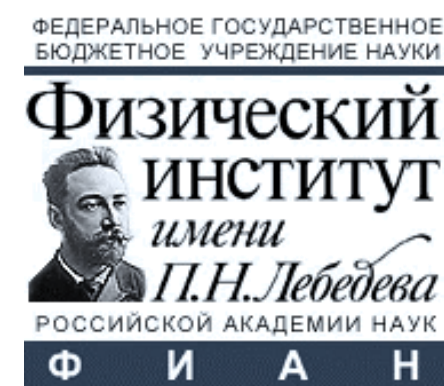




Поиск пульсаров и вращающихся радиотранзиентов по наблюдениям на радиотелескопе БСА ФИАН

М. А. Китаева

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

1.3.1 – Физика космоса, астрономия

Научный руководитель – С. А. Тюльбашев

Пушино

Цели и задачи

Цель данной работы заключалась в поиске новых пульсаров и радиотранзиентов и исследовании радиоизлучения от этих объектов в метровом диапазоне длин волн, в поиске радиоизлучения от нескольких гамма-пульсаров, исследовании дрейфового поведения субимпульсов пульсаров и исследовании влияния межпланетной плазмы на проходящее через нее импульсное излучение пульсаров.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- *Разработать способы, позволяющие обнаруживать радиоизлучение пульсаров и транзиентов*
- *Провести наблюдения на радиотелескопе БСА ФИАН*
- *Провести отработку методики поиска*

Наблюдения



БСА ФИАН (1974 г.) - фазированная антенная решётка: 187 м. с востока на запад и 384 метра с севера на юг. Состоит из 256 линейных антенн по 64 волновых диполя в каждой. Центральная частота приёма - 111 МГц (длина волны 2,7 метра), полоса частот 2,5 МГц.

При модернизации антенны в 2012 году удалось создать четыре независимых системы лучей на основе матриц Батлера (Shishov2016), то есть реализовать техническую возможность создания четырех радиотелескопов на базе одного антенного поля. Лучи диаграммы направленности располагаются в меридианной плоскости.

Наши наблюдения:

БСАЗ $-9^{\circ} < \delta < +55^{\circ}$, БСА1 $+55^{\circ} < \delta < +87^{\circ}$

Наблюдения ведутся с 2014 года.

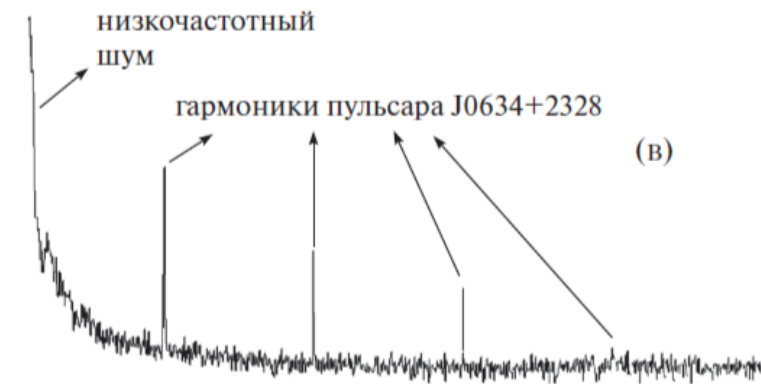
2 режима записи данных: 6 частотных каналов, временное разрешение 100 мс. – данные с низким частотно-временным разрешением («короткие данные»)

32 частотных канала с временным разрешением 12,5 мс – данные с высоким частотно-временным разрешением («длинные данные»).

1. Поиск пульсаров методом усреднения спектров мощности: Фурье-спектры мощности на временных интервалах в 2048 точек (204.8 сек.) складывались в соответствии со звездным временем на промежутке наблюдений 4 года. Результат: **зарегистрировано излучение от 131 пульсара, из них 18 пульсаров - новые**

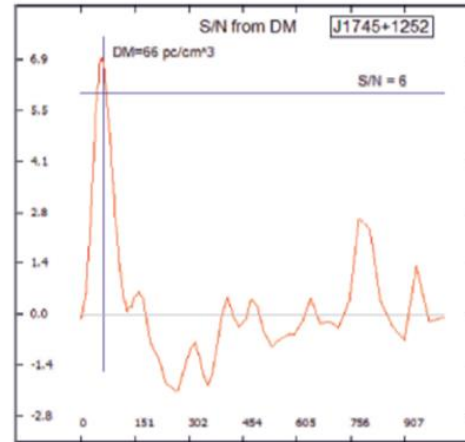
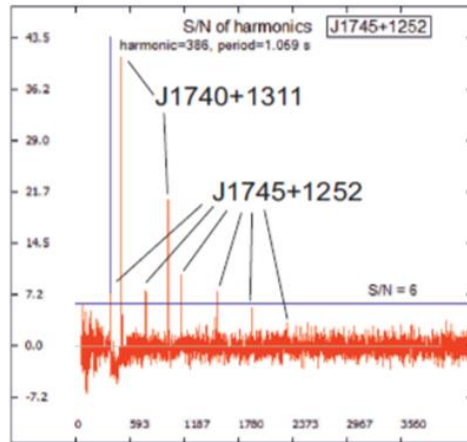
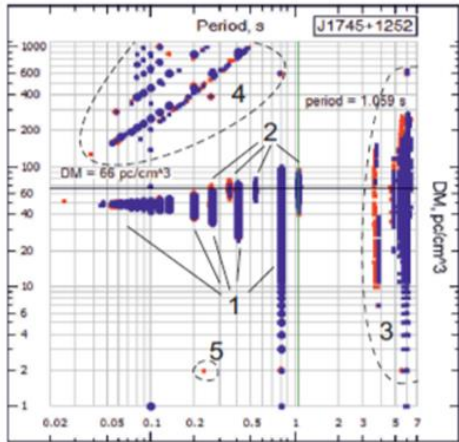
2. Поиск пульсаров методом усреднения спектров мощности с использованием новой системы калибровки на 5-летнем интервале наблюдений. Результат: 87 кандидатов: 23 – известные пульсары, наблюдающиеся в боковых лепестках БСА (ранее не обнаруживались); 8 – помехи; для 56 кандидатов проводился дополнительный поиск в исходных данных => **5 новых пульсаров**.

Исследуемая площадка ($-9^\circ < \delta < +42^\circ$): ~ 40000 направлений (пикселей), для каждого из которых ежедневно вычислялась дисперсия шумов после нормировки с калибровочным сигналом => накоплено $\sim 10^8$ оценок дисперсии шумов. Результат: **рост отношения сигнал/шум для всех направлений на небе на промежутке наблюдений 5 лет находится в пределах от 20 до 30 раз.**



Фурье-спектр мощности нового пульсара: J0634+2328 $P=0.9981c$

3. Поиск пульсаров по выборке неотожествленных ранее кандидатов: 135 кандидатов из обзора с низким частотно временным разрешением => обработка новой версией программы по данным с высоким частотно временным разрешением (БСАЗ $-9^0 < \delta < +42^0$, 32 частотных канала, временное разрешение 12.5 мс.). **Результат** проверки 135 кандидатов: 55 – помехи; 69 – известные пульсары, видимые в боковых лепестках БСА. **11 пульсаров - новые**



Окна визуализации программы: карта с точками P/DM для всех посчитанных спектров; один из спектров мощности, соответствующий карте; зависимость SN/DM для первой гармоники пульсара J1745+12.

4. Поиск пульсаров по данным с высоким частотно-временным разрешением на $-9^0 < \delta < +55^0$. Спектры мощности, получаемые за каждую наблюдательную сессию и просуммированные по данным за период 8 лет => ~ 1800 спектров мощности на одно направление на небе. Всего ~ 40 000 направлений. **Результат: зарегистрирован 331 пульсар, 286 – известные, 45 – новые.**

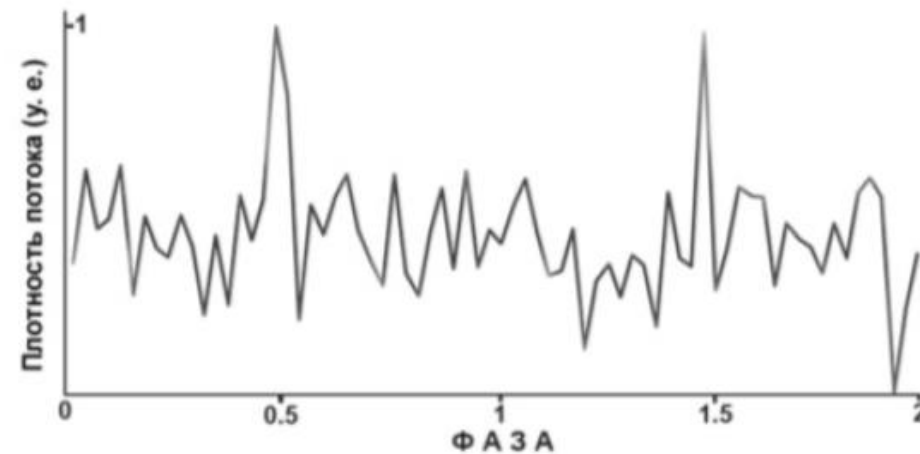
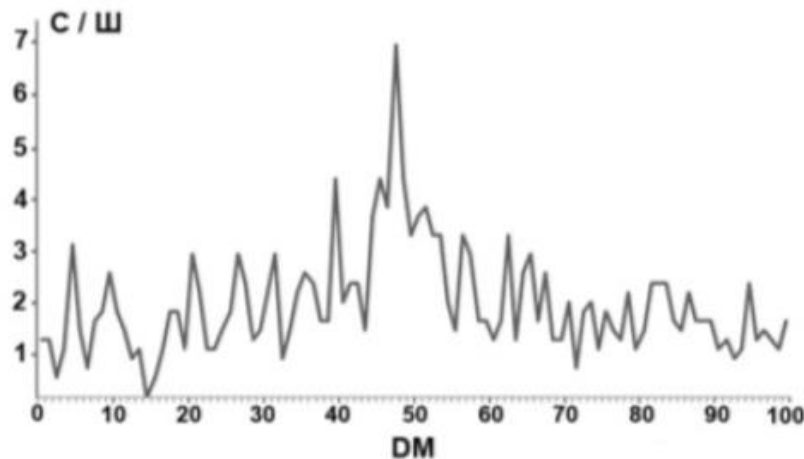
Способы поиска:

- поиск частотных гармоник в суммированных спектрах мощности;
- поиск гармоник в индивидуальных спектрах мощности;
- поиск отдельных сильных импульсов.

Имя	α_{2000}	δ_{2000}	ссылка
J0357+3205	03 ^h 57 ^m 52 ^s	32°05'25''	[Abdo2009]
J0554+3107	05 54 05	31 07 41	[Pletsch,2013]
J1958+2846	19 58 40	28 45 54	[Abdo2009]
J2021+4026	20 21 29	40 26 45	[Abdo2009]
J2055+2539	20 55 48	25 40 02	[Saz2010]

Для J0357+3205 накоплено ~1700 сеансов наблюдений. Визуальный просмотр не дал результатов.

Критерий отбора: $CШ > 6 \rightarrow CШ > 3 \Rightarrow 36$ дней, в двух получены пики в районе DM пульсара.

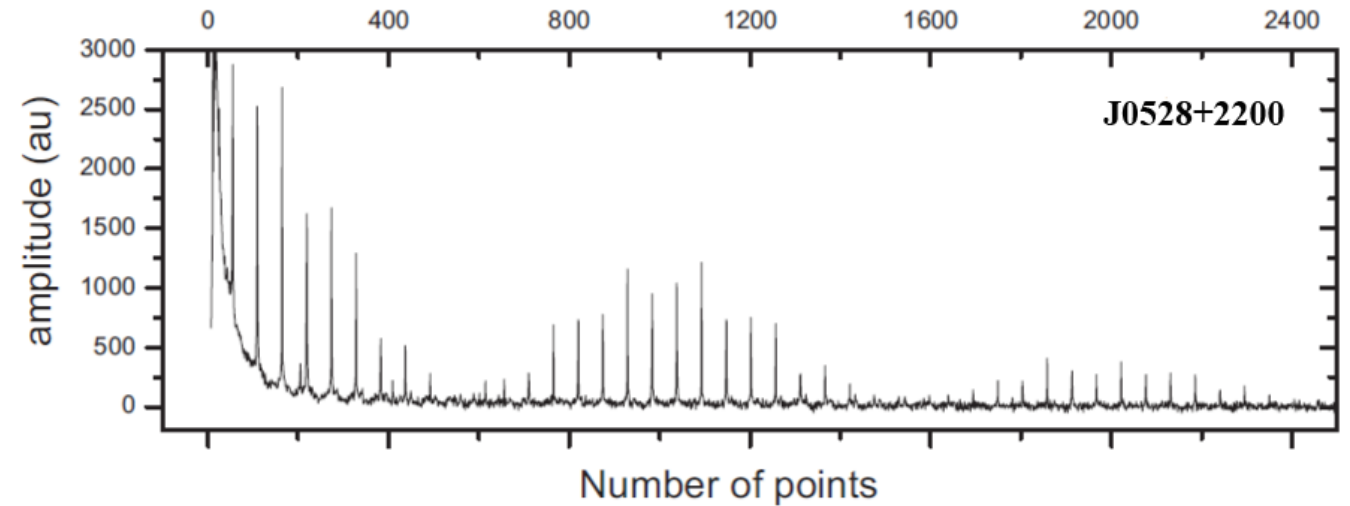
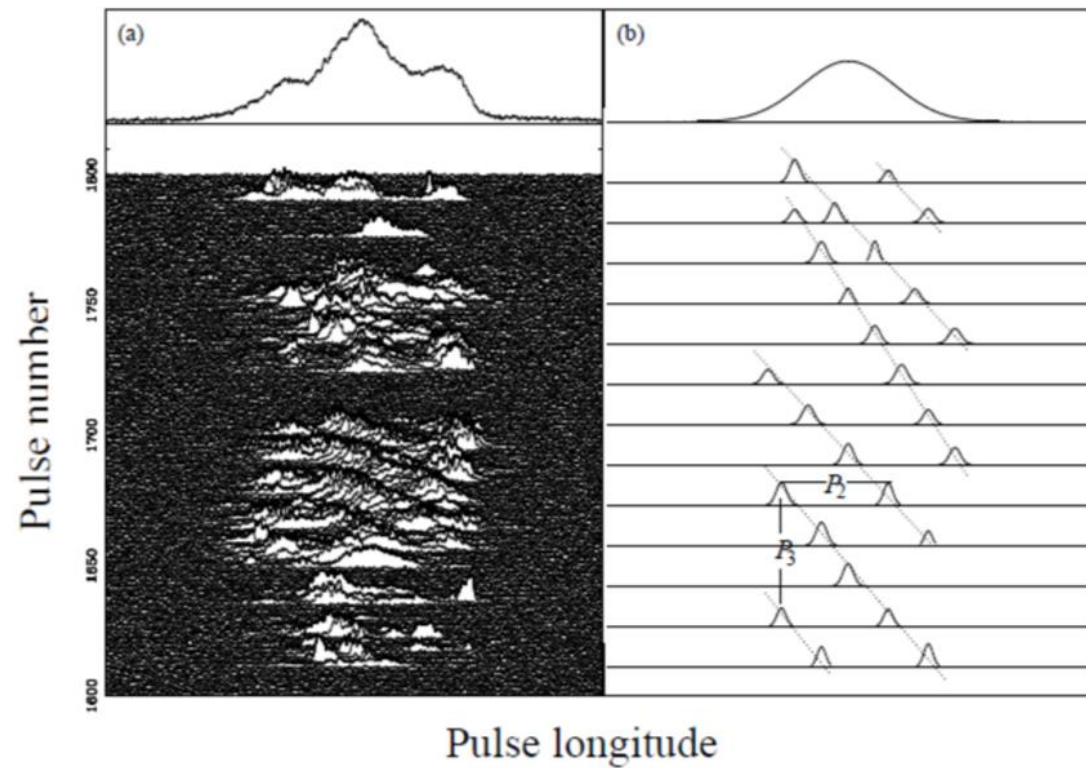


Левая часть: средний профиль пульсара J0357+3205, вертикальная ось показывает отношение C/Ш, горизонтальная – меру дисперсии. Максимум попадает на DM=46-48 пк/см³. Правая часть: средний профиль пульсара J0357+3205 с двойным периодом за 23.12.2016. По вертикальной оси отложены плотности потока в условных единицах, по горизонтальной – фаза, которая показывает распределение энергии в двойном профиле.

1. Разработаны новые методы поиска радиоизлучения пульсаров. Результатом применения этих методов стало обнаружение 79 новых пульсаров.
2. Методом суммирования спектров мощности и периодограмм проведен поиск радиоизлучения в метровом диапазоне длин волн для пяти гамма-пульсаров. Обнаружено радиоизлучение для гамма-пульсара J0357+3205. Дана верхняя оценка интегральной плотности потока на частоте 111 МГц для пяти гамма-пульсаров.

Результаты первой главы входят в следующие статьи:

- *Тюльбашев С.А., Тюльбашев В.С., Китаева М.А. и др. (АЖ, 2017, 94, 10)*
- *Тюльбашев С.А., Китаева М.А., Тюльбашев В.С. и др. (АЖ, 2020, 64, 6)*
- *Tyul'bashev S.A., Kitaeva M.A., Tyul'basheva G.E. (MNRAS, 2022, 517, 1)*
- *Tyul'bashev S.A., Tyul'basheva G.E., Kitaeva M.A. (MNRAS, 2024, 528, 2)*
- *Тюльбашев С.А., Китаева М.А. (КСФ, 2019, 7)*
- *Тюльбашев С.А., Китаева М.А., Тюльбашева Г.Э. (АЖ, 2021, 98, 10)*



Пример проявления периода P_2 в суммарном спектре мощности пульсара J0528+2200

Рисунок взят из книги Handbook of Pulsar Astronomy, D. R. Lorimer, M. Kramer, Cambridge University Press, 2005

Поиск периодов P2 и P3 проведен для 41 пульсара с $СШ > 10$ на интервале наблюдений 5.5 лет.

Пересмотрены оценки P2 и P3 для пульсаров из работы Malofeev V.M., Tyulbashev S.A. «Investigation of radio pulsar emission features using power spectra», 2018г.

Модель: на временном интервале T (204с) формировалась последовательность импульсов с периодом P1 (амплитуда импульсов, полуширина $W_{0.5}$).

2 варианта: 1) постоянная амплитуда импульсов и 2) случайное распределение амплитуды импульсов. В каждом периоде задавался 1 или 2 субимпульса с интервалом между ними P2 мс. Учитывалось направление дрейфа.

1 субимпульс - 2 варианта: 1) при отсутствии дрейфа предполагалось ($P2=0$); 2) субимпульс смещается со скоростью P2/P3 (фазовый сдвиг импульсов в течение одного периода пульсара).

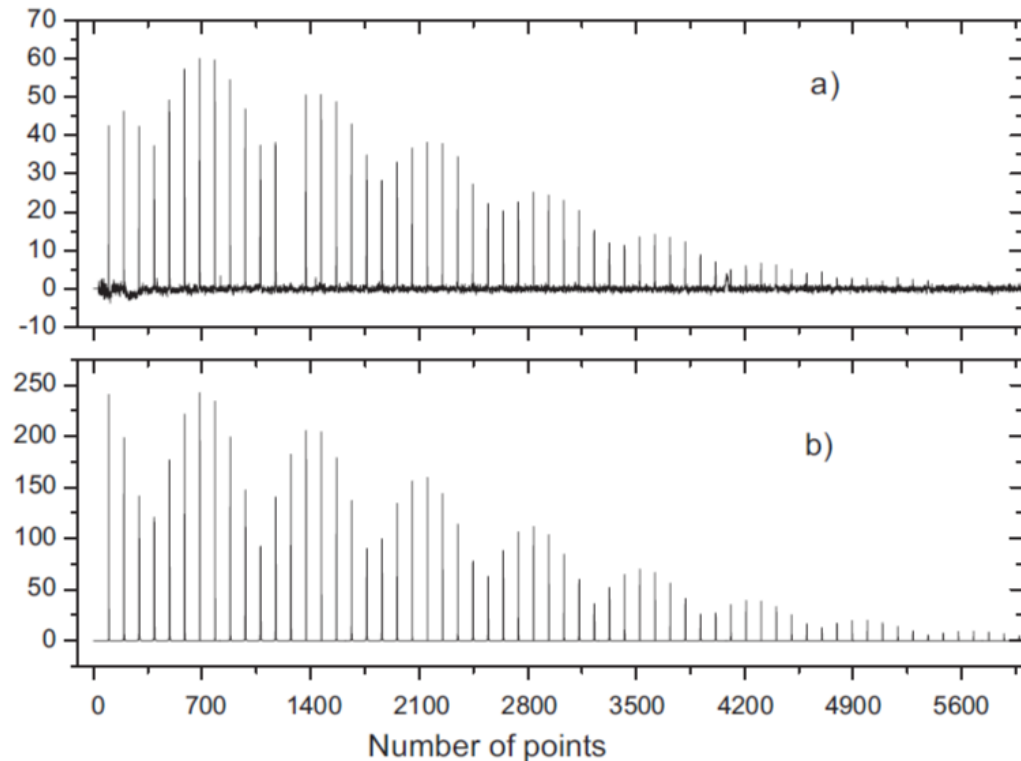
В спектре мощности P2 проявляется как периодическая модуляция основных гармоник с периодом $k_{P2} = T/P2$

P3 отображается в виде дополнительных гармонических сателлитов с интервалом $r = T/(P3*P1)$ от основных гармоник.

Положение главной гармоники в спектре мощности определяется как $T/P1$.

Результаты моделирования

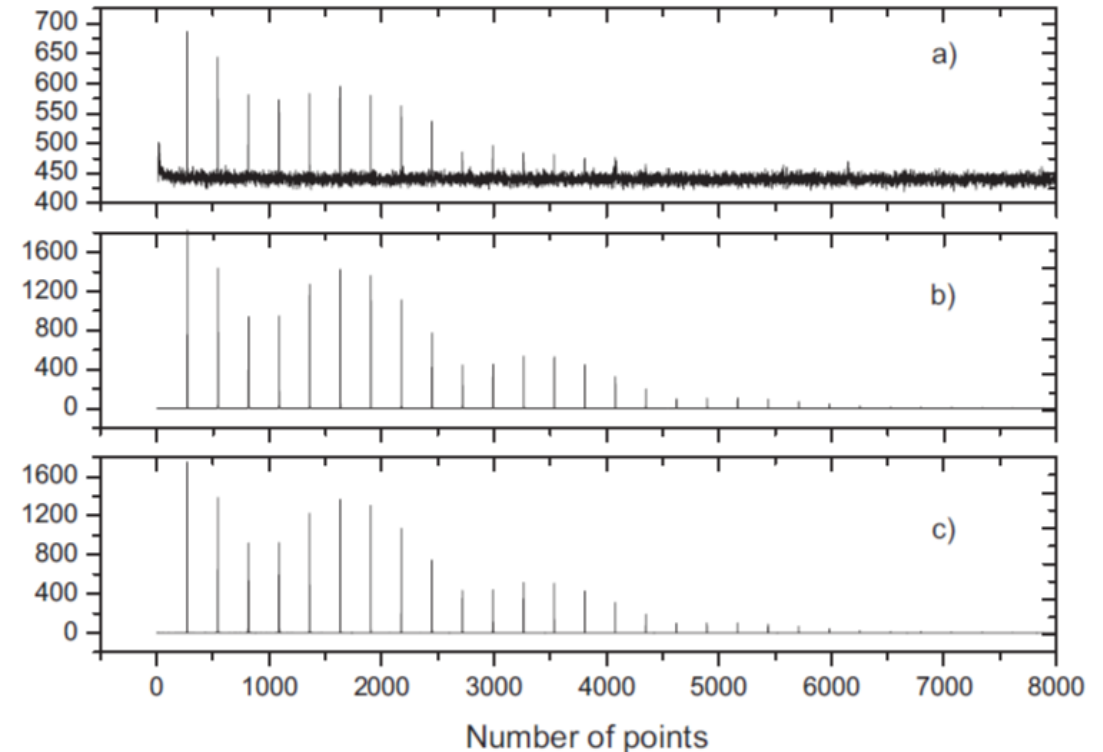
Периодическая модуляция не всегда связана с дрейфом.



Суммарный и смоделированный спектры мощности для пульсара J0928+3037. Горизонтальная ось – количество точек в спектре, вертикальная – амплитуда гармоник в произвольных единицах.

Модельный спектр: $P=2.0915$, $W_{0.5}=12.5$ мс, $P_2=0$
 $T/P_1=97.845 \Rightarrow$ 6, 7 и 8 гармоники (и кратные им) имеют значения положения гармоник, наиболее близкие к целому числу: 587.07, 684.92 и 782.76

Случайные изменения амплитуд начальных импульсов не влияют на распределение амплитуд гармоник спектра мощности



Суммарный и смоделированные спектры мощности для пульсара J1823+0550. $P_1=0.75291$ с, $P_2=0$

Модельный спектр:

b) без амплитудно-импульсной модуляции

c) с 50% -ой амплитудно-импульсной модуляцией

Полученные оценки периодов дрейфа

PSR	P_1 , (s)	P_2 (LPA), (ms)	P_2 (W06), (ms)	P_3 (LPA)	P_3 (W06)
J0034-0721 (Dif)	0.9429	-63 ± 5	-105^{+5}_{-131}	13.6 ± 0.4	8.3 ± 0.3
J0304+1932 (Dif*)	1.3875	69.4^{+5}_{-6}	-135^{+27}_{-21}		5.2 ± 0.3
J0323+3944*(Coh)	3.0321	$+118 \pm 10$ (112 ± 13 M18)	152^{+42}_{-28}	8.44 ± 0.05 (8.4 ± 1.3 M18)	8.4 ± 0.1
J0528+2200* (Dif*)	3.7455	-190 ± 16 (200 ± 10 M18)	-200^{+20}_{-90} 520^{+580}_{-105}	$(4.9 \pm 0.5$ M18)	3.8 ± 0.7
J0611+3016*	1.4121			3.6 ± 0.5 (2.5 ± 0.2 M18)	
J0826+2637* (Dif*)	0.5307		80^{+60}_{-10}	5.2 ± 0.2 (5.7 ± 0.4 M18)	7 ± 2
J1136+1551* (Dif*)	1.1879	36 ± 3 (400 ± 70 M18)	430^{+400}_{-50}		3 ± 1
J1239+2452* (Dif*)	1.3824	$+62 \pm 5$ (60 ± 3 M18)	61^{+4}_{-9} -77^{+5}_{-11}	2.74 ± 0.03 (2.7 ± 0.1 M18)	2.7 ± 1
J1532+2745	1.1248	39 ± 3 (39 ± 2 M18)			
J1721+3524	0.8219	117^{+8}_{-11}			
J1921+2153*(Dif)	1.3373	$< - 40 $ (33 ± 1 M18)	-13 ± 1 -41 ± 4	4.1 ± 0.06 (4.2 ± 0.5 M18)	4.4 ± 0.1
J2046+1540 (Dif*)	1.1383	52 ± 8	$-22^{+1.6}_{-4.4}$		18 ± 6
J2227+3030	0.8424	105 ± 10 (105 ± 15 M18)			
J2234+2114	1.3574			25 ± 2 (23.3 ± 3.5 M18)	

M18 - Malofeev V.M., Tyul'bashev S.A. «Investigation of radio pulsar emission features using power spectra», 2018r.
W06 - Weltevrede P., Edwards R. T., Stappers B. W. «The subpulse modulation properties of pulsars at 21 cm» 2006r.

1. Проведен поиск дрейфовых периодов по суммарным спектрам мощности для 41 пульсара. Определен период P_2 для 11 пульсаров. Направление дрейфа и значение P_3 получено для 7 пульсаров
2. Показано, что случайные изменения амплитуд начальных импульсов практически не влияют на распределение амплитуд гармоник спектра мощности.
3. Показано, что в некоторых случаях периодическая модуляция не связана с дрейфом.

Результаты второй главы опубликованы в статье

- *Smirnova T.V., Tyul'bashev S.A., Kitaeva M.A., Malofeev V.M.*

"Pushchino multibeam pulsar search III. Drift periods of pulsars from summed power spectra method"

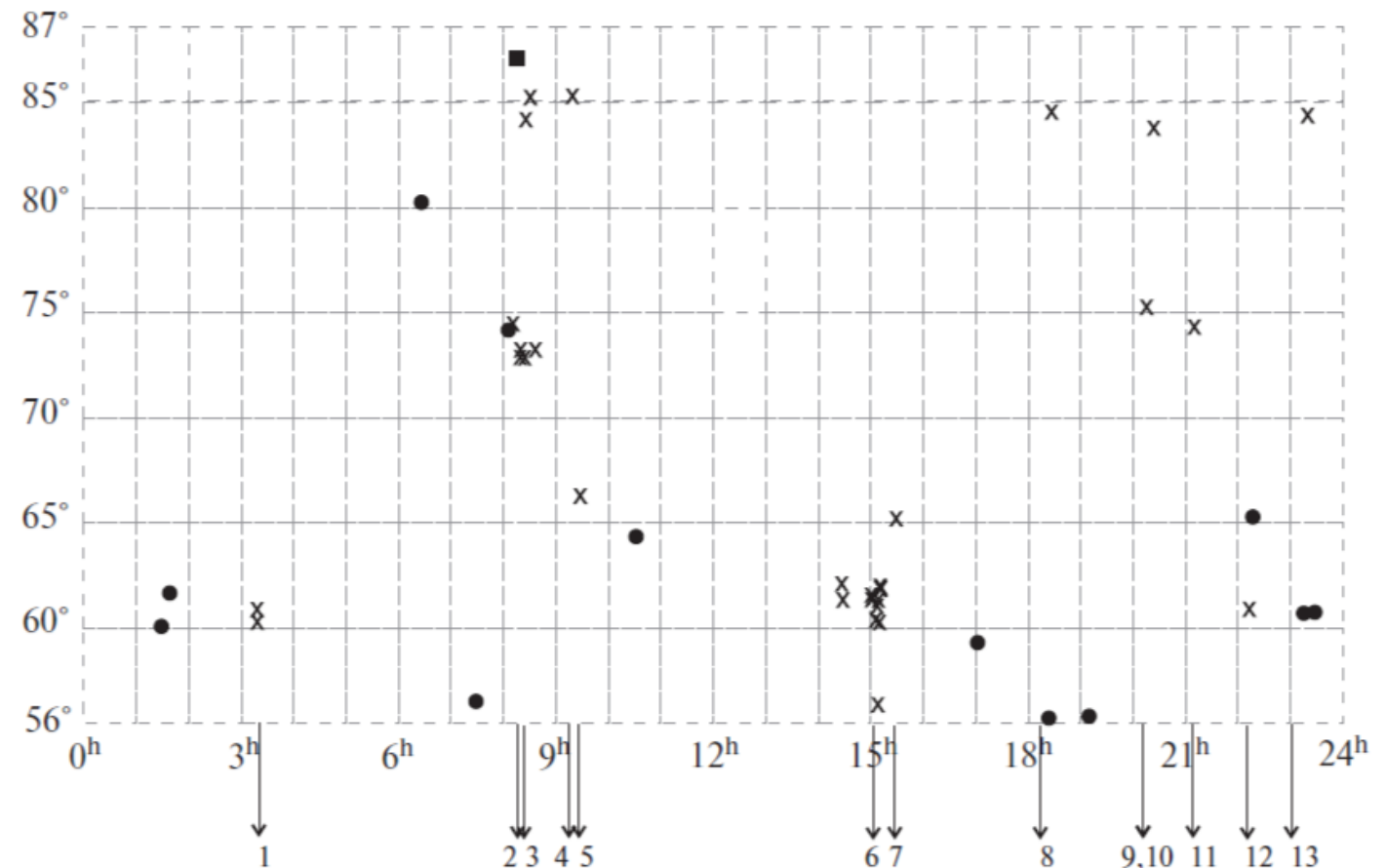
MNRAS 2024, 528, 1, 726-734

Поиск диспергированных импульсов на БСА1 в площадке $+56^{\circ} < \delta < +87^{\circ}$

Обнаружено 75 направлений на небе, испускающих диспергированные сигналы

- x – 13 пульсаров, наблюдаемых в боковых лепестках БСА
- – 12 известных пульсаров, наблюдаемых в своих лучах
- – новый RRAT J0812+8626

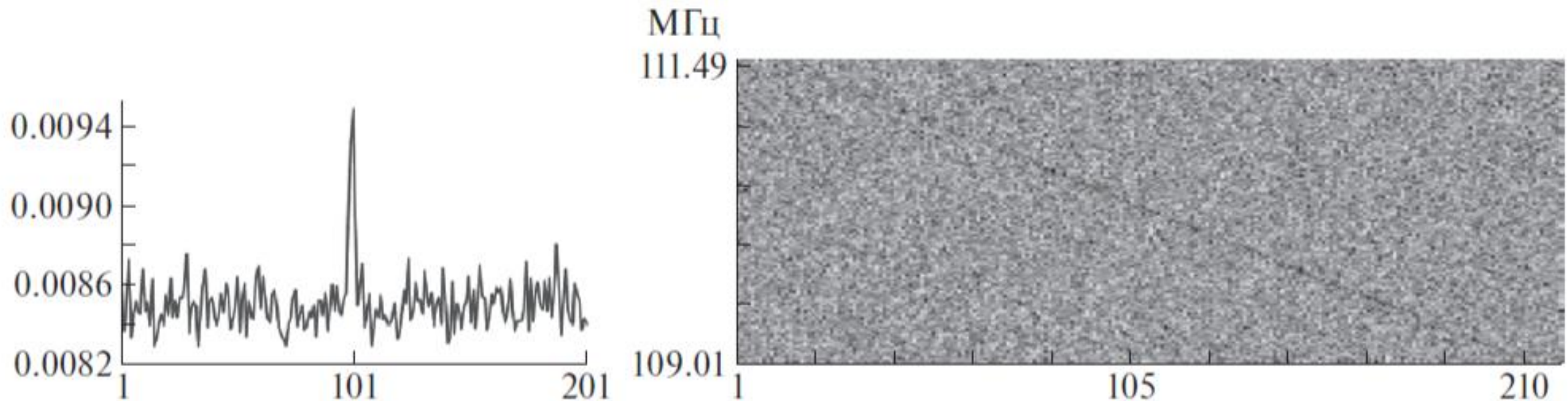
Для нового RRAT и 12-ти пульсаров
посчитаны плотности потока с
использованием калибровочных
источников (Пушинский каталог
дискретных источников,
Дагкесаманский Р.Д и др., АЖ, 2000г.)



Поиск диспергированных импульсов на БСА1 в площадке $+56^{\circ} < \delta < +87^{\circ}$

Новый RRAT J0812+8626:

2 импульса с $DM = 40.25 \pm 0.25$ пк/см³, $S_p = 10$ и 4.5 Ян, полуширина профиля $W_{0.5} = 10$ мс,

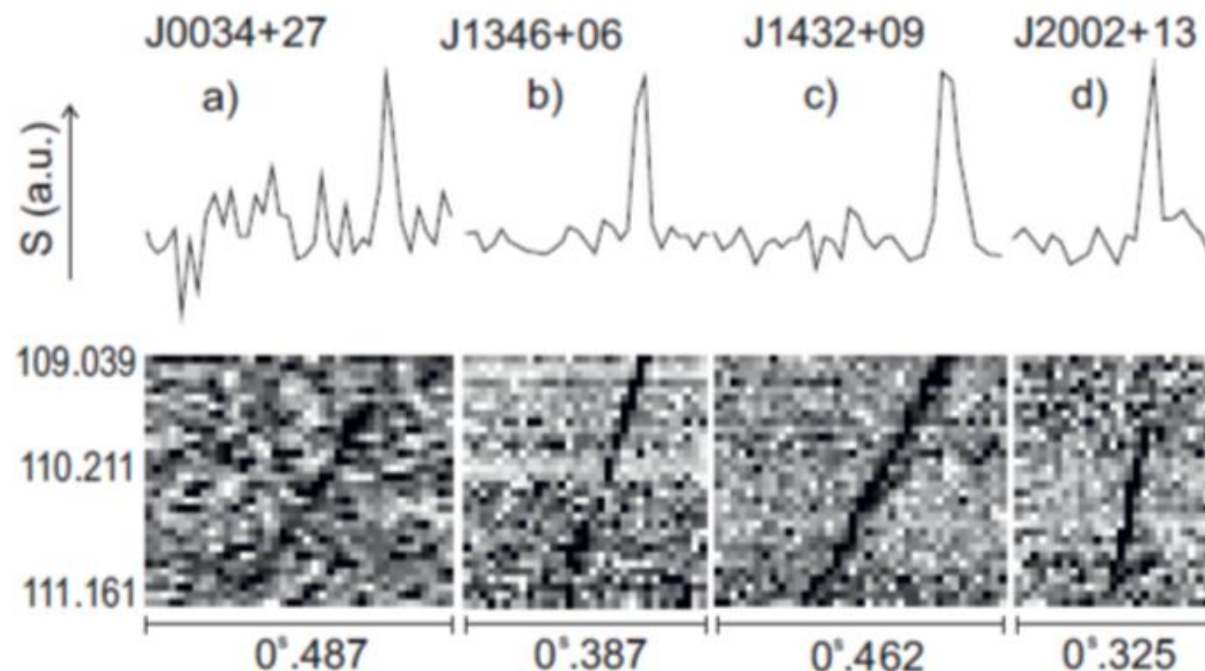


Профиль сильнейшего импульса и динамический спектр для J0812+8626. По горизонтали – длительность записи в точках, по вертикали слева – плотность потока в у.е., справа – частота.

Впервые проведен поиск RRAT с помощью нейронной сети

Обработанные данные за полгода наблюдений: $6 \cdot 10^5$ динамических спектров
=> 9000 изображений

2/3 изображений – для обучения сети, 1/3 – для ее тестирования



Профили и динамические спектры новых RRAT.

Вертикальная ось на верхней части показывает плотность потока в у.е., а на динамических спектрах - частоты каналов. По горизонтальной оси под каждым динамическим спектром показана продолжительность записи в секундах.

Результат:

- Нейронная сеть уменьшила количество помех в 80 раз;
- Потеря реальных импульсов не превышает 6%
- Нейронной сетью **обнаружены 4 новых RRATs** с показателями дисперсии 5-16 пк/см³

Как проявляются межпланетных мерцания:

- 1) для некоторых RRATs происходит усиление слабых сигналов за счет мерцаний (Smirnova T.V., Tyul'bashev S.A., Brylyakova E.A., Kitaeva, M.A. et. al., MNRAS 2022г.): для 6 из 16 исследованных RRAT количество наблюдаемых импульсов увеличивается от 2 до 10 раз на элонгациях $\epsilon = 30^0 \pm 10^0$;
- 2) может проявляться как увеличение, так и уменьшение числа наблюдаемых импульсов из-за межпланетных мерцаний, то есть происходит увеличение или уменьшение энергии отдельных импульсов => можно говорить об оценке индекса мерцаний, который отражает эти изменения в числовом виде;
- 3) состоит в искажении зависимости распределения импульсов по энергиям.

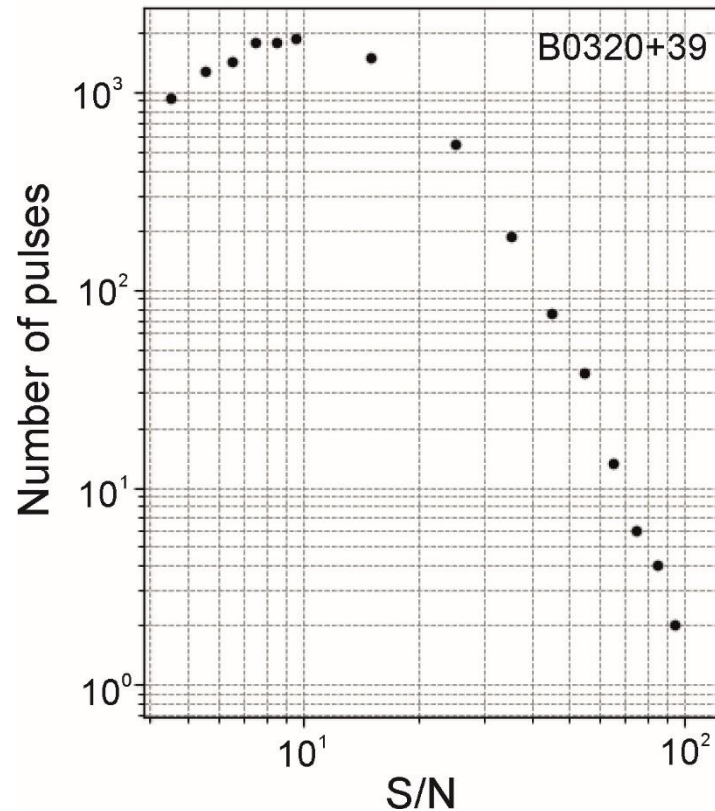
Исследовались 2 RRATs: J0609+16, J1132+25 и пульсар B0320+39 (данные за 8 лет)

Для расчета индекса мерцаний использовалось уравнение, выведенное И.В. Чашеем:

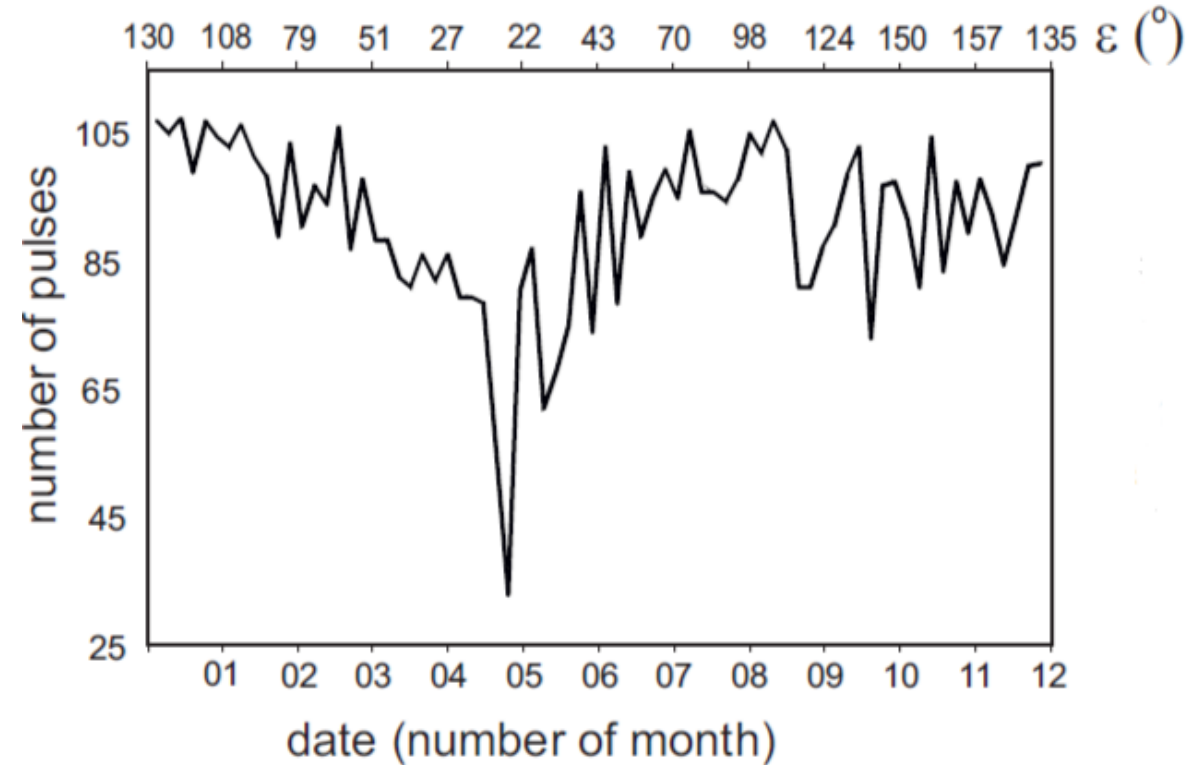
$$m = \frac{N_{obs} - N_0}{2(\alpha - 1)N_0}$$

N_{obs} – общее наблюдаемое кол-во импульсов, N_0 – среднее число импульсов вне зоны оптимальных элонгаций, α – спектральный индекс.

Величина изменения количества импульсов зависит от формы функции распределения энергии.



Логнормальное распределение энергии импульсов для пульсара B0320+39. Вертикальная ось – количество обнаруженных импульсов, горизонтальная – отношение С/Ш для этих импульсов.



Количество наблюдаемых импульсов (вертикальная ось) от даты и элонгации (горизонтальные оси) для пульсара B0320+39.

1. Поиск диспергированных импульсов привел к обнаружению 12-ти источников импульсного излучения и одного нового RRAT. Исследования полуширин средних профилей и сильнейших импульсов обнаруженных пульсаров показали, что 3 из них могут оказаться пульсарами с гигантскими импульсами.
2. В поиске RRAT с помощью нейронной сети найдено 4 новых RRAT. Показано, что применение нейронной сети уменьшает количество помех в 80 раз, а потери реальных импульсов не превышают 6% от общего числа.
3. Рассмотрено влияние межпланетной плазмы на проходящее через нее импульсное излучение. Показано, что при наблюдениях на частоте 111 МГц на элонгациях 20° - 40° наблюдается как увеличение, так и уменьшение количества принимаемых импульсов. Изменение количества импульсов объясняется искажением распределения энергии импульсов из-за межпланетных мерцаний. Впервые разработан метод оценки индекса мерцаний по наблюдениям отдельных импульсов пульсаров.

Результаты третьей главы входят в следующие статьи:

- *Тюльбашев С.А., Китаева М.А., Логвиненко С.В., Тюльбашева Г.Э. "Поиск диспергированных импульсов ..." (АЖ, 2021, 98, 12)*
- *Tyul'bashev S.A., Pervukhin D.V., Kitaeva M.A. "Revisiting the Pushchino RRAT search ..." (A&A, 2022, 664, A37)*
- *Tyul'bashev S.A., Chashei I.V., Kitaeva M.A. "Interplanetary scintillation and pulsar pulse statistics" (MNRAS, 2023, 523, 1)*

Положения, выносимые на защиту

1. С использованием разработанных методов обработки данных проведен поиск пульсаров. Результатом поиска является открытие 79 новых пульсаров. Найдено радиоизлучение для гамма-пульсара J0357+3205 и дана верхняя оценка интегральной плотности потока на частоте 111 МГц для пяти гамма-пульсаров.
2. Определен период P2 для 11 пульсаров. Направление дрейфа и значение P3 получено для 7 пульсаров.
3. Впервые проведен поиск RRAT с помощью нейронной сети на склонениях от -9° до $+42^\circ$. Обнаружены 4 новых радиотранзиента. Показано, что использование нейронной сети позволяет уменьшить количество помех в просматриваемых данных в 80 раз, а потеря реальных импульсов не превышает 6%. Проведен поиск диспергированных импульсов на склонениях $+55^\circ$ до $+87^\circ$, обнаружены 12 источников импульсного излучения, являющихся известными пульсарами, и один новый RRAT (J0812+8626). Для двух пульсаров уточнена мера дисперсии.
4. Рассмотрено влияние межпланетной плазмы на проходящее через нее импульсное излучение одного пульсара и проанализированы импульсы 2-х вращающихся радиотранзиентов. Показано, что при наблюдениях на частоте 111 МГц на элонгациях 20° - 40° наблюдается как увеличение, так и уменьшение количества принимаемых импульсов. Изменение количества импульсов объясняется искажением распределения энергии импульсов из-за межпланетных мерцаний.

Список публикаций

1. Тюльбашев С.А., Тюльбашев В.С., Китаева М.А. и др. "Поиск и обнаружение пульсаров в мониторинговых наблюдениях на частоте 111 МГц" (АЖ, 2017, 94, 10)
2. Тюльбашев С.А., Китаева М.А., Тюльбашев В.С. "Обнаружение пяти новых пульсаров на радиотелескопе БСА ФИАН" (АЖ, 2020, 64, 6)
3. Tyul'bashev S.A., Kitaeva M.A., Tyul'basheva G.E. "Pushchino multibeam pulsar search I. Targeted search of weak pulsars" (MNRAS, 2022, 517, 1)
4. Tyul'bashev S.A., Tyul'basheva G.E., Kitaeva M.A. "Pushchino multibeam pulsar search IV. Detection of new pulsars at declinations $-9^{\circ} > \delta > +55^{\circ}$ " (MNRAS, 2024, 528, 2)
5. Тюльбашев С.А., Китаева М.А. "Поиск периодического радиоизлучения гамма-пульсара J0357+3205 в индивидуальных записях на частоте 111 МГц" (КСФ, 2019, 7)
6. Тюльбашев С.А., Китаева М.А., Тюльбашева Г.Э. "Поиск периодического радиоизлучения у пяти гамма-пульсаров на частоте 111 МГц" (АЖ, 2021, 98, 10)
7. Smirnova T.V., Tyul'bashev S.A., Kitaeva M.A. "Pushchino multibeam pulsar search III. Drift periods of pulsars from summer power spectra method" (MNRAS, 2024, 528, 1)
8. Тюльбашев С.А., Китаева М.А., Логвиненко С.В., Тюльбашева Г.Э. "Поиск диспергированных импульсов на склонениях от $+56^{\circ}$ до $+87^{\circ}$ " (АЖ, 2021, 98, 12)
9. Tyul'bashev S.A., Pervukhin D.V., Kitaeva M.A., Tyul'basheva G.E. "Revisiting the Pushchino RRAT search using a neural network" (Astronomy and Astrophysics, 2022, 664)
10. Tyul'bashev S.A., Chashei I.V., Kitaeva M.A. "Interplanetary scintillation and pulsar pulse statistics" (MNRAS, 2023, 523, 1)

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих Всероссийских конференциях:

1. Всероссийская конференция "Физика звёзд в эпоху многоволновых наблюдений" (Санкт-Петербург, сентябрь 2025 г.)
2. Всероссийская конференция "Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр" (п. Нижний Архыз, САО РАН, август 2024 г.)
3. Всероссийская конференция "Физика нейтронных звёзд" (Санкт-Петербург, июль 2023 г.)
4. Всероссийская конференция "Наземная астрономия в России. XXI век" (п. Нижний Архыз, САО РАН, сентябрь 2020 г.)
5. Всероссийская астрофизическая конференция "Астрофизика высоких энергий" (Москва, ИКИ, декабрь 2018 г.)
6. Всероссийская астрономическая конференция--2017 "Астрономия: познание без границ" (Ялта, сентябрь 2017 г.)

Личный вклад

Вклад автора является основным в следующих результатах, вынесенных на защиту: вычисление периодов и мер дисперсий пульсаров, вычисление плотностей потока пульсаров, визуальный поиск пульсаров и радиотранзиентов. Анализ и интерпретация полученных результатов совместно с руководителем и другими соавторами делался в равных долях. Текст статей в части, касающейся наблюдений и обработки данных, делался автором самостоятельно. Большая часть рисунков, графиков и гистограмм в работах подготовлены автором самостоятельно.

Достоверность результатов

Результаты, представленные в диссертации, были получены с использованием известных в мире и апробированных методов наблюдений и обработки данных. Часть обнаруженных нами новых пульсаров подтверждена на других крупнейших радиотелескопах (LOFAR, MWA, FAST и др.)

Регистрация радиоизлучения от гамма-пульсара J0357+3205 с характеристиками, близкими к характеристикам, полученным в работах других авторов на разных частотах [Abdo2009, Marelli2013, Wang2018], подтверждает, что наши методы регистрации и обработки наблюдений, как и наши инструменты, способны составить конкуренцию ведущим исследователям.

На опубликованные работы на сегодняшний день имеется более ста положительных ссылок в ведущих журналах, включая зарубежные, например:

- Andrade, Christopher et.al., 2025, The Astrophysical Journal, Volume 990, Issue 1, id.50, 22 pp.;\\
- Han, J. L. et.al., 2025, Research in Astronomy and Astrophysics, Volume 25, Issue 1, id.014001, 56 pp.;\\
- Ridnaia, A. et.al., 2024, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 527, Issue 3, pp.5580-5587;\\
- van der Wateren, E. et.al., 2023, Astronomy & Astrophysics, Volume 669, id.A160, 16 pp.;\\
- Kontar, Eduard P. et.al., 2023, The Astrophysical Journal, Volume 956, Issue 2, id.112, 20 pp.;\\
- McKenna, D. J. et.al., 2024, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 527, Issue 3, pp.4397-4419;\\
- Tanashkin, A. S. et.al., 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 516, Issue 1, pp.13-25;\\
- Malofeev, V. M. et.al., 2022, Research in Astronomy and Astrophysics, Volume 22, Issue 3, id.035010, 12 pp.;\\
- Teplykh, D. et.al., 2020, Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Proceedings of the All-Russian Conference held 21-25 September, 2020, p. 446-450;\\
- Zhao, Rushuang et.al., 2023, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 521, Issue 2, pp.2298-2325;\\
- Xu, Jun et.al., 2022, Science China Physics, Mechanics & Astronomy, Volume 65, Issue 12, article id.129704;\\
- Malofeev, V. M. et.al., 2022, Research in Astronomy and Astrophysics, Volume 22, Issue 3, id.035010, 12 pp.;\\
- Perera, B. B. P. et.al., 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 509, Issue 2, pp.1929-1939

Научная и практическая значимость

Все ведущие исследования пульсаров проводились на более высоких частотах, чем имеет радиотелескоп БСА ФИАН. Проведение новых низкочастотных обзоров, таких, как наш обзор, поможет разрешать существующие на сегодняшний день нерешенные задачи, такие, как более полное исследование ближней популяции пульсаров, поиск пульсаров с экстремальными свойствами, поиск новых типов этих объектов, исследование свойств у разных выборок пульсаров, а также поможет получить новые модели популяционного синтеза и другие.

Результаты работы используются ведущими наблюдателями и теоретиками во всем мире, например:

Han J. L., Sanidas S., Malov I.F., Malofeev V.M., Wang Chen, Tan C.M., Cooper S., Bassa C. G.

Спасибо за внимание

Замечания ведущей организации

- 1) В главе 1, в частности в разделе 1.2 подробно исследуется влияние разных факторов на зависимость отношения сигнала к шуму от времени при регистрации пульсаров (рис. 1.6). Однако при этом не упоминается влияние векового изменения (то есть производной) периода пульсара. По всей видимости, оно несущественно на рассматриваемом периоде наблюдений (несколько лет). Но все же стоило бы привести оценку амплитуды эффекта.
- Оценка амплитуды эффекта векового изменения периода пульсара ($\dot{P}$) для рассматриваемого интервала наблюдений Δt пять лет:

Типичное значение $\dot{P} \sim 10^{-15}$ (для обычных пульсаров)

Приращение периода: $\Delta P = \dot{P} * \Delta t = 10^{-15} * (3 * 10^7 * 5) = 15 * 10^{-8}$

Относительное изменение: $\Delta P / P \sim 10^{-8} / P \sim 10^{-8}$ – эффект пренебрежимо мал и не влияет на оценку P

- 2) Таблица 8 очень важна, так как подытоживает результаты поиска пульсаров в данной работе. Однако ее можно было сделать более удобной для чтения и использования в последующих исследованиях. Эта таблица является расширенной компиляцией представленных выше по тексту таблиц 1, 2, 4 и 5, в каждой из которых приведены результаты измерений для той или иной подвыборки пульсаров. При этом отдельно и в разных форматах (иногда в основном тексте рядом с таблицей, а иногда внутри таблицы) для каждой подвыборки сообщалось о точности определения координат, периода и других характеристик пульсаров. Было бы хорошо привести все погрешности измерений прямо в итоговой таблице 8.
- Согласно с замечанием. Это было сделано из желания не загромождать итоговую таблицу.

- 3) В тексте хоть и редко, но встречаются опечатки и небольшие ошибки. Так, на стр. 25, по-видимому, имеется в виду, что скорость потока данных составляет 2.76 Мб, а не Гб, в секунду.

В тексте:

Каждая FPGA параллельно обрабатывает потоки данных, поступающие от 8 АЦП, с общей скоростью потока 2.76 ТБ в секунду. В этом случае используются около 80% возможностей FPGA. Выходной поток данных, записываемых на жесткие диски со всех трех регистраторов, составляет 4.65 ГБ в час, 115 ГБ в сутки и 39.8 ТБ в год.

$230 * 1,5 * 8 = 2.76$ ТБ – это входной поток данных, где 230 МГц – частота оцифровки, 12 бит АЦП = 1.5 байта, обрабатывается сразу 8 потоков данных

Замечания оппонента Пширкова М.С.

- Основное замечание, которое возникает при чтении диссертации – недостаточно четко произведена оценка статистической значимости: в ходе поиска осуществляется перебор по большому количеству направлений и значений мер дисперсии, что уменьшает глобальную значимость. Достаточно ли выбранного значения отношения СШ для исключения ложноположительных кандидатов?

- Для оценки количества случайных совпадений можно использовать пуассоновское распределение:

$$P_n(k) = \frac{\lambda^k}{k!} \cdot e^{-\lambda} \quad \begin{array}{l} \lambda = n * p - \text{среднее число появлений события в } n \text{ испытаниях (число ложных обнаружений)} \\ p - \text{вероятность обнаружения, } k - \text{количество совпадений.} \end{array}$$

Для одной нашей площадки наблюдений, 32 канала, данные за 6 месяцев, принимаем вероятность обнаружения ложного источника $p=0,001$ и считаем, что это достаточно надежное условие:

$СШ=7.7$ $p=0,000697$, то есть $СШ \geq 7.7$ - достаточно однократного детектирования, чтобы считать обнаружение надежным;

$СШ=5.3$ $p=0,00077$ – нижняя граница для 2-х совпадений, то есть $5.3 < СШ < 7.7$ - необходимо иметь двукратное обнаружение:

$СШ=5.0$ $p=0,001066$ – нижняя граница для 3-х совпадений, то есть $5.0 < СШ < 5.3$ - необходимо иметь трехкратное обнаружение

Замечание 5:

- стр.25 «1.2 Поиск пульсаров методом усреднения спектров мощности.» Не сказано, на какой из диаграмм это осуществляется – БСА1?
- действительно не указана площадка, в которой проводился поиск: БСА3.

Замечание 11:

- стр.109 «но мы можем привести формальные оценки координат» Что такое формальные оценки координат?
- Это значит, что точность определения координат в данном случае очень низкая (найден всего 1 импульс) и определяется размером диаграммы направленности БСА. Поэтому мы указываем точность определения по альфа $\pm 2.5m$, по дельта $\pm 15'$, что близко к размерам диаграммы направленности БСА.

«Мелкие замечания» – 13 штук.

С замечаниями полностью согласна, есть среди них несколько вопросов.

Замечания оппонента Трушкина С.А.

С замечаниями 1, 3-7 согласна. Остальные - с вопросами:

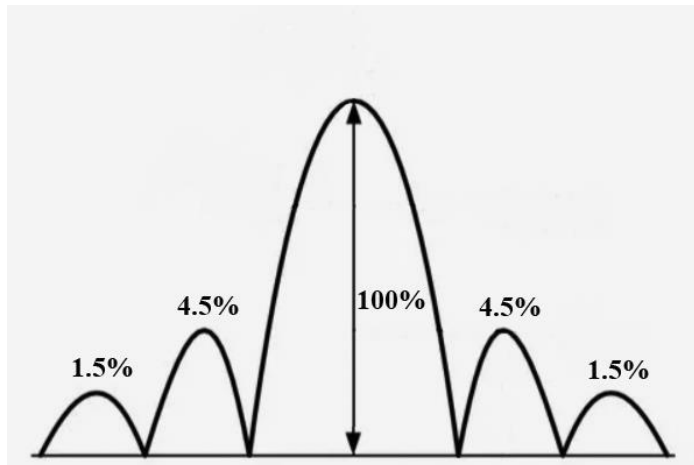
2) Не все процедуры обработки данных описаны подробно – например не оговорено, что собственно принимает телескоп – вероятно интенсивность в одной горизонтальной поляризации

- верно, у нас только одна линейная поляризация

Также не ясно, каков уровень боковых лепестков. Например, на рисунке 3.2 приведены 13 пульсаров, которые не входят в указанную площадку ($>56^\circ$), но регистрируются в боковых лепестках телескопа. Однако, склонения указанных пульсаров лежат на десятки градусов ниже указанного предела склонений. Значит ли это, что боковые лепестки антенны могут сильно осложнять поиск новых пульсаров?

- Действительно, импульсы, обнаруживаемые в боковых лепестках антенны, серьезно осложняют отождествление найденных пульсаров. Если в данный день обнаруживается несколько импульсов, то помимо меры дисперсии можно грубо оценить верхнее значение периода и, соответственно, получить возможные кратные периоды. Полученные оценки периода и меры дисперсии позволяют проверить попадающие в обзор сильные пульсары в качестве кандидатов на отождествление.

Уровень боковых лепестков:



8) Как можно понять из текста, суммируются именно сотни спектров мощности, а не сами записи, потому что не удастся учесть сдвиги на движение Земли день ото дня, то что называется приведением к барицентру. Существует ли теоретическая возможность такого подхода? Если нет, то почему?

- Проблема приведения к барицентру состоит в том, что из-за орбитального движения Земли и её вращения фаза сигнала от удалённого источника смещается от дня к дню. Точное приведение к барицентру Солнечной системы требует знания момента прихода сигнала с высокой точностью. Если эти сдвиги не удаётся корректно учесть, прямое суммирование временных записей (сырых данных) приведёт к «размазыванию» периодического сигнала и потере чувствительности. Преимущества работы со спектрами мощности: спектр мощности — это квадрат модуля преобразования Фурье, он не содержит фазовой информации, а отражает распределение мощности по частотам. Поэтому суммирование спектров мощности за разные дни устойчиво к неизвестным фазовым сдвигам: периодический сигнал проявляется как избыток мощности на определённой частоте, и этот избыток накапливается при суммировании.

В современных пульсарных наблюдениях поправки на барицентр вычисляются с точностью порядка $10^{-5} c$ и лучше. Наша точность определения P пульсара из-за временем записи сигнала составляет $\sim 10^{-4} c$.

С остальными мелкими замечаниями согласна.

Замечания оппонента Трушкина С.А.

- 6) Если судить по ряду западных работ, критика обнаружения пульсирующих источников на БСА ФИАН основана на малой полосе частот: 2.5 МГц (например, у LOFAR на схожей частоте 135 МГц она составляет 32 МГц). А это приводит к фактически линейным динамическим спектрам, то, что часто называют «водопадом» - который и должен выглядеть как спадающая парабола.
- Полоса 2.5 МГц делает дисперсионную кривую в динамическом спектре практически линейной, и отличить её от параболы невозможно. Узкая полоса ограничивает точность определения DM и затрудняет верификацию формы кривой, но не отменяет сам факт обнаружения сигналов, так как методика обнаружения опирается на комплекс независимых критериев:
- **Дисперсионный сдвиг:** сигнал приходит раньше на высокой частоте и позже на низкой — это проверяется по 32 частотным каналам даже в пределах 2.5 МГц.
- **Ограничение по лучам:** сигнал должен наблюдаться не более чем в двух соседних лучах диаграммы направленности. Помехи, как правило, видны во многих лучах одновременно.
- **Порог S/N :** в каждом канале отношение сигнал/шум должно превышать 6
- **Накопление по времени:** для периодических источников — повторяемость сигнала в разные дни наблюдений с одинаковым периодом и DM.
- **Отождествление с известными каталогами:** обнаруженные источники сверяются с ATNF.

Спасибо за внимание

Актуальность темы

Почти 60 лет прошло со дня открытия первого пульсара, но интерес ученых всего мира к этим объектам по-прежнему высок. Об этом говорит тот факт, что ежегодно появляется порядка тысячи публикаций, посвященных исследованиям пульсаров. Несмотря на это, очень многие вопросы по-прежнему остаются без ответов. Согласно теоретическим расчетам (Yusifov, A&A, 2004) количество радиопульсаров, доступных для обнаружения современными телескопами, оценивается как $(24 \pm 3) \cdot 10^3$, а полное число радиопульсаров в Галактике значительно больше и оценивается как $(240 \pm 30) \cdot 10^3$. В настоящее время каталог ATNF (ATNF Pulsar Catalogue) (Manchester, 2005) насчитывает более четырех тысяч этих объектов, из них более 200 пульсаров были обнаружены в Пушинской обсерватории, в том числе с участием автора этой диссертации. Оценки количества и расположения пульсаров имеют важное значение для понимания распределения и эволюции этих объектов в Галактике, а также для планирования будущих наблюдательных программ, направленных на обнаружение новых объектов этого класса.

Изучение пульсаров в диапазоне метровых волн представляет значительный научный интерес, поскольку позволяет глубже понять их энергетические характеристики. Это обусловлено тем, что у большинства пульсаров характерные завалы в спектрах на низких частотах проявляются примерно при частоте 100 МГц. Ключевым инструментом наших исследований выступает Большая синфазная антенна БСА ФИАН, обладающая впечатляющей эффективной площадью около 45 000 квадратных метров. Являясь крупнейшим в мире по эффективной площади радиотелескопом метрового диапазона, он предоставляет уникальные возможности для изучения пульсаров и обеспечивает исключительную чувствительность наблюдений.

Отсутствие достаточного количества чувствительных радиотелескопов для наблюдений на низких частотах создает значительный пробел в исследованиях пульсаров. Благодаря использованию БСА наши исследования занимают лидирующие позиции в мировой науке.

Научная новизна

В диссертации получен ряд новых результатов, которые представляют собой ценность в понимании природы пульсаров.

Методом усреднения Фурье-спектров мощности проведен поиск пульсаров с периодами больше 0.4 с на склонениях $-9^\circ < \delta < +42^\circ$, результатом которого стало обнаружение 18-ти новых пульсаров с мерами дисперсии от 5 до 84 пк/см³. Результаты исследования опубликованы в работе Тюльбашев С.А., Тюльбашев В.С., Китаева М.А. и др., *Астрономический журнал*, 2017, 94, 10, 837-848.

Итогом применения новой системы калибровки 6-канальных данных на интервале 5 лет было найдено еще 5 новых пульсаров. Показано, что при поиске пульсаров методом суммирования спектров мощности на пятилетнем интервале наблюдений в зависимости от выбранного направления на небе отношение сигнала к шуму вырастает в 20-30 раз. Результат исследования был опубликован в работе Тюльбашев С.А., Китаева М.А., Тюльбашев В.С., *Астрономический журнал*, 2020, 64, 6, 526-532.

В проведенном обзоре в данных с низким частотно-временным разрешением методом суммирования спектров мощности и периодограмм открыто 11 новых пульсаров. Для одного из них удалось получить средний профиль. Результат исследования был опубликован в работе Tyul'bashev S.A., Kitaeva M.A., Tyul'basheva G.E., *MNRAS*, 2022, 517, 1, 1112--1125.

Проведен поиск пульсаров с использованием суммированных спектров мощности по данным с высоким частотно-временным разрешением. Всего обнаружено 332 пульсара. Из них 45 оказались новыми пульсарами. Для 8 новых пульсаров получены средние профили. Для 7 ранее обнаруженных пульсаров уточнена DM. Результат исследования был опубликован в работе Tyul'bashev S.A., Tyul'basheva G.E., Kitaeva M.A. et. al., *MNRAS*, 2024, 528, 2, 2220--2231.

Методом суммирования спектров мощности и суммирования периодограмм проведен поиск радиоизлучения в метровом диапазоне длин волн для пяти гамма-пульсаров. Для одного из них найдено периодическое излучение в одном сеансе наблюдений. Впервые получена верхняя оценка плотности потока на частоте 111 МГц для всех пяти гамма-пульсаров. Результат исследования был опубликован в работах Тюльбашев С.А., Китаева М.А., *Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук*, 2019, 7, 21-25; Тюльбашев С.А., Китаева М.А., Тюльбашева Г.Э., *Астрономический журнал*, 2021, 98, 10, 849-855.

Научная новизна

С использованием суммированных спектров мощности найдены периоды дрейфа P2 и P3 для 41 пульсара на склонениях -9° до $+42^\circ$. Были смоделированы спектры мощности импульсов с заданным периодом, шириной импульсов и поведением дрейфа, показана применимость такого метода для оценки параметров дрейфа. Для 11 пульсаров определены или переопределены периоды дрейфа P2. Для 8 источников определен или переопределен период дрейфа P3, а также переопределено направление дрейфа субимпульсов. Результат исследования был опубликован в работе Smirnova T.V., Tyul'bashev S.A., Kitaeva M.A., Malofeev V.M., MNRAS, 2024, 528, 1, 726-734.

Проведен поиск диспергированных импульсов, в результате которого были обнаружены 12 источников импульсного излучения, являющихся известными пульсарами, и один новый RRAT (J0812+8626). Для двух пульсаров уточнена мера дисперсии. Исследования полуширин средних профилей и сильнейших импульсов обнаруженных пульсаров показали, что четыре из них могут оказаться пульсарами с гигантскими импульсами. Результат исследования был опубликован в работе Тюльбашев С.А., Китаева М.А., Логвиненко С.В., Тюльбашева Г.Э., Астрономический журнал, 2021, 98, 12, 1010-1018.

С использованием нейронной сети проведен поиск RRAT в полугодовых мониторинговых данных на антенне БСА ФИАН, в результате которого были открыты 4 новых радиотранзиента. Использование нейронной сети показало, что с ее помощью можно уменьшить количество помех в просматриваемых данных в 80 раз, а потери реальных импульсов пульсаров не превышает 6% от их общего числа. Результат исследования был опубликован в работе Tyul'bashev S.A., Pervukhin D.V., Kitaeva M.A., Tyul'basheva G.E., Astronomy and Astrophysics, 2022, 664, A37.

Рассмотрено влияние межпланетной плазмы на проходящее через нее импульсное излучение пульсара. Проанализированы импульсы двух вращающихся радиотранзиентов. Показано, что при наблюдениях на частоте 111 МГц на элонгациях 20° - 40° наблюдается как увеличение, так и уменьшение количества принимаемых импульсов. Изменение количества импульсов объясняется искажением распределения энергии импульсов из-за межпланетных мерцаний. Получены аналитические выражения, позволяющие оценить индекс мерцаний по результатам наблюдений отдельных импульсов для распределения мощности импульсов по энергиям. Результат исследования был опубликован в работе Tyul'bashev S.A., Chashei I.V., Kitaeva M.A., MNRAS, 2023, 523, 1, 1389-1393.