

МЕРА ДИСПЕРСИИ В НАПРАВЛЕНИИ ПУЛЬСАРА PSR B1530+27 ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА ЧАСТОТЕ 111 МГц

© 2020 г. А. А. Ершов^{1*}

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева, Пушчинская радиоастрономическая обсерватория
(ПРАО АКЦ ФИАН), Московская обл., Пушкино, Россия

Поступила в редакцию 04.09.2020 г.

После доработки 21.09.2020 г.; принята к публикации 22.09.2020 г.

Проведены наблюдения индивидуальных импульсов пульсара PSR B1530+27. По 11 084 импульсам определена мера дисперсии в направлении этого пульсара $DM = 14.6904 \pm 0.0009$ пк см⁻³. Верхний предел (3σ) на производную меры дисперсии равен $|dDM/dt| < 0.001$ пк см⁻³/год. Сезонные изменения меры дисперсии, связанные с прохождением излучения через межпланетную плазму, не превышают 0.01 пк см⁻³.

Ключевые слова: пульсары, индивидуальные импульсы пульсаров, мера дисперсии.

DOI: 10.31857/S032001082010006X

ВВЕДЕНИЕ

Тайминг (хронометрирование) пульсаров заключается в точном измерении моментов прихода импульсов пульсаров и используется для решения многих задач в физике нейтронных звезд, фундаментальной астрономии и др. Кроме вращательных параметров (и их нерегулярностей) самих нейтронных звезд, большое влияние на моменты прихода импульсов оказывает дисперсия сигнала в межзвездной среде. Для корректного определения дисперсионных задержек и, соответственно, для точного измерения времен прихода импульсов в работах по таймингу нужны точные значения мер дисперсий в направлении пульсаров. Именно поэтому в тайминге используются многочастотные наблюдения. Однако в этом случае могут возникнуть трудности с выравниванием профилей излучения вследствие изменения этих профилей с частотой.

На больших временных интервалах возможны вековые вариации самой меры дисперсии как вследствие больших скоростей пульсаров по сравнению со скоростью окружающей их межзвездной среды, так и вследствие орбитального движения Земли вокруг Солнца. Лэм и др. (2016) провели подробный анализ систематических и стохастических вариаций меры дисперсии пульсаров. Петрофф и др. (2013) по пятилетним тайминговым наблюдениям 168 пульсаров обнаружили значимые (3σ) вариации меры дисперсии для 11 пульсаров,

в том числе для 4 пульсаров – на уровне выше 5σ . Высокая точность измерения меры дисперсии и ее вариаций достигается при наблюдениях миллисекундных пульсаров (Йоу и др., 2007; Деморест и др., 2013). Для пульсаров с большими периодами точность заметно хуже. Например, в каталоге пульсаров ATNF (Манчестер и др., 2005) имеется 696 пульсаров с периодами более 1 с, и только для 23 из них (3.3%) ошибка определения меры дисперсии меньше 0.001 пк см⁻³. Ни для одного из вышеупомянутых 696 пульсаров нет значимого определения производной меры дисперсии.

Одночастотные наблюдения по таймингу пульсаров также проводятся. Например, Шабанова и др. (2013) проводили наблюдения 27 пульсаров на одной частоте в течение трех десятков лет. Именно в таком случае необходим альтернативный (одночастотный) метод определения меры дисперсии. Предлагается использовать для этого индивидуальные импульсы пульсаров. Преимущества индивидуальных импульсов по сравнению со средними профилями: во-первых, индивидуальные импульсы в несколько раз уже средних, вследствие чего гораздо быстрее реагируют (расплываются) при отклонении меры дисперсии от истинной. Во-вторых, индивидуальные импульсы имеют более простую форму, что позволяет, для увеличения точности, вписывать в профиль простую аналитическую функцию. Цель данной работы – определение меры дисперсии в направлении пульсара PSR B1530+27 (PSR J1532+2745) по наблюдениям индивидуальных импульсов на длительном

* Электронный адрес: ershov@prao.ru

временном интервале и сравнение полученных результатов (для меры дисперсии и ее производной) с тайминговыми наблюдениями.

Пульсар PSR B1530+27 был открыт Дамашеком и др. (1978). Период пульсара равен 1.125 с, средний профиль состоит из двух хорошо разделенных компонент. Мера дисперсии этого пульсара по тайминговым наблюдениям Хоббса и др. (2004) равна 14.698 ± 0.018 пк см⁻³. Недавние низкочастотные (110–188 МГц) наблюдения Билоус и др. (2016) на радиотелескопе LOFAR (подробное описание этой системы сделали ван Хаарлем и др., 2013) дают примерно такую же точность определения меры дисперсии: 14.691 ± 0.016 пк см⁻³.

НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Исследования проводились в рамках программы поиска гигантских импульсов пульсаров (Ершов, Кузьмин, 2003, 2005; Кузьмин и др., 2004; Кузьмин, Ершов, 2006). Использовался радиотелескоп БСА ФИАН (Большая Синфазная Антенна) Пушчинской радиоастрономической обсерватории с марта 2001 г. по декабрь 2008 г. Подробное описание текущего состояния этого телескопа приведено в работе Шишова и др. (2016). БСА ФИАН — транзитный радиотелескоп с эффективной площадью в зените около 15 000 квадратных метров на момент проведения этих наблюдений. Длительность одного сеанса наблюдений составляет $3.2 \cos(\delta)$ мин, что соответствует 215 с для пульсара PSR B1530+27.

Наблюдения проводились на специализированном пульсарном приемнике — 128-канальном фильтровом анализаторе спектра (далее АС-128) с временем опроса 0.82 мс и постоянной времени 1 мс. Центральная частота была равна 110.6 МГц, а ширина одного частотного канала составляла 20 кГц. За один сеанс записывалось от 150 до 192 периодов пульсара. С февраля 2007 г. дополнительно использовалась Пульсарная Машина (далее ПМ, анализатор спектра с быстрым преобразованием Фурье, 512 каналов с общей полосой 2.5 МГц и центральной частотой 110.8 МГц) с временем опроса 0.82 мс и такой же постоянной времени. В этом случае за один сеанс записывалось 192 периода пульсара. При мере дисперсии 14.7 пк см⁻³ дисперсионное расплывание в полосе одного канала составляет 1.8 и 0.4 мс для АС-128 и ПМ соответственно. Всего проведено 825 сеансов наблюдений, содержащих около 155 000 периодов пульсара.

На рис. 1 приведен пример одного из сильных индивидуальных импульсов пульсара PSR B1530+27 в сравнении со средним профилем за один

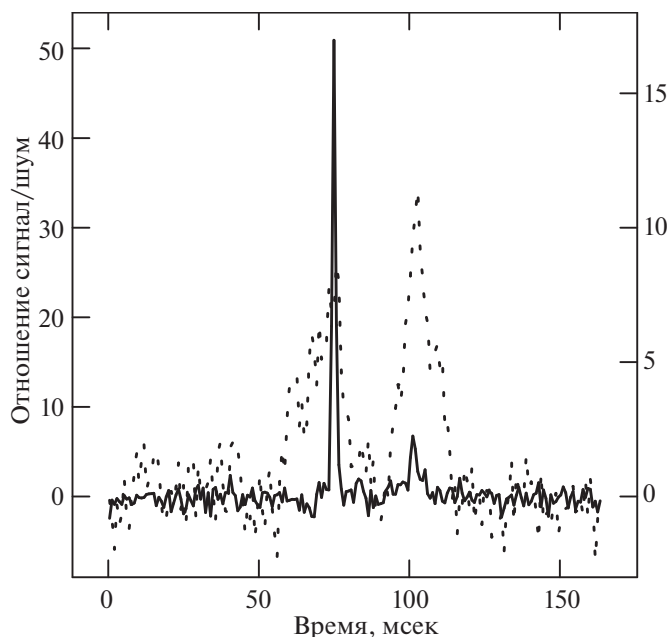


Рис. 1. Пример индивидуального импульса (сплошная линия, шкала слева) от пульсара PSR B1530+27. Сильный (отношение сигнал/шум более 50) и короткий (длительность 1.2 мс по уровню 0.5) импульс в первой компоненте хорошо подходит для определения меры дисперсии. Во второй компоненте также виден импульс, но он заметно слабее и шире. Пунктирной линией показан средний профиль за этот же сеанс наблюдений (отношение сигнал/шум на правой шкале).

сеанс наблюдений. Для определения меры дисперсии использовался тот факт, что компенсация запаздывания с использованием неправильной меры дисперсии приводит к уменьшению амплитуды импульса и увеличению его ширины, т.е. расплыванию импульса. Обработка происходила следующим образом. Перебирались все значения меры дисперсии с шагом 0.05, 0.04, 0.03 и 0.02 пк см⁻³ для импульсов с отношением сигнал/шум до 10, 20, 30 и более 30 соответственно, т.е. для более сильных импульсов выбирался меньший шаг. Диапазон изменения меры дисперсии составлял ± 1 пк см⁻³ относительно опорной, в качестве которой использовалось значение $DM = 14.70$ из каталога пульсаров ATNF (Манчестер и др., 2005). В полученный профиль методом наименьших квадратов вписывалась гауссовская функция, и выбиралось значение меры дисперсии, при котором достигался максимум амплитуды вписанной функции. Для дальнейшего анализа отбирались импульсы с отношением амплитуды к шуму более 4.5, при этом контролировалось, чтобы фазы этих импульсов находились в пределах среднего импульса за текущий сеанс наблюдений. Момент времени, при котором достигался максимум вписанной функции,

Таблица 1. Сравнение результатов

Ссылка	DM пк см ⁻³	$d(DM)/dt$ пк см ⁻³ /год	Интервал, годы	Эпоха (MJD)
Хоббс и др. (2004)	14.6980(180)	0.00010(430)	1987–2002	49666.0
Данная работа	14.6904(009)	0.00035(034)	2001–2008	53005.0
Билоус и др. (2016)	14.6910(160)	–	–	56703.0

Примечание. Цифры в скобках во втором и третьем столбцах показывают ошибку (1σ) в единицах последнего знака.

принимался за момент прихода импульса и пересчитывался в юлианские дни. Общее количество детектированных импульсов составило 11 084. В качестве веса (для дальнейшего усреднения) такой оценки меры дисперсии использовалось отношение амплитуды вписанной функции к ее ширине.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вековые изменения меры дисперсии

В полученные оценки меры дисперсии и моменты прихода, определенные по вписанной гауссовской функции для всех 11 084 импульсов, методом наименьших квадратов была вписана прямая линия. Получены значения меры дисперсии и ее производной: $DM(MJD = 53\,005) = 14.6904 \pm 0.0009$ пак см⁻³, $dDM/dt = 0.00035 \pm 0.00034$ пак см⁻³/год. Отметим, что высокая точность определения меры дисперсии достигается, в том числе, и за счет большого количества импульсов. Сравнение полученных результатов с наблюдениями Хоббса и др. (2004) и наблюдениями Билоус и др. (2016) приведено в таблице. Видно, что точность определения меры дисперсии и оценки ее производной в данной работе (по индивидуальным импульсам этого конкретного пульсара) на порядок выше, чем по тайминговым наблюдениям Хоббса и др. (2004), несмотря на меньший в два раза интервал наблюдений (8 лет против 16). Низкочастотные наблюдения Билоус и др. (2016) дают сравнимую с тайминговыми наблюдениями точность определения DM , но не дают оценки вековых изменений.

Так как в данной работе используется некогерентный способ компенсации дисперсии, то межзвездные мерцания могут влиять на форму импульсов. Наиболее сильно это проявляется в случае, когда полоса декорреляции сравнима с полосой наблюдений. Кордс и др. (1985) измерили полосу декорреляции для пульсара PSR B1530+27 на частоте 430 МГц: $\Delta\nu_{dc}(430) = 515$ кГц. Показатель степенной зависимости для полосы декорреляции

равен 4.4 для Колмогоровского спектра турбулентности. Используя это значение, мы получим $\Delta\nu_{dc}(111) = 1.3$ кГц для частоты 111 МГц, что значительно меньше полосы наблюдений (≈ 2.5 МГц). Таким образом, влияние межзвездных мерцаний на наши наблюдения пренебрежимо мало.

Отметим, что низкий уровень значимости для производной меры дисперсии позволяет говорить пока только о верхнем пределе для абсолютной величины $|dDM/dt| < 0.001$ пак см⁻³/год (по уровню 3σ). Бэккер и др. (1993) предположили, что $|dDM/dt|$ должно быть пропорционально квадратному корню из меры дисперсии. Хоббс и др. (2004) по большой выборке пульсаров показали, что $|dDM/dt| \approx 0.0002\sqrt{DM}$ пак см⁻³/год, хотя и с большим разбросом – примерно на порядок величины. Ожидаемая из этой зависимости величина производной меры дисперсии для пульсара PSR B1530+27 равна $|dDM/dt| \approx 0.0008$ пак см⁻³/год и не противоречит нашим наблюдениям.

Нас также интересуют возможные вариации меры дисперсии со временем, желательно не только в виде вписанной прямой линии. Для каждого импульса мы имеем время его прихода, а также меру дисперсии и ее ошибку, определенные по этому импульсу. Отобразить на одном рисунке меры дисперсии, полученные по всем импульсам, затруднительно. Разбиение на равные интервалы (по времени) и последующее усреднение также мало информативно, так как распределение импульсов по временной оси очень неравномерно. Ось времени разбивалась на интервалы таким образом, чтобы ошибки средних значений меры дисперсии в этих интервалах были одинаковыми. В данном случае использовалось значение 0.003 пак см⁻³. Все измерения в каждом интервале заменялись средним значением по интервалу, а по оси времени ему соответствовало среднее значение моментов прихода импульсов этого интервала, при этом использовались те же значения весов, что и для определения среднего значения меры дисперсии в этом интервале. Таким образом, мы получаем

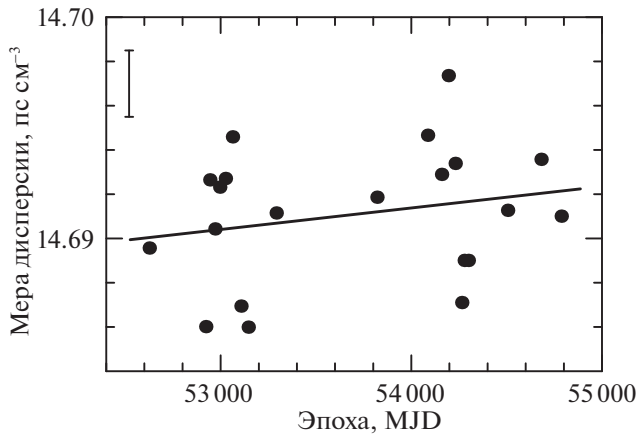


Рис. 2. Вековые изменения меры дисперсии в направлении пульсара PSR B1530+27. Значения DM , полученные по всем 11 084 импульсам, были распределены по интервалам таким образом, чтобы ошибки среднего значения меры дисперсии во всех интервалах были одинаковыми и равными 0.003 пс см^{-3} .

аналог равноточных измерений, но со значительно меньшим количеством точек.

На рис. 2 показаны полученные таким образом вековые (на 8-летнем интервале) изменения меры дисперсии. Прямая линия на этом рисунке — это результат вписывания по всем исходным импульсам. Видно, что прямая идет под небольшим наклоном, но уровень значимости определения производной меры дисперсии недостаточен для того, чтобы говорить об обнаружении вековых изменений меры дисперсии. Следует отметить, что весь диапазон по оси DM на этом рисунке составляет 0.016 пс см^{-3} , что примерно равно одному среднеквадратичному отклонению для значения меры дисперсии из каталога пульсаров ATNF (Манчестер и др., 2005).

Сезонные изменения меры дисперсии

Вследствие орбитального движения Земли вокруг Солнца возможны вариации меры дисперсии с годовым периодом, связанные с вкладом межпланетной плазмы (солнечного ветра). В разные времена года излучение от пульсара проходит сквозь разные участки межпланетной плазмы.

Анализ сезонных изменений проводился следующим образом. Сначала из исходных значений меры дисперсии для всех импульсов был удален возможный тренд на 8-летнем интервале, а именно, была вычтена прямая линия, вписанная методом наименьших квадратов. Полученные отклонения были сгруппированы в условные “месяцы”, каждый из которых равен $1/12$ от юлианского года.

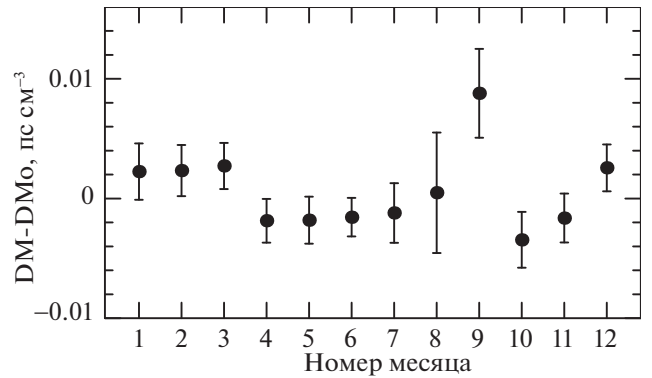


Рис. 3. Сезонные изменения меры дисперсии. Каждый условный “месяц” представляет собой $1/12$ от юлианского года. Из исходных значений меры дисперсии для всех 11 084 импульсов был удален возможный линейный тренд, а затем был сделан фолдинг, т.е. сложение данных временного ряда на интервале один год.

Затем для каждого “месяца” определялись средне-взвешенное значение отклонения меры дисперсии от возможного тренда и его ошибка. На рис. 3 показаны полученные таким образом сезонные вариации меры дисперсии.

Видно, что сезонные изменения меры дисперсии, связанные с прохождением излучения через межпланетную плазму, не превышают 0.01 пс см^{-3} . Впрочем, для этого пульсара такая ситуация не удивительна, так как у него довольно большая эклиптическая широта $\beta = 43$ градуса.

ВЫВОДЫ

Показано, что низкочастотные наблюдения индивидуальных импульсов пульсаров можно использовать для определения меры дисперсии с высокой точностью, в том числе и на длительных интервалах времени. Такие наблюдения можно использовать при проведении тайминга пульсаров на одной частоте. Важно, что в этом методе отсутствует зависимость от конкретных параметров тайминговых моделей пульсаров.

Проведены наблюдения индивидуальных импульсов пульсара PSR B1530+27. По 11 084 импульсам определена мера дисперсии в направлении этого пульсара $DM = 14.6904 \pm 0.0009 \text{ пс см}^{-3}$. Верхний предел (3σ) на производную меры дисперсии равен $|dDM/dt| < 0.001 \text{ пс см}^{-3}/\text{год}$. Сезонные изменения меры дисперсии, связанные с прохождением излучения внутри земной орбиты, не превышают 0.01 пс см^{-3} .

Автор признателен сотрудникам Пушинской радиоастрономической обсерватории за помощь в

проведении наблюдений, Т.В. Смирновой, С.А. Тюль-
башеву и рецензентам — за полезные замечания,
а также С.В. Логвиненко — за разработку Пуль-
сарной Машины (анализатора спектра с Быстрым
Преобразованием Фурье).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Билоус и др. (A.V. Bilous, V.I. Kondratiev, M. Kramer, E.F. Keane, J.W.T. Hessels, B.W. Stappers, V.M. Malofeev, C. Sobey, R.P. Breton, et al.), *Astron. Astrophys.* **591**, A134 (2016). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527702>
2. Бэккер и др. (D.C. Backer, S. Nama, S.V. Hook, and R.S. Foster), *Astrophys. J.* **404**, 636 (1993).
3. Дамашек и др. (M. Damashek, J.H. Taylor, and R.A. Hulse), *Astrophys. J.* **225**, L31 (1978).
4. Деморест и др. (P.B. Demorest, R.D. Ferdman, M.E. Gonzalez, D. Nice, S. Ransom, I.H. Stairs, Z. Arzoumanian, A. Brazier, et al.), *Astrophys. J.* **762**, 94 (2013).
5. Ершов А.А., Кузьмин А.Д., Письма в Астрон. журн. **29**, 111 (2003) [A.A. Ershov and A.D. Kuzmin, *Astron. Lett.* **29**, 91 (2003)].
6. Ершов, Кузьмин (A.A. Ershov and A.D. Kuzmin), *Astron. Astrophys.* **443**, 593 (2005).
7. Йоу и др. (X.P. You, G. Hobbs, W.A. Coles, R.N. Manchester, R. Edwards, M. Bailes, J. Sarkissian, J.P.W. Verbiest, et al.), *MNRAS* **378**, 1493 (2007).
8. Кордс и др. (J.M. Cordes, J.M. Weisberg, and V. Boriakoff), *Astrophys. J.* **288**, 221 (1985).
9. Кузьмин А.Д., Ершов А.А., Лосовский Б.Я., Письма в Астрон. журн. **30**, 285 (2004) [A.D. Kuzmin, A.A. Ershov, Losovsky, *Astron. Lett.* **30**, 247 (2004)].
10. Кузьмин А.Д., Ершов А.А., Письма в Астрон. журн. **32**, 650 (2006) [A.D. Kuzmin, A.A. Ershov, *Astron. Lett.* **32**, 583 (2006)].
11. Лэм и др. (M.T. Lam, J.M. Cordes, S. Chatterjee, M.L. Jones, M.A. McLaughlin, and J.W. Armstrong), *Astrophys. J.* **821**, 66 (2016).
12. Манчестер и др. (R.N. Manchester, G.B. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs), *Astrophys. J.* **129**, 1993 (2005). <http://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat/> (Каталог пульсаров ATNF, версия 1.63).
13. Петрофф и др. (E. Petroff, M.J. Keith, S. Johnston, W. van Straten, and R.M. Shannon), *MNRAS* **435**, 1610 (2013).
14. ван Хаарлем и др. (M.P. van Haarlem, M.W. Wise, A.V. Gunst, G. Heald, J.P. McKean, J.W.T. Hessels, A.G. de Bruyn, R. Nijboer, et al.), *Astron. Astrophys.* **556**, A2 (2013).
15. Хоббс и др. (G. Hobbs, A.G. Lyne, M. Kramer, S.E. Martin, and C. Jordan), *MNRAS* **353**, 1311 (2004).
16. Шабанова и др. (T.V. Shabanova, V.D. Pugachev, and K.A. Lapaev), *Astrophys. J.* **775**, 2 (2013).
17. Шишов В.И., Чашей И.В., Орешко В.В. и др., Астрон. журн. **93**, 1045 (2016) [V.I. Shishov et al., *Astron. Rep.* **60**, 1067 (2016)].