

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2018.02.05

FAST 19 波束脉冲星漂移扫描巡天模拟

刘 鹏^{1,2}, 王 培², 李 蔚^{2,3}, 张 洁¹,
张 蕾², 张承民², 朱炜炜², 岳友岭², 代 实⁴

(1. 西华师范大学 物理与空间科学学院, 南充 637009; 2. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 3. 中国科学院 FAST 重点实验室, 北京 100012; 4. CSIRO Astronomy and Space Science, Australia Telescope National Facility, Box 76 Epping NSW 1710, Australia)

摘要: 脉冲星搜索是 500 m 口径球面射电望远镜 (Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope, FAST) 的主要科学目标之一。针对 FAST 设备性能, 模拟 FAST 脉冲星巡天, 优化巡天方案, 对即将开展的 FAST 脉冲星巡天项目具有重要的实用价值。基于 Parkes 多波束巡天、Parkes 中纬度巡天和 Parkes 高纬度巡天的结果, 利用脉冲星分布模拟软件包 PsrPopPy, 模拟得到了银河系中正常脉冲星和毫秒脉冲星的空间分布样本, 并根据 FAST 设备参数进行了虚拟观测。结果表明, 使用 FAST 19 波束接收机漂移扫描观测模式, 在中心频率为 1 250 MHz, 带宽为 400 MHz, 每波束扫描时间为 13.5 s, 有效积分时间为 6.0 s 的情况下, 在赤纬为 $-14^{\circ}12' \sim 65^{\circ}48'$ 天区内, 可发现 1 600 颗正常脉冲星和 238 颗毫秒脉冲星。为获得银河系中脉冲星自旋演化的样本, 使用 evolve 代码进行了再次模拟。设置相同的观测参数的情况下, 在全天范围内模拟探测到孤立正常脉冲星 1 749 颗, 并得到其在 $P-\dot{P}$ 图上的分布。

关键词: FAST; 脉冲星; 脉冲星模拟; 脉冲星巡天模拟

中图分类号: P145.2 **文献标识码:** A

1 引 言

目前, 在银河系中已知的射电脉冲星有 2 636 颗^[1, 2]。脉冲星搜寻主要依靠射电望远镜的巡天观测。目前国际上大型望远镜都进行过脉冲星搜索巡天研究, 如美国 305 m 射电望远镜 Arecibo^[3]、德国 Effelsberg 100 m 射电望远镜^[4]、澳大利亚 64 m 射电望远镜 Parkes^[5] 等, 其中 Parkes 的巡天工作尤为突出。Parkes 多波束脉冲星巡天 (Parkes Multibeam Pulsar Survey, PMPS)^[5-11] 已探测到脉冲星 1 122 颗, 其中正常脉冲星 1 109 颗, 新发现脉冲星 834 颗^[2]。Parkes 高纬度脉冲星巡天 (Parkes High-latitude Multibeam Pulsar Survey, PHMPS)^[12] 探测

收稿日期: 2017-10-12; 修回日期: 2017-12-07

资助项目: 国家自然科学基金 (11273020); 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类)(XDB09000000, XDB23000000)

通讯作者: 张洁, zhangjie_mail@cqu.edu.cn

到脉冲星 41 颗, 其中正常脉冲星 34 颗, 新发现脉冲星 18 颗^[2]。Parkes 中纬度脉冲星巡天 (Parkes Swinburne Multibeam Pulsar Survey, PSMPs)^[13] 探测到脉冲星 244 颗, 其中正常脉冲星 221 颗, 新发现脉冲星 109 颗^[2]。三个巡天总计探测到脉冲星 1 407 颗, 其中正常脉冲星 1 364 颗^[2], 占已发现脉冲星总数的 53.4%。

在完成设备调试并进入正式科学运行时, FAST 将成为世界上口径最大、灵敏度最高的单口径射电望远镜^[14], 并将在 10 ~ 20 年内处于国际领先地位^[15]。FAST 的主要技术指标如下: 观测频率为 70 MHz ~ 3 GHz (未来可升级到 8 GHz), 接收机波束数为 19 (未来焦平面阵列大于 100), 灵敏度 (L 波段) 为 $18 \text{ K} \cdot \text{Jy}^{-1}$, 系统温度为 $T_{\text{sys}} \approx 50 \text{ K}$, 天空覆盖范围为赤纬 $-14^{\circ}12' \leq \delta \leq 65^{\circ}48'$ ^[16, 17]。与 Arecibo 相比, FAST 拥有更高的测量精度和更大的天区覆盖面, 综合灵敏度高 10 倍^[18], 在探测毫秒脉冲星、脉冲双星、双脉冲星和银河系外的脉冲星等方面更具优势^[19]。最让人惊喜的是, FAST 具有发现脉冲星黑洞体系的科学潜力, 这将有助于了解黑洞的精确信息^[17]。

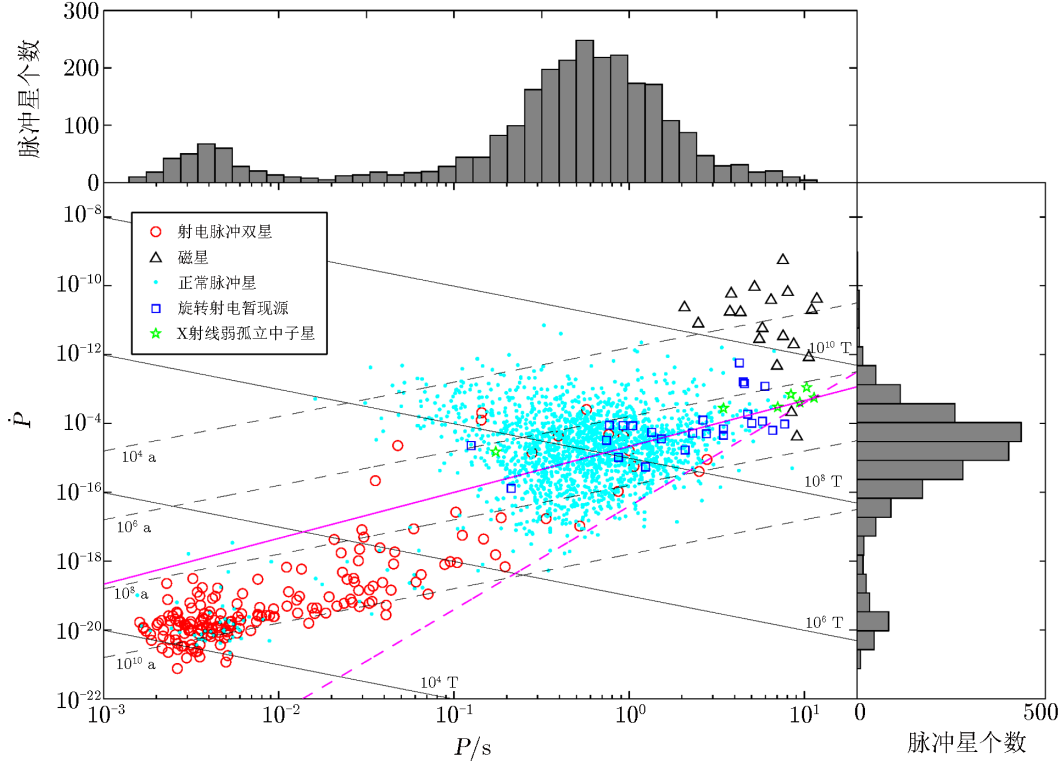
Smits 等人^[20]在 2009 年对当时正在建设的 FAST 进行了两项脉冲星巡天模拟。他们首先在银道面上搜索, 在观测频率为 1 315 MHz, 带宽为 400 MHz, 积分时间为 600 s 的条件下, 使用 19 波束接收机, 在银经 $20^{\circ} < l < 90^{\circ}$, 银纬 $|b| < 5^{\circ}$ 范围内搜索。他们每天观测 8 h, 观测时间超过 200 d, 在银道面发现未知的正常脉冲星 4 760 颗, 毫秒脉冲星 460 颗。使用 100 波束的相控阵馈源, 他们搜寻到未知正常脉冲星 4 200 颗, 毫秒脉冲星 380 颗。此外, 他们也对 M31 和 M33 进行了模拟搜索, 用 19 波束接收器每天观测 6 h, 共观测 80 d (总观测时间为 470 h)。当时他们预计可探测到 50~100 颗银河系外脉冲星^[20]。Yue 等人^[21]在 2013 年使用 7 波束接收机, 在观测频率为 400 MHz, 观测时间为 40 s 的情况下, 在银道面上进行漂移扫描模拟。当时他们预计可探测到 1 500 颗未知脉冲星, 其中包括 200 颗毫秒脉冲星。

本文第 2 章主要对银河系中脉冲星分布做一个简单介绍。第 3 章将介绍模拟银河系中脉冲星分布的软件包 PsrPopPy, 并运用蒙特卡罗方法得到脉冲星在银河系中的空间分布模拟样本, 以及银河系中正常脉冲星的自旋演化模拟样本。第 4 章将在得到的银河系中脉冲星分布样本的基础上, 使用 FAST 对其进行虚拟观测, 获得 FAST 巡天样本。第 5 章将对全文进行总结。

2 脉冲星

脉冲星是高速旋转的具有强磁场的中子星^[22, 23]。一般认为, 质量为 8 ~ 25 个太阳质量的恒星, 在其演化末期——超新星爆发后将形成脉冲星。它依靠中子简并压来平衡自身引力。自 1967 年 J. Bell 和 A. Hewish 发现第一颗脉冲星 PSR B1919+21 以来^[24], 关于脉冲星的理论及观测研究形成一股热潮, 以发现更多脉冲星为目的的脉冲星巡天项目也不断开展。目前已知射电脉冲星有 2 613 颗^[2], 它们的自行速度通常为每秒几百千米^[25-27], 主要分布在银道面 100 pc 的厚度内^[28], 其中自旋周期最长的脉冲星是 PSR J2144-3933, 其周期为 8.51 s ^[29]; 最短的是 PSR J1748-2446ad, 其周期为 1.396 ms ^[30]。

脉冲星有两个重要的自转参数——自转周期 P 和自转周期的导数 \dot{P} , 它们对脉冲星物理性质的估计有重要的作用。以 P 为横坐标, \dot{P} 为纵坐标构成了最重要的脉冲星分布图 (见图 1)。脉冲星在分布图上的位置反映脉冲星演化所处的阶段和类别。



注: 灰色实线为恒定特征表面磁场 (式 (1)), 灰色虚线为恒定的特征年龄 (式 (2)), 洋红色实线为自转加速线, 洋红色虚线为死亡线。上方直方图横坐标为周期, 纵坐标为相应周期范围内的脉冲星个数。右边直方图纵坐标为周期变化率, 横坐标为相应周期变化率内的脉冲星个数。

图 1 银河系脉冲星 P - \dot{P} 图

根据磁偶极模型^[31], 假定脉冲星所损失的自转能全部转变为磁偶极辐射, 也就是说, 假定磁偶极辐射功率等于自转能损率。取中子星的质量 $M = M_{\odot}$ (M_{\odot} 为太阳质量), 我们就可以确定脉冲星的特征表面磁场^[32]:

$$B = \left(\frac{3c^3 I}{8\pi^2 R^6} \right)^{1/2} \sqrt{P\dot{P}} = 3.29 \times 10^{15} \sqrt{P\dot{P}}, \quad (1)$$

其中, c 为光速; R 是中子星的半径, 通常取 10 km; I 是脉冲星的转动惯量, 一般为 $I = (2/5)MR^2 = 10^{45} \text{ g}\cdot\text{cm}^2$ 。

通过对脉冲星 P 和 \dot{P} 的测量可估计脉冲星的年龄。从脉冲星诞生时的自转周期 P_0 变到现在的自转周期所需要的时间定义为特征年龄 T , 其表达式为^[33]:

$$T = \frac{P}{(n-1)\dot{P}} \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{n-1} \right] \approx \frac{P}{2\dot{P}}, \quad (2)$$

其中, n 为制动指数, 在磁偶极模型中 $n = 3$ 。假定脉冲星诞生时自转特别快, 则其自转周期 P_0 非常小, 远小于现在的自转周期, 甚至几乎为 0 (虽然这个假设并不总是正确, 特别是对于年轻脉冲星来说)^[34]。由于制动指数的问题还没有解决, 所以脉冲星年龄估计仍然是一个问题。除了用脉冲星的自转周期变化估算特征年龄外, 还可以用脉冲星的自行速度估算其运动年龄, 以及用磁衰减模型估计其磁衰减年龄。

我们采用传统的 $P-\dot{P}$ 图的方法来分析脉冲星 (见图 1)。从图上可以看出, 柱形图分别有两个波峰, 分别对应 $P-\dot{P}$ 图上的正常脉冲星群和双星脉冲星群 (也可称之为毫秒脉冲星群)。正常脉冲星群自转周期的峰值在 500 ms 左右, 其典型的磁场强度 $B \approx 10^7$ T, 特征年龄 $T \approx 10^7$ a^[33]。双星脉冲星群自转周期峰值在 5 ms 左右。图中右下角没有任何脉冲星分布的区域被称为脉冲星“死亡谷”^[35]。

3 模拟银河系中脉冲星

银河系中脉冲星大约有 1.2×10^5 颗^[28]。现已观测到脉冲星 2 636 颗, 约占其总数的 2.3%。脉冲星巡天是指射电望远镜在一定灵敏度和天区覆盖条件下, 通过观测发现更多的脉冲星。在众多的巡天项目中, PMPS 是目前最成功的巡天, 至今已探测到 1 122 颗脉冲星, 其中正常脉冲星 1 109 颗, 新发现脉冲星 834 颗^[2]。根据统计巡天得到的脉冲星样本建立参数模型, 并通过蒙特卡罗法, 可以模拟出银河系中脉冲星的分布。通过设置望远镜参数对该模拟样本进行虚拟观测, 可达到模拟巡天的目的^[37]。

2006 年 Lorimer 等人^[11]使用当时最成功的巡天结果, 即 PMPS 和 PSMPs 获得的 1 008 颗正常脉冲星数据集, 提出了银河系中脉冲星光度 L 、自转周期 P 、距银道面的距离 Z 以及距银心的距离 r 的概率密度函数, 并采用蒙特卡罗方法, 模拟得到了银河系中脉冲星的分布样本。他们基于此方法, 且不考虑脉冲星随时间的演化, 开发了模拟银河系中可观测脉冲星分布的软件包 PsrPop^[38]。

2014 年 Bates 等人^[39]基于 Lorimer 等人 2006 年开发的 PsrPop 软件包, 重新开发了银河系脉冲星分布模拟软件包 PsrPopPy^[40]。他们在该软件包中增加了脉冲星分布随时间的演化, 并通过 Ridley 和 Lorimer^[41]于 2010 年开发的 evolve 代码, 获得了模拟孤立射电脉冲星样本的周期变化率。此外, 该软件包还可以根据不同需要, 选择使用相应的分布模型, 因此, 其模拟样本比用 PsrPop 软件包得到的样本更加真实可靠。本文通过 PsrPopPy 软件包模拟得到的脉冲星样本, 其每一颗脉冲星的辐射束都要扫过地球^[20]。基于假定的概率密度函数, 每颗脉冲星都会产生相应的 P , L , R 和 Z 的值。我们应用 Faucher-Giguère 和 Kaspi^[28]提出的对数正态分布计算了光度 L 。此模型的优势是不需要像幂律光度模型那样的一个特定的 L 的下限^[11]。对于 P , R 和 Z 分布, 我们使用 Lorimer 等人^[11]的 C' 模型获取。

通过磁轴与视线间夹角 β 、自转轴与磁轴间夹角 χ 及其与固有脉冲宽度 W 之间的关系,

可计算固有脉冲宽度^[20]。脉冲星圆锥辐射束角半径 ρ 与自旋周期 P 之间的经验关系为^[43]:

$$\rho = \begin{cases} 5.4^\circ P^{-1/2} & , P > 30 \text{ ms} \\ 31.2^\circ & , P \leq 30 \text{ ms} \end{cases} . \quad (3)$$

其中 P 在 $-0.15 \sim 0.15$ 内随机分布。对这种关系的散射模型^[44], 通过蒙特卡罗方法可找到光束角半径:

$$\lg \rho = \lg \rho_{\text{init}} + P , \quad (4)$$

其中 ρ_{init} 为初始光束角半径。 β 均匀随机分布在 $-\rho \leq \beta \leq \rho$ 范围。 χ 可通过计算获得:

$$\chi = \arccos q , \quad (5)$$

其中 q 是随机数, 均匀分布在 $0 < q < 1$ 范围。由 χ, β 和 ρ 可得到固有脉冲宽度 W :

$$\sin^2 \left(\frac{W}{4} \right) = \frac{\sin^2(\frac{\rho}{2}) - \sin^2(\frac{\beta}{2})}{\sin \chi \sin(\chi + \beta)} . \quad (6)$$

我们使用电子密度模型 NE2001^[46] 计算色散 DM 和散射展宽对每一个脉冲的影响。PsrPopPy 允许射电谱指数为正态分布, 可以分别给定平均值 α 和标准差 β 。我们使用了 Bates 等人^[47] 的谱指数分布的最优值, 即 $\alpha = -1.4$, $\beta = 1.0$ 。

3.1 银河系中脉冲星的空间分布模拟样本

我们使用脉冲星分布软件包 PsrPopPy 完成本研究的模拟工作。首先, 在 Parkes 的 PMPS, PSMPS 和 PHMPS 三次巡天所探测到的真实样本的基础上, 模拟产生银河系中正常脉冲星的分布 ($P > 30 \text{ ms}$)。PMPS, PSMPS 和 PHMPS 的三次巡天的银经范围分别为 $-100^\circ < l < 50^\circ$, $-100^\circ < l < 50^\circ$ 和 $-140^\circ < l < -100^\circ$, 银纬范围分别为 $|b| < 5^\circ$, $|b| < 30^\circ$ 和 $|b| < 60^\circ$ ^[5-11, 49]。Parkes 望远镜其他巡天参数见表 1。

表 1 PMPS, PSMPS 和 PHMPS 的巡天参数, 以及 FAST 模拟巡天参数^[16, 36]

巡天项目	PMPS	PSMPS	PHMPS	FAST 19 波束
数字化损失因子	1.5	1.5	1.5	0.8
天线增益 / (K·Jy ⁻¹)	0.643	0.634	0.634	18
观测时间 /s	2 100	265	265	6
采样时间 / μs	250	125	125	100
系统温度 /K	25	25	25	50
中心频率 /MHz	1 374	1 374	1 374	1 250
带宽范围 /MHz	288	288	288	400
子通道带宽 /MHz	3.0	3.0	3.0	0.1
偏振数目	2	2	2	2
半高全宽 /(')	14.28	14.28	14.28	2.7
信噪比阈值	9.0	9.0	9.0	9.0

运用 populate 代码进行模拟, 选择 Parkes 三次巡天观测到的 1 364 颗正常脉冲星作为输入样本。在银河系中脉冲星分布样本模拟过程中, 当正常脉冲星达到 1 364 颗时, 模拟停止, 并生成正常脉冲星在银河系中的空间分布样本^[11]。此次模拟工作的具体参数见表 2, 分布图见图 2。

表 2 银河系中脉冲星空间分布模拟样本的参数^[37]

巡天选用项目	PMPS, PSMPs 和 PHMPS	巡天选用项目	PMPS, PSMPs 和 PHMPS
样本数目	1 364	对数周期标准差 $\lg P/\text{ms}$	0.34
半径 r 分布模型	lf06 ^[11]	脉冲星谱指数分布	高斯
初始距离 z 分布	指数	谱指数平均值	-1.4
初始标高 z_0/kpc	0.33	谱指数标准差	0.96
光度 L 分布	对数正态	电子密度分布模型	NE2001
对数光度平均值 $\lg L/\text{mJy}\cdot\text{kpc}^{-2}$	-1.1	有效脉冲宽度 ν (%)	6
对数光度标准差 $\lg L/\text{mJy}\cdot\text{kpc}^{-2}$	0.9	散射模型	Bhat04 ^[42]
初始周期 P 分布	对数正态	散射指数	-3.86
对数周期平均值 $\lg P/\text{ms}$	2.7		

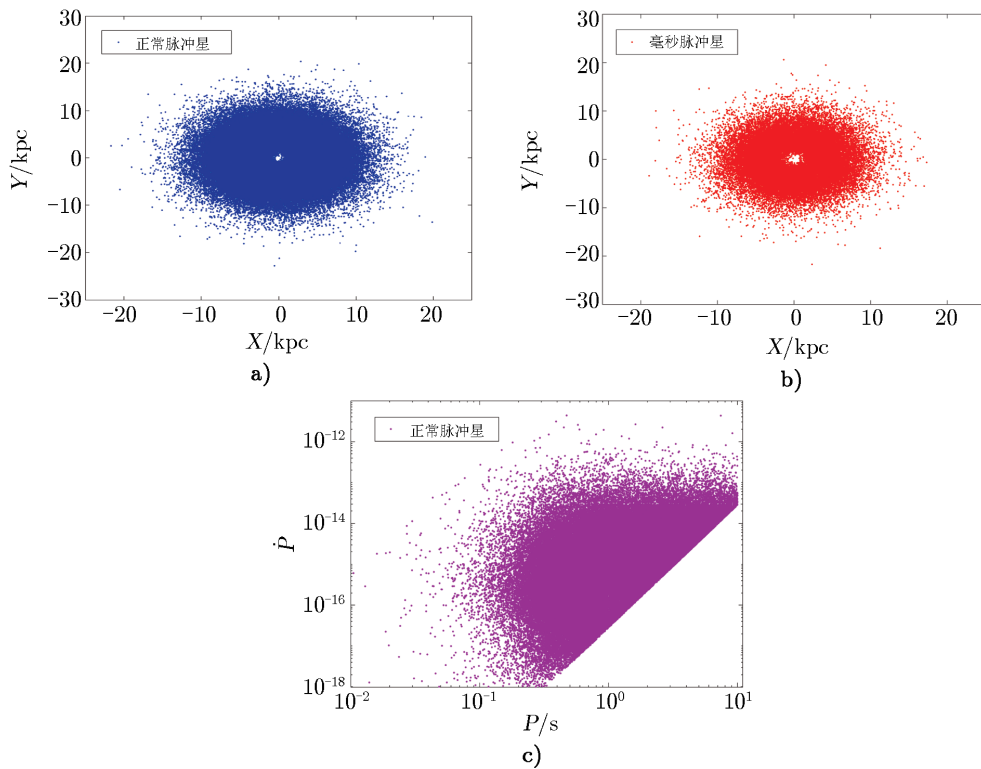


图 2 银河系中脉冲星的模拟样本分布

为了确保模拟结果的可靠性, 我们进行了 20 余次模拟, 并计算出了多次模拟结果的平均值, 以选择与平均值差距最小的模拟结果作为银河系脉冲星的分布样本^[37]。如此得到的银河系中正常脉冲星平均模拟样本数目为 134 500 颗, 并最终确定模拟样本 133 116 颗。它们在银河系中的分布如图 2a) 所示。

我们使用相同的方法来模拟银河系中毫秒脉冲星的空间分布。在 PMPS, PSMPS 和 PHMPS 三次巡天所探测到的 43 颗毫秒脉冲星基础上^[2], 采用如表 1 所示的大部分模拟参数, 仅将初始标高设定为 500 pc^[48], 初始周期分布采用 Cordes 和 Chernoff^[50] 在 1997 年提出的模型 (CC97 模型)。经过多次模拟后得到, 银河系中毫秒脉冲星的模拟样本平均值为 32 083 颗, 银河系中毫秒脉冲星的样本数为 31 880 颗, 其分布如图 2b) 所示。

3.2 模拟银河系中正常脉冲星自旋演化分布

populate 代码只能模拟脉冲星在银河系中的空间分布。为获得银河系中正常脉冲星 ($P > 30$ ms, $\dot{P} < 10^{-12}$) 的自旋演化的分布样本, 我们选择 evolve 代码进行模拟。我们仍选择 PMPS, PSMPS 和 PHMPS 三次巡天获得的 1 364 颗正常脉冲星作为输入样本^[37]。然后基于 Faucher-Giguère 和 Kaspi^[28] 的模型 (FK06 模型), 通过对数正态分布确定磁场, 其平均值为 $\mu_{\lg B} = 12.65$, 标准差为 $\sigma_{\lg B} = 0.55$ ^[41]。模拟的正常脉冲星的最大年龄为 10^9 a。每个脉冲星在 x, y, z 方向诞生的自行速度 V 的范围为 $0 \leq V \leq 180$ km·s⁻¹, 呈高斯分布^[39]。具体模拟参数见表 3。当模拟巡天搜索到 1 364 颗正常脉冲星时模拟停止。经过 20 余次巡天模拟, 我们得到的模拟样本平均值为 131 347 颗, 最终确定的银河系中正常脉冲星自旋演化样本个数为 131 570 颗, 如图 2c) 所示。

表 3 银河系中正常脉冲星自旋演化模拟样本的参数^[39]

巡天选用项目	PMPS, PSMPS 和 PHMPS	巡天选用项目	PMPS, PSMPS 和 PHMPS
样本数目	1 364	谱指数平均值	-1.4
初始标高 z_0 /pc	50	谱指数标准差	0.96
光度 L 分布	对数正态	光束对模型	WJ08
对数光度平均值 $\lg L/\text{mJy}\cdot\text{kpc}^{-2}$	-1.5	散射模型	Bhat04 ^[42]
对数光度标准差 $\lg L/\text{mJy}\cdot\text{kpc}^{-2}$	0.5	散射指数	-3.86
初始周期 P 分布	高斯	脉冲星自转减慢模型	FK06
对数周期平均值 $\lg P/\text{ms}$	300	制动指数	3.0
对数周期标准差 $\lg P/\text{ms}$	150	脉冲星最大年龄 /Ga	1.0
脉冲星谱指数分布	高斯		

4 FAST 19 波束脉冲星漂移扫描巡天模拟及其结果

基于上面所得的正常脉冲星和毫秒脉冲星在银河系的空间分布样本, 我们通过设定望远镜的巡天参数, 对此样本进行模拟观测。首先确定巡天范围, 然后在此范围内进行模拟搜寻。

这个区域内每个脉冲信号都有理论的观测信噪比值 (SNR)^[39]:

$$SNR = S_\nu G \frac{\sqrt{n_p t_{\text{obs}} \Delta\nu}}{\varepsilon T_{\text{tot}}} \sqrt{\frac{P - W_{\text{eff}}}{W_{\text{eff}}}}, \quad (7)$$

其中, S_ν 为最小可检测流量密度; G 为天线增益; n_p 为极化数; $\Delta\nu$ 为系统频带宽度; t_{obs} 为观测时间; ε 为数字化及其他处理过程中的损失因子; P 为脉冲星周期; W_{eff} 为有效脉冲宽度。 T_{tot} 为总温度, 可表示为:

$$T_{\text{tot}} = T_{\text{sys}} + T_{\text{sky}} + T_{\text{CMB}}, \quad (8)$$

其中, T_{sys} 为系统温度, T_{sky} 和 T_{CMB} 分别为天空和宇宙微波背景 (CMB) 温度。

在已知射电望远镜观测系统和模拟脉冲星各参数的前提下, 我们可得到观测脉冲星信号的信噪比。我们设定望远镜的信噪比阈值为 9, 即当脉冲星信噪比 $SNR \geq 9$ 时, 该脉冲星为可观测到的脉冲星^[11, 39]。

4.1 FAST 漂移扫描观测时间

射电望远镜的观测方法有跟踪观测和漂移扫描。FAST 早期科学目标为进行漂移扫描 (drift scans), 即需要将望远镜移动到对准天空特定位置处, 然后等待天体源漂移通过波束。漂移扫描观测与跟踪观测确定观测时间的方法不同, 跟踪观测只与望远镜自身参数有关, 而漂移扫描的观测时间还受到观测频率和波束形状的影响。早期漂移扫描观测相对于正式科学运行状态下的定点跟踪观测存在两个特点: (1) 不同观测频率下波束形状的改变, 导致积分时间具有观测频率依赖性; (2) 点源通过波束时, 单位观测时间内探测灵敏度受波束调制影响。如图 3 所示。针对漂移扫描特点, 我们在模拟脉冲星漂移扫描探测率时, 采用将漂移扫描波束形状调制效应等效为对跟踪观测参数的修正, 以简化计算过程。脉冲星漂移扫描观测的最小灵敏度 S_{min} 可表示为:

$$S_{\text{min}} \equiv \frac{SNR \cdot \beta T_{\text{sys}}}{G \sqrt{N_p} \Delta\nu} \sqrt{\frac{W}{P - W}} \frac{1}{\sqrt{t_{\text{obs}}}}, \quad (9)$$

其中, N_p 是偏振数目; t_{obs} 是观测时间, 可表示为 $t_{\text{obs}} = \Gamma_{\text{eff}} t_{\text{eff}}$, 其中, t_{eff} 是有效观测时间, Γ_{eff} 为波束形状有效修正参数, 两者都与频率相关。

有效观测时间与观测频率的关系为:

$$t_{\text{eff}} = \frac{\sum_i^{N_{\text{CH}}} t_i \Delta\nu_i}{\sum_i^{N_{\text{CH}}} \Delta\nu_i}, \quad (10)$$

$$t_i = 24 \times 3600 \times \frac{1.22 \arcsin(\frac{c}{\nu_i d})}{2\pi}, \quad (11)$$

其中, N_{CH} 为通道数; t_i 为在一定频率下的观测时间; $\Delta\nu_i$ 为观测频率; d 为射电望远镜实际照明孔径。

漂移扫描的波束形状有效修正参数为:

$$\Gamma_{\text{eff}} = \frac{\sum_i^{N_{\text{CH}}} \Gamma_i \Delta t}{\sum_i^{N_{\text{CH}}} \Delta t}, \quad (12)$$

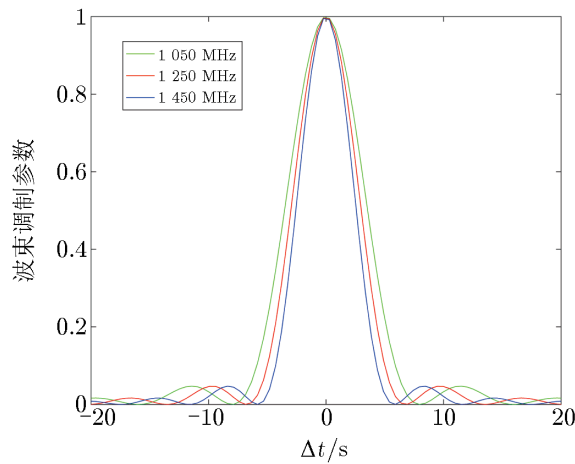


图 3 波束形状和漂移扫描观测时间对观测频率的依赖性

$$\Gamma_{t_i} = \int \left(\frac{t_i \sin\left(\frac{-2\pi t}{t_i}\right)}{-2\pi t} \right)^2 dt, \quad (13)$$

其中, Γ_{t_i} 为一定频率下的波束形状有效修正参数; Δt 为积分时间。

FAST 漂移扫描的中心频率为 1 250 MHz, 带宽为 400 MHz。本文运用等面积法, 将漂移扫描模式的积分时间等效到跟踪观测模式下。如图 4 所示, 我们得到在此频率下有效观测时间约为 13.53 s, 有效修正因子约为 0.45, 即 FAST 多波束漂移扫描观测时间约为 6.0 s。

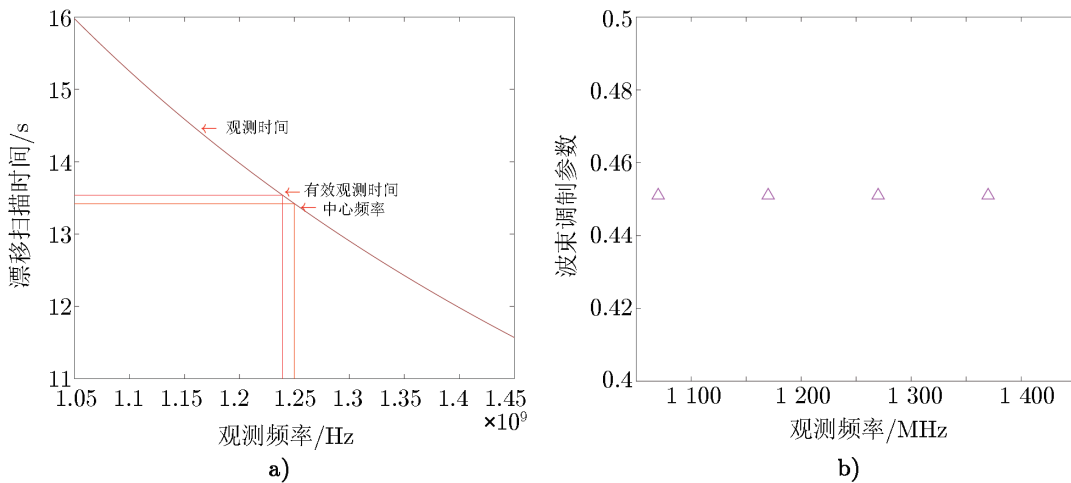


图 4 FAST 漂移扫描时间和波束调制参数的观测频率依赖性

4.2 周期截断经验公式

FAST 漂移巡天的有效积分时间相对较短, 这意味着用傅里叶分析的方法进行脉冲星搜寻时对低频信号的频谱分辨率有限, 这会降低对周期较长的脉冲星的探测灵敏度。灵敏度的

降低程度与脉冲星周期的 $1/2$ 次方成正比, 但是具体结果也与脉冲星脉冲轮廓形状和占空比有关, 因此不容易解析处理。由于当周期大于 0.32 s 时, 快速傅里叶变换之后功率谱采样数明显偏少, 因此, 为简化问题, 我们引入一个经验公式来修正长周期脉冲星的探测率: $1/\sqrt{P/0.32}$ 。对 $P > 0.32$ s 的长周期脉冲星, 我们采用经验公式进行筛选。

4.3 空间分布样本模拟观测结果

在脉冲星样本确定之后, 我们对 FAST 进行脉冲星巡天模拟。我们使用 19 波束接收机, 其中心频率为 $1\ 250$ MHz, 带宽为 400 MHz, 积分时间为 6.0 s, 增益恒定在 $18\ \text{K}\cdot\text{Jy}^{-1}$ ^[16, 18]。FAST 具体巡天参数见表 2。巡天天区限制在银经 $30^\circ < l < 100^\circ$, 银纬分别为 $|b| < 5^\circ$, $|b| < 20^\circ$, 以及 FAST 全天。各巡天区域内已知正常脉冲星分别为 376 颗和 497 颗, 已知毫秒脉冲星分别为 32 颗和 48 颗^[2]。FAST 全天区域内, 已知脉冲星 1 157 颗, 其中毫秒脉冲星为 119 颗^[2]。

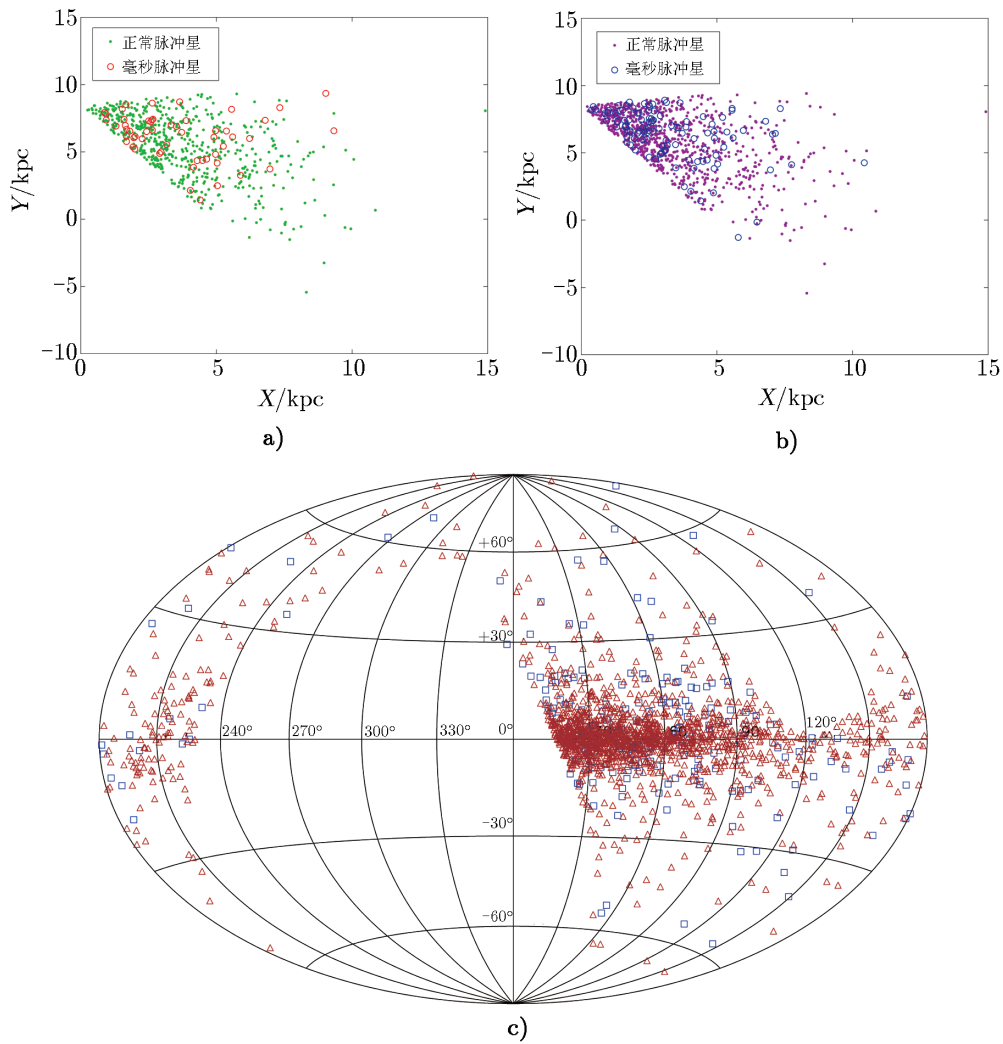
为保证模拟巡天结果的可靠性, 我们对 FAST 巡天进行了多次模拟。巡天在银纬 $|b| < 5^\circ$ 时, 我们在银道面多次模拟搜寻到的正常脉冲星样本平均为 600 颗, 毫秒脉冲星样本平均为 56 颗; 模拟巡天探测到的正常脉冲星样本数为 573 颗, 毫秒脉冲星样本数为 54 颗。巡天在银纬 $|b| < 20^\circ$ 时, 在银道面模拟搜寻到的正常脉冲星样本平均为 844 颗, 毫秒脉冲星样本平均为 121 颗; 模拟巡天探测到的正常脉冲星样本数为 994 颗, 毫秒脉冲星样本数为 96 颗。我们在 FAST 天区做全天搜寻, 在银道面模拟搜寻到的正常脉冲星样本平均为 1 632 颗, 毫秒脉冲星样本平均为 241 颗; 模拟巡天探测到的正常脉冲星样本 1 600 颗, 毫秒脉冲星样本 238 颗。图 5 为 FAST 所有巡天项目在银道面检测到的正常脉冲星和毫秒脉冲星的分布。

我们依次改变 FAST 观测的中心频率 f 并进行模拟, 其观测频率范围为 $100 \leq f \leq 3\ 072$ MHz, 积分时间为 $2\ 100$ s, 带宽为中心频率的 $1/3$ 。图 6 显示 FAST 在银道面模拟观测的正常脉冲星和毫秒脉冲星数目与观测的中心频率之间的关系。从图中可以发现, 在中心频率为 $100\sim 1\ 500$ MHz 时, 模拟观测到的正常脉冲星和毫秒脉冲星数目随中心频率增大而增加, 且在中心频率达到 800 MHz 之后, 模拟观测的正常脉冲星数目增加缓慢。毫秒脉冲星数目在中心频率达到 $1\ 000$ MHz 之后增加缓慢。

我们把 FAST 的观测时间调整为 $100 \leq t \leq 3\ 000$ s 进行模拟搜寻, 其观测结果如图 7 所示。从图中可以发现, 观测时间在 $100 \leq t \leq 3\ 000$ s 时, 正常脉冲星和毫秒脉冲星数目随观测时间的增加而增加; 观测时间小于 500 s 时, 模拟检测到的脉冲星数目增加迅速。

4.4 自旋演化样本模拟观测结果

基于银河系中正常脉冲星自旋演化分布样本用 FAST 进行模拟观测, 同基于银河系中正常脉冲星的空间分布样本进行模拟观测的方法一致。我们使用相同巡天观测参数, 进行足够次数的模拟探测。在银纬 $|b| < 5^\circ$ 的天区内, 在银道面模拟探测到正常脉冲星样本数平均为 646 颗, 模拟巡天探测到的孤立正常脉冲星样本数为 641 颗。在银纬 $|b| < 20^\circ$ 的天区内, 在银道面模拟探测到的正常脉冲星样本数平均为 858 颗, 模拟巡天探测到的孤立正常脉冲星样本数为 841 颗。图 8 为 FAST 巡天检测到的正常脉冲星在 $P-\dot{P}$ 图中的分布。FAST 全天搜寻得到模拟结果的平均值为 1 762 颗, 模拟巡天探测到银河系中孤立正常脉冲星自旋演化样本

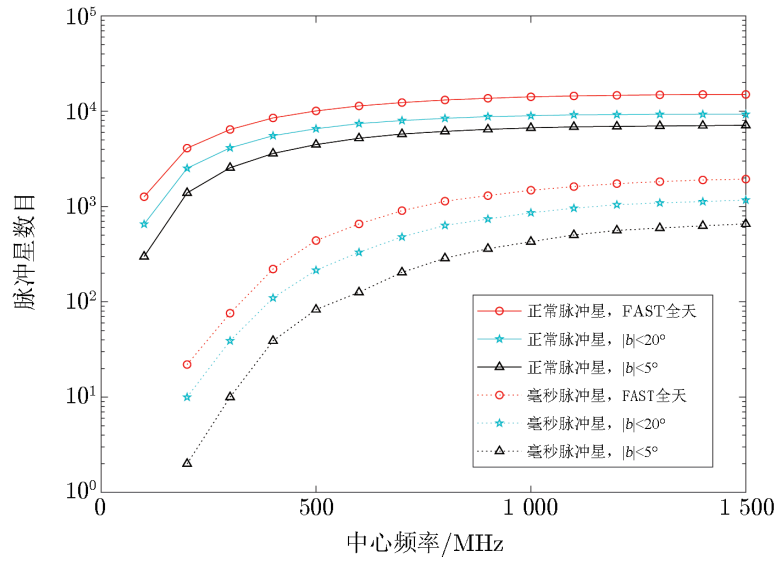


注: a) 在银河系 $|b| < 5^\circ$ 区域所探测到的脉冲星; b) 在银河系 $|b| < 20^\circ$ 区域所探测到的脉冲星; c) 在全天区检测到的脉冲星, 其中红色三角形表示模拟巡天观测到的正常脉冲星, 蓝色正方形表示观测到的毫秒脉冲星。

图 5 FAST 巡天所探测到的脉冲星样本在银河系中的分布

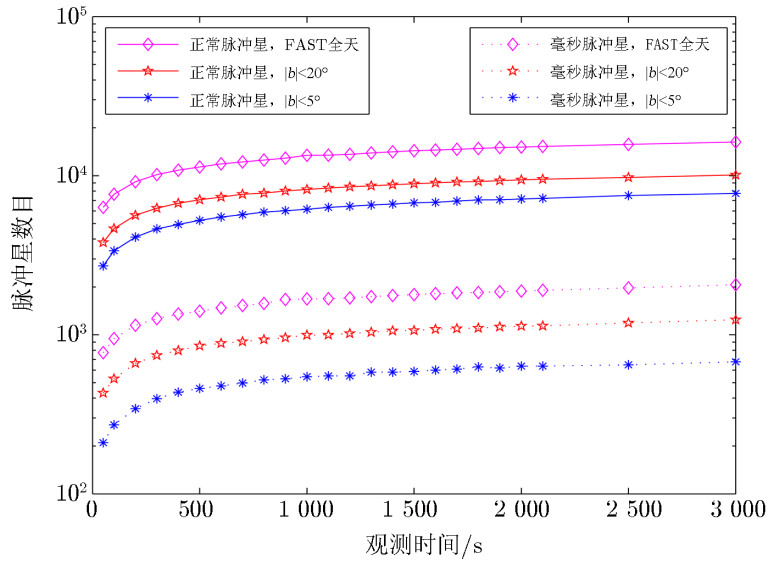
为 1749 颗。

Swiggum 等人^[51] 和 Lazarus 等人^[52] 对 Arecibo L 波段馈源阵列 (Arecibo L-band Feed Array, ALFA) 脉冲星巡天的相关研究表明, 在红噪声的影响下, 当脉冲星自转周期 $P > 4$ s 时, 使用 PsrPopPy 模拟的探测数目比巡天实际探测数目多约 30%。本文脉冲星巡天模拟搜寻到的长周期脉冲星数目偏多, 这可能是因为红噪声对模拟结果的影响。从图 9 中我们可以看出, FAST 全天搜寻样本几乎覆盖整个已知正常脉冲星范围, 磁场分布在 $10^6 \sim 10^{10}$ T, 特征年龄为 $10^4 \sim 10^{10}$ a。与图 1 相比, FAST 模拟搜寻结果增加了正常脉冲星样本数量, 脉冲星的整体分布基本没有发生改变, 主要为双星、正常脉冲星和磁星这三部分。FAST 样本



注：FAST 在银道面模拟巡天的银经限制在 $30^\circ < l < 100^\circ$ 。图中实线和虚线分别表示正常脉冲星和毫秒脉冲星数目，红色圆圈表示在 FAST 天区内全天的搜寻，青绿色五角星表示在银纬 $|b| < 20^\circ$ 范围内的搜寻，黑色三角形表示在银纬 $|b| < 5^\circ$ 范围内的搜寻。观测时间为 2 100 s，带宽为观测频率的 1/3。

图 6 脉冲星数目随中心频率的变化



注：FAST 在银道面模拟巡天的银经限制在 $30^\circ < l < 100^\circ$ 。实线和虚线分别表示正常脉冲星和毫秒脉冲星数目。蓝色星号表示巡天范围限制在银纬 $|b| < 5^\circ$ ，红色五角星表示巡天范围限制在银纬 $|b| < 20^\circ$ ，洋红色菱形表示巡天范围在整个 FAST 天空。FAST 巡天的中心频率为 1 250 MHz，带宽为 400 MHz。

图 7 脉冲星数目随观测时间的变化

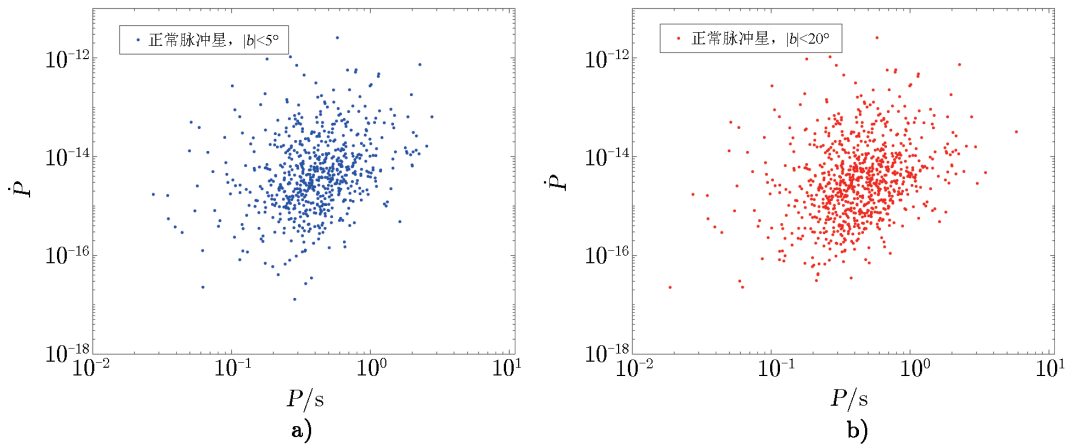
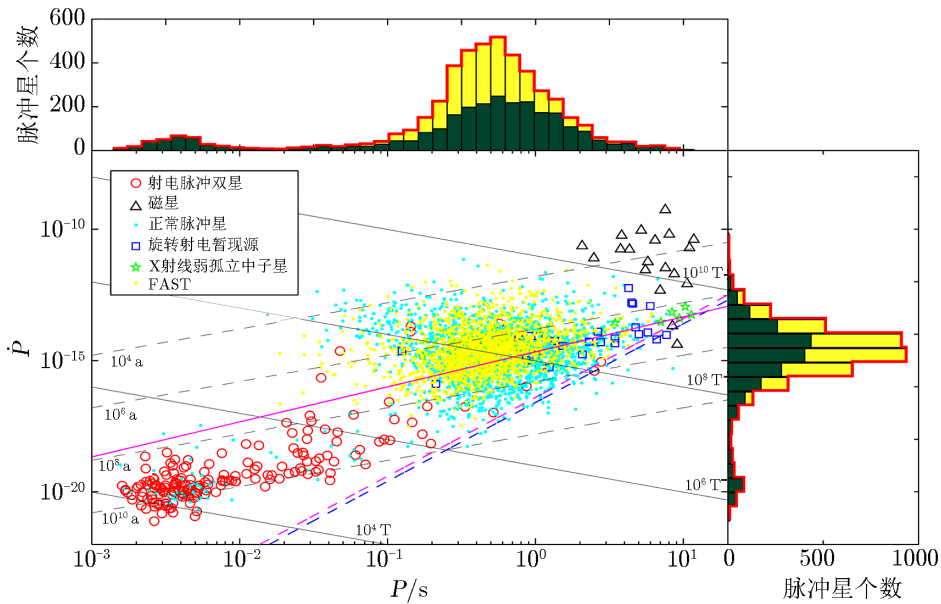


图 8 FAST 巡天所探测到的脉冲星样本 $P-\dot{P}$ 分布图

区域有两条生硬的线, 其中一条为模拟银河系中脉冲星的演化样本时设定的范围所致, 模拟出的自旋演化脉冲星周期分布在 $0.03 \leq P \leq 10$ s; 另一条为模型的死亡线, 它与已知脉冲星死亡线平行。



注: 灰色实线为恒定特征表面磁场 [式 (1)], 灰色虚线为恒定的特征年龄 [式 (2)], 洋红色实线为自转加速线, 洋红色虚线为死亡线, 蓝色虚线为模型死亡线。上方蓝绿色直方图横坐标为周期, 纵坐标为相应周期范围内的已知脉冲星个数, 黄色直方图表示相应周期范围内模拟脉冲星与已知脉冲星数之和。右边蓝绿色横坐标为周期变化率, 纵坐标为相应周期变化率内的脉冲星个数, 黄色表示相应周期变化率内模拟脉冲星与已知脉冲星数之和。

图 9 FAST 模拟巡天样本与现有脉冲星的 $P-\dot{P}$ 图

5 总结与展望

脉冲星巡天是寻找新脉冲星的最主要方法之一。本文在 FAST 覆盖的天区范围内, 选取 FAST 全天、 $|b| < 5^\circ$ 和 $|b| < 20^\circ$ 三个天区进行模拟观测。因为不知道脉冲星的方位、周期等信息, 所以只能将观测天区分成许多小块, 逐一进行观测。巡天的结果也依赖观测时间、观测频率以及望远镜的灵敏度等。

本文以 PMPS, PSMPs 和 PHMPS 三次巡天所观测到的 1 364 颗正常脉冲星为样本, 采用蒙特卡罗方法模拟得到银河系中正常脉冲星约 1.3×10^5 颗。以 PMPS, PSMPs 和 PHMPS 三次巡天所观测到的 43 颗毫秒脉冲星为样本, 初始标高为 500 pc, 初始周期 P 分布采用 CC97 模型, 模拟得到银河系中毫秒脉冲星约 3.2×10^4 颗。然后, 运用 FAST 对此样本进行模拟观测得到: 使用 19 波束接收机, 搜寻范围在 $30^\circ < l < 100^\circ$, $|b| < 5^\circ$ 时, 发现正常脉冲星 573 颗, 毫秒脉冲星 54 颗; 巡天范围在 $|b| < 20^\circ$ 时, 搜寻到正常脉冲星 994 颗, 毫秒脉冲星 96 颗。在全天范围内, 发现 1 600 颗正常脉冲星, 238 颗毫秒脉冲星。

本文使用 FK06 脉冲星自旋减慢模型, 模拟得到银河系中自旋演化的正常脉冲星样本约 1.32×10^5 颗。设置相同的 FAST 巡天参数, 获得巡天样本在 $P-\dot{P}$ 图中的分布。从 FAST 全天区域巡天结果可以发现, 搜寻到的脉冲星几乎覆盖整个正常脉冲星区域。本文对 FAST 正式科学运行时, 长时间跟踪观测的科学运行状态也进行了相应的模拟。在频率一定时, 改变观测时间, 可以发现探测的脉冲星数目随观测时间的增加而增加, 在 500 s 后增加缓慢。在观测时间一定时, 改变中心频率, 发现探测到的脉冲星数目随中心频率的增大而增加, 在 1 000 MHz 后增加缓慢。

Smits 等人^[20]和 Yue 等人^[21]使用脉冲星模拟软件 PsrPop, 分别对 FAST 多波束跟踪巡天和 7 波束低频漂移巡天做过预测。与他们的预测相比, 本文的工作具有以下的特点: (1) 本文使用 PsrPopPy 模拟得到的脉冲星样本更加真实可靠, 而且还获得了模拟样本在 $P-\dot{P}$ 上的分布。PsrPopPy 是 2014 年 Bates 等人在 PsrPop 基础上重新开发的脉冲星模拟软件, 除了增加模拟孤立射电脉冲星随时间的演化功能外, 该软件还使用对数正态分布的光度函数来避免截断处理, 更新了脉冲星模拟样本在银河系中的分布, 因此, 与 PsrPop 模拟样本相比更加真实可靠。(2) 本文的工作更加接近 FAST 近期科学目标, 有助于实施 19 波束漂移扫描巡天, 为即将开展的巡天工作提供关于观测频率、积分时间、搜寻率、脉冲星分布等方面的参考信息, 对提高脉冲星巡天效率具有一定的积极意义。(3) Smits 等人和 Yue 等人都是使用 FAST 的理论参数进行模拟观测, 这些参数与实际相差较大。本文采用 FAST 的真实巡天参数数据, 因而模拟观测结果更加精确, 对 FAST 巡天更具有参考意义。

目前, PsrPopPy 模拟产生脉冲星的种类比较单一, 虽在空间分布上可以模拟出正常脉冲星和毫秒脉冲星两类, 但在自旋演化上只能模拟出正常脉冲星。FAST 巡天不仅将会在现有基础上大大增加各类脉冲星数目, 而且可以发现不同种类的脉冲星, 甚至发现新的脉冲星种类, 例如, 发现 $P-\dot{P}$ 图中右下角的长周期脉冲星就是 FAST 的科学目标之一。不同星族区域之间新脉冲星的发现, 将会大大提高脉冲星分布的统计完整性, 对探索脉冲星演化过程有重要意义。各类脉冲星样本的增加反过来也将会对模拟工作起促进作用。

参考文献:

- [1] Manchester R N, Hobbs G B, Teoh A, et al. *AJ*, 2005, 129: 1993
- [2] ATNF Pulsar Catalogue. <http://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat/>, 2016
- [3] Hessels J W T, Ransom S M, Stairs I H, et al. *ApJ*, 2007, 670: 363
- [4] Lorimer D R, Kramer M, Müller P, et al. *A&A*, 2000, 358: 169
- [5] Manchester R N, Lyne A G, Camilo F, et al. *MNRAS*, 2001, 328: 17
- [6] Camilo F, Lyne A G, Manchester R N, et al. *ASP Conf Ser*, 2000, 202: 3
- [7] Morris D J, Hobbs G, Lyne A G, et al. *MNRAS*, 2002, 335: 275
- [8] Kramer M, Bell J F, Manchester R N, et al. *MNRAS*, 2003, 342: 1299
- [9] Hobbs G, Faulkner A J, Stairs I H, et al. *MNRAS*, 2004, 352: 1439
- [10] Faulkner A J, Stairs I H, Kramer M, et al. *MNRAS*, 2004, 355: 147
- [11] Lorimer D R, Faulkner A G, Manchester R N, et al. *MNRAS*, 2006, 372: 777
- [12] Burgay M, Joshi B C, D' Amico N, et al. *MNRAS*, 2006, 368: 283
- [13] Edwards R T, Bailes M, Straten W V, et al. *MNRAS*, 2001, 326: 358
- [14] Jin C J, Nan R D, Gan H Q. *IAU Symposium*, 2008, 248: 178
- [15] Nan R D, Li D, Jin C J, et al. *IJMPD*, 2011, 20: 989
- [16] Li D, Pan Z. *Radio Science*, 2016, 51: 1060
- [17] Nan R D, Zhang H Y, Zhang Y, et al. *ChA&A*, 2017, 41: 293
- [18] 南仁东, 张海燕, 张莹, 等. *天文学报*, 2016, 57: 623
- [19] 南仁东. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2005, 35: 449
- [20] Smits R, Lorimer D R, Kramer M, et al. *A&A*, 2009, 505: 919
- [21] Yue Y, Li D, Nan R. *IAU Symposium*, 2013, 291: 577
- [22] Gold T. *Nature*, 1968, 221: 25
- [23] Pacini F. *Nature*, 1968, 219:145
- [24] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, et al. *Nature*, 1968, 217: 709
- [25] Lyne A G, Lorimer D R. *Nature*, 1994, 369: 127
- [26] Hansen B, Phinney E S. *MNRAS*, 1997, 291: 569
- [27] Hobbs G, Lorimer D R, Lyne A G, et al. *MNRAS*, 2005, 360: 974
- [28] Faucher-Giguère C A, Kaspi V M. *ApJ*, 2006, 643: 332
- [29] Young M D, Manchester R N, Johnston S. *Nature*, 1999, 400: 848
- [30] Hessels J W T, Ransom S M, Stairs I H, et al. *Science*, 2006, 311: 1901
- [31] Shapiro S L, Teukolsky S A, Lightman A P. *Physics Today*, 1983, 36: 89
- [32] Keane E F, Kramer M. *MNRAS*, 2008, 391: 41
- [33] Kaspi V M, Kramer M. <https://arxiv.org/abs/1602.07738>, 2016
- [34] Kaspi V M, Roberts M S E, Vasisht G, et al. *ApJ*, 2001, 560: 371
- [35] Chen K, Ruderman M. *ApJ*, 1993, 402: 264
- [36] Zhang L, Hobbs G, Li D, et al. *RAA*, 2016, 16: 10
- [37] 张蕾, 张洁, 李葭, 等. *天文学进展*, 2015, 33: 506
- [38] <http://psrpop.sourceforge.net>, 2016
- [39] Bates S D, Lorimer D R, Rane A, et al. *MNRAS*, 2014, 439: 2893
- [40] <https://github.com/samb8s/PsrPopPy>, 2016
- [41] Ridley J P, Lorimer D R. *MNRAS*, 2010, 404: 1081
- [42] Bhat N D R, Cordes J M, Camilo F, et al. *ApJ*, 2004, 605: 759
- [43] Kramer M, Xilouris K M, Lorimer D, et al. *ApJ*, 1998, 501: 270
- [44] Lorimer D R, Kramer M. *Handbook of Pulsar Astronomy*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
- [45] Weltevrede P, Johnston S. *MNRAS*, 2008, 387: 1755
- [46] Cordes J M, Lazio T J W. <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0207156>, 2002
- [47] Bates S D, Lorimer D R, Verbiest J P W. *MNRAS*, 2013, 431: 1352
- [48] Levin L, Bailes M, Barsdell B R, et al. *MNRAS*, 2013, 434: 1387

- [49] Lyne A G, Graham-Smith F. *Sterne Und Weltraum*, 2007, 46: 88
[50] Cordes J M, Chernoff D F. *ApJ*, 1997, 482: 971
[51] Swiggum J K, Lorimer D R, McLaughlin M A, et al. *ApJ*, 2014, 787: 643
[52] Lazarus P, Brazier A, Hessels J W T, et al. *ApJ*, 2015, 812: 81

FAST 19-beam Drift-scan Pulsar Survey Simulation

LIU Peng^{1,2}, WANG Pei², LI Di^{2,3}, ZHANG Jie¹ ZHANG Lei²,
ZHANG Cheng-min², ZHU Wei-wei², YUE You-ling², DAI Shi⁴

(1. School of Physics and Space Science, China West Normal University, Nanchong 637009, China; 2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 3. CAS Key Lab of FAST, Beijing 100012, China; 4. CSIRO Astronomy and Space Science, Australia Telescope National Facility, Box 76 Epping NSW 1710, Australia)

Abstract: Pulsar search is one of the main scientific goals of Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope (FAST). It is very important for the actual FAST pulsar survey to simulate the pulsar survey by using the device parameters of FAST. Based on the datasets of the Parkes Multi-beam Pulsar Surveys, we simulate the spatial distributions of the millisecond and ordinary pulsars by using the software package PsrPopPy. For those simulated pulsars in the sky region of $-14^{\circ}12' \leq \delta \leq 65^{\circ}48'$, we use the FAST 19-beam receiver to carry out virtual drift-scan observation at center frequency of 1250 MHz with the bandwidth of 400 MHz. We find that 1600 ordinary pulsars and 238 millisecond pulsars can be searched by FAST in the virtual drift-scan observation. To obtain the sample of the pulsar spin evolution, we simulate the distributions of pulsars in all sky of FAST under the same parameters with the evolve code. We obtain 1749 isolated normal pulsars and their distribution of $P-\dot{P}$.

Key words: FAST; pulsar; pulsar simulation; pulsar surveys simulation