

Особенности распределения неоднородностей межзвездной плазмы в галактике по данным проекта «Радиоастрон»

Фадеев Евгений Николаевич

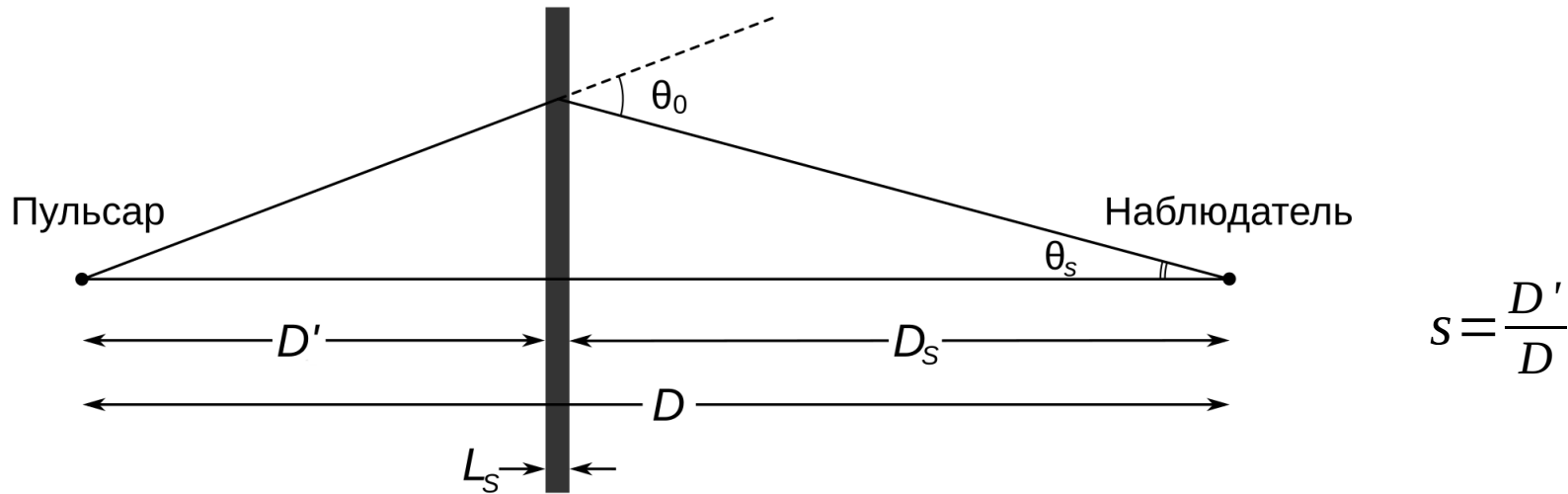
Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия

Научный руководитель д.ф.-м.н. М. В. Попов

Содержание

1. Обзор и постановка задачи
2. Наблюдения и первичная обработка
3. Результаты наблюдений
4. Определение расстояния до рассеивающих экранов

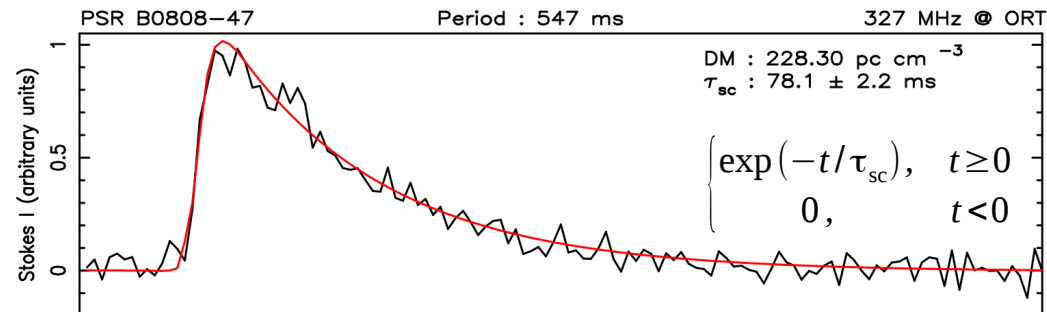
Обзор и постановка задачи



θ_s – радиус диска рассеяния

$\Delta f_{dif} \approx (2\pi\tau_{sc})^{-1}$ – полоса декорреляции

$\tau_{sc} = sD_S\theta_s^2/c$ – время рассеяния



Обзор и постановка задачи

ρ_{dif} — характерный масштаб мерцаний

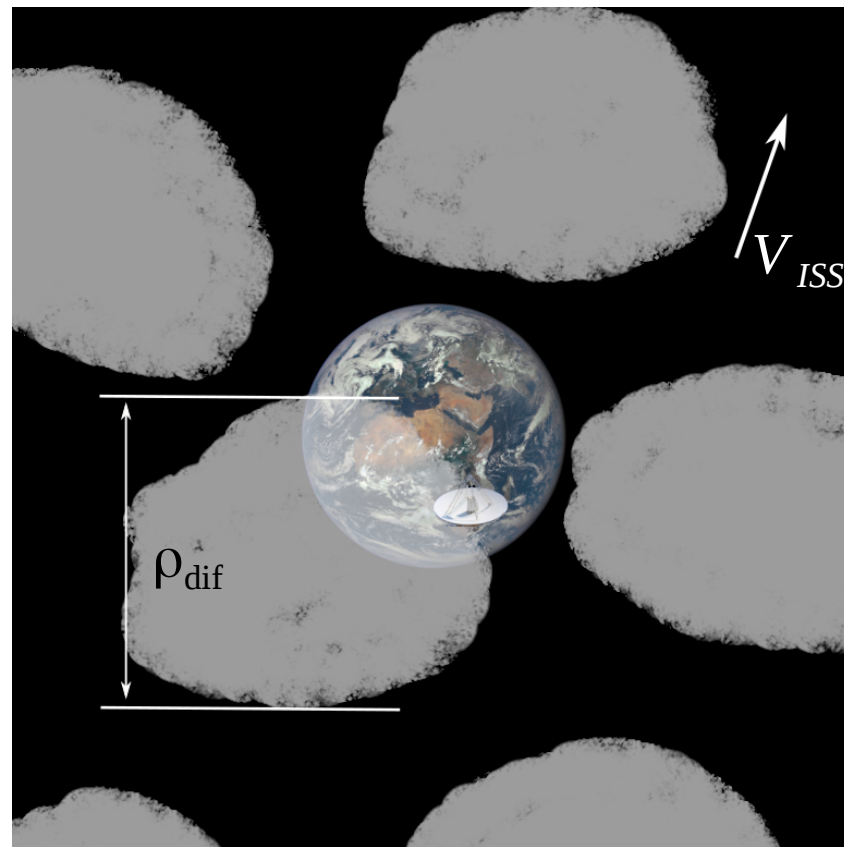
t_{dif} — время мерцаний

$$\frac{\rho_{\text{dif}}}{t_{\text{dif}}} = V_{ISS} = V_o + \frac{1}{s} V_s - \frac{1-s}{s} V_p$$

$$P_{n_e}(q) = C_{n_e}^2 q^{-\beta}$$

$\beta = 11/3$ — колмогоровский спектр

$\beta = 4$ — гауссов спектр



Обзор и постановка задачи

$$\tilde{V}_{AB}(f, t, \mathbf{b}) = E_A(f, t, \mathbf{r}_A) E_B^*(f, t, \mathbf{r}_B)$$

$$\tilde{V}_{AA}(f, t, 0) = E_A^2(f, t)$$

$$|\tilde{V}_{AB}(f, t, \mathbf{b})|^2 \quad - \text{динамический спектр}$$

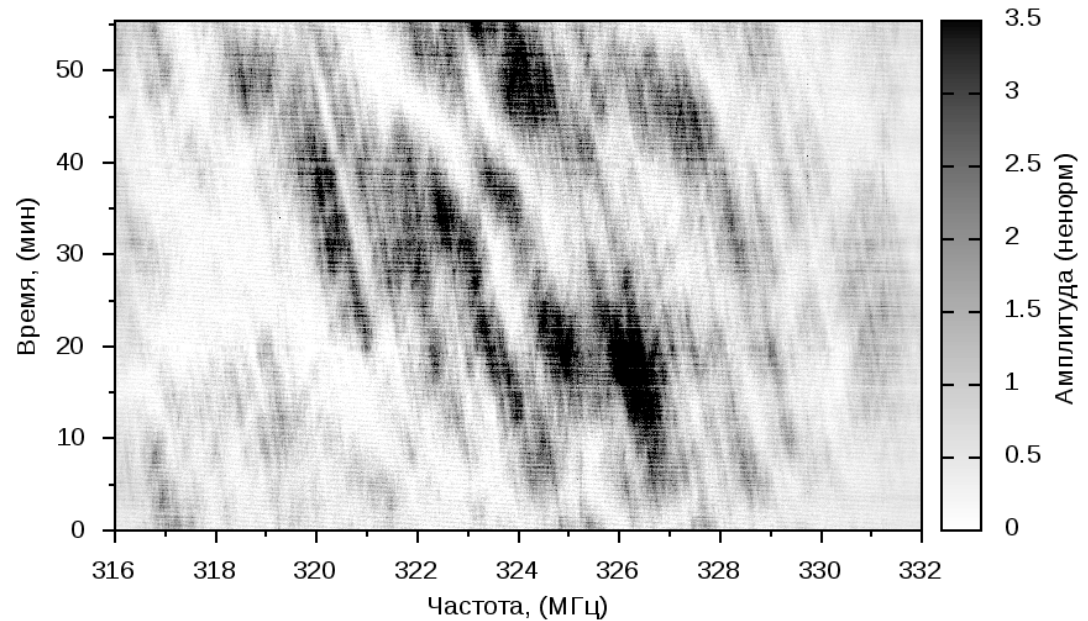
$$V_{AB}(\tau, t, \mathbf{b}) = \mathfrak{F}_{f \rightarrow \tau}^{-1}(\tilde{V}_{AB}(f, t, \mathbf{b}))$$

$$V_{AB}(\tau, \nu, \mathbf{b}) = \mathfrak{F}_{t \rightarrow \nu}(\tilde{V}_{AB}(\tau, t, \mathbf{b}))$$

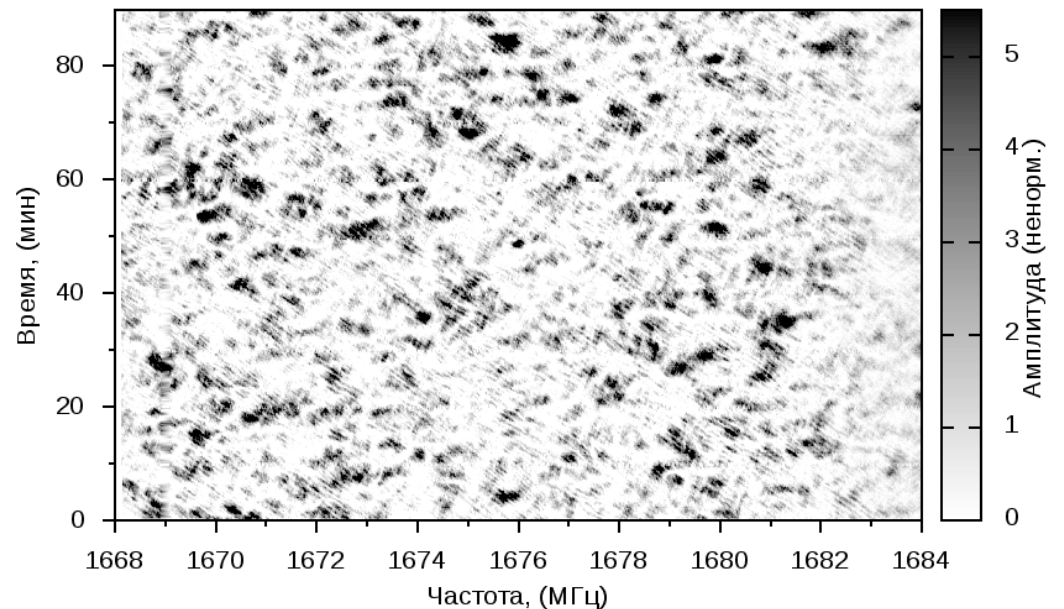
$$A(\tau, \nu) = |V_{AA}(\tau, \nu)|^2$$

– вторичный спектр

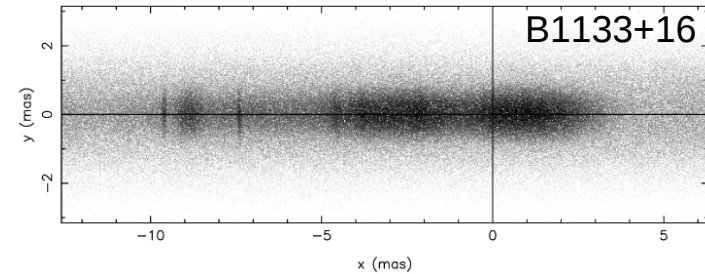
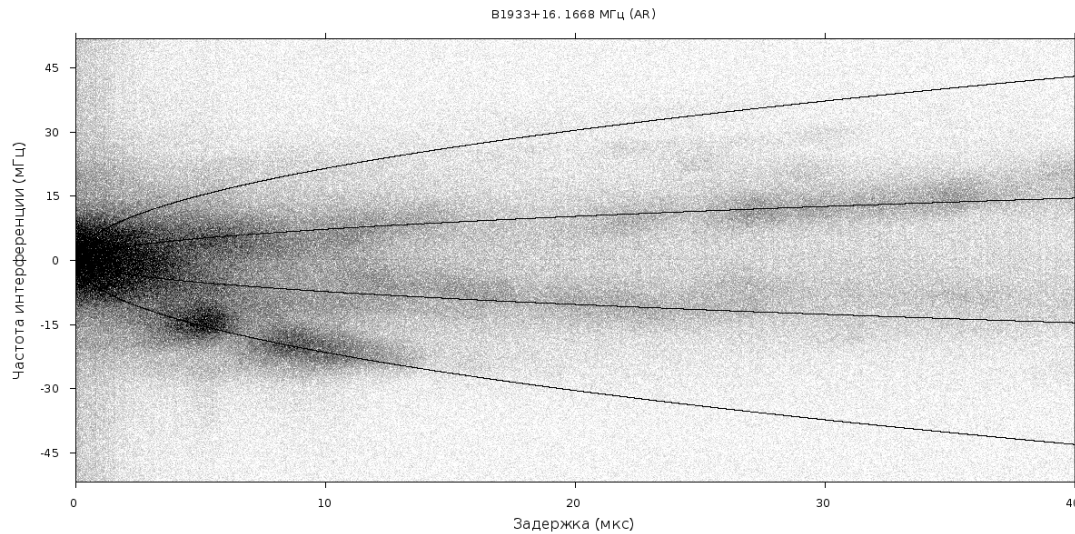
PSR B0834+06 (rags04ah 08.12.2014 GB-GB)



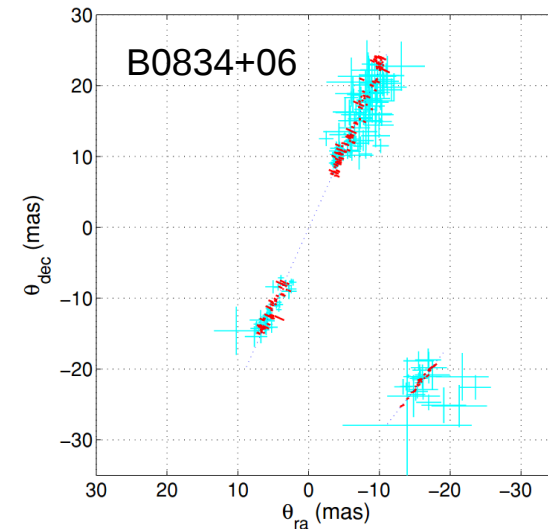
B1933+16 (raks02aa 01.08.2013 AR-AR)



Обзор и постановка задачи



Trang and Rickett. 2007



Briskin et al. 2010

$$\tau = \theta^2 D_{\text{eff}} / 2c$$

$$v = V_{\text{eff}} \cdot \theta / \lambda$$

$$\tau = \frac{D_{\text{eff}} \lambda^2}{2c V_{\text{eff}}^2 \cos^2 \alpha} v^2$$

c — скорость света

λ — длина волны

$$D_{\text{eff}} = \frac{DD_s}{D - D_s}$$

$$V_{\text{eff}} = \frac{D_s}{D - D_s} V_{\perp, p} + V_{\perp, \oplus} - \frac{D}{D - D_s} V_{\perp, s} \approx \frac{D_s}{D - D_s} V_{\perp, p}$$

Изображение

- Должно быть сильно вытянутым (линия)
- Располагаться примерно параллельно V_{eff}

Что мы можем найти?

- Мониторинг параметров рассеяния τ_{sc} , t_{dif} , Δf_{dif} , β . Исследование изменчивости рассеяния.
- Измерение размеров кружков рассеяния θ_s .
- Определение формы кружка рассеяния.
- Измерение расстояния до рассеивающих экранов – исследование структуры межзвездной среды вдоль луча зрения.

Содержание

1. Обзор и постановка задачи
2. Наблюдения и первичная обработка
3. Результаты наблюдений
4. Определение расстояния до рассеивающих экранов

Радиоастрон



Зеркало $\varnothing$ 10 м.

Приемники: 324 МГц, 1664 МГц, 4.8 ГГц, 22 ГГц.

Две полосы по 16 МГц*.

Орбита (начальная):

$T = 8.7$ сут

$e = 0.88$

$a = 178726$ км

$i = 60^\circ$

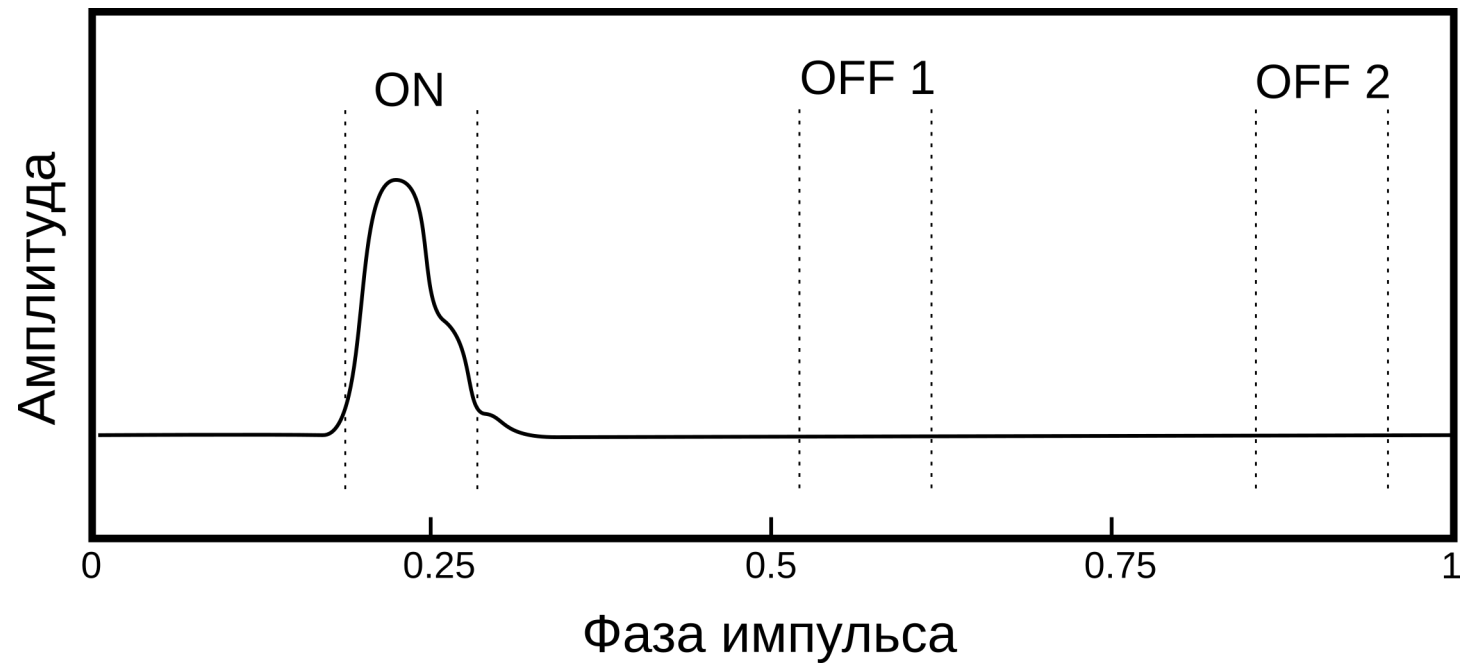
Код	Название и расположение	Диаметр главного зеркала, м
AT	АТКА, Обсерватория им. Пола Уайлда, Нарабрай, Австралия	22 м ^a
AR	Аресибо, Пуэрто-Рико	305 м
CD	Радиоастрономическая обсерватория Седуна, Австралия	30 м
EF	Эффельсбергский радиотелескоп, Германия	100 м
GB	Радиотелескоп имени Роберта С. Бёрда, Грин-Бэнк, США	100 × 110 м
HN	Хартебестхукская радиоастрономическая обсерватория, Йоханнесбург, ЮАР	26 м
HO	Обсерватория Маунт Плезант, Хобарт, Австралия	26 м
KL	Калязинская радиоастрономическая обсерватория, Россия	64 м
MP	Обсерватория Мопра, Кунабарабран, Австралия	22 м
PA	Обсерватория в Парксе, Паркс, Австралия	64 м
SC	Санта-Крус, Американские Виргинские Острова	25 м ^b
SV	Радиоастрономическая обсерватория «Светлое», Россия	32 м
TB	Комплекс дальней космической связи в Канберре, Тидбинбилла, Австралия	70 м
TR	Пивницкая астрономическая обсерватория, Торуньский астрономический центр, Польша	32 м
WB	Система апертурного синтеза в Вестерборке (WSRT), Нидерланды	25 м ^c

^a6 телескопов, работающих в режиме интерферометра.

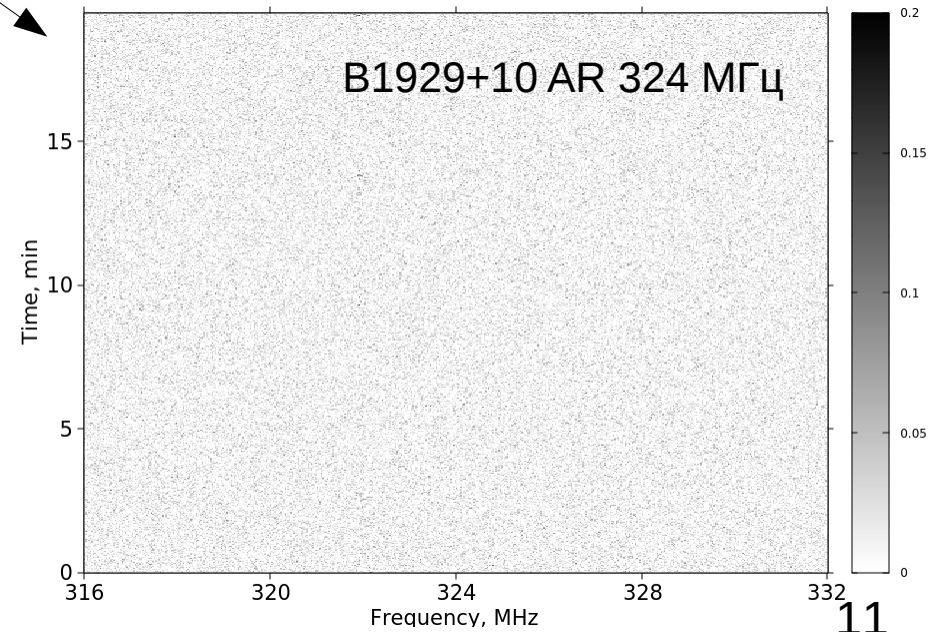
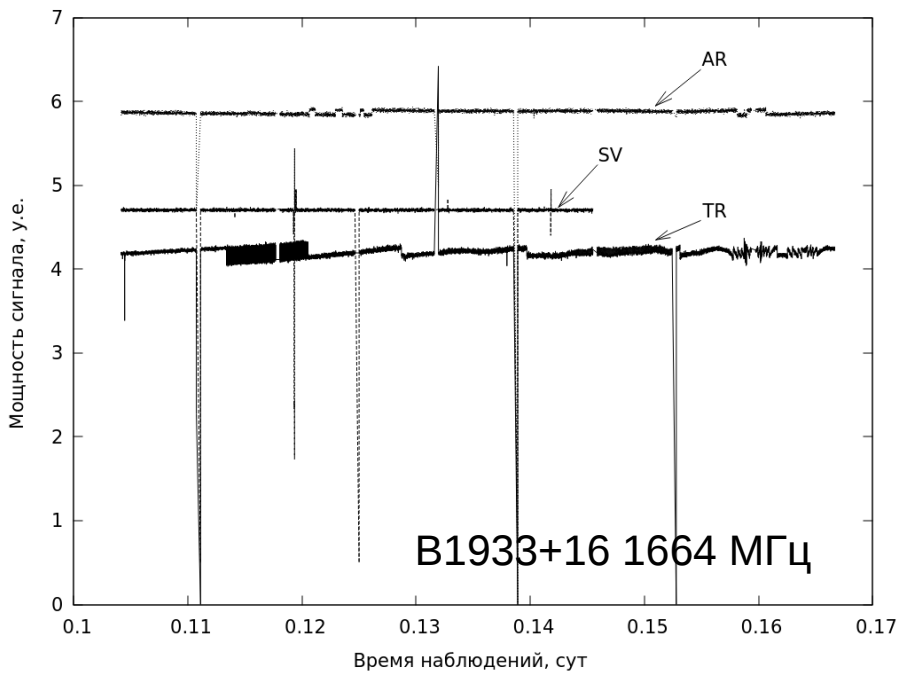
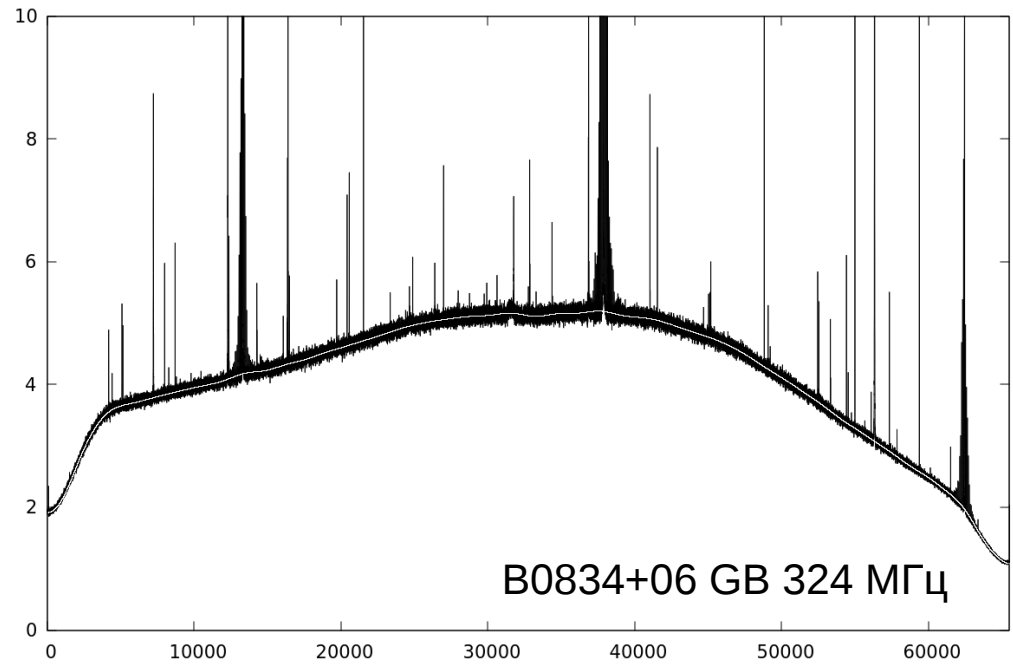
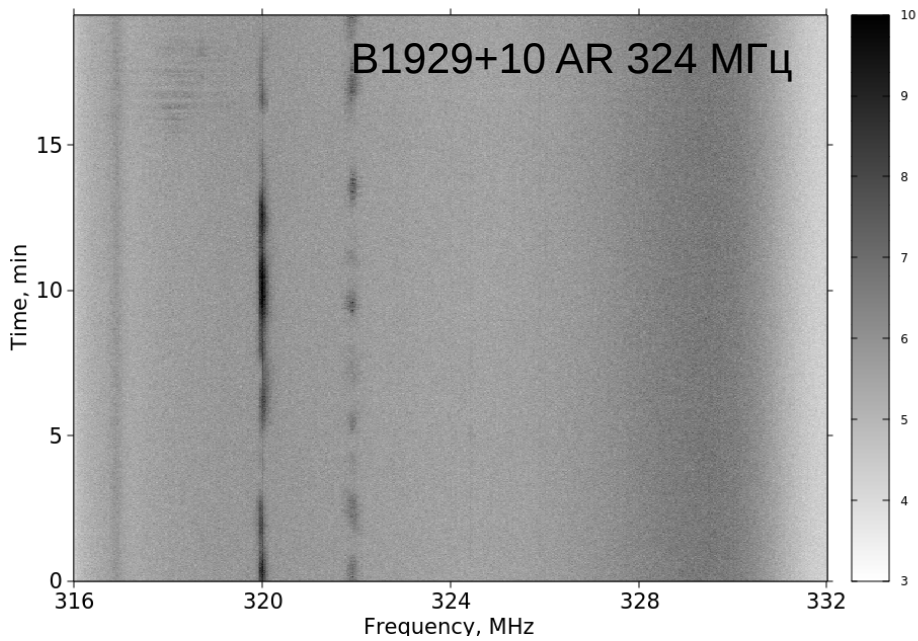
^bЧасть VLBA

^cВ 2013 году началась масштабная модернизация системы, поэтому в большинстве рассматриваемых сеансов использовался только один из телескопов антенной решетки.

Корреляционная обработка



Обработка динамических спектров



Пульсары и наблюдения

Пульсар	P , с	D , кпк	$V_{p\perp}$, км/с
B0329+54	0.7145	$1.03^{+0.13}_{-0.12}$	95 ± 13
B0823+26	0.5307	0.36 ± 0.08	190 ± 50
B0833-45	0.08933	$0.287^{+0.019}_{-0.017}$	78 ± 5
B0834+06	1.2738	0.62 ± 0.06	150 ± 20
B1237+25	1.3824	0.85 ± 0.06	480 ± 30
B1641-45	0.4551	4.5 ± 0.4	
B1749-28	0.5626	$0.2^{+1.1}_{-0.1}$	6^{+40}_{-6}
B1929+10	0.2265	0.331 ± 0.010	177 ± 6
B1933+16	0.3587	$3.7^{+1.3}_{-0.8}$	230^{+130}_{-100}
B2016+28	0.558	0.95 ± 0.09	30 ± 5

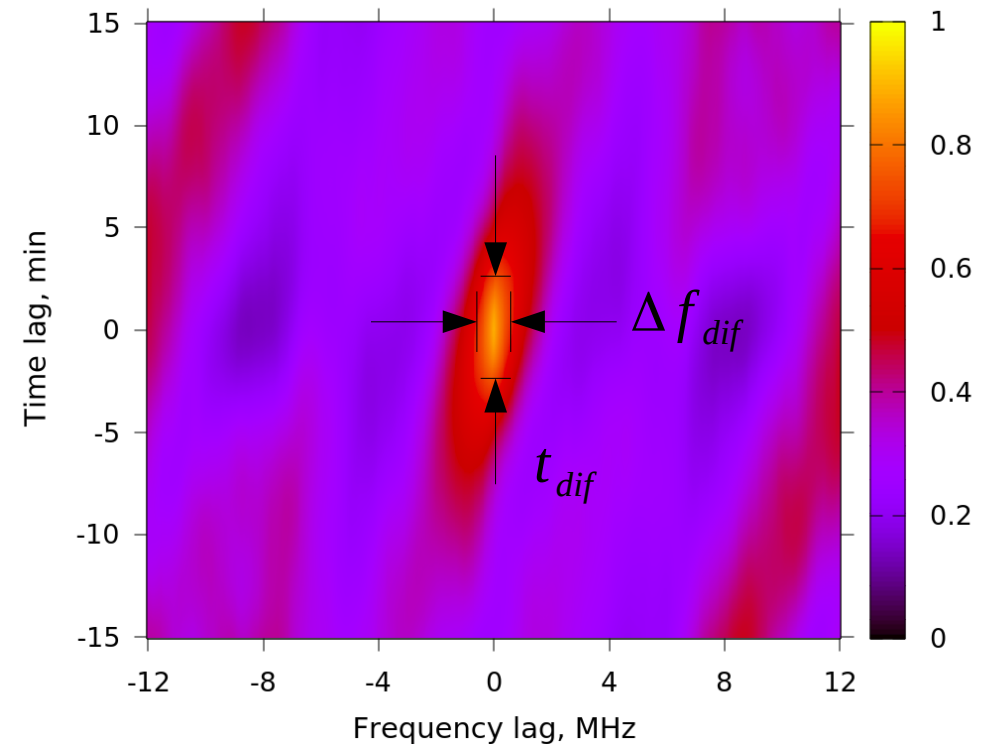
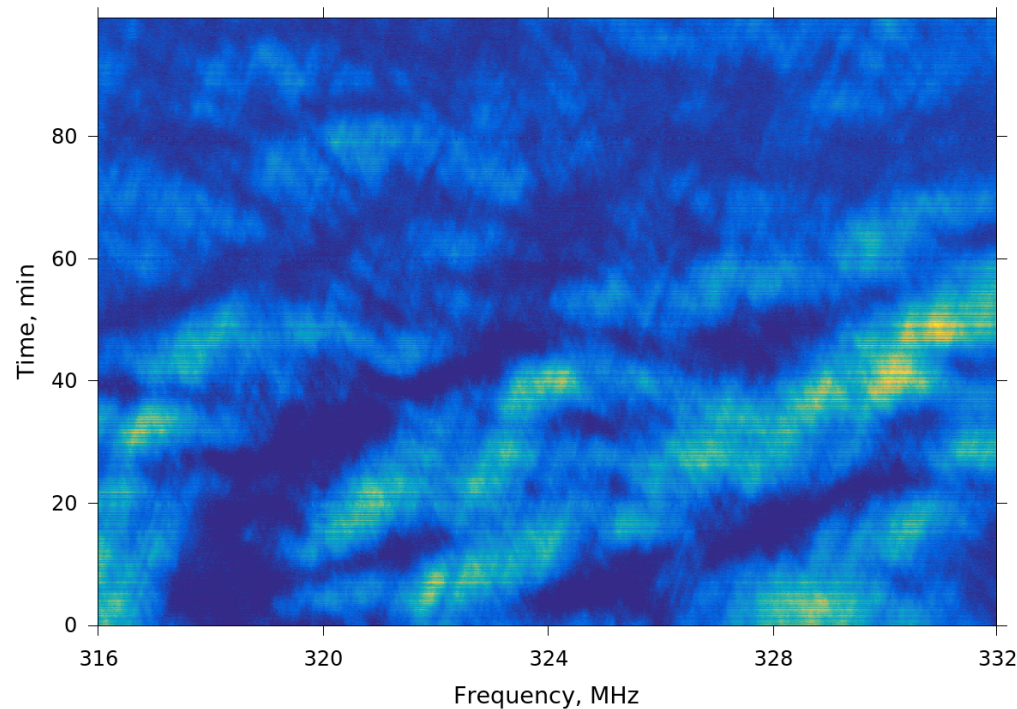
Пульсар	Дата	Диа-пазон	Время на-блюдения	Число каналов
B0329+54	22.11.2013	P	16:20	2048
	01.01.2014	P	12:00	2048
B0823+26	11.03.2015	P	05:16	2048
	11.03.2015	P	08:10	1024
B0833-45 (VELA)	10.05.2012	L	3:00	8192
	18.05.2012	L	1:30	8192
	15.12.2013	L	02:39	8192
B0834+06	26.04.2012	P	01:17	65536
	08.12.2014	P	00:55	65536
	08.04.2015	P	01:35	1024
B1237+25	13.05.2015	P	02:10	512
	07.06.2015	P	01:30	512
B1641-45	18.03.2014	L	10:49	16384
B1749-28	26.05.2014	L	05:59	256
B1929+10	05.05.2015	P	01:40	512
B1933+16	01.08.2013	P	01:30	8192
		L		2048
B2016+28	22.05.2015	P	00:55	4096

Содержание

1. Обзор и постановка задачи
2. Наблюдения и первичная обработка
3. Результаты наблюдений
4. Определение расстояния до рассеивающих экранов

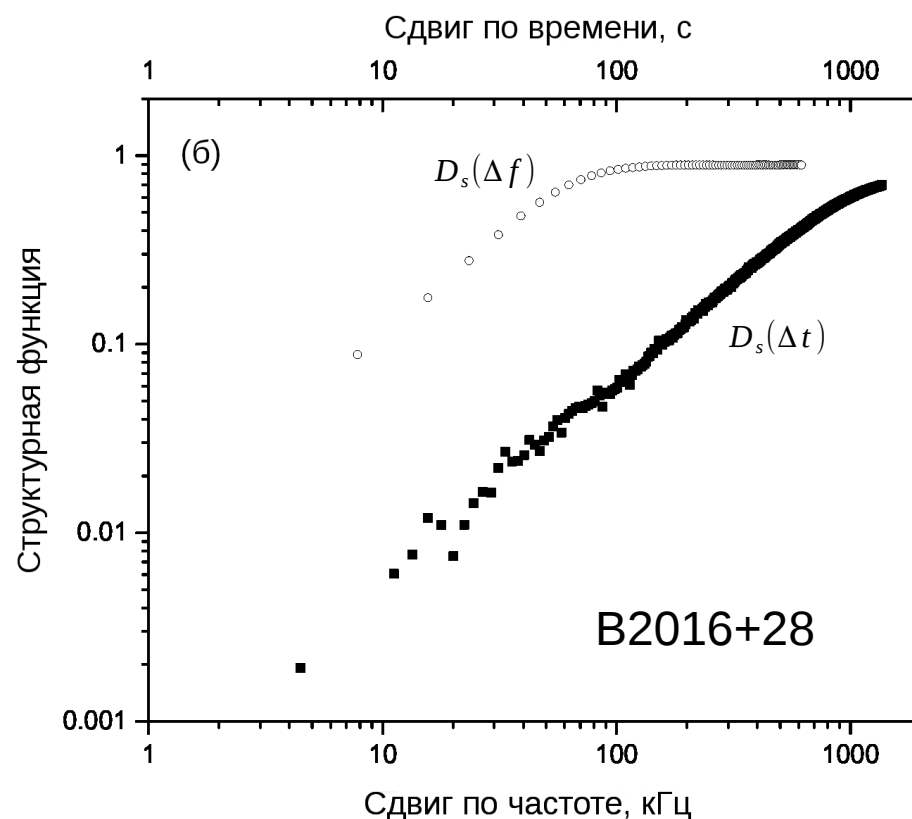
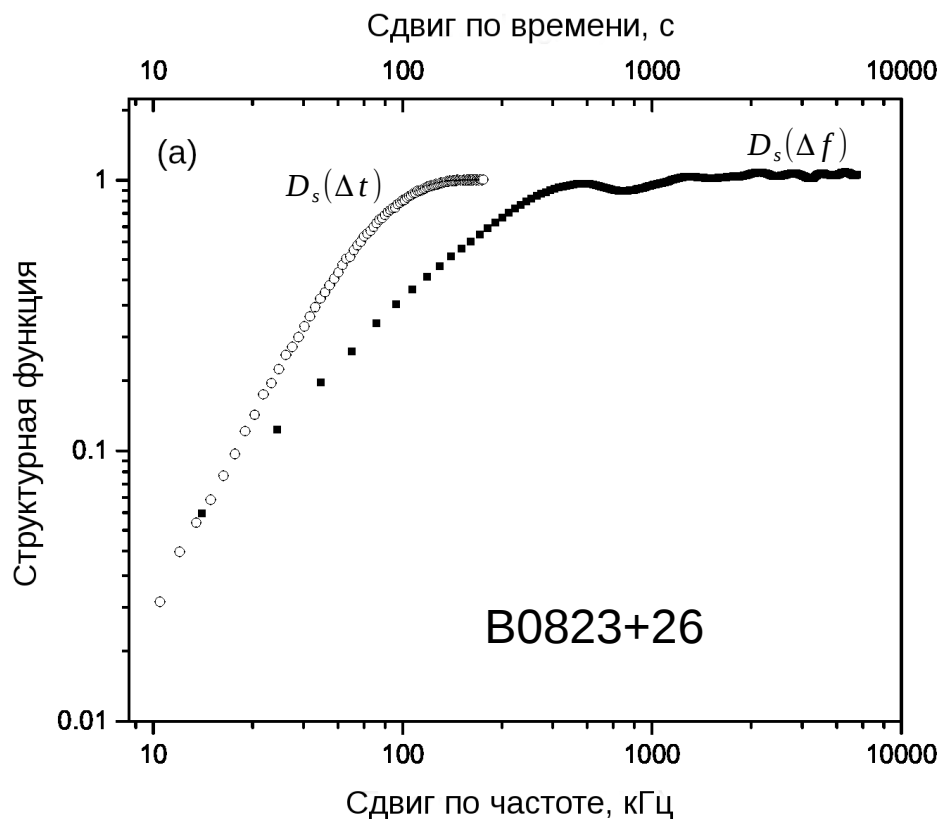
Измерение полосы декорреляции и времени мерцания

B1929+10 324 MHz. AR-AR



$$B_I(\Delta f_n, \Delta t_m) = \frac{\sum_{i=0}^{N_{ch}-1} \sum_{j=0}^{N_{pulses}-1} \tilde{I}_{a,ij} \tilde{I}_{b,i+n,j+m}}{(N_{ch}-n)(N_{pulses}-m)}$$

Структурные функции

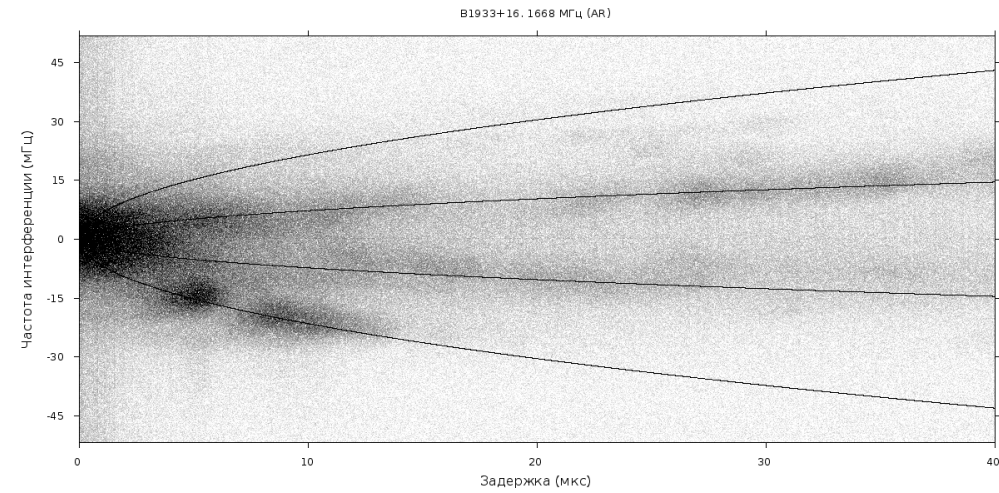
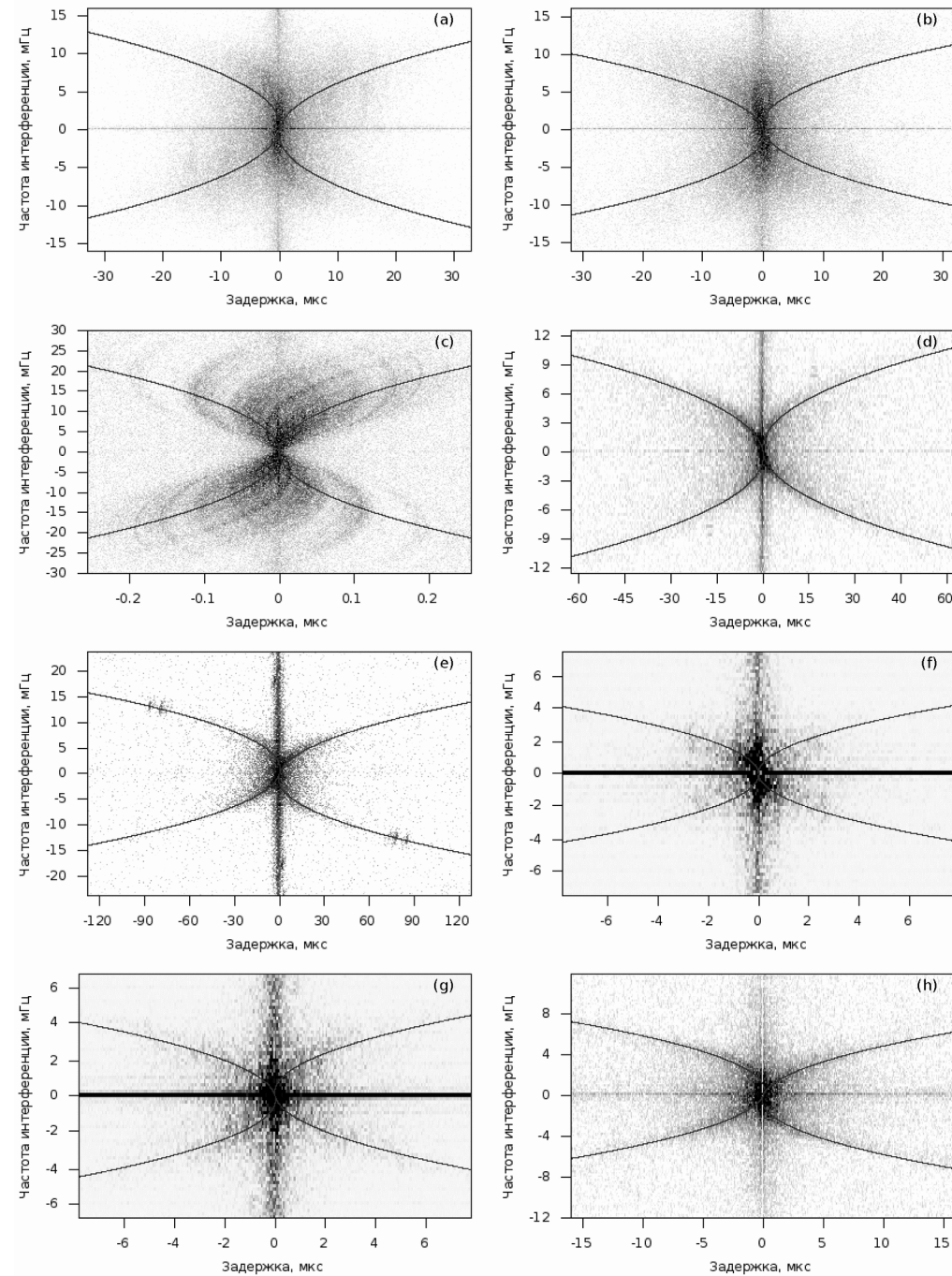


$$D_s(\Delta t) = \frac{B_I(0) - B_I(\Delta t)}{\langle \tilde{I} \rangle} \propto \Delta t^{\alpha_t}, \quad \Delta t \leq t_{dif}$$

$$D_s(\Delta f) = \frac{B_I(0) - B_I(\Delta f)}{\langle \tilde{I} \rangle} \propto \Delta f^{\alpha_f}, \quad \Delta f \leq \Delta f_{dif}$$

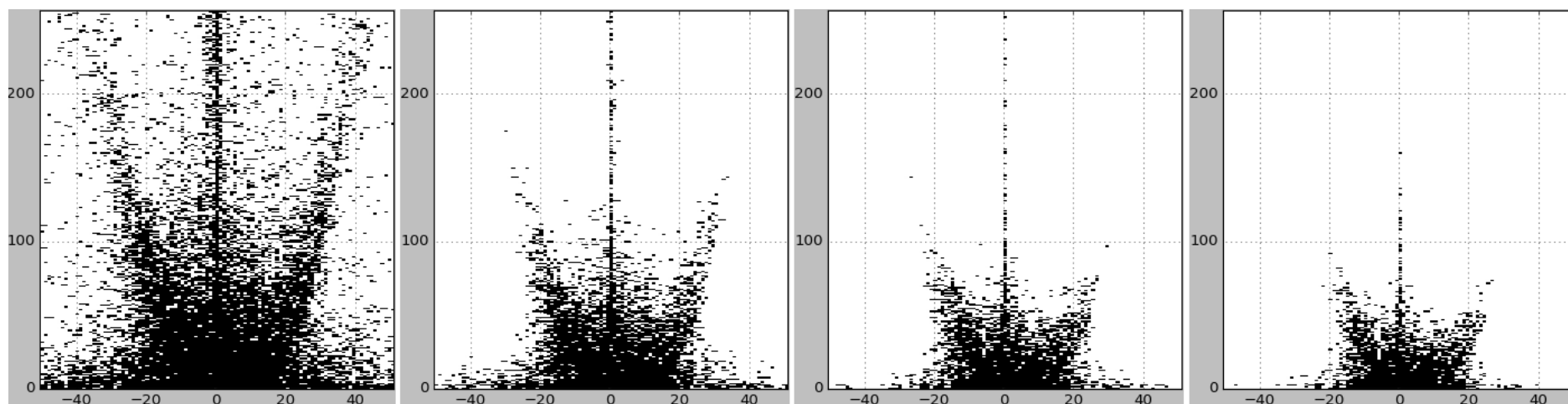
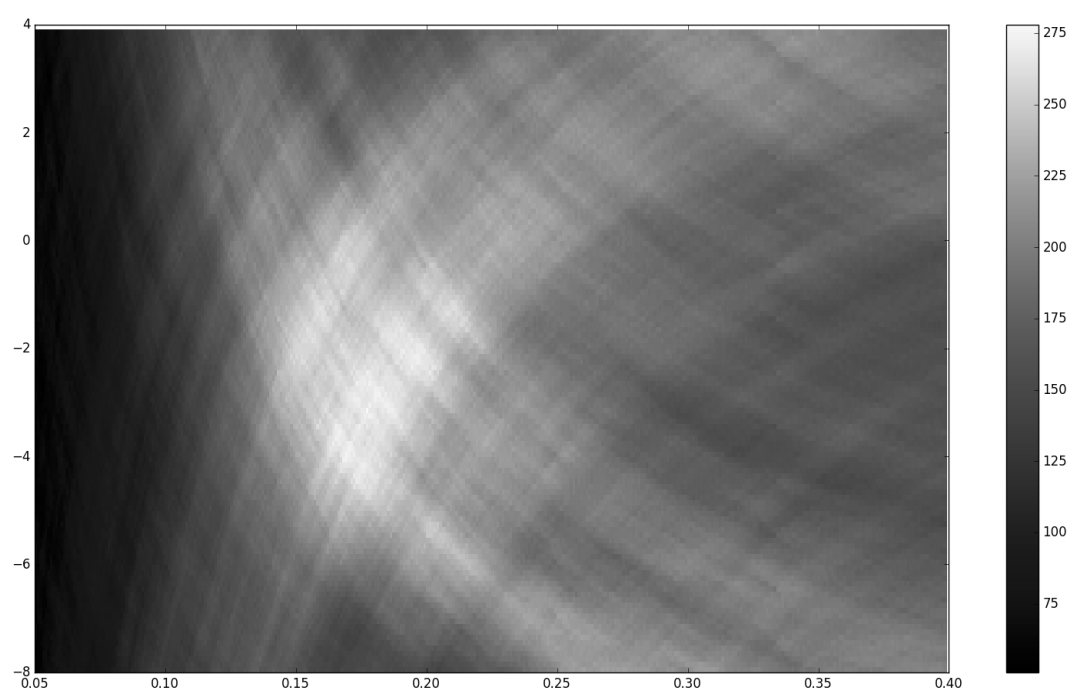
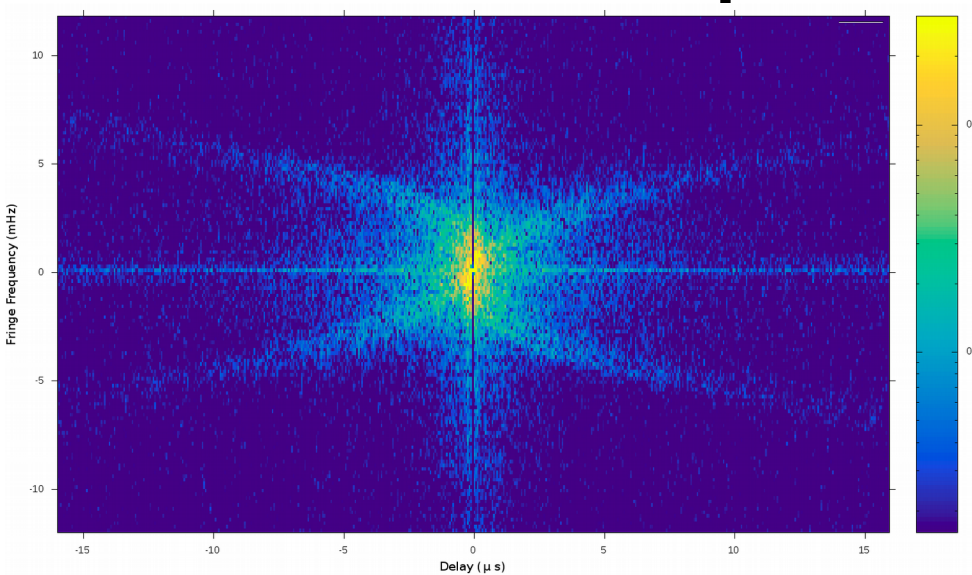
$$\beta = \alpha_t + 2$$

Вторичные спектры



$$\tau = a(v^2 - 2v\Delta v)$$

Вторичные спектры



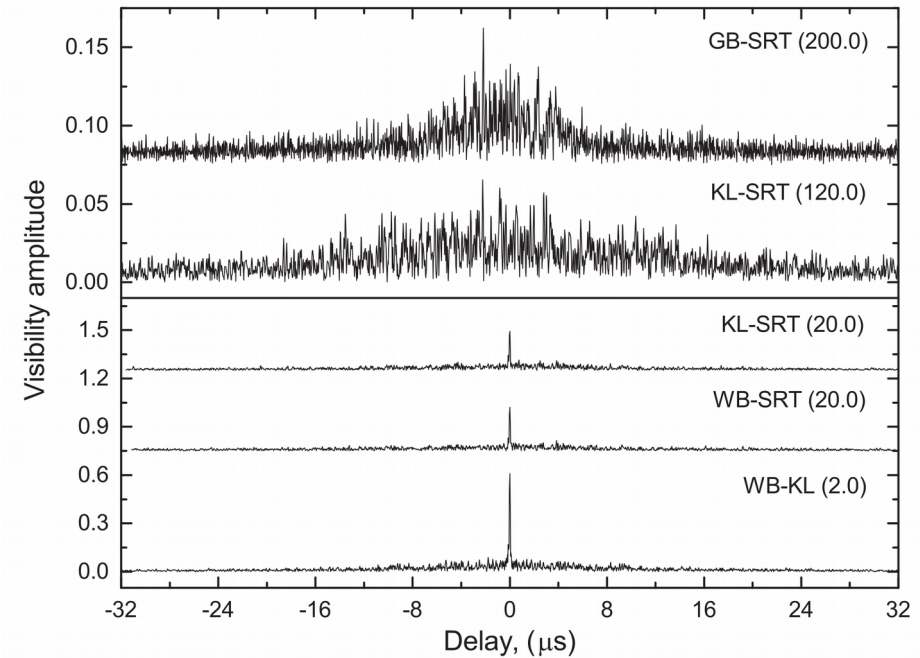
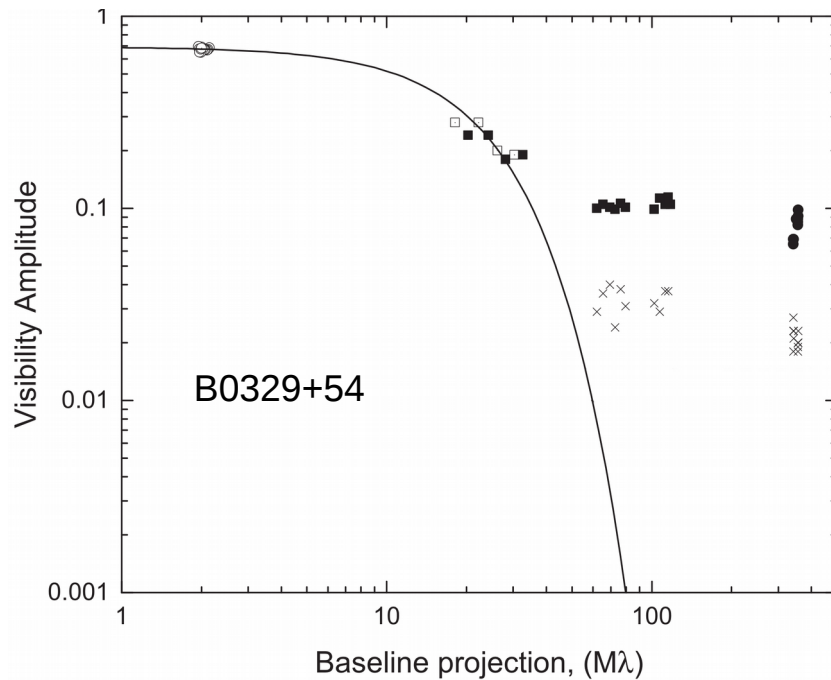
Вторичные спектры

Таблица 3.1: Характеристики параболических дуг во вторичных спектрах пульсаров.

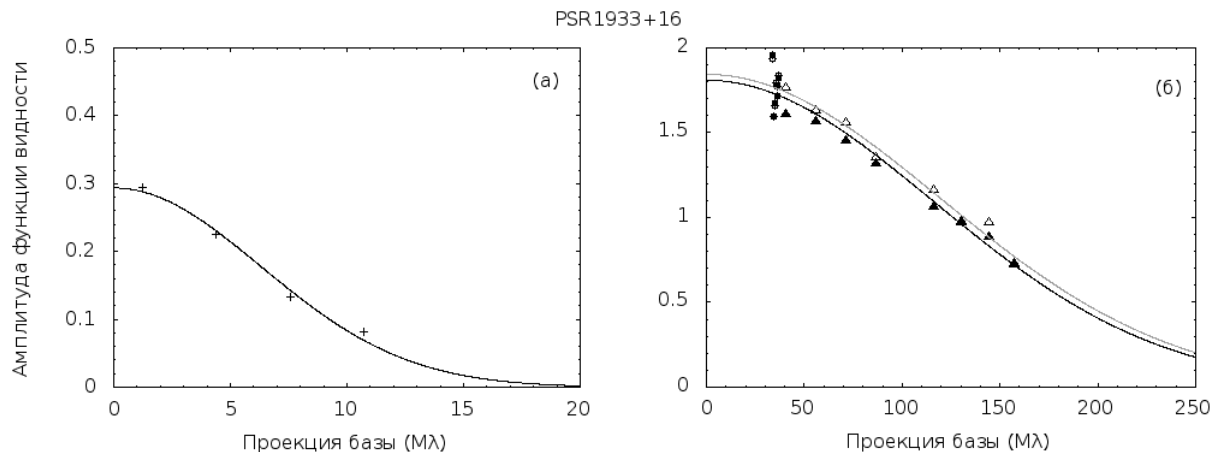
Таблица составлена диссертантом на основе данных из работ [A1, A3].

Пульсар	Дата	a , мкс/мГц ²	Δf , мГц
B0823+26	11.03.2015	0.22 ± 0.03	-0.61 ± 0.17
	11.03.2015	0.28 ± 0.02	0.74 ± 0.13
B0834+06	26.04.2012	0.56 ± 0.03	
	08.12.2014	0.57 ± 0.03	0.41 ± 0.05
	08.04.2015	0.58 ± 0.05	-0.91 ± 0.09
B1237+25	13.05.2015	0.45 ± 0.05	0.04 ± 0.10
	07.06.2015	0.42 ± 0.02	0.21 ± 0.10
B1929+10	05.05.2015	0.39 ± 0.03	-0.48 ± 0.03
B1933+16	01.08.2013	0.216 ± 0.004	0.40 ± 0.07
		0.0225 ± 0.0009	

Измерение размеров дисков рассеяния



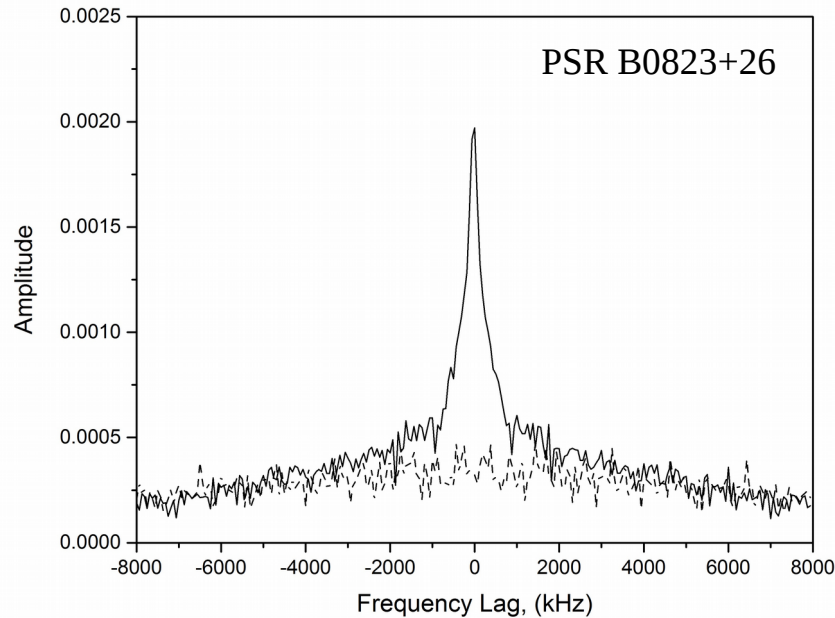
Gwinn et al. 2016



$$V(b) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{\sqrt{2 \ln 2}} \frac{\theta_H b}{\lambda} \right)^{\beta-2} \right]$$

$\theta_H = \sqrt{8 \ln 2} \theta_S$ – FWHM диска рассеяния

Измерение размеров дисков рассеяния



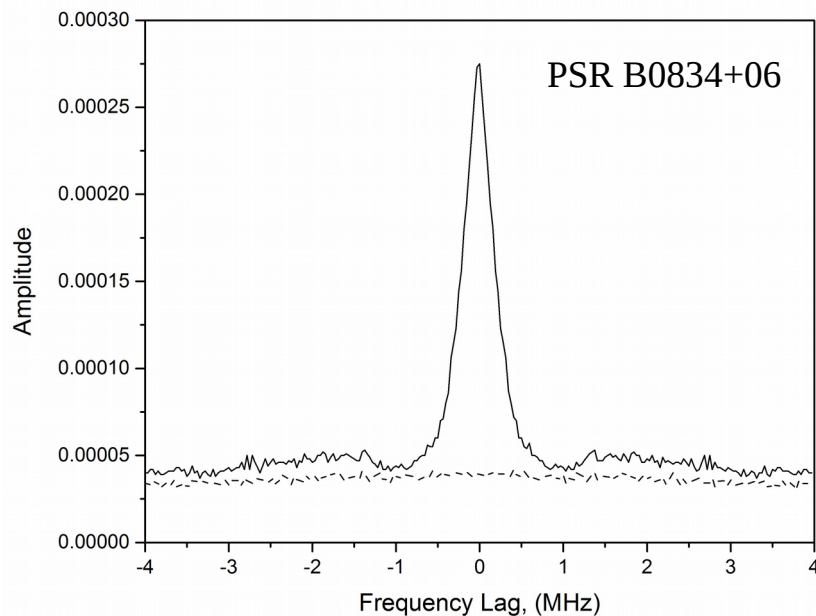
Двумерная корреляционная функция видности

$$J_f(\mathbf{b}, \Delta f) = |\langle \tilde{V}(\mathbf{b}, f, t) \tilde{V}^*(\mathbf{b}, f + \Delta f, t) \rangle|$$

В режиме сильных мерцаний

$$J_f(\mathbf{b}, \Delta f) = |B_u(\Delta f)|^2 + |B_u(\mathbf{b})|^2$$

$B_u(\mathbf{b})$ – пространственная ковариационная функция



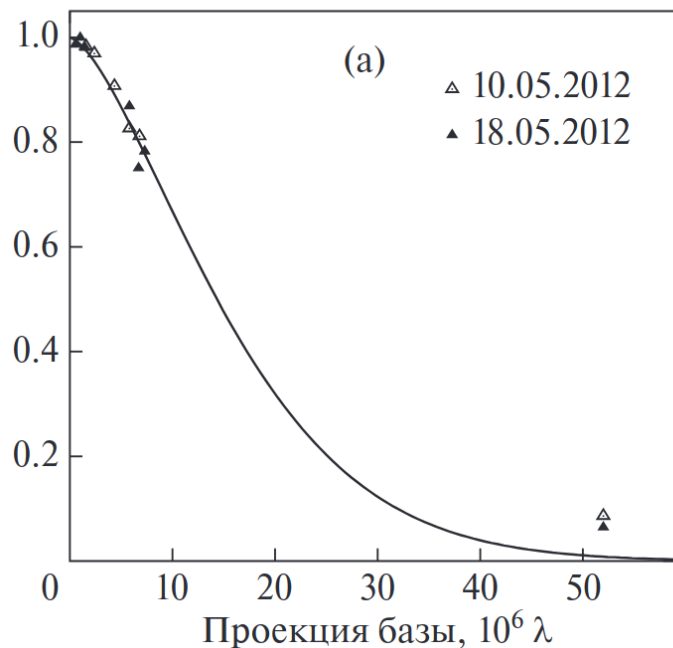
$$\frac{J_f(\mathbf{b}, \Delta f > \Delta f_{dif})}{J_f(\mathbf{b}, \Delta f = 0)} = \frac{|B_u(\mathbf{b})|^2}{1 + |B_u(\mathbf{b})|^2}$$

$$B_u(\mathbf{b}) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{|\mathbf{b}|}{\rho_{dif}} \right)^{\beta-2} \right]$$

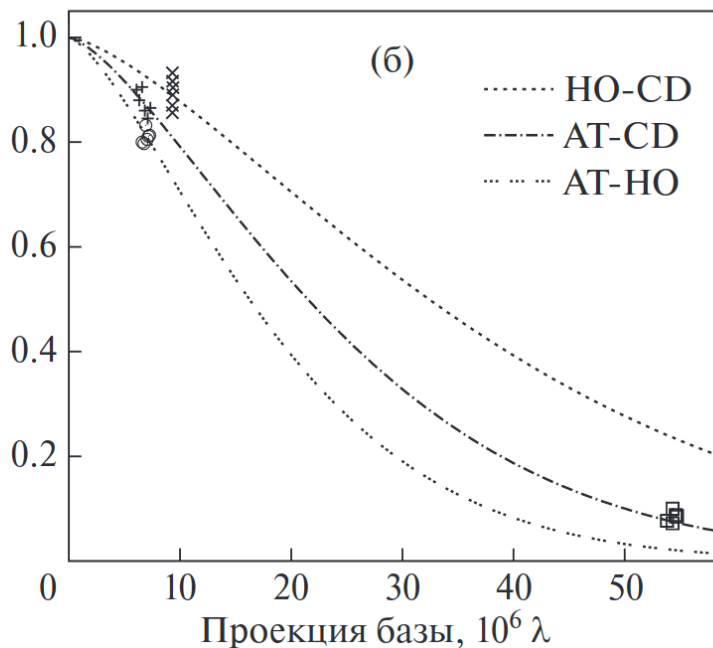
$$\theta_H = \frac{\sqrt{2 \ln 2} \lambda}{\pi \rho_{dif}}$$

Анизотропия диска рассеяния

Амплитуда функции видности

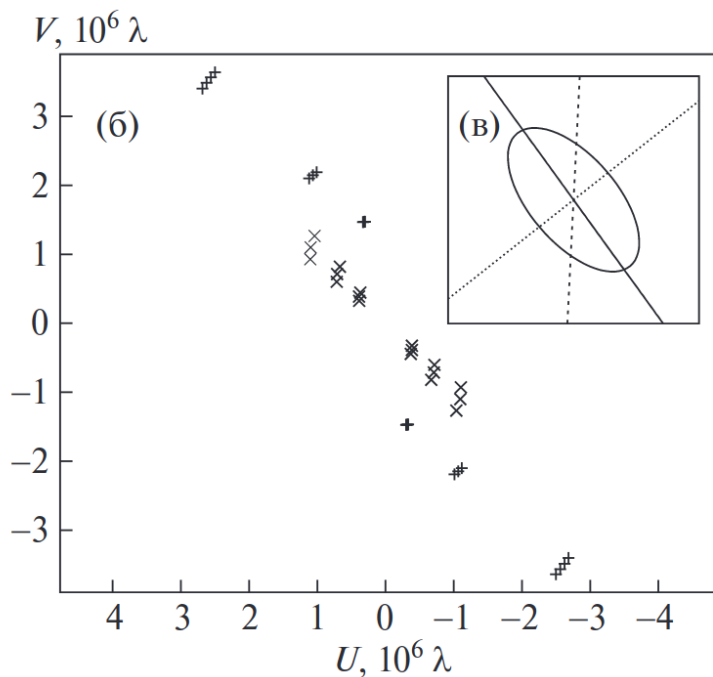
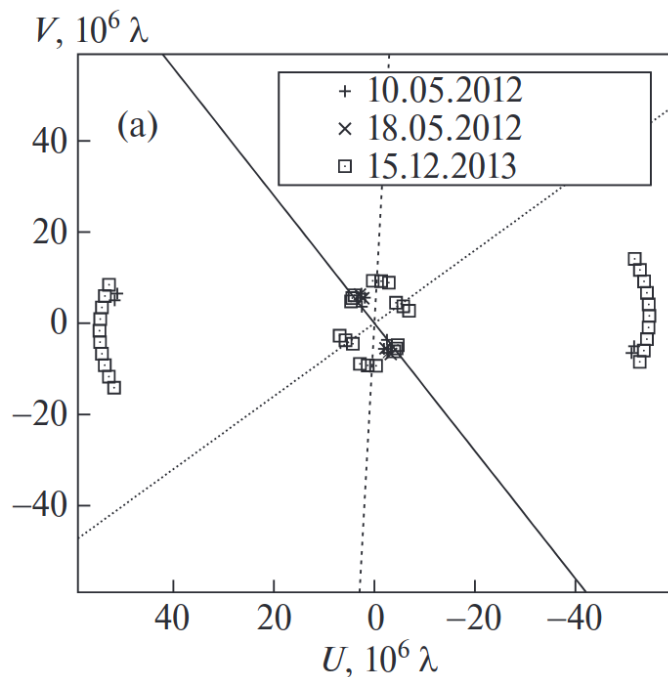


Амплитуда функции видности



2012 год
 $\theta_H = 6.5 \text{ mas}$

2013 год
 $\theta_H = 8.0 \text{ mas}$ (AT-HO)
 $\theta_H = 4.5 \text{ mas}$ (AT-CD)
 $\theta_H = 3.8 \text{ mas}$ (HO-CD)



2:1

Измеренные параметры мерцаний

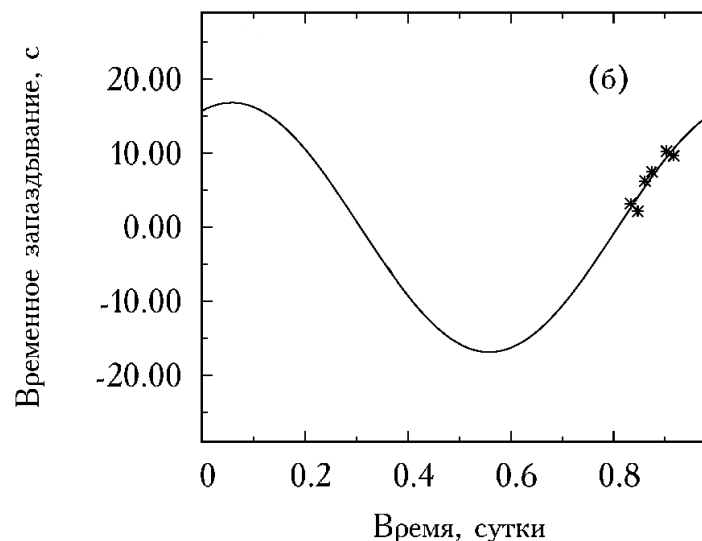
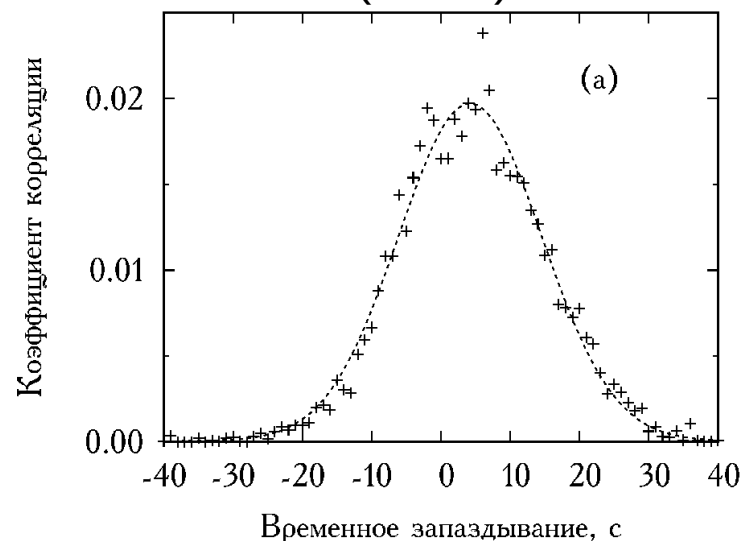
Пульсар	Дата	Δf_{dif} , кГц	t_{dif} , с	α_t	α_f	β	τ_{sc} , мкс	$\theta_H, 10^{-3''}$
B0329+54	22.11.2013	7(2)	110(2)	—	—	—	11.6(8)	—
	01.01.2014	7(2)	102(2)	—	—	—	12.5(7)	5.0(8)
B0823+26	11.03.2015	140(5)	70(3)	1.65(2)	0.92(1)	3.65(2)	0.44(4)	1.8(2)
	11.03.2015	—	—	—	—	—	—	—
B0833–45	10.05.2012	8.4(5)	6.4(3)	1.48(9)	0.98(2)	3.48(9)	6.3(3), 19.0(3)	6.4(4)
	18.05.2012	7.3(1), 28.3(3)	6.2(1)	1.6(1)	0.99(3)	3.6(1)	9.2(1)	6.4(4)
	15.12.2013	6.2(2), 33.3(3)	9.0(3)	1.42(4)	1.42(6)	3.42(4)	3.6(3), 21.5(5)	8.0(3) $\times$ 3.6(2)
B0834+06	26.04.2012	4.00(5)	12(2)	0.83(4)	—	2.83(4)	8(1)	0.78(16)
	08.12.2014	350(20)	314(10)	1.75(1)	1.06(1)	3.75(1)	—	—
	08.04.2015	210(10)	220(15)	1.13(1)	1.13(1)	3.13(1)	0.76(9)	1.2(4)
B1237+25	13.05.2015	526(18)	209(1)	1.01(3)	1.04(2)	3.01(3)	<0.081	<0.8
	07.06.2015	454(7)	285(1)	0.99(2)	1.00(2)	3.00(2)	<0.114	—
B1641–45	18.03.2014	0.062(2)	0.20(5)	—	—	—	2600	27(5)
B1749–28	26.05.2014	410(100)	220(20)	—	—	—	310(40)	>0.5
B1929+10	05.05.2015	619(5)	233(1)	1.36(3)	0.68(6)	3.36(3)	<0.106	0.63(6)
B1933+16	01.08.2013	50.4(1.1)	41.6(5)	—	—	3.7(4)	3.2(1)	0.84(4)
		0.25(15)	—	—	—	—	600(400)	12.3(6)
B2016+28	22.05.2015	43(2)	2125(230)	1.05(2)	1.05(2)	3.05(2)	2.50(5)	2.1(3)

Содержание

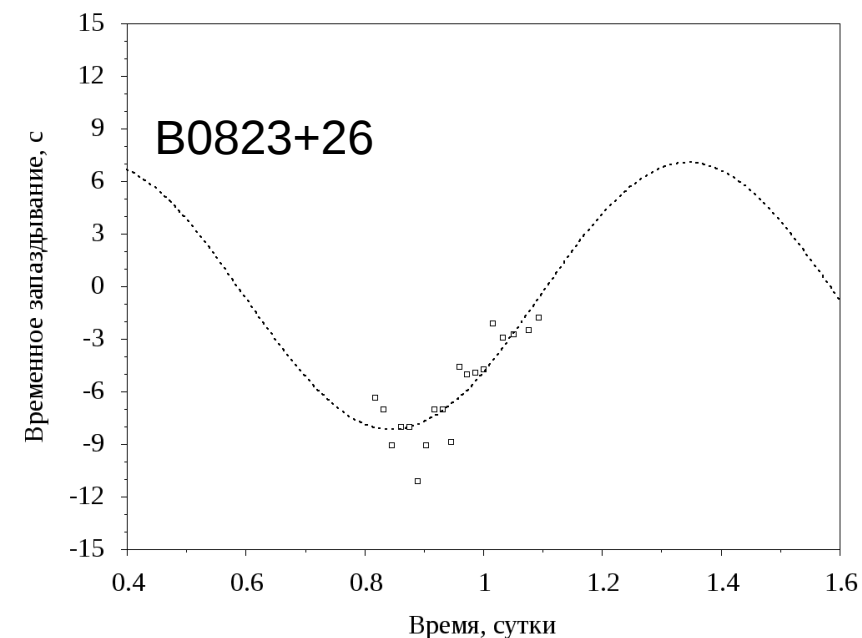
1. Обзор и постановка задачи
2. Наблюдения и первичная обработка
3. Результаты наблюдений
- 4. Определение расстояния до рассеивающих экранов**

Кросс-корреляция динамических спектров

B0833-45 (VELA)



$$\begin{aligned}
 T &= 2.5 \text{ ч} \\
 AT-HH &\cong 9700 \text{ км} \\
 V_p &= 78 \pm 5 \text{ км/с} \\
 V_{ISS} &= 540 \text{ км/с} \\
 s &= 0.13 \pm 0.10
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 T &= 7 \text{ ч} \\
 GB-WB &\cong 4900 \text{ км} \\
 V_p &= 190 \pm 50 \text{ км/с} \\
 V_{ISS} &= 610 \text{ км/с} \\
 s &= 0.23 \pm 0.07
 \end{aligned}$$

$$b_V = \frac{(b_{uv} \cdot V_{ISS})}{|V_{ISS}|} \propto \sin t$$

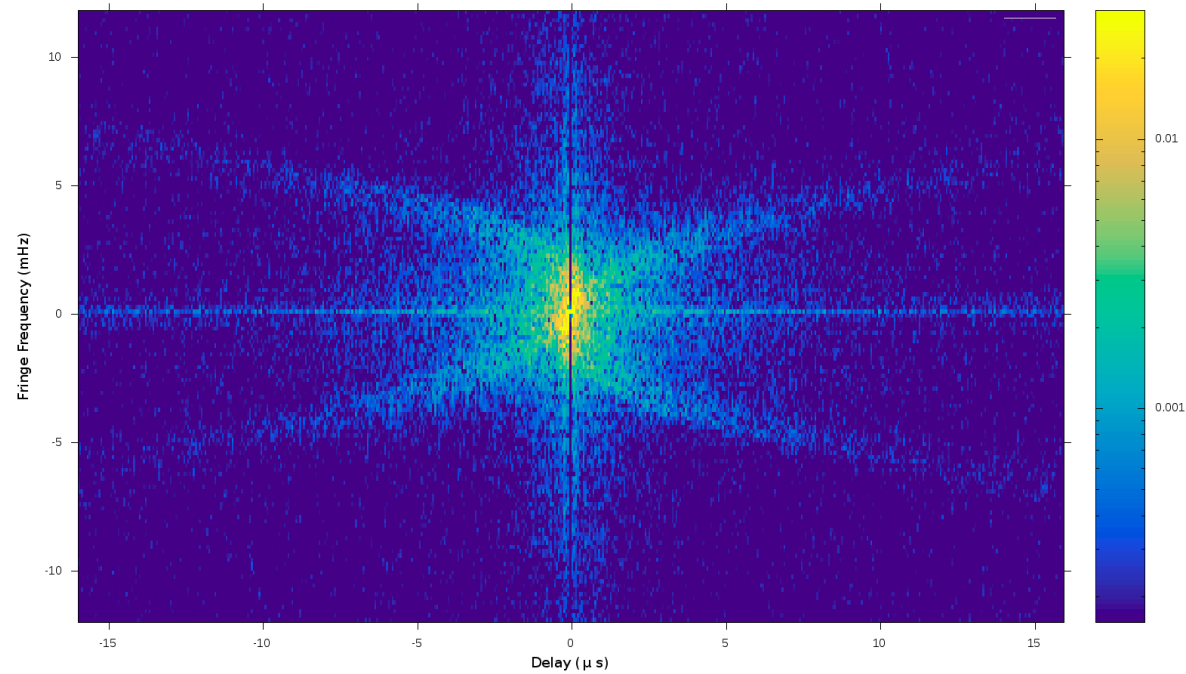
$$V_{ISS} = V_o + \frac{1}{s} V_s - \frac{1-s}{s} V_p$$

Расстояние из динамических спектров

$$\tau = \frac{D_{\text{eff}} \lambda^2}{2c V_{\text{eff}}^2 \cos^2 \alpha} v^2 = a v^2$$

$$D_{\text{eff}} = \frac{DD_s}{D - D_s}$$

$$V_{\text{eff}} = \frac{D_s}{D - D_s} V_{\perp, \text{p}} + V_{\perp, \oplus} - \frac{D}{D - D_s} V_{\perp, \text{s}} \approx \frac{D_s}{D - D_s} V_{\perp, \text{p}}$$



$$s = \left(\frac{2290 \cdot \lambda^2}{a \mu^2 D} + 1 \right)^{-1}$$

Анализ размера кружка рассеяния

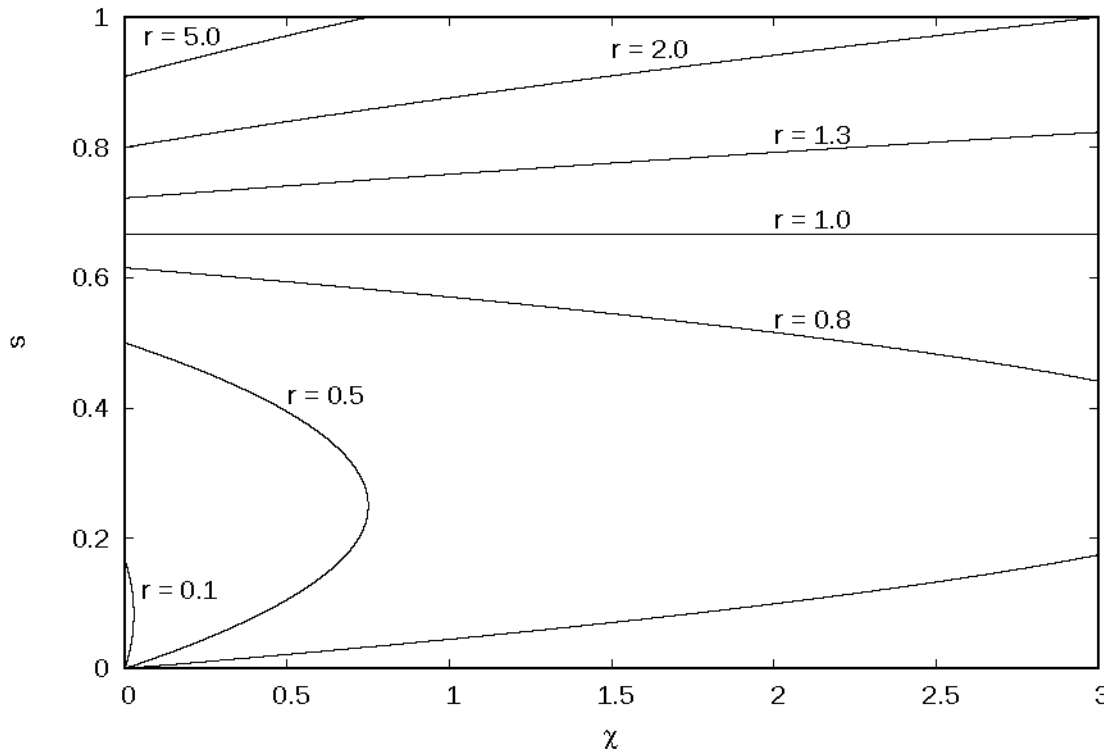
$$\theta_H^2 = \frac{4 \ln 2}{D^2} \int_0^D z^2 \psi(z) dz$$

$$\psi = \Psi_0 = \text{const} \Rightarrow \theta_{H,u}^2 = 16 \ln 2 c \tau_{sc} / D$$

$$\tau_{sc} = \frac{1}{2cD} \int_0^D z(D-z) \psi(z) dz$$

$$\psi(z) = \Psi_1 \delta(z - (D - D_s)) \Rightarrow$$

$$s = \left(1 + \frac{\theta_{H,u}^2}{2\theta_H^2} \right)^{-1}$$



$$\psi(z) = \Psi_1 \delta(z - (D - D_s)) + \Psi_0$$

$$s = \frac{1 \pm \left[1 - \frac{(1+2r)(1-r)}{3r^2} \chi \right]^{1/2}}{2+r^{-1}}$$

$$r = \theta_H^2 / \theta_{H,u}^2$$

$$\chi = \Psi_0 D / \Psi_1$$

Анализ размера кружка рассеяния

$$B_u(\mathbf{b}) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{|\mathbf{b}|}{\rho_{\text{dif}}} \right)^{\beta-2} \right]$$

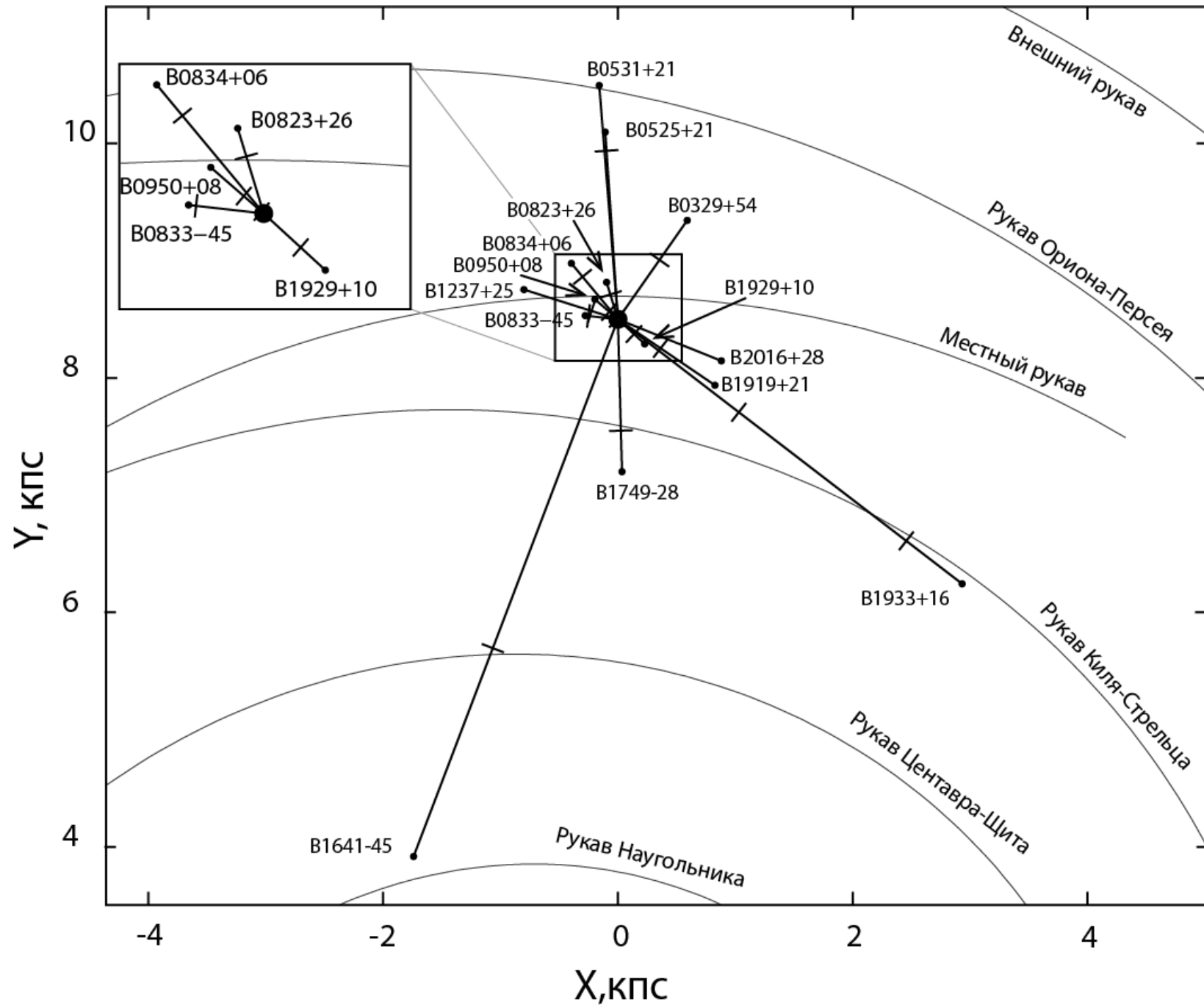
$$\frac{\rho_{\text{dif}}}{t_{\text{dif}}} = V_{ISS} = V_o + \frac{1}{s} V_s - \frac{1-s}{s} V_p$$

$$s = \left(1 + \frac{\rho_{\text{dif}}}{t_{\text{dif}} V_p} \right)^{-1}$$

Положение рассеивающих экранов

Пульсар	Дата	s_1	s_2	s_3	s_4
B0329+54	01.01.2014	0.5(1)	0.37(6)		
B0823+26	11.03.2015	0.53(16)	0.28(8)		0.34(10)
	11.03.2015			0.23(3)	0.40(9)
B0833-45	10.05.2012			0.13(10)	
	18.05.2012				
	15.12.2013	0.21(5)	0.19(8)		
B0834+06	26.04.2012	0.020(14)	0.019(9)		0.27(9)
	08.12.2014				0.27(9)
	08.04.2015	0.36(6)	0.34(11)		0.27(10)
B1237+25	13.05.2015				0.73(4)
	07.06.2015				0.72(2)
B1641-45	18.03.2014	0.36(2)			
B1749-28	26.05.2014	$0.07^{+0.27}_{-0.04}$		0.22	
B1933+16	01.08.2013	$0.26^{+0.07}_{-0.06}$			$0.64^{+0.15}_{-0.19},$ $0.16^{+0.13}_{-0.08}$
B1929+10	05.05.2015	$>0.36(5)$	0.27(11)		0.436(10)
B2016+28	22.05.2015	0.42(8)	> 0.9		

Положение рассеивающих экранов



Положения, выносимые на защиту

1. С помощью наземно-космического интерферометра «Радиоастрон» впервые надежно измерены угловые размеры дисков рассеяния для 9 пульсаров. Измеренные значения лежат в интервале от 0.78 до 12.3 миллисекунд дуги на частоте 324 МГц и от 0.5 до 27 миллисекунд дуги на частоте 1.664 ГГц. Такие величины недоступны для измерения на наземных РСДБ системах.
2. Сравнение измеренных угловых размеров дисков рассеяния с временем запаздывания рассеянных лучей показало, что модель однородной рассеивающей среды не согласуется с наблюдательными данными ни для одного из исследованных пульсаров. Следовательно, рассеяние происходит на сравнительно компактных слоях турбулентной плазмы в Галактике.
3. В модели тонкого рассеивающего экрана определены расстояния до этих компактных слоев плазмы в направлении каждого пульсара. В ряде случаев положения таких выделенных слоев турбулентной плазмы совпадает с известными физическими структурами в Галактике: это области спиральных рукавов — местный спиральный рукав для пульсара B0823+26, рукав Центавра-Щита для пульсара B1641–45 и рукав Киля-Стрельца для пульсара B1749–28. Для последних двух объектов возможна связь с конкретными рассеивающими туманностями — это зоны HII G339.1-04 и RCW 142 соответственно. В случае пульсара B0833 – 45 (пульсар в созвездии Парусов, Vela) положение рассеивающего экрана оказалось близким к положению оболочки остатка сверхновой. Такие совпадения подтверждают применимость модели тонкого рассеивающего экрана для интерпретации экспериментальных данных.
4. Обнаружено анизотропное рассеяние радиоизлучения пульсара в созвездии Парусов (Vela pulsar). Непосредственно измерен диск рассеяния, который имеет форму эллипса с отношением осей 2:1. Такое анизотропное рассеяние может быть объяснено особенностями турбулентных слоев в остатке вспышки сверхновой.

Положения, выносимые на защиту

5. Во вторичных динамических спектрах нескольких пульсаров (B0823+26, B0834+26, B1237+25, B1929+10 и B1933+16) с помощью разработанной специальной методики выделены специфические структуры, называемые параболическими арками. Для объектов B1237+25 и B1933+16 такие структуры выявлены впервые. Само существование параболических арок указывает на анизотропное рассеяние в компактных плазменных слоях в соответствии с существующей теорией.
6. Были определены расстояния до рассеивающих экранов несколькими методами, в том числе для пульсаров B0823+26, B0834+26, B1237+25, B1929+10 и B1933+16 с использованием полученной нами кривизны параболических арок и известному собственному движению пульсаров.
7. Сравнение результатов определения расстояний до рассеивающих экранов несколькими способами показывает удовлетворительные совпадения для пульсаров B0329+54, B1749–28, B1929+10 и обнаруживает значительные расхождения для пульсаров B0823+26, B0834+26, B1933+16 и B2016+28. Наличие таких расхождений свидетельствует о том, что модель тонкого экрана не всегда адекватно описывает явления рассеяния.
8. Рассмотрен теоретически случай рассеяния на тонком экране в комбинации с вкладом от однородно распределенной среды. Показано что положение экрана в такой комбинации не может быть установлено однозначно.
9. Определены характерные масштабы дифракционных мерцаний по времени и частоте для всех исследованных пульсаров. Оказалось, что для пульсара B0834+06 измеренные значения полосы декорреляции изменяются в 50 раз между 2012 и 2014 годом. Такие кардинальные изменения налагают серьёзные ограничения на параметры и свойства пространственной структуры турбулентных слоёв плазмы на луче зрения к этому пульсару.
10. Определены показатели степени спектра пространственных неоднородностей в направлении на пульсары B0823+26, B0833–45, B0834+06, B1237+25, B1929+10, B1933+16 и B2016+28 на основе анализа структурных функций. Полученные значения заключены в интервале от 2.83 до 3.75.

Список публикаций

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Попов М.В., Андрианов А.С., Бартель Н., Гвинн К., Джоши Б.Ч., Джонси Д., Кардашев Н.С., Рудницкий А.Г., Смирнова Т.В., Соголаснов В.А., Фадеев Е.Н., Шишов В.И. Распределение неоднородностей межзвездной плазмы в направлении трех удаленных пульсаров по результатам наблюдений с наземно-космическим интерферометром «Радиоастрон» // *Астрономический журнал* – 2016 – Т. 93, №9 – С. 788–794.
2. Popov M.V., Andrianov A., Fadeev E., Kardashev N., Kovalev Y.Y., Rudnitskiy A., Soglasnov V.A., Bartel N., Gwinn C.R., Johnson M.D., Joshi B.C., Karuppusamy R., Kramer M., Anton Zensus J., Shishov V., Smirnova T. PSR B0329+54: Substructure in the scatter-broadened image discovered with RadioAstron on baselines up to 330 000 km // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* . 2017. V. 465, I.1. pp. 978–985.
3. Fadeev E.N., Andrianov A.S., Burgin M.S., Popov M.V., Rudnitskiy A.G., Zuga V.A., Shishov V.I., Smirnova T.V. Revealing compact structures of interstellar plasma in the Galaxy with RadioAstron // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2018. – V. 480, I.3. – pp. 4199–4210.
4. Fadeev E.N. Uncertainty in measurements of the distances of scattering screens in pulsar observations // *Research in Astronomy and Astrophysics*. – 2018. – V. 18, I.8. – pp. 103–106.
5. Попов М.В., Андрианов А.С., Бургин М.С., Зуга В.А., Рудницкий А.Г., Смирнова Т.В., Соголаснов В.А., Фадеев Е.Н. Анизотропное рассеяние радиоизлучение пульсара B0833–45 в остатке сверхновой в созвездии Парусов // *Астрономический журнал*. – 2019. – Т. 96, №5. – С. 393–406.

Тезисы докладов научных конференций

6. Фадеев Е.Н., Андрианов А.С., Зуга В.А., Попов М.В., Рудницкий А.Г., Смирнова Т.В., Соголаснов В.А., Шишов В.И. Зондирование космической плазмы радиоимпульсами пульсаров в проекте «Радиоастрон» // *Известия крымской астрофизической обсерватории*. – 2018. – Т. 114, №1. – С. 151–156.