

Астрокосмический Центр Физического Института им. П. Н. Лебедева
Российской Академии Наук

ЗОНДИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ ГИГАНТСКИМИ ИМПУЛЬСАМИ ПУЛЬСАРА В КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ

Алексей Рудницкий

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия

Научный руководитель:
д.ф.-м.н. Попов Михаил Васильевич



Цель работы

Исследовать структуру межзвездной среды и измерить параметры рассеяния с помощью методов наземно-космического РСДБ миссии «Радиоастрон» в направлении на пульсар B0531+21, который расположен в Крабовидной туманности, а также изучить свойства индивидуальных гигантских импульсов данного пульсара.

Содержание работы

- **Введение**
- **Глава 1**
Гигантские импульсы пульсара в Крабовидной туманности
- **Глава 2**
Распространение радиоизлучения гигантских импульсов в космической плазме
- **Глава 3**
Радиоинтерферометрические наблюдения гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности в миссии “Радиоастрон”
- **Глава 4**
Исследование свойств гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности
- **Глава 5**
Зондирование космической плазмы гигантскими импульсами пульсара в Крабовидной туманности
- **Заключение**

Глава 1. Гигантские импульсы пульсара в Крабовидной туманности

Впервые обнаружен в 1968 году [*].

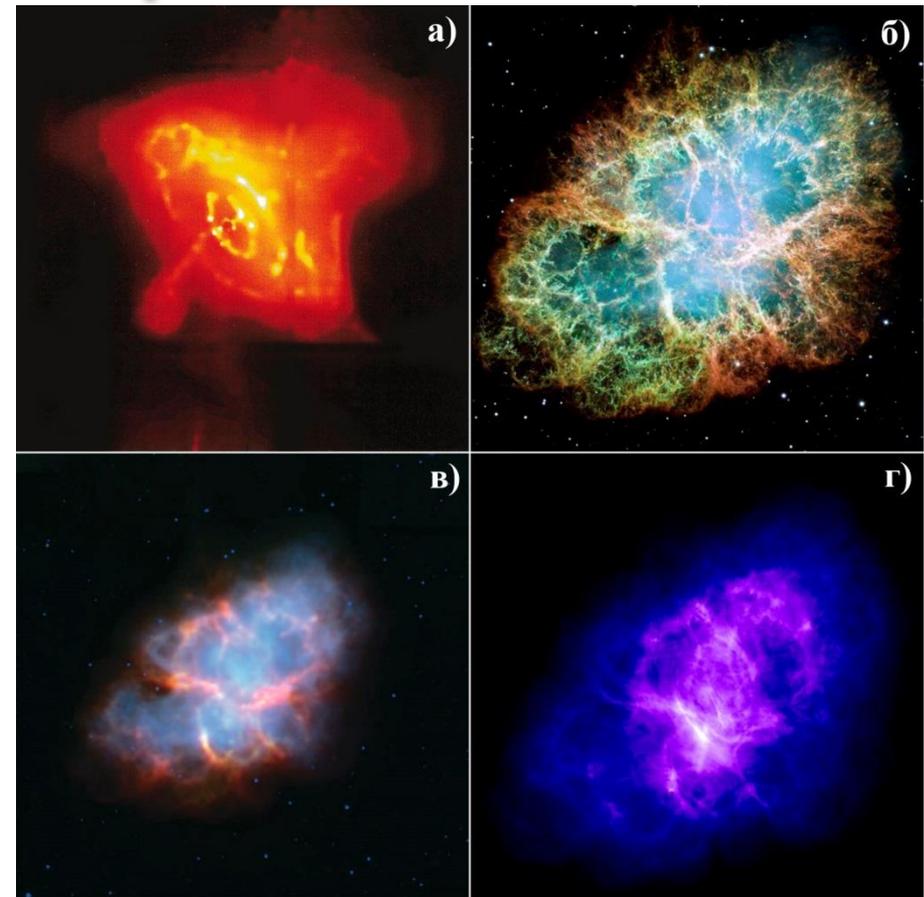
Координаты:

$\alpha = 05:34:31.973$, $\delta = +22:00:52.06$

Период: $P \sim 0.0331$ сек.

Мера дисперсии: $DM = 56.791$ пк/см³.

Располагается в Крабовидной туманности – остаток сверхновой SN 1054 на расстоянии 2 кпк от Солнца.



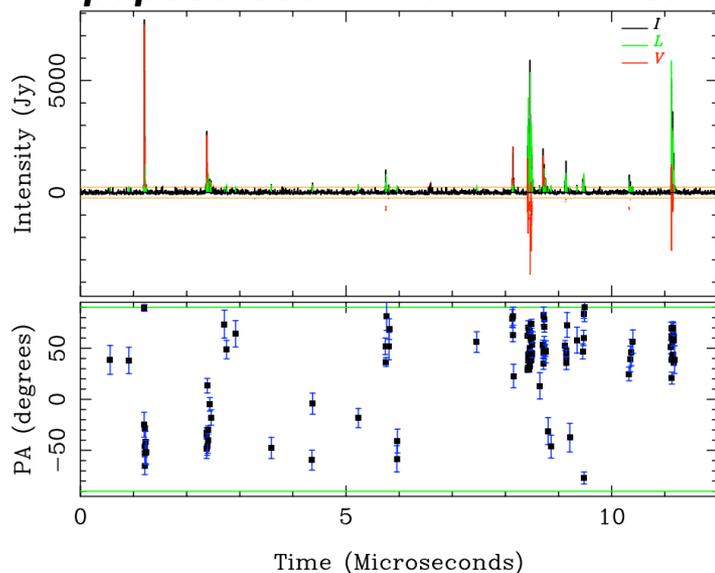
Изображения Крабовидной туманности, полученные в разных диапазонах электромагнитного спектра: а) – рентгеновский диапазон (NASA/CXC/SAO), б) – оптический диапазон (Пол Скоуэн и Джефф Хестер (Национальный университет Аризоны), Паломарская обсерватория), в) – инфракрасный диапазон (Spitzer), г) – радиодиапазон (NRAO/VLA).

[*] Staelin David H., III Edward C. Reifenstein. Pulsating Radio Sources near the Crab Nebula // Science. — 1968. — Vol. 162, no. 3861. — Pp. 1481–1483.

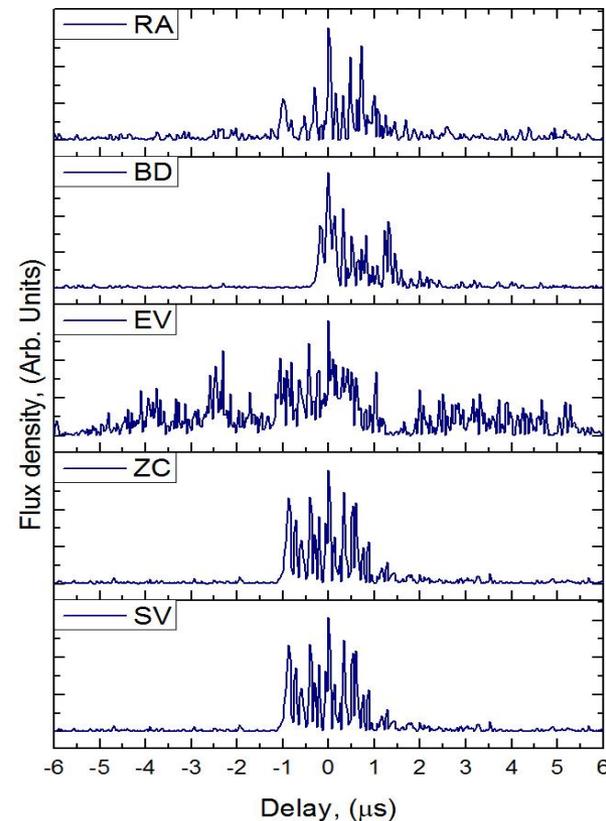
Matveenko L. I. Position of a Source of Small Angular Size in the Crab Nebula // Soviet Astronomy. — 1968. — Vol. 12, no. 7. — P. 552.

Глава 1. Гигантские импульсы пульсара в Крабовидной туманности

- Возникают спорадически, характеризуются высокой плотностью потока.
- Плотность потока может достигать значений $10^5 - 10^6$ Ян.
- Обладают короткой длительностью (для пульсара V0531+21 это несколько микросекунд).
- Профиль пульсара V0531+21 в дециметровом диапазоне полностью состоит из гигантских импульсов [*].
- Импульсы имеют сильную линейную и круговую поляризацию.
- **Природа возникновения до сих пор не ясна.**



Пример неразрешенных временных компонент гигантского импульса пульсара V0531+21. Частота 5.5 ГГц. Временное разрешение 4 нс. (I – полная интенсивность, L – линейная поляризация, V – круговая поляризация) [**].



Профиль гигантского импульса
Телескопы: RA, BD, EV, ZC, SV,
сеанс: RAFS01, 14.11.2011.

[*] Giant pulses – the main component of the radio emission of the crab pulsar / M. V. Popov, V. A. Soglasnov, V. I. Kondrat'ev et al. // Astronomy Reports. — 2006. — Vol. 50. — Pp. 55–61.

[**] Eilek J. A., Hankins T. H., Radio emission physics in the Crab pulsar, Journal of Plasma Physics, 82, 3, 34 pp., 2016

Глава 2. Распространение радиоизлучения гигантских импульсов в космической плазме

Распространении когерентного радиоизлучения пульсаров через межзвездную среду сопровождается дисперсией сигнала и рассеянием. Мера дисперсии DM – один из параметров, который характеризует рассеяние радиоизлучения:

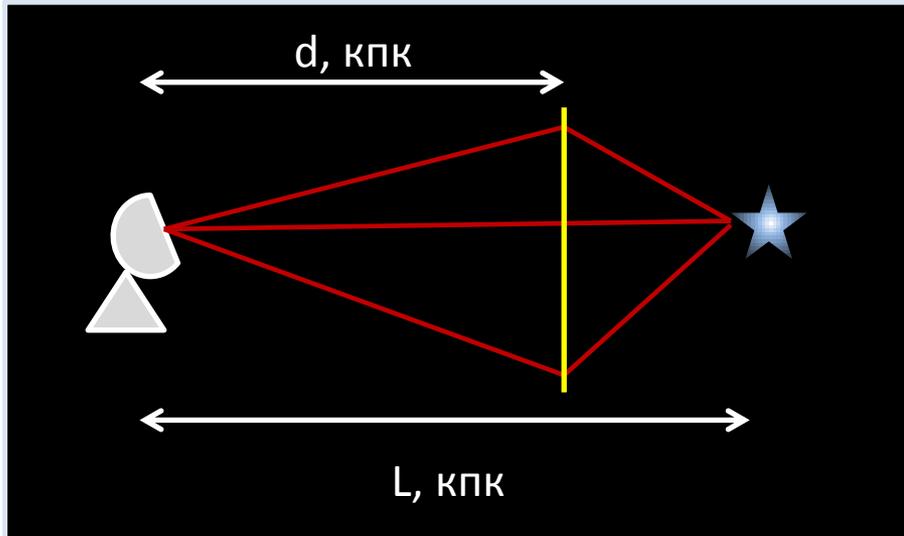
$$DM = \int n_e dl$$

Наблюдаемые эффекты рассеяния:

- Изменение углового размера наблюдаемого пульсара (диск рассеяния θ_H)
- Увеличение длительности зарегистрированных импульсов (время рассеяния τ_{SC})
- Мерцания (время мерцаний t_{scint} , полоса декорреляции $\Delta\nu_d$)
- Зависимость от частоты ($\theta_H \propto \nu^{-\alpha}$, $\tau_{SC} \propto \nu^{-2\alpha}$)

Глава 2. Тонкий рассеивающий экран

В модели предполагается, что неоднородная межзвездная среда сосредоточена в бесконечно тонком слое и имеет характерный спектр неоднородностей.



Пусть рассеивающий материал сконцентрирован в бесконечно тонком экране, расположенном на расстоянии d от наблюдателя [*]. Угловой размер диска рассеяния:

$$\theta_H = \sqrt{8 \ln 2 \cdot c \tau_{SC} \cdot \frac{(L - d)}{L \cdot d}}$$
$$\tau_{SC} = \frac{\theta_H^2}{8c \ln 2} \cdot \frac{L \cdot d}{(L - d)}$$

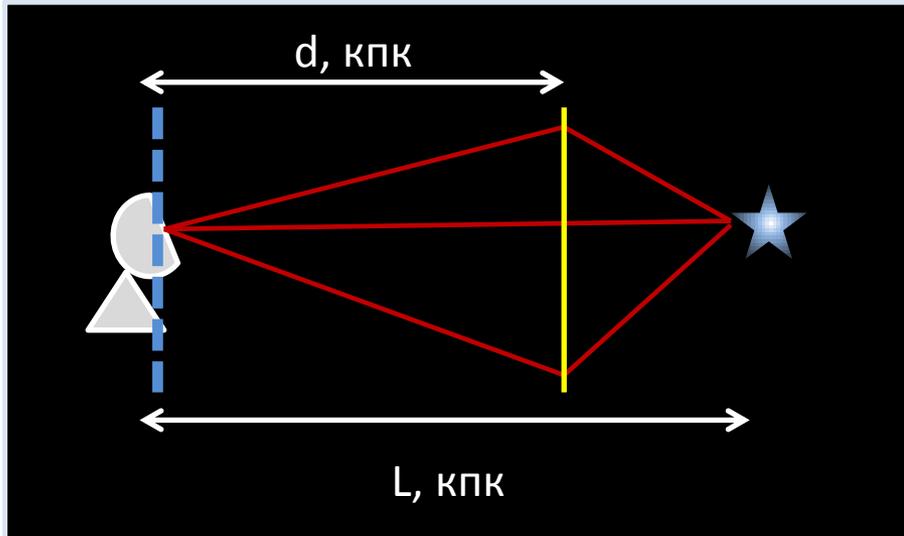
Обозначив параметр α_s как $\alpha_s = d/L$ (где d – расстояние от наблюдателя до рассеивающего экрана, а L – расстояние от наблюдателя до пульсара) можно определить расстояние до рассеивающего экрана:

$$\alpha_s = \frac{8c \tau_{SC} \cdot \ln 2}{\theta_H^2 \cdot L + 8c \tau_{SC} \cdot \ln 2}$$

[*] Britton M. C., Gwinn C. R., Ojeda M. J. Angular broadening of nearby pulsars // Astrophysical Journal. — 1998. — Vol. 501. — P. 101.

Глава 2. Тонкий рассеивающий экран

Характерный пространственный масштаб дифракционной картины в плоскости наблюдателя [*]:



$$r_{diff} = \sqrt{2 \ln 2} \cdot \frac{\lambda}{\pi \cdot \theta_H}$$

Зная величину r_{diff} и скорость движения дифракционной картины v , можно оценить характерное время мерцаний пульсара:

$$t_{scint} \approx \frac{r_{diff}}{v}$$

где v скорость движения дифракционной картины в плоскости наблюдателя:

$$v = v_p \cdot \frac{d}{L - d}$$

Поперечная скорость пульсара B0531+21: $v_p \approx 150$ км/с [**,***].

[*] PSR B0329+54: Statistics of Substructure Discovered within the Scattering Disk on RadioAstron Baselines of up to 235,000 km / M. V. Popov, A. S. Andrianov, N. Bartel et al. // Astrophysical Journal. — 2016. — Vol. 822, no. 2. — P. 13.

[**] Wyckoff S., Murray C. A. Proper motion of the Crab pulsar // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1977. — Vol. 180. — Pp. 717–729.

[***] A Precise Proper Motion for the Crab Pulsar, and the Difficulty of Testing Spin-Kick Alignment for Young Neutron Stars / D. L. Kaplan, S. Chatterjee, B. M. Gaensler, J. Anderson // Astrophysical Journal. — 2008. — Vol. 667, no. 2. — Pp. 1201–1215

Глава 3. Радиоинтерферометрические наблюдения гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности в миссии “Радиоастрон”

10-метровый космический радиотелескоп

Запуск состоялся 18 июля, 2011

- Ежедневные наземно-космические РСДБ наблюдения
- Поддержка от более чем **40 наземных телескопов**
- Околоземная орбита с максимальным удалением до **350 000 км**
- Более **6 лет** успешной работы
- Возможность многочастотного синтеза (18392 – 25112 МГц)

Исследования в области:

- AGN+QSO (картографирования, обзоры)
- Мазеры (картографирования, обзоры)
- Пульсары (ISM, рассеяние и т.д.)

Частотные диапазоны:

316 МГц, 1660 МГц, 4868 МГц, 22220 МГц



CERTIFICATE

The largest radio space telescope is the Spektr-R, which is 10 metres across, and was launched from the Baikonur Cosmodrome in Kazakhstan, on 18 July 2011

OFFICIALLY AMAZING

Глава 3. Наблюдения

Код. набл.	Дата	Время	B, (км)	λ , (см)	Кол-во наземных телескопов	Корреляция
<u>Ранняя научная программа и этап АО-1 ключевой научной программы</u>						
RAFS01	14.11.2011	23:00 - 00:00	46000	18	4	Есть корр. с КРТ
RAES04A	02.03.2012	13:00 - 17:00	145000	18	8	Только наземные телескопы
RAES04B	06.03.2012	14:30 - 17:30	128000	18	8	Есть корр. с КРТ
RAES04D	23.10.2012	07:00 - 09:00	113000	18	7	Есть корр. с КРТ
RAKS02AD	27.10.2013	06:00 - 09:00	150000	18	4	Есть корр. с КРТ
RAKS02AE	02.11.2013	19:30 - 08:40	40000 - 57000	92	5	Только наземные телескопы
<u>Этап АО-2 ключевой научной программы</u>						
RAGS10A	10.01.2015	22:00 – 04:00	153000	18	5 (11)	Есть корр. с КРТ
RAGS10B	28.01.2015	21:00 – 03:00	140000	18/92	10 (15)	Есть корр. с КРТ
RAGS10C	15.02.2015	20:00 – 02:00	107000	92	2 (4)	Неудачный

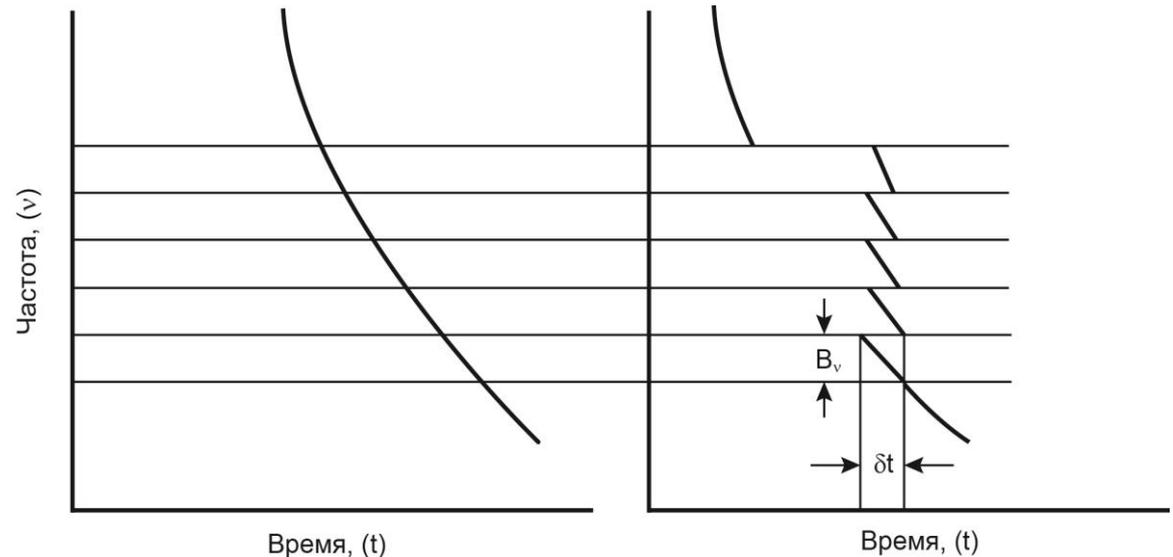
Глава 3. Обработка данных

- Первичная обработка всех данных выполнялась на программном корреляторе АКЦ, с использованием некогерентной компенсации дисперсии
- Для коррелятора АКЦ был разработан модуль поиска гигантских импульсов
- В отдельном случае, для исследований, представленных в Главе 4 использовался метод когерентной компенсации дисперсии
- После корреляции выполнялась амплитудная калибровка

Глава 3. Обработка данных

Существуют два метода компенсации дисперсии:

1. Когерентная (додетекторная) компенсация дисперсии
2. Некогерентная (постдетекторная) компенсация дисперсии.



Схематическое изображение метода некогерентной компенсации дисперсии. Слева – исходный сигнал в зависимости от частоты и времени, справа – скорректированный сигнал на величину δt .

Когерентная компенсация дисперсии – операция обратной линейной фильтрации. Наилучшее временное разрешение, существенные затраты вычислительных мощностей.

Некогерентная компенсация дисперсии – деление полосы пропускания и компенсация задержки, вызванной дисперсией. Скорость вычисления выше в ущерб временному разрешению.

Глава 4. Исследование свойств гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности

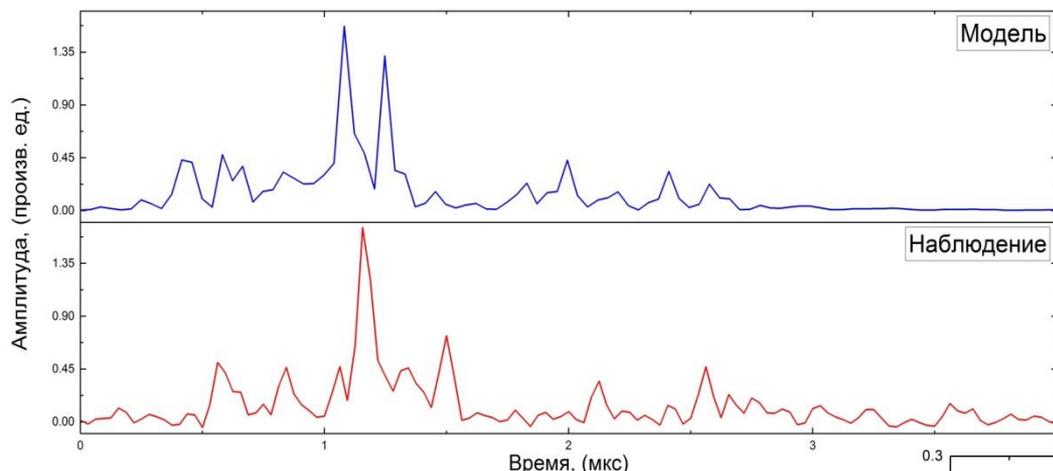
- Моделирование влияния собственной временной структуры гигантских импульсов на измеряемые параметры рассеяния **(1)**:
 - Влияние структуры на полосу декорреляции
 - Влияние структуры на функцию видности
- Изучение распределения гигантских импульсов по энергиям
- Анализ структурных функций фазы функций видности для индивидуальных гигантских импульсов

(1) Использовались данные наблюдений пульсара B0531+21 от 10-11 января 2015 года (код эксперимента: RAGS10A).

В обработке применялся метод когерентной компенсации дисперсии для получения наилучшего временного разрешения.

Глава 4. Моделирование эффектов рассеяния

- Исследовалось влияние собственной структуры гигантских импульсов на измеряемые параметры рассеяния.
- Для этого было выполнено моделирование распространения гигантских импульсов с заданной структурой через рассеивающую среду с некоторой характерной полосой декорреляции.
- Затем результаты сравнивались с реальными наблюдениями, которые проводились на длине волны 18 см.



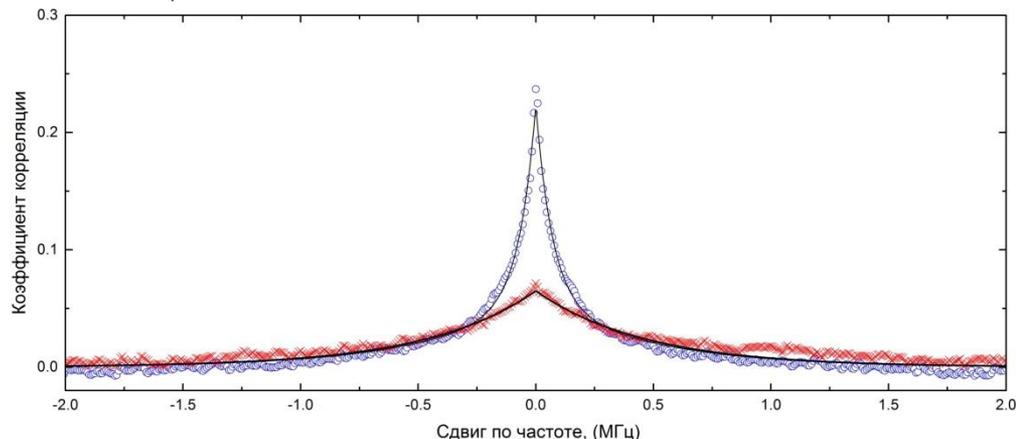
Значение полосы декорреляции выбиралось на основе реальных измерений $\Delta\nu \approx 300$ кГц.

Импульс пропускался через передаточную функцию $K(i\omega) = K(\omega)e^{i\phi(\omega)}$, где $K(\omega)$ – АЧХ среды, а $\phi(\omega)$ – ФЧХ.

Структура гигантских импульсов моделировалась случайным набором неразрешенных всплесков (~ 20 шт.), равномерно распределенных в интервале 2-х микросекунд с амплитудами, распределенными по Гауссу.

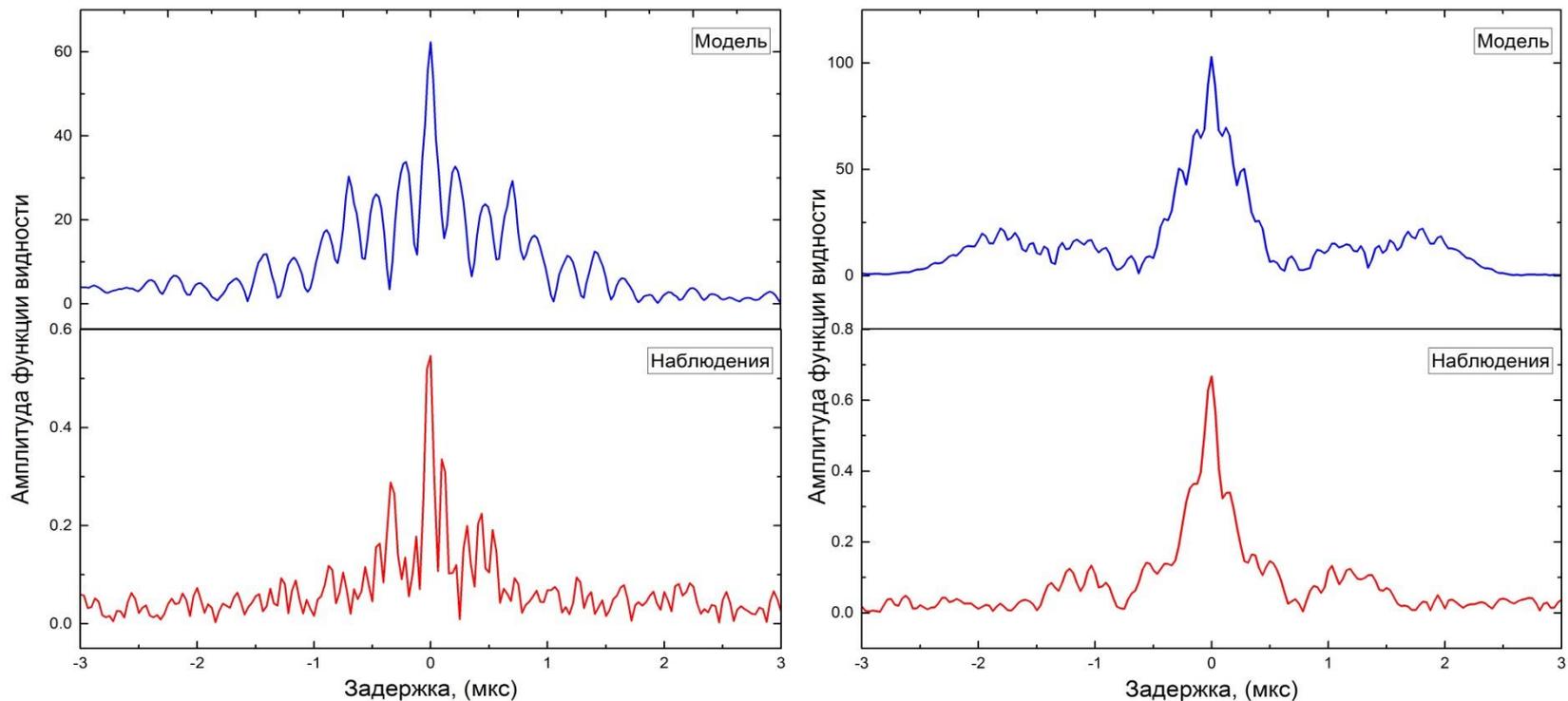
Кросскорреляционная функция от спектров в одной поляризации имеет амплитуду в 2 раза больше при нулевом сдвиге и демонстрирует узкую частотную структуру, при больших частотных сдвигах обе функции совпадают и имеют экспоненциальный спад.

Узкая центральная компонента обусловлена влиянием спектра индивидуальных импульсов, широкая компонента соответствует спектру мерцаний.



[*] Попов М. В., Рудницкий А. Г., Согласнов В. А. Гигантские импульсы пульсара в Крабовидной туманности – индикаторы сильной электромагнитной волны // *Астрономический журнал*. — 2017. — Т. 94, № 3. — С. 194–203.

Глава 4. Влияние на время рассеяния

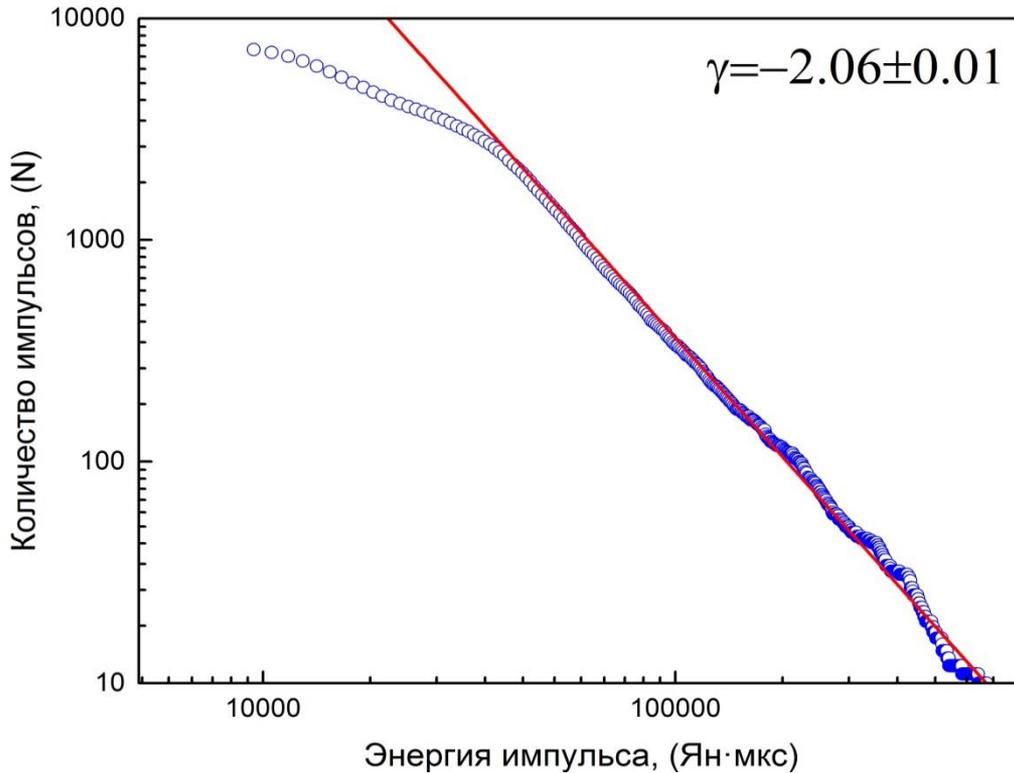


Наблюдаемые структуры являются результатом интерференции между отдельными идентичными волновыми пакетами.

Временной масштаб таких неразрешенных компонент $\delta t \leq 30$ нс, а нижний предел яркостной температуры $T_b \geq 10^{38}$ К.

На длине волны 18 см данные компоненты обнаружены впервые.

Глава 4. Распределение импульсов по энергиям



Используя получаемые на выходе коррелятора кросс-спектры, можно оценить распределение зарегистрированных гигантских импульсов по энергиям.

Преимущество такого подхода:

- минимизируется шумовая составляющая в распределении по энергиям
- оценка не привязана к ширине зарегистрированного импульса

Распределение гигантских импульсов по энергиям носит степенной характер $N(E) \propto E^{-\gamma}$:

$$N(E > E_\gamma) = \int_{E_\gamma}^{\infty} n(E) dE \propto E_\gamma^{-\beta+1}$$

где $n(E)$ -- количество гигантских импульсов с энергией E , а $\gamma = \beta - 1$.

Полная энергия в единицах Ян х мкс вычисляется как $S_{Jy} \cdot \delta t$, где $\delta t_{18cm} = 32$ мкс и $\delta t_{92cm} = 64$ мкс -- ширина окна корреляции в микросекундах, которая выбиралась при корреляционной обработке для 18 см и 92 см соответственно, S_{Jy} -- коррелированный поток в янских.

Глава 4. Распределение импульсов по энергиям

Сеанс	Дата	γ
RAES04A	02.03.2012	-2.48 ± 0.01
RAES04B	06.03.2012	-2.06 ± 0.01
RAES04D	23.10.2012	-1.64 ± 0.01
RAKS02AD	27.10.2013	-1.60 ± 0.01
RAKS02AE	02.11.2013	-1.63 ± 0.01
RAGS10A	10.01.2015	-1.63 ± 0.01
RAGS10B	28.01.2015	-2.51 ± 0.01

Используя получаемые на выходе коррелятора кросс-спектры, можно оценить распределение зарегистрированных гигантских импульсов по энергиям.

Преимущество такого подхода:

- минимизируется шумовая составляющая в распределении по энергиям
- оценка не привязана к ширине зарегистрированного импульса

Распределение гигантских импульсов по энергиям носит степенной характер $N(E) \propto E^{-\gamma}$:

$$N(E > E_\gamma) = \int_{E_\gamma}^{\infty} n(E) dE \propto E_\gamma^{-\beta+1}$$

где $n(E)$ -- количество гигантских импульсов с энергией E , а $\gamma = \beta - 1$.

Полная энергия в единицах Ян х мкс вычисляется как $S_{Jy} \cdot \delta t$, где $\delta t_{18cm} = 32$ мкс и $\delta t_{92cm} = 64$ мкс -- ширина окна корреляции в микросекундах, которая выбиралась при корреляционной обработке для 18 см и 92 см соответственно, S_{Jy} -- коррелированный поток в янских.

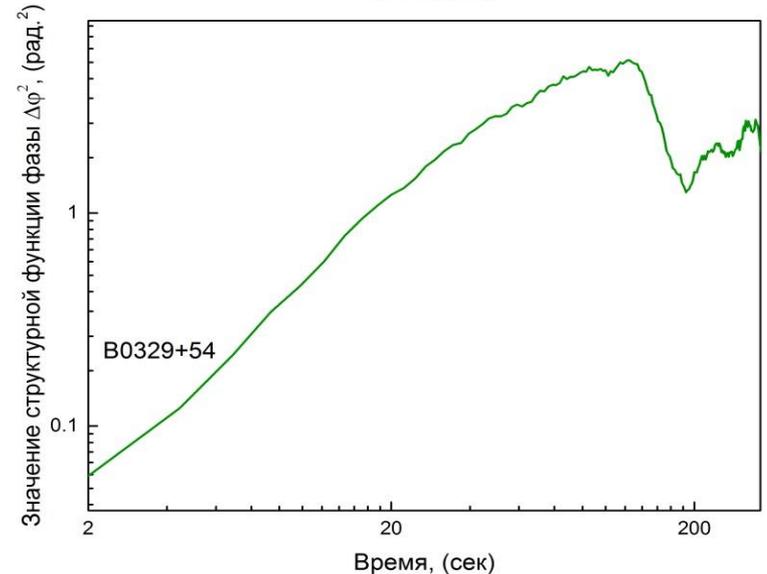
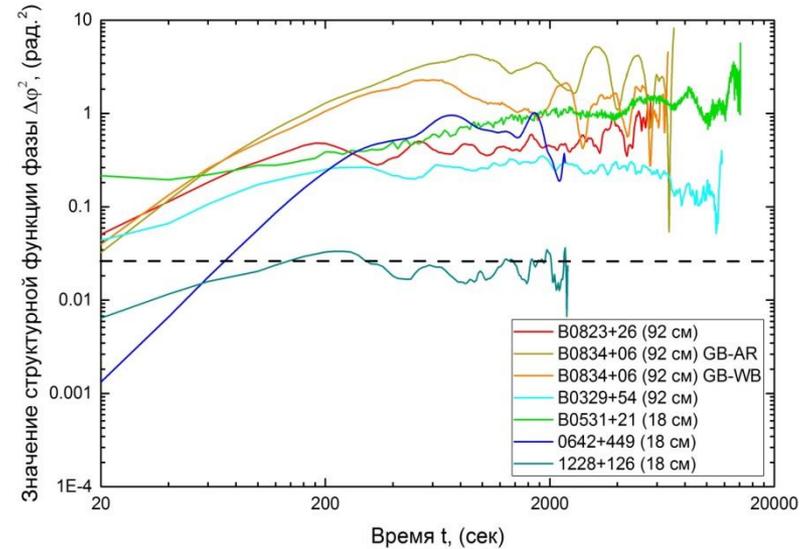
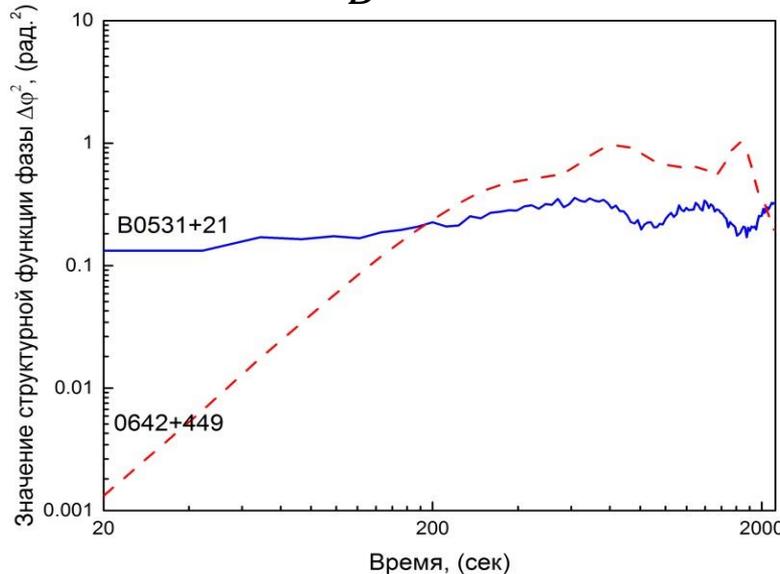
Глава 4. Структурная функция фазы

Структурная функция фазы определяется следующим выражением:

$$D\phi(\Delta t) = \langle [|\phi(t) - \phi(t + \Delta t)|]^2 \rangle_t$$

Зная величину $\Delta\phi$, можно вычислить геометрическую задержку $\tau_g = \Delta\phi / (2\pi\nu)$ и оценить угловой размер диска рассеяния [*]:

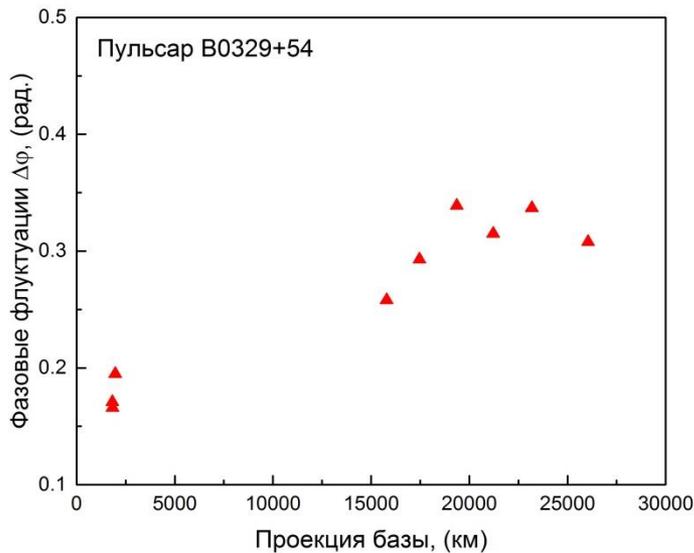
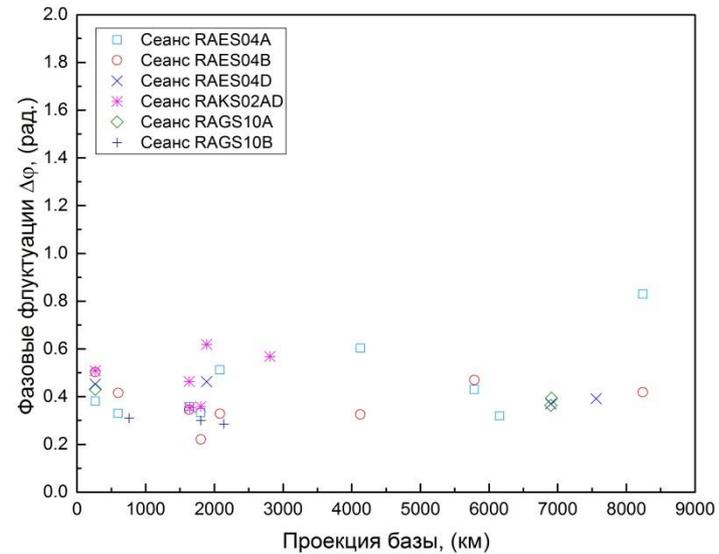
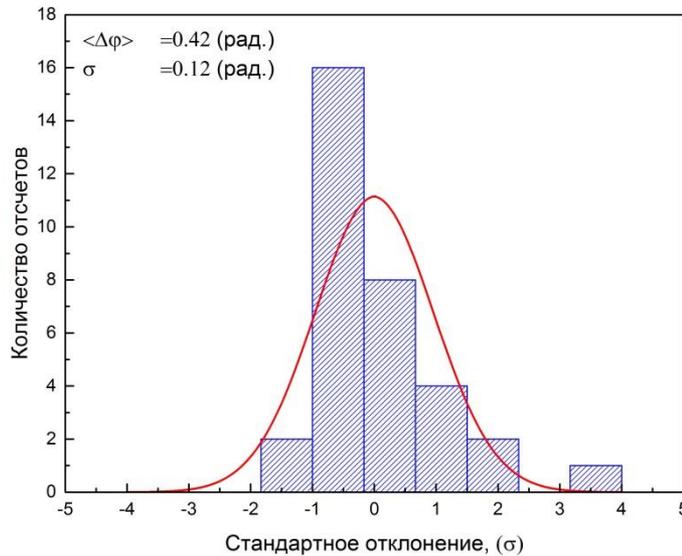
$$\theta_H = \frac{c\tau_g}{B}$$



[*] Probing cosmic plasma with giant radio pulses / V. I. Kondratiev, M. V. Popov, V. A. Soglasnov et al. // Astronomical and Astrophysical Transactions. — 2007. — Vol. 26. — Pp. 585–595.

[**] Рудницкий А. Г., Попов М. В., Сogласнов В. А. Зондирование космической плазмы гигантскими импульсами пульсара в Крабовидной туманности // *Астрономический журнал*. — 2017. — Т. 94, № 5. — С. 387–399

Глава 4. Структурная функция фазы



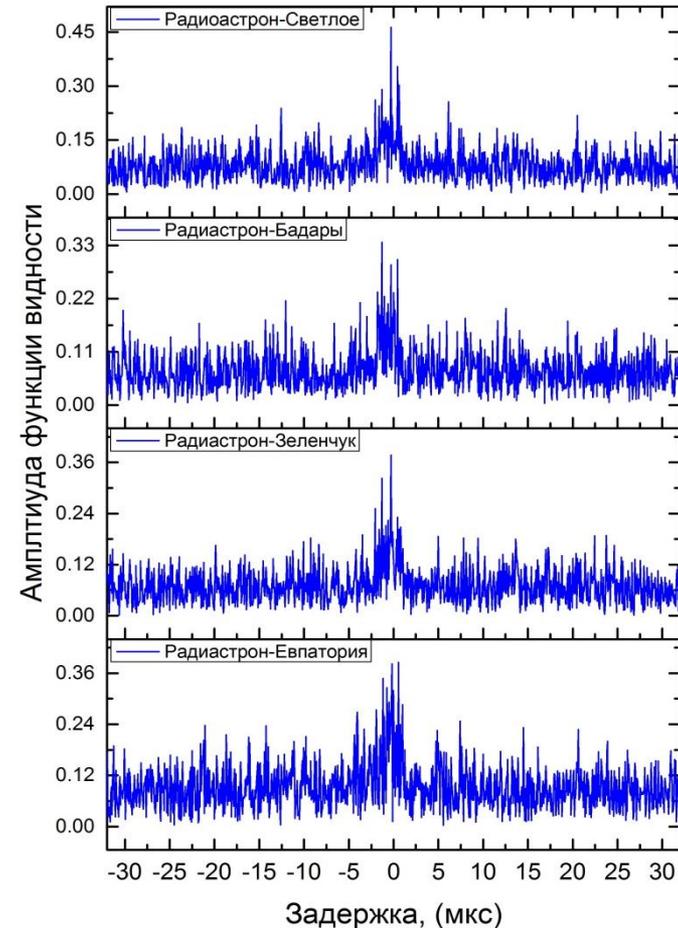
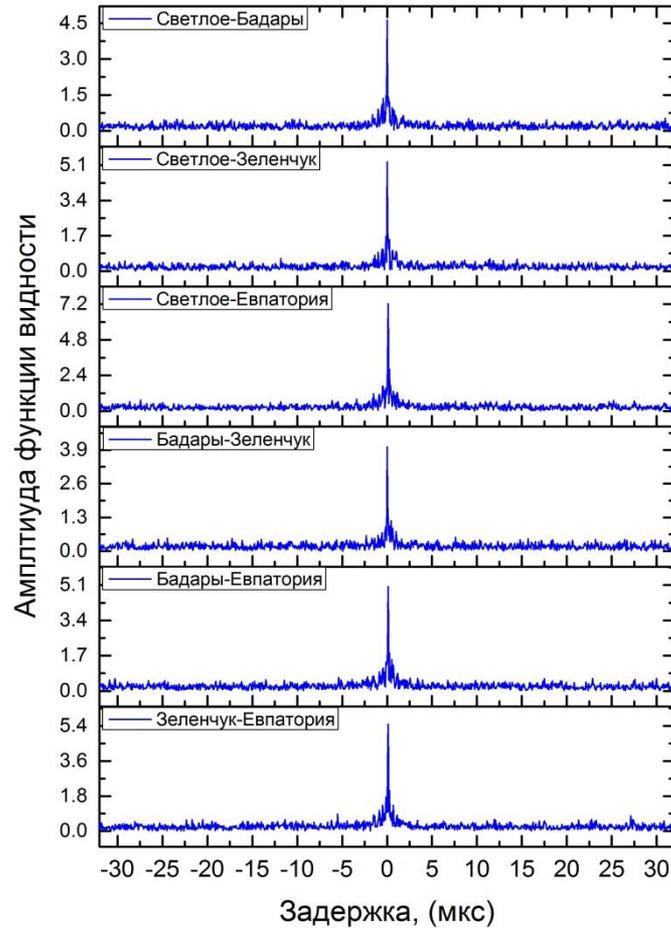
Величина фазовых флуктуация для пульсара B0531+21 сохраняется постоянной с увеличением проекции базы, так как значение радиуса дифракционного пятна для длины волны 18 см находится в пределах от 10000 до 34000 км, при этом максимальное значение наземных проекций базы в наблюдениях не превышал значений в 9000 км. Из результатов анализа, следует, что изменение фазовых флуктуаций наблюдается только в случае, когда проекция базы B будет превышать значение радиуса дифракционного пятна r_{diff} . **Только при $B > r_{diff}$ можно вычислить угловые размеры кружка рассеяния θ_H .**

Глава 5. Зондирование космической плазмы гигантскими импульсами пульсара в Крабовидной туманности

- Угловые размеры диска рассеяния (θ_H)
- Время рассеяния (τ_{sc})
- **Расстояние до рассеивающего экрана (d_s)**
- Полоса декорреляции (ν_d)
- Время мерцаний (t_{scint})
- Дифракционный радиус (r_{diff})

Глава 5. Угловой размер диска рассеяния

Структура диска рассеяния

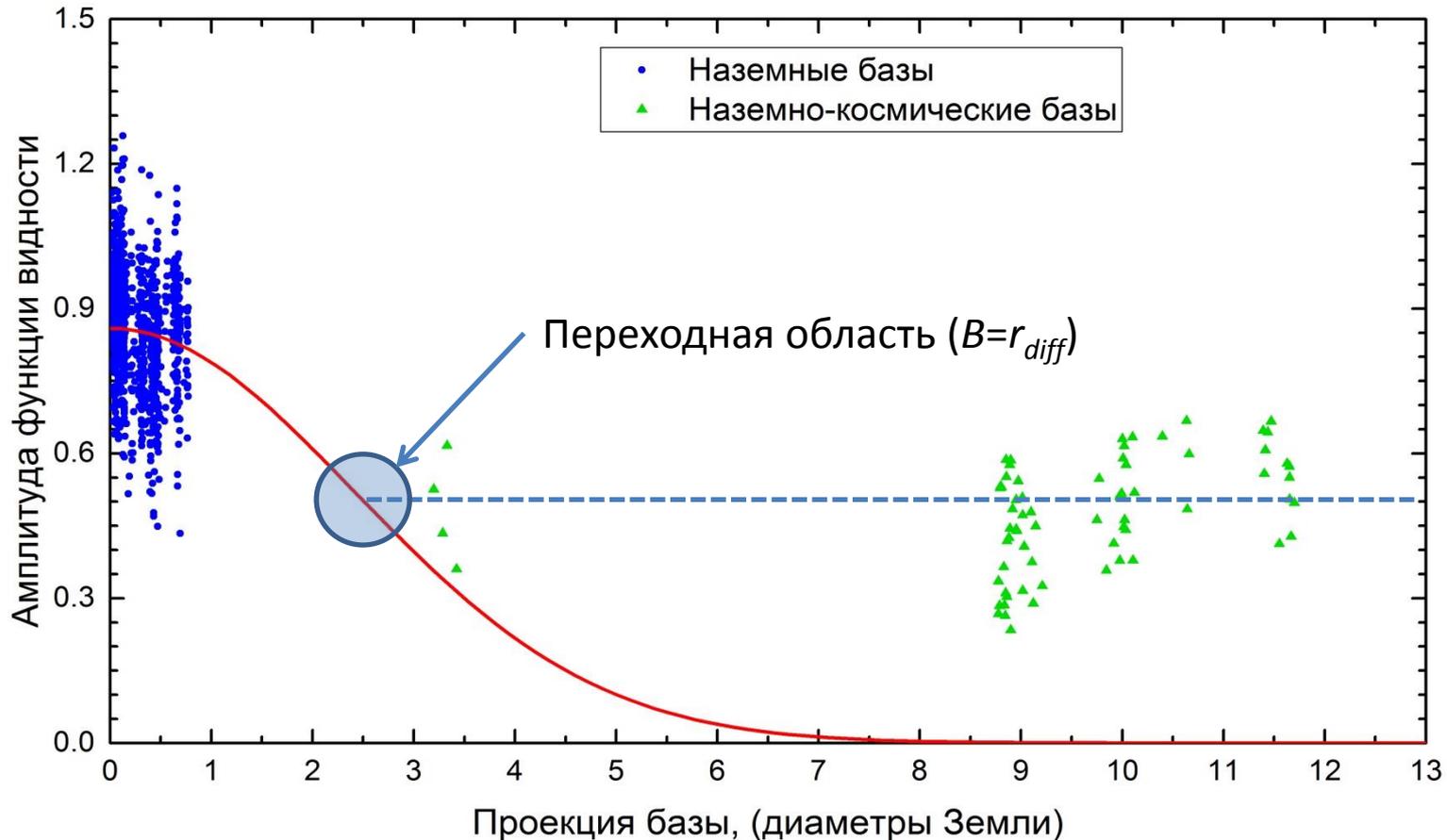


Пример изменения формы кросс-корреляционных функций (функций видности) для наземных баз (слева) и наземно-космических баз (справа). Сеанс (RAFS01 14.11.2011), длина волны 18 см [*].

[*] Рудницкий А. Г., Попов М. В., Согласнов В. А. Исследование космической плазмы по данным РСДБ наблюдений гигантских импульсов пульсара В0531+21 в проекте «Радиоастрон» // *Астрономический журнал*. — 2016. — Т. 93, № 2. — С. 167–176.

Глава 5. Угловой размер диска рассеяния

Структура диска рассеяния

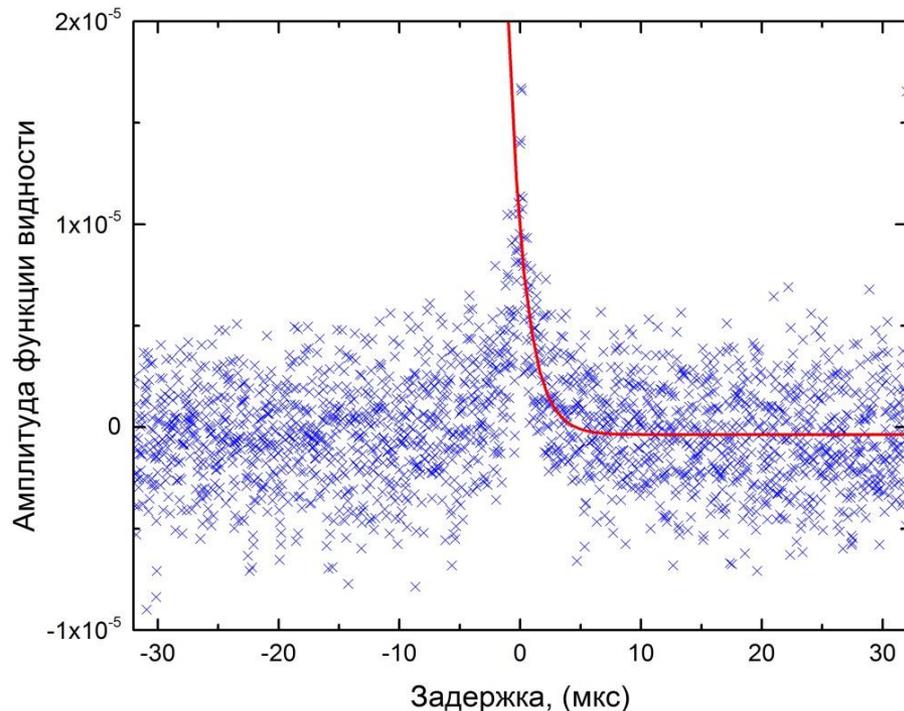


Зависимость амплитуды функции видности от проекции базы для всех сеансов наблюдений пульсара B0531+21 на длине волны 18 см. Кружками показаны значения амплитуды функции видности для наземных баз, треугольниками отображено максимальное значение амплитуды функции видности для наземно-космических баз. Сплошной линией показана аппроксимация. [*]

[*] Rudnitskiy A. G., Popov M. V., Soglasnov V. A. Preliminary results of giant pulse investigations from Crab pulsar with Radioastron // Труды конференции 12th European VLBI Network Symposium, Proceedings of Science. — 2015.

Глава 5. Время рассеяния

Наземно-космические базы



Средняя функция видности для сеанса от 10.01.2015. База Радиоастрон-Аресибо.

Для наземно-космических баз во временной структуре функции видности отсутствует центральная компактная деталь и присутствует только протяженная часть, которая соответствует рассеянию.

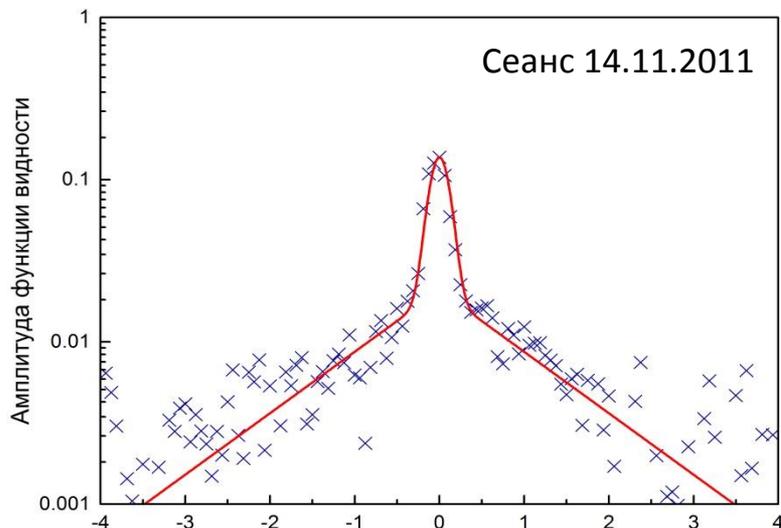
В этом случае наземно-космические базы позволяют прямым методом измерить время рассеяния с помощью экспоненциальной аппроксимации средней функции видности $\langle |V(\tau)| \rangle$ [*]:

$$\langle |V(\tau)| \rangle = V_1 \cdot e^{-\frac{x}{\tau_1}} + V_0$$

[*] Рудницкий А. Г., Попов М. В., Согласно В. А. Исследование космической плазмы по данным РСДБ наблюдений гигантских импульсов пульсара B0531+21 в проекте «Радиоастрон» // *Астрономический журнал*. — 2016. — Т. 93, № 2. — С. 167–176.

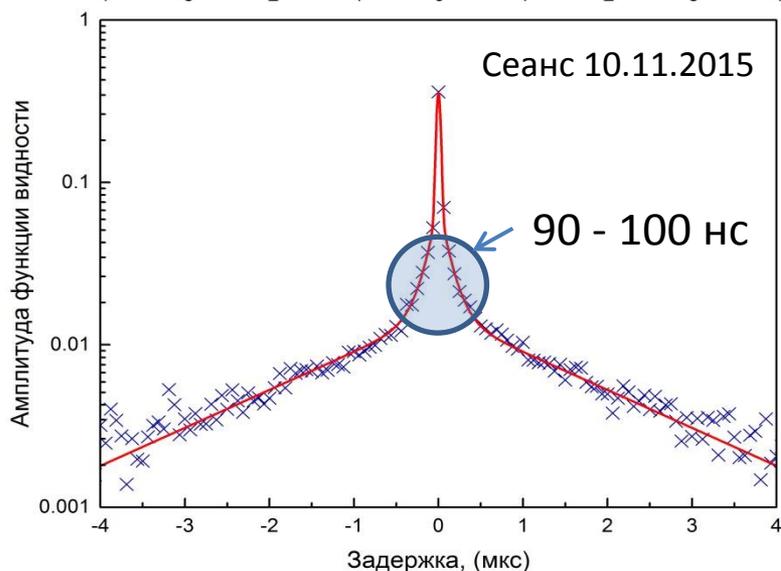
Глава 5. Время рассеяния

Наземные базы



Второй метод вычисления времени рассеяния: аппроксимация средней функций видности от наземных баз с помощью суммы экспоненциальной функции (протяженная деталь) и функции Гаусса (узкая деталь):

$$\langle |V(\tau)| \rangle = V_1 \cdot e^{-\frac{|x|}{\tau_1}} + V_2 \cdot e^{-\frac{x^2}{\tau_2}} + V_0,$$



$$\langle |V(\tau)| \rangle = V_1 \cdot e^{-\frac{|x|}{\tau_1}} + V_2 \cdot e^{-\frac{|x|}{\tau_2}} + V_3 \cdot e^{-\frac{x^2}{\tau_3}} + V_0.$$

Анализ функций видности для наземных баз выявил наличие трех временных компонент: центральная узкая компонента (соответствует неразрешенной компоненте), протяженная компонента (соответствует рассеянию) и промежуточная компонента с характерным масштабом 90 - 100 нс. [*]

Глава 5. Полоса декорреляции

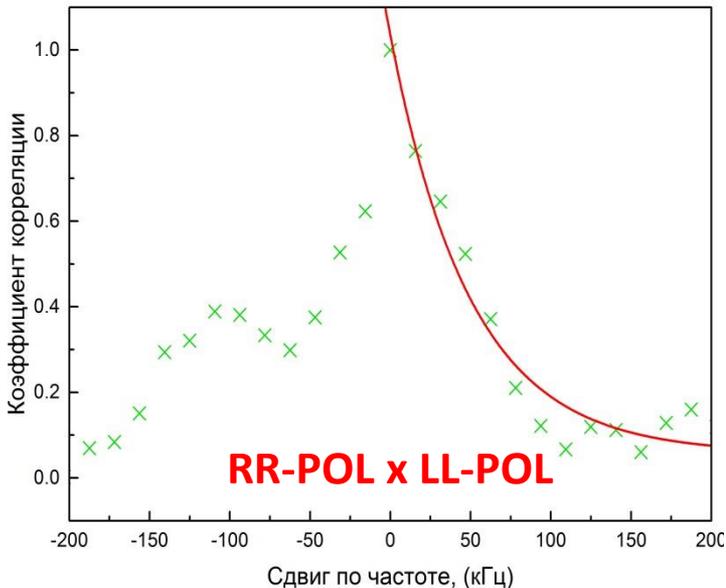
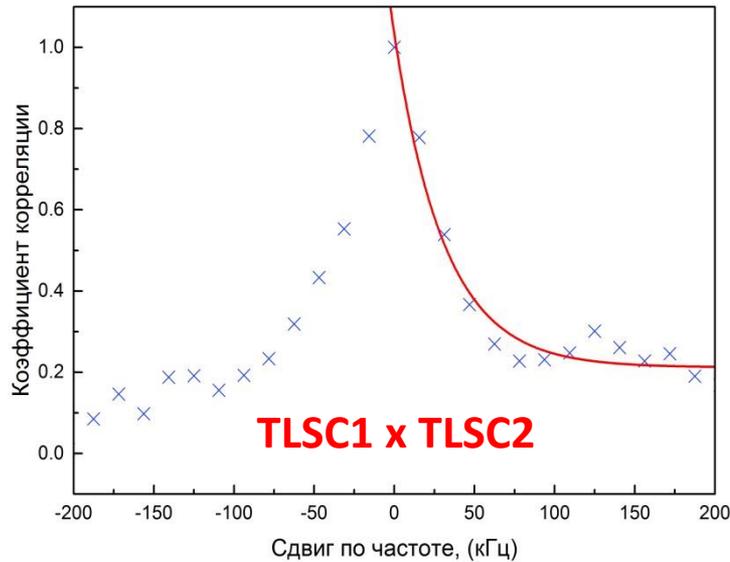
Полоса декорреляции $\Delta\nu_d$ определялась экспоненциальной аппроксимацией кросс-корреляционных функций:

$$CCF(\nu) = A_0 \cdot \exp(-\nu/\Delta\nu_d)$$

Кросс-корреляционные функции были получены двумя способами:

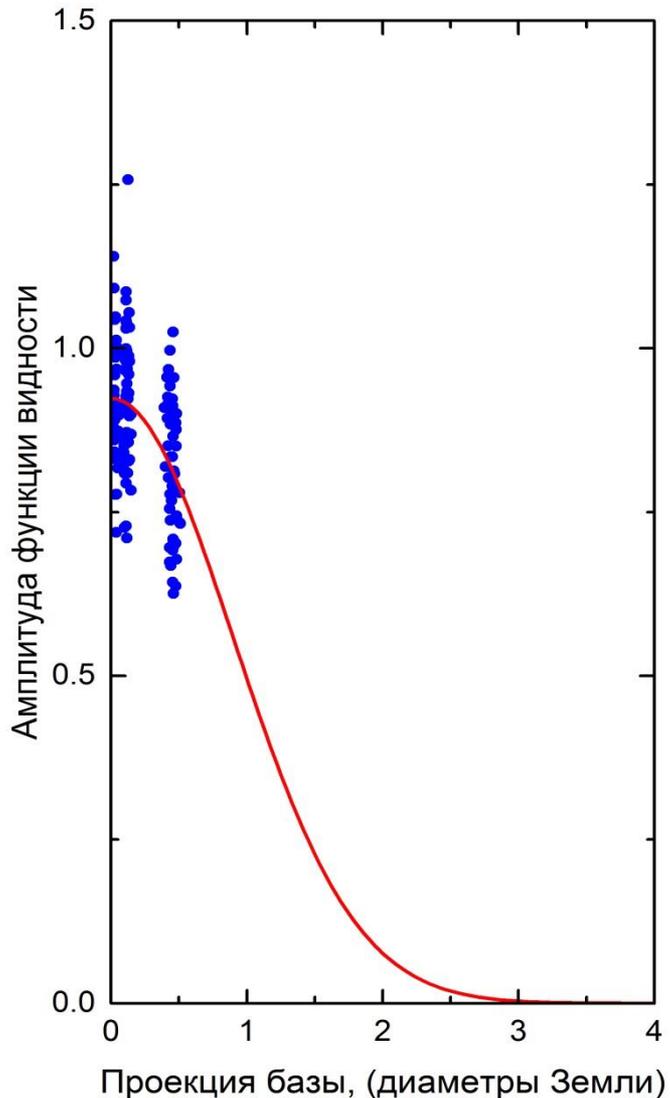
- Корреляция автоспектров от разных радиотелескопов в одном поляризационном канале.
- Корреляция автоспектров от одного радиотелескопа из разных поляризационном канале.

Таким образом, и полоса декорреляции ν_d , и время рассеяния τ_{SC} измерялись двумя независимыми способами.



Код сеанса	τ_{SC1} , (мкс)	τ_{SC2} , (мкс)	$\Delta\nu_{d1}$, (кГц)	$\Delta\nu_{d2}$, (кГц)
RAFS01	0.9 ± 0.1	1.1 ± 0.3	116.3 ± 24.5	149.3 ± 47.6
RAES04A	5.8 ± 0.3	4.3 ± 0.4	55.2 ± 5.9	43.5 ± 5.6
RAES04B	5.5 ± 0.7	5.3 ± 0.6	41.2 ± 7.9	57.3 ± 9.9
RAES04D	5.1 ± 0.5	4.6 ± 0.7	40.7 ± 4.6	44.3 ± 3.8
RAKS02AD	2.2 ± 0.3	2.5 ± 0.2	78.1 ± 7.9	140.8 ± 20.3
RAGS10A	1.4 ± 0.2	1.9 ± 0.2	161.1 ± 13.4	279.2 ± 34.4
RAGS10B	1.5 ± 0.1	1.7 ± 0.6	70.2 ± 8.3	192.6 ± 26.1

Глава 5. Угловой размер диска рассеяния



Угловые размеры диска рассеяния определяются из зависимости амплитуды функции видности от проекции базы. В предположении модели однородного рассеивающего диска [*]:

$$|V_{ij}(B)| = |V(0)| \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\pi}{\sqrt{2 \ln 2}} \cdot \frac{\theta_H \cdot B^2}{\lambda} \right)^2 \right]$$

где θ_H — угловой размер кружка рассеяния в угловых секундах дуги (полная ширина по уровню 0.5), B — проекция базы в см, λ — длина волны в см, на которой проводились наблюдения.

Использовались данные для наземных баз.

[*] Gwinn C. R., Bartel N., Cordes J. M. Angular broadening of pulsars and distribution of interstellar plasma fluctuations // Astrophysical Journal. — 1993. — 6. — Vol. 410, no. 2. — P. 673.

Глава 5. Расстояние до рассеивающего экрана

Путем одновременного измерения времени рассеяния и углового размер диска рассеяния, можно оценить расстояние до рассеивающего экрана:

$$\alpha_s = \frac{8c \tau_{SC} \cdot \ln 2}{\theta_H^2 \cdot L + 8c \tau_{SC} \cdot \ln 2}$$

Из восьми эпох наблюдений в четырех положение рассеивающего экрана было ближе к Крабовидной туманности. Для этих эпох вычисленные значения параметра α_s , который определяет положение экрана, были $\alpha_s \geq 0.9$, что соответствует расстоянию от пульсара до рассеивающего экрана ≤ 200 пк. Изменяющееся положение рассеивающего экрана указывает на наличие как минимум **двухкомпонентного рассеяния — области, близкой к Крабовидной туманности и протяженной рассеивающей области, обусловленной межзвездной плазмой** [*].

[*] C. C. Counselman, Rankin J. M. Multipath Delay Distortion of Radio Pulses from NP 0532 // *Astrophysical Journal*. — 1971. — Vol. 166. — P. 513.

Rankin J. M., III C. C. Counselman. Pulsar NP 0532: Variability of Dispersion and Scattering // *Astrophysical Journal*. — 1973. — Vol. 181. — Pp. 875–890.

Lyne A. G., Thorne D. J. Anomalous scattering in the Crab Nebula // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1975. — Vol. 172. — Pp. 97–108.

Karuppusamy R., Stappers B. W., van Straten W. Giant pulses from the Crab pulsar. A wide-band study // *Astronomy and Astrophysics*. — 2010. — Vol. 515. — P. A36.

Результаты

Измеренные параметры рассеяния

Наблюд.	τ_{scr} (μs)	θ , (mas)	$\Delta\nu$, (кГц)	R_{diff} (км)	α	γ	t_{scint} (сек)	Кол-во ГИ
RAFS01	0.922 ± 0.106	1.318 ± 0.213	116.299 ± 24.512	10361 ± 1697	0.36 ± 0.08	—	123.3 ± 20.2	98
RAES04A	5.765 ± 0.311	0.618 ± 0.081	55.210 ± 5.931	21817 ± 2874	0.94 ± 0.02	-2.48 ± 0.01	9.3 ± 1.2	1202
RAES04B	5.515 ± 0.745	0.501 ± 0.142	41.213 ± 7.899	26949 ± 7686	0.96 ± 0.03	-2.06 ± 0.01	7.5 ± 2.1	1034
RAES04D	5.106 ± 0.548	1.182 ± 0.095	40.722 ± 4.558	11413 ± 922	0.79 ± 0.03	-1.64 ± 0.01	20.2 ± 1.6	929
RAKS02AD	2.202 ± 0.294	1.235 ± 0.107	78.144 ± 7.944	12113 ± 1171	0.61 ± 0.06	-1.60 ± 0.01	51.5 ± 5.1	453
RAKS02AE	2340 ± 23	14.013 ± 1.374	0.068 ± 0.002	5140 ± 527	0.92 ± 0.07	-1.63 ± 0.01	2.9 ± 0.3	579
RAGS10A	1.385 ± 0.161	0.397 ± 0.108	161.142 ± 13.364	34015 ± 9268	0.91 ± 0.05	-1.63 ± 0.01	22.4 ± 6.1	1807
RAGS10B	1.490 ± 0.116	0.525 ± 0.093	70.173 ± 8.320	25675 ± 4485	0.85 ± 0.04	-2.51 ± 0.01	30.2 ± 5.3	627

[*] Рудницкий А. Г., Попов М. В., Согласно В. А. Исследование космической плазмы по данным РСДБ наблюдений гигантских импульсов пульсара B0531+21 в проекте «Радиоастрон» // *Астрономический журнал*. — 2016. — Т. 93, № 2. — С. 167–176.

[**] Рудницкий А. Г., Попов М. В., Согласно В. А. Зондирование космической плазмы гигантскими импульсами пульсара в Крабовидной туманности // *Астрономический журнал*. — 2017. — Т. 94, № 5. — С. 387–399

Заключение. Выносимые результаты

1. Впервые для пульсара в Крабовидной туманности с помощью наземно-космического интерферометра “Радиоастрон” на длине волны 18 см обнаружена субструктура в диске рассеяния радиоизлучения этого пульсара.
2. Измерены параметры рассеяния гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности для восьми эпох наблюдений на длинах волн 18 см и 92 см. Измерены: время рассеяния τ_{SC} , полоса декорреляции $\Delta\nu_d$, угловой размер диска рассеяния θ_H , время мерцаний t_{scint} , размер дифракционного пятна r_{diff} . С помощью наземно-космического интерферометра «Радиоастрон» прямым методом измерено время рассеяния τ_{SC} .
3. Для каждой эпохи наблюдений определены расстояния до эффективного рассеивающего экрана. Показано, что Крабовидная туманность часто имеет доминирующее влияние на наблюдаемые эффекты рассеяния.
4. Обнаружены вариации спектрального индекса γ степенного распределения гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности по энергиям в зависимости от эпохи.
5. Впервые на частоте 1668 МГц в индивидуальных гигантских импульсах пульсара в Крабовидной туманности обнаружена временная субструктура, которая содержит неразрешенные всплески длительностью $\tau \leq 30$ нс с яркостной температурой $T_b \geq 10^{38}$ К.
6. Анализ структурных функций фазы функции видности показал, что величина фазовых флуктуаций на малых временах $\Delta t \leq 20$ сек. определяется мерцаниями. Показано, что величина $\Delta\phi$ не зависит от проекции базы B в случае, когда проекция базы меньше характерного масштаба дифракционной картины $B < r_{diff}$.

Апробация результатов

1. COSPAR-2014, г. Москва, 2014.
2. 12th EVN Symposium and Users Meeting, г. Кальяри, Италия, 2014.
3. XII Конференция молодых ученых .Фундаментальные и прикладные космические исследования., г. Москва, 2015.
4. Dissecting the Universe –Workshop on Results from High-Resolution VLBI, г. Бонн, Германия, 2015.
5. International Conference All-wave Astronomy. Shklovsky-100, г. Москва, 2016.
6. Scintillometry Workshop, г. Бонн, Германия, 2016.
7. Ежегодные научные отчетные сессии Астрокосмического Центра ФИАН, г. Пущино, (2014, 2015).
8. Семинары Астрокосмического Центра ФИАН.

Публикации с основными результатами

1. Рудницкий А. Г., Попов М. В., Согласнов В. А. Исследование космической плазмы по данным РСДБ наблюдений гигантских импульсов пульсара B0531+21 в проекте «Радиоастрон» // *Астрономический журнал*. — 2016. — Т. 93, № 2. — С. 167–176.
2. Кардашев Н. С., Алакоз А. В., Андрианов А. С., Артюхов М. И., Баан В., Бабышкин В. Е., Бартель Н., Баяндина О. С., Вальтц И. Е., Войцик П. А., Воробьев А. З., Гвинн К., Гомез Х. Л., Джиованнини Г., Джонси Д., Джонсон М., Имаи Х., Ковалев Ю. Ю., Куртц С. Е., Лисаков М. М., Лобанов А. П., Молодцов В. А., Новиков Б. С., Погодин А. В., Попов М. В., Привезенцев А. С., Рудницкий А. Г., Рудницкий Г. М., Саволайнен Т., Смирнова Т. В., Соболев А. М., Согласнов В. А., Соколовский К. В., Филиппова Е. Н., Чурикова М. Е., Ширшаков А. Е., Шишов В. И., Эдвардс Ф. РАДИОАСТРОН.: Итоги выполнения научной программы исследований за 5 лет полёта // *Вестник НПО имени С.А. Лавочкина*. — 2016. — Т. 33, № 3. — С. 4–24.
3. Попов М. В., Рудницкий А. Г., Согласнов В. А. Гигантские импульсы пульсара в Крабовидной туманности – индикаторы сильной электромагнитной волны // *Астрономический журнал*. — 2017. — Т. 94, № 3. — С. 194–203.
4. Попов М. В., Рудницкий А. Г., Согласнов В. А. Зондирование космической плазмы гигантскими импульсами пульсара в Крабовидной туманности // *Астрономический журнал*. — 2017. — Т. 94, № 5. — С. 387–399.

Благодарю за внимание!