, 相比其他 GPS 脉冲星, 它们有着更高的峰值频率。脉冲星 J1745-2900、PSR J1550-5418、J1622-4950 的峰值频率甚至超过了 2 GHz, 这 3 个射电磁星所具有的高频倒转谱说明磁星

^①www.antf.csiro.au/people/pulsar/psrcat

周围的星际介质密度都超过了普通倒转谱脉冲星，它们所具有的高 DM (dispersion measure) 值说明了这一点。而且从表中可以看出这 3 个磁星的年龄都比较年轻，似乎表明磁星的早期演化阶段所处的环境具有较高的星际介质密度。另外 J1550-5418 和 J1622-4950 的高频谱也较平，磁星 J1745-2900 在暴发后，其谱也有平化的趋势^[14, 16]。

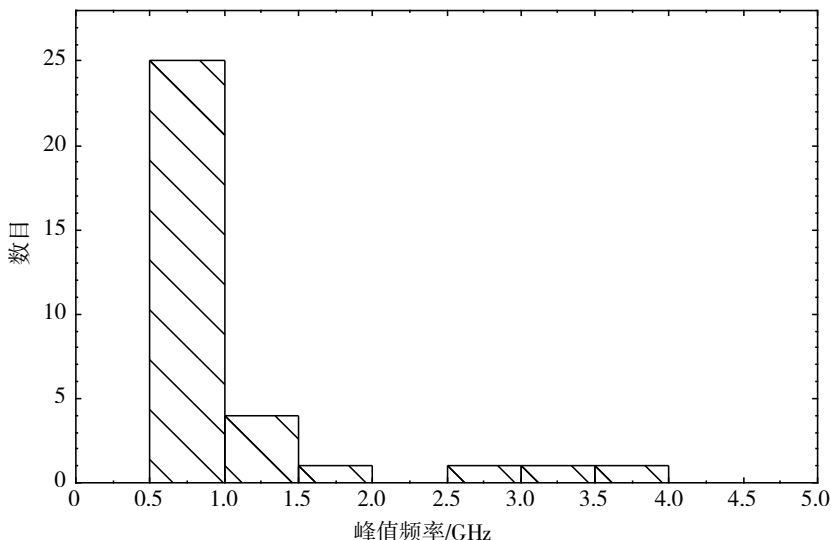


图 2 辐射流量峰值对应频率分布

2.2 谱指数分布

具有高频倒转的脉冲星谱指数分布如图 3 所示。

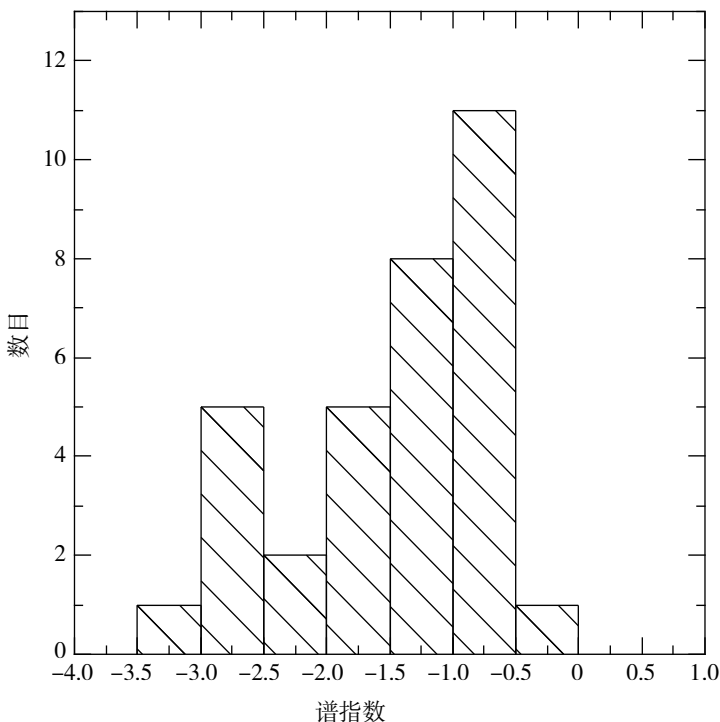


图 3 GPS 脉冲星射电谱指数分布

从图 3 中可以看出，谱指数除了在 $[-1.0, -0.5]$ 之间有个极大分布外，似乎在 $[-3.0, -2.5]$ 之间也有一个集中的分布，这可能表明 GPS 脉冲星里至少由两类脉冲星组成，谱指数在 $[-3.0, -2.5]$ 之间的脉冲星平均峰值频率为 0.64 GHz，谱指数在 $[-1.0, -0.5]$ 之间的脉冲星平均峰值频率为 1.28 GHz，两组脉冲星

平均峰值频率的差异也佐证了该 GPS 脉冲星样本可能包含了两类脉冲星。有 12 颗脉冲星的谱指数大于 -1.0 , 占样本的 36.4%。V. M. Malofeev (1996)^[17]对 284 颗脉冲星的谱指数进行了统计研究, 这些脉冲星的平均谱指数为 -1.71 , F. Jankowski 等人 (2018)^[18]对 441 颗脉冲星谱指数进行了统计研究, 这些脉冲星的平均谱指数为 -1.60 。表 1 中 GPS 脉冲星的平均谱指数为 -1.52 。总体上看, GPS 脉冲星其谱指数是大于其他脉冲星的谱指数。从图 3 可以看出, 有 6 颗脉冲星的谱指数小于 -2.5 , 显然小于大部分脉冲星的谱 -1.6 ^[18]。F. Jankowski 等人 (2018)^[18]在 441 颗脉冲星样本中发现了有 10 颗脉冲星其谱指数小于 -2.5 , 占整个样本的比例为 2.3%。而在表 1 的 GPS 脉冲星中, 谱指数小于 -2.5 的脉冲星占比为 18.2%, 这种差异可能是由于表 1 中的样本具有选择效应, 因为如果假设脉冲星在高频 (比如 10 GHz) 都有相近的辐射强度, 显然谱指数较陡的脉冲星在 1 GHz 附近更容易被探测到; 当然, 也不能排除 GPS 脉冲星中可能存在一类特殊的脉冲星, 其谱指数较陡。C. H. Agar 等人 (2021)^[19]研究了 PSR J0250+5854 的谱, 其谱指数为 -3.5 , 该脉冲星也是现在已知的自转最慢的脉冲星, 可能也是已知谱指数最陡的脉冲星。

样本中有 4 颗磁星, 这些磁星的谱指数平均值为 -0.62 , 磁星的谱指数相比其他脉冲星的平均谱指数, 从谱形上来说就是在高频部分谱会更平, 与之前人们对磁星的谱研究结论一致^[20-22]。J1809-1917 是首颗在射电波段探测到的磁星, 虽然 R. Basu 等人 (2018)^[11]得到 J1809-1917 的高频谱指数为 -1.0 , 但 S. Dai 等人 (2019)^[23]最新的观测表明该脉冲星的谱指数为 0.3, 他们的观测正好处于 J1809-1917 的射电暴发阶段, 而之前 R. Basu 等人 (2018)^[11]所利用的观测数据都是在它的射电宁静状态。从 S. Dai 等人 (2019)^[23]的观测谱也可以看出, 在磁星的暴发阶段, 它的倒转谱峰值频率大于 4 GHz, 比在射电宁静状态要高。磁星 J1745-2900 的高频倒转谱特性也会随着时间发生演化^[10]。磁星 J1745-2900 在 2013 年 4 月被钱德拉 X 射线望远镜观测到了暴发, T. T. Pennucci 等人 (2015)^[14]利用 Green Bank 望远镜对其进行了跨度 100 天 (从 2013 年 5 月 4 日到 2013 年 8 月 12 日) 的多波段观测, 在此观测时间段内该磁星的平均谱指数为 -1.4 , 与普通脉冲星的谱指数没有太大差别。但 P. Torne 等人 (2015)^[16]对 J1745-2900 在 2014 年 7 月至 2014 年 8 月的观测中, 测得该磁星的谱指数为 -0.4 。A. Suresh 等人 (2021)^[24]给出了磁星 J1745-2900 从 2013 年至 2020 年在 6.4 GHz 上的流量密度变化, 在 2014 年至 2015 年间该磁星有一个很强的暴发, 再根据 P. Torne 等人 (2015)^[16]所测的谱指数, 表明磁星在辐射较强时其谱较平, 谱指数的变化反映了磁星辐射区电子数密度能谱分布变化。

J1622-4950 是首颗被发现有射电辐射的磁星^[25]。J. Kijak 等人 (2017)^[9]根据之前发表的数据, 通过自由-自由吸收模型拟合获得谱指数为 -0.54 , 但 Chu Cheyen 等人 (2021)^[25]于 2017 年 6 月在 5.5~45 GHz 上开展了多波段观测, 测得其谱指数为 -1.3 , 他们的测量正好处在该磁星的暴发过程 (见参文[25]的图 4)。通过对磁星 J1745-2900 和 J1622-4950 在暴发后不久或正在暴发过程中的谱指数测量, 可以发现此时它们的谱指数都是 -1.4 左右, 而当该磁星处于不活跃状态时, 其谱指数相对较平。

J. Kijak 等人 (2017)^[9]利用之前发表的谱数据, 获得 J1550-5418 的谱指数为 -0.46 , 而 Chu Cheyen 等人 (2021)^[25]的最新观测结果显示, 该磁星在 2017 年 8 月, 其在 43~100 GHz 谱指数为 0.4, 可以推测在更高频段该磁星的谱可能会出现一个峰值。与 J1550-5418 类似, J1745-2900 除了在 GHz 附近有个峰值, 在 200 GHz 附近可能还有个峰值, 这种更高频的谱峰很难用自由-自由吸收模型来解释, 因为自由-自由吸收一般发生在低频。这种双峰谱很可能是由于不同的机制引起的, 低频的峰很可能是由于自由-自由吸收引起, 100~200 GHz 波段处于脉冲星的相干辐射向非相干辐射过渡的频段内^[26], 本文认为当非相干辐射增强时, 脉冲星的射电谱就会在 100 GHz 以上显示出峰。

2.3 色散量分布

当脉冲星射电辐射穿过星际介质时, 由于自由电子对电磁波的色散, 从而引起接收到的不同频率的

电磁波有时间延迟。根据 J. M. Cordes (1978)^[27] 的研究，色散量与脉冲星离观测者的距离成正比，与射电波传播路径上的电子数密度成正比。根据 J. Kijak 等人 (2011)^[7] 和 J. Kijak 等人 (2017)^[9] 的研究，高频倒转谱的形成原因很可能是由于星际介质对脉冲星射电辐射的自由-自由吸收引起的，这类脉冲星附近或其辐射所经过的星际介质一般具有较高的电子数密度，所以人们推测高频倒转谱脉冲星其辐射经过的介质所引起的色散也较大。本文给出了这些脉冲星的色散量分布，如图 4 所示。从图 4 中可以看出，有 13 颗脉冲星其色散量小于 200 pc cm⁻³，其他 20 颗脉冲星的色散都大于 200 pc cm⁻³，占整个 GPS 脉冲星样本的 60.6%。这 20 颗脉冲星的色散平均值 454 pc cm⁻³，有着较大的色散量。磁星 J1745-2900 色散量更高，说明对该磁星进行色散测量时其周围星际介质浓度较高。作为对比，本文也对澳大利亚 ATNF 脉冲星星表中的 3197 颗脉冲星色散量进行了统计，其色散量大于 200 pc cm⁻³ 的脉冲星比例为 38.3%，大幅低于 GPS 脉冲星的相应比例。而且整个 ATNF 星表中，脉冲星的平均色散量为 208 pc cm⁻³，也低于 GPS 脉冲星的平均色散量 334 pc cm⁻³。但是必须注意，ATNF 所收录的脉冲星具有选择效应，即各类脉冲星的搜寻项目中，色散量小的脉冲星更容易被发现，也相对较多。

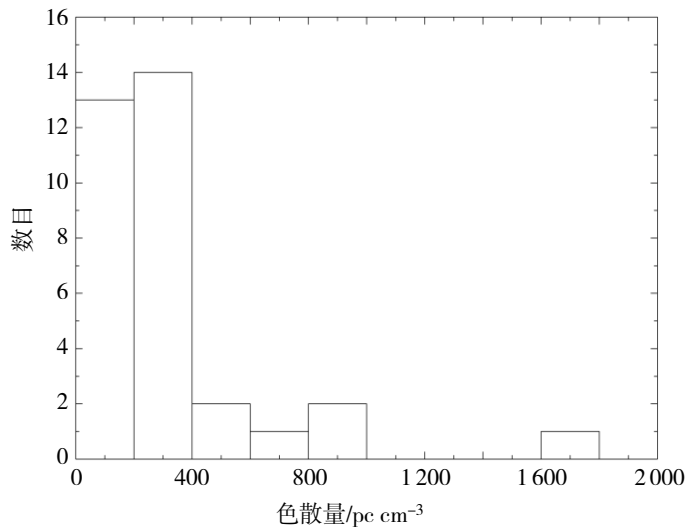


图 4 色散量分布

本文还统计了这些脉冲星的周期与 DM 的相关性。通过拟合，GPS 脉冲星的周期与其色散量的皮尔森相关系数 (Pearson correlation) 为 0.66，如图 5 所示。

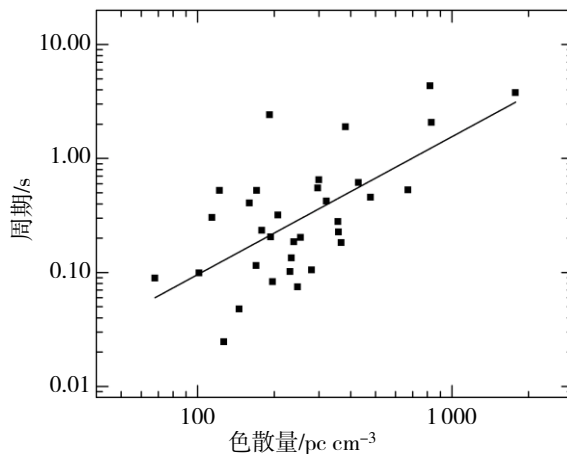


图 5 色散量与周期相关性

皮尔森相关系数反映了两个量的相关度，其值变化范围在-1~1 之间。当相关系数为 1 时，表示两个量具有完全的线性正相关，当相关系数为-1 时，表示两个量具有完全的线性负相关。GPS 脉冲星的

周期与其色散量的皮尔森相关系数为 0.66, 表明该类脉冲星的周期与色散量有较强的相关性。从图 5 可以看出当色散量增加时, 脉冲星的周期也增加。这种相关性与 GPS 脉冲星的倒转谱形成机制具有一致性。具有倒转谱的脉冲星一般具有较大的色散量, 其色散量的大部分可能是由脉冲星周围的星际介质贡献的。脉冲星周围较高的星际介质密度对脉冲星的射电辐射有较高的自由-自由吸收, 从而导致了射电谱的倒转。脉冲星周围较高的星际介质密度也对脉冲星的自转形成了阻力, DM 越大, 星际介质的阻力也越大, 从而脉冲星的自转周期越大。图 5 中, 有些脉冲星对这种相关性偏离较大, 如 J1743-3150、J2007+2722、J1622-4950。这种偏离部分原因可能是由于脉冲星的色散量有变化性。

3 讨论

目前为止共发现了 33 颗 GPS 脉冲星, 但很显然 GPS 脉冲星的数目与其定义有较大关系。本文把倒转频率高于 0.5 GHz 的倒转谱脉冲星作为 GPS 脉冲星, 这种规定显然是人为的规定。如果把倒转频率的要求放低, 将会有更多的 GPS 脉冲星。已有不少研究者发现了这种低频倒转谱脉冲星, 如 W. Sieber (1973)^[1]、T. Murphy 等人 (2017)^[28]、K. Stovall 等人 (2015)^[29]。低频倒转谱脉冲星的统计性质是否具有与 GPS 脉冲星相同的性质需要进一步的观测和研究。

由于技术的限制, 国际上很少有射电望远镜能够单独从低频到高频同时完成脉冲星的多波段观测。脉冲星的射电多波段观测数据一般是由不同望远镜在不同观测历元上获得的。由于脉冲星存在光变现象, 根据不同历元上的多波段数据获得的脉冲星谱参数一般来说是不同的。为了减少由于射电光变带来的谱变化, 需要对脉冲星在各个波段进行多次观测, 来获得一个平均的谱。但多次观测往往需要较多的望远镜观测时间, 在实际研究中很难充分保证。表 1 中的样本, 只有部分脉冲星在 325 MHz 和 610 MHz 上进行了两次观测^[13]。所以表 1 中的谱指数和峰值频率数据还是存在较大的波动范围, 这些因素都会对本文统计结果有较大的影响。

自由-自由吸收被认为是 GPS 脉冲星的射电倒转谱的主要形成机制, 但其他机制并不能完全排除。比如, V. A. Izvekova 等人 (1981)^[30]利用同步自吸收模型对脉冲星的射电谱进行了拟合。另外, 对其他射电源的倒转谱形成机制研究表明, 同步自吸收是倒转谱形成的一个重要机制。比如 Cai Hongbing 等人 (2007)^[31]对河外射电源 3C66A 的核进行了多频段观测分析, 发现 3C66A 的核在 5 GHz 附近, 其谱有显著的倒转, 可能是由于同步自吸收所引起。他们还发现 3C66A 的核位置在不同的观测频率上有显著偏移 (offset), 这种不同观测频率下的位置偏移只有同步自吸收能够解释。由于脉冲星是致密天体, 只是利用一般的 VLBI 技术对脉冲星进行成图观测很难观测到类似于河外射电源的位置偏移, 但可以通过 VLBI 相位参考技术来观测这种位置偏移。如果 VLBI 的相位参考技术能够观测到脉冲星的位置偏移, 那将是脉冲星内部存在同步自吸收的一个强有力证据。B. Marcote 等人 (2015)^[32]利用同步自吸收加拉金效应 (Razin effect) 模型对伽马射线双星 LS 5039 的倒转谱进行了拟合, 他们认为同步自吸收加拉金效应模型也可以用来解释脉冲星的倒转谱。

作为一类特殊的脉冲星, S. D. Bates 等人 (2013)^[33]估计 GPS 脉冲星可能占整个脉冲星的 10%, 但现在发现的 GPS 脉冲星大概只占全部脉冲星的 1%。这种原因一部分可能是由于人们能够利用的测量数据比较少。比如, 人们在对脉冲星的谱统计研究时发现, 有一类脉冲星的谱有转折 (break) 或者截断 (cut-off)^[3, 18], 这一类脉冲星的谱可能本来也是倒转谱脉冲星, 只是由于测量的频段覆盖范围不够宽, 特别是缺少较低的频率区数据, 从而表现出这类谱具有转折或截断现象, 这一类脉冲星现在还没有把它们归类为 GPS 脉冲星。还有一种原因是脉冲星的谱指数测量误差比较大, 许多脉冲星的谱数据并不是同时观测获得, 有的甚至不是同一个望远镜测得, 通过这些数据获得的谱指数和峰值倒转频率自然有较

大的误差。

GPS 倒转谱脉冲星的年龄普遍比较年轻, 其中有 27 颗脉冲星的年龄小于 10^6 年, 特别是其中的 4 个磁星, 它们的平均年龄只有 3.49 ky。J2007+2722 的年龄为 404 000 ky, 估计其处于死亡前期, 其辐射变化比较大, 周围的星际介质引起的色散量也比较大。从表 1 中的 DM、峰值频率可以看出, 磁星 J1809-1917 与其他 3 颗磁星所处的星际介质环境不同。J1809-1917 的 DM 值比其他 3 颗脉冲星要低 4 倍以上, 峰值频率也要低 2 倍以上, J1809-1917 的特征年龄也比其他 3 颗磁性要年老。这些信息表明 J1809-1917 所处的环境中的星际介质密度要远远低于其他 3 颗磁星, 这个可能是其长期演化的结果。本文还对这些脉冲星的峰值倒转频率与色散量的相关性进行了分析(如图 6 所示), 二者相关系数为 0.48, 说明它们有一定的相关性。结合色散量与 GPS 脉冲星的周期相关性, 进一步说明星际介质是影响 GPS 脉冲星演化的一个关键因素。通过利用澳大利亚 ATNF 的脉冲星星表, 分析了所有脉冲星的色散量与周期的相关关系, 并没有发现这些脉冲星的色散量和周期有明显的相关性。对于毫秒脉冲星, 也没有发现这种相关性。这说明自转周期与色散量的显著相关性是 GPS 脉冲星的一个重要特征。

本文还分析了这些脉冲星的峰值倒转频率与它们的年龄之间的相关性, 在不考虑 3 个倒转频率偏大的脉冲星 (J1550-5418、J1745-2900、J1622-4950) 情况下它们之间的相关性较弱, 相关系数只有 0.18。说明脉冲星的年龄并不是影响脉冲星倒转频率的主要因素。

GPS 脉冲星的统计研究对脉冲星的计时观测研究也有一定的帮助。如需对倒转谱脉冲星进行计时观测, 最好选择在峰值频率附近进行观测, 这样获得的计时数据有较高的信噪比, 有助于提高计时精度。在高精度的脉冲星计时研究中, 往往需要精确的 DM 测量。由于 DM 反映了脉冲星辐射传播路径上的星际介质密度, 所以星际介质密度的变化会带来 DM 的变化, 从而引起脉冲星计时有较大的残差。在脉冲星计时研究中, 往往会采取先验的 DM 值, 而实际上 DM 变化会带来计时的误差。例如, O. Koralewska 等人^[34]发现脉冲星 B1259-63 在绕伴星时 DM 有 15 pc cm^{-3} 的变化, 在 1.4 GHz 上观测就会引入 31 ns 的计时残差。所以, 在脉冲星计时研究时可以先考察一下脉冲星的射电谱是否有显著的变化, 特别是如果出现了倒转谱, 就应当调整采用的先验 DM 值, 或者直接把 DM 也作为一个解算量, 从而避免引起较大的计时残差。

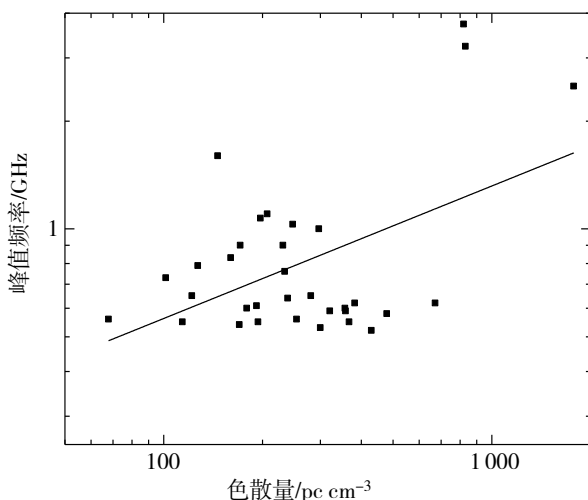


图 6 色散量与峰值频率的相关性

4 结论

GPS 脉冲星是一类特殊脉冲星, 它的射电谱在 GHz 附近有倒转, 这种射电谱的倒转在其他射电源

里也被观测到。目前的研究表明,脉冲星的倒转谱可能是由于自由-自由吸收引起的,但是也不能排除可能有其他的辐射机制调节,如同步自吸收。本文对所有已发现的33颗GPS脉冲星进行了统计研究,分析了这些脉冲星的倒转频率统计分布,发现大部分GPS脉冲星的倒转频率在0.5~1.0 GHz之间。GPS脉冲星的谱指数分布较广,统计表明该类脉冲星谱指数有两个极大分布,谱指数除了在[-1.0, -0.5]之间有个极大分布外,似乎在[-3.0, -2.5]之间也有一个集中的分布,这可能表明GPS脉冲星里至少有两类不同的脉冲星。这些脉冲星的DM值普遍较大,它们平均DM值为 334 pc cm^{-3} ,较大的DM值佐证了它们的倒转谱可能是由于星际介质的吸收引起的。本文还发现GPS脉冲星的DM值与它们的自转周期有较强的正相关性,这种相关性说明星际介质对GPS脉冲星的自转周期有较强的影响。本文也尝试利用ATNF的数据对所有已知脉冲星的DM和自转周期就行了统计分析,并没有发现有较强的相关性。对于其他类型的脉冲星是否也具有DM与自转周期的强相关性需要进一步的研究,下一阶段还将对其他射电特殊谱如折断谱(break或cut-off)、低频倒转谱开展统计研究,分析这些具有射电特殊谱的脉冲星与GPS脉冲星的异同。

参考文献:

- [1] SIEBER W. Pulsar Spectra[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 1973, 28: 237-252.
- [2] KORIBALSKI B, JOHNSTON S, WEISBERG J M, et al. HI line measurements of eight southern pulsars[J]. *The Astrophysical Journal*, 1995, 441: 756-764.
- [3] MARON O, KIJAK J, KRAMER M, et al. Pulsar spectra of radio emission[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2000, 147: 195-203.
- [4] KIJAK J, MARON O. High-frequency turnover in pulsar spectra[C]// *IAU Symposium, Sydney*, 2004, 218: 339-340
- [5] KIJAK J, GUPTA Y, KRZESZOWSKI K. Turn-over in pulsar spectra around 1 GHz[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2007, 462(2): 699-702.
- [6] KIJAK J, LEWANDOWSKI W, MARON O, et al. Pulsars with gigahertz-peaked spectra[J]. *Astrophysics & Glaxies*, 2011, 531(A16): 1-9.
- [7] KIJAK J, DEMBSKA M, LEWANDOWSKI W, et al. Spectrum evolution in binary pulsar B1259-63/LS 2883 Be star and gigahertz-peaked spectra[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, 418(1): L114-L118.
- [8] KIJAK J, LEWANDOWSKI W, ROZKO K. Analysis and discussion of a sample of 25 gigahertz-peaked spectra pulsars[J]. *International Astronomical Union*, 2018, 337: 352-353.
- [9] KIJAK J, BASU R, LEWANDOWSKI W, et al. Gigahertz-peaked spectra pulsars and thermal absorption model[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, 840(2): 108-120.
- [10] LEWANDOWSKI W, ROZKO K, KIJAK J, et al. Thermal absorption as the cause of gigahertz-peaked spectra in pulsars and magnetars[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 808(1): 18-26.
- [11] BASU R, ROZKO K, LEWANDOWSKI W, et al. Time variation in the low-frequency spectrum of Vela-like pulsar B1800-21[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 458(3): 2509-2515.
- [12] KAMENO S, HORIUCHI S, SHEN Z Q, et al. Asymmetric free-free absorption towards a double lobe of OQ 208[J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2000, 52: 209-216.
- [13] KIJAK J, BASU R, LEWANDOWSKI W, et al. Low-frequency flux density measurements and pulsars with GHz-peaked spectra[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 923(2): 211-221.
- [14] PENNUCCI T T, POSSENTI A, ESPOSITO P, et al. Simultaneous multi-band radio and X-ray observations of the galactic center magnetar SGR 1745-2900[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 808(1): 81-95.

- [15] DEMBSKA M, KIJAK J, LEWANDOWSKI W. Binary pulsar B1259-63 spectrum evolution and classification of pulsar spectra[C]// *Astronomical Society of the Pacific*, Zielona Góra, 2012, 466: 75-78.
- [16] TORNE P, EATOUGH R P, KARUPPUSAMY R, et al. Simultaneous multifrequency radio observations of the galactic centre magnetar SGR J1745-2900[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, 451: L50-L54.
- [17] MALOFEEV V M. Pulsar radio spectra[C]// *International Astronomical Union Colloquium*, Sydney, 1996, 105: 271-277.
- [18] JANKOWSKI F, VAN STRATEN W, KEANE E F, et al. Spectral properties of 441 radio pulsars[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 473(4): 4436-4458.
- [19] AGAR C H, WELTEVREDE P, BONDONNEAU L, et al. A broad-band radio study of PSR J0250+5854: the slowest spinning radio pulsar known[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, 508(1): 1102-1114.
- [20] CAMILO F, REYNOLDS J, JOHNSTON S, et al. The magnetar 1E 1547.0-5408: radio spectrum, polarimetry, and timing[J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, 679(1): 681-686.
- [21] LEVIN L, BAILES M, BATES S, et al. A radio-loud magnetar in X-ray quiescence[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2010, 721(1): L33-L37.
- [22] KEITH M J, JOHNSTON S, LEVIN L, et al. 17- and 24-GHz observations of southern pulsars[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, 416(1): 346-354.
- [23] DAI S, LOWER M E, BAILES M, et al. Wideband polarized radio emission from the newly revived magnetar XTE J1810-197[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, 874(2): L14-L19.
- [24] SURESH A, CORDES J M, CHATTERJEE S, et al. 4~8 GHz Spectrotemporal emission from the galactic center magnetar PSR J1745-2900[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 921(2): 101-112.
- [25] CHU C Y, NG C Y, KONG A K H, et al. High-frequency radio observations of two magnetars, PSR J1622-4950 and 1E 1547.0-5408[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, 503(1): 1214-1220.
- [26] MICHEL F C. Theory of pulsar magnetospheres[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1982, 54(1): 1-66.
- [27] CORDES J M. Observational limits on the location of pulsar emission regions[J]. *The Astrophysical Journal*, 1978, 222: 1006-1011.
- [28] MURPHY T, KAPLAN D L, BELL M E, et al. Low-frequency spectral energy distributions of radio pulsars detected with the Murchison Widefield Array[J]. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 2017, 34: 20-36.
- [29] 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[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 8089(2):156-174.
- [30] IZVEKOVA V A, KUZMIN A D, MALOFEEV V M, et al. Radio spectra of pulsars- Part One- observations of flux densities at meter wavelengths and analysis of the spectra[J]. *Astrophysics and Space Science*, 1981, 78(1): 45-72.
- [31] CAI H B, SHEN Z Q, SUDOU H, et al. Multi-epoch VLBA observations of 3C 66A[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2007, 468(3): 963-971.
- [32] MARCOTE B, RIBO M, PAREDES J M, et al. Physical properties of the gamma-ray binary LS 5039 through low- and high-frequency radio observations[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, 451(1): 59-73.
- [33] BATES S D, LORIMER D R, VERBIEST J P W. The pulsar spectral index distribution[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, 431(2): 1352-1358.
- [34] KORALEWSKA O, KIJAK J, LEWANDOWSKI W. Modelling the thermal absorption and radio spectra of the binary pulsar B1259-63[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2018, 363(7): 141-152.