

## ИЗМЕРЕНИЕ МЕРЫ ФАРАДЕЕВСКОГО ВРАЩЕНИЯ У ПУЛЬСАРОВ С ПОМОЩЬЮ ТЕЛЕСКОПА LoFAR: ИОНОСФЕРА ПРОТИВ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ

**Н.К. Порайко, А. Нутсос, Й. Фербист, К. Тибурци, А. Хоннеффер, Й. Кюнсмёллер**

Радиоастрономический институт Макса Планка, Бонн, Германия  
nporayko.mpifr-bonn.mpg.de

## MEASURING RM VARIATIONS OF PULSARS WITH LoFAR: ISM VS IONOSPHERE

**N.K. Porayko, A. Noutsos, J. Verbiest, C. Tiburzi, A. Horneffer, J. Kuensmoeller**

Max Planck Institute for Radio Astronomy, Bonn, Germany  
nporayko.mpifr-bonn.mpg.de

**Аннотация.** Измерение фарадеевское вращение пульсаров является эффективным методом исследования межзвездного и межпланетного магнитных полей. Помимо астрофизических сред вклад в фарадеевское вращение пульсаров вносит ионосфера, которая также как и межзвездная среда является замагниченной плазмой. Для учета фарадеевского вращение радио сигналов в земной атмосфере, мы используем модель тонкой ионосферы. Для реконструкции магнитных полей использовались эмпирические геомагнитные карты. Электронные плотности в ионосферном слое были смоделированы с помощью так называемых ионосферных карт, созданных на основе данных с GPS спутников. В данной работе с помощью низкочастотных наблюдений пульсаров на радио телескопе LoFAR мы исследуем, какова точность реконструирования ионосферного вклада в фарадеевское вращение радио источников в случае использования тонкой модели ионосферы. Проводится анализ остаточных систематик и коррелированных шумов, которые связаны с недостаточной физической достоверностью модели тонкой ионосферы, а также приводится сравнение семи ионосферных карт электронной плотности. На временных интервалах порядка года наибольшая точность моделирования фарадеевского вращение, которая может быть достигнута в рамках модели тонкой атмосферы, составляет  $0.06\text{--}0.07 \text{ рад м}^{-2}$ . Это значение по сути определяет нашу сегодняшнюю чувствительность к изменению фарадеевского вращение пульсара за счет астрофизических сред.

**Ключевые слова:** пульсары, фарадеевское вращение, межзвездная среда, ионосфера, радиоастрономия

**Abstract.** Faraday rotation of pulsars is one of the powerful tools that astronomers use to investigate the interstellar and interplanetary magnetic fields. Besides astrophysical media, terrestrial ionosphere which is also a magnetised plasma, can significantly alter the pulsar polarisation properties. In order to account for ionospheric Faraday rotation we utilise the so-called thin layer ionosphere model. Within this model the ionospheric magnetic field is reconstructed using semi-empirical geomagnetic models. The electron density in the ionospheric layer is modeled with ionospheric maps based on GPS data. Through the data of five pulsars observed with German LoFAR stations, we investigate the performance of ionospheric modelling. We also explore the systematics and correlated noise associated with the residual unmodelled ionospheric effects, and show the comparison of different ionospheric maps. We have found that for the best maps the ionospheric Faraday rotation is accurate to  $0.06\text{--}0.07 \text{ rad m}^{-2}$ .

**Keywords:** pulsars, Faraday rotation, interstellar medium, ionosphere, radio astronomy

### ВСТУПЛЕНИЕ

Пульсары с момента своего открытия зарекомендовали себя как эффективный инструмент для изучения межзвездной среды. Благодаря дисперсионной задержки и рассеянию радиосигналов, пульсары широко используются для изучения распределения электронных плотностей в нашей Галактике [Cordes, Lazio, 2002], для исследования межзвездной турбулентности на разных пространственных масштабах [Armstrong et al., 1995], а также для изучения солнечного ветра [Tiburzi et al., 2019]. Если плазма, через которую проходит пульсарный радио сигнал, является замагниченной, то имеет место фарадеевское вращение плоскости линейной поляризации радиоизлучения. А именно поляризационный угол РА, характеризующий положение плоскости линейной поляризации, по мере прохождения пульсарного излучения через межзвездную среду меняется, как функция длины волны  $\lambda$ :

$$PA=PA_0+RM\lambda^2,$$

где мера вращения RM:

$$RM=0.81\int n_e B dr \text{ [град м}^{-2}\text{]}.$$

В данном выражении  $n_e$  электронная плотность в межзвездной среде [ $\text{см}^{-3}$ ], В магнитное поле [ $\mu\text{Гс}$ ],

$dr$  бесконечно малый элемент длины в направлении пульсара [pc]. Интегрирование ведется от источника к наблюдателю вдоль луча зрения. Как видно из выражения, при увеличении длины волны, эффект фарадеевского вращение усиливается. Соответственно, при использовании широкополосных приемников, принимающих излучение на низких радиочастотах мера вращения RM может быть измерена с высокой точностью. Более того, отрицательный наклон спектров пульсаров [Bates et al., 2013], а также наблюдаемое уменьшение линейной поляризации с увеличением частоты [Johnston et al., 2008] делают наблюдения пульсаров на низких радиочастотах еще более привлекательными для исследования эффекта фарадеевского вращение в межзвездной среде.

С другой стороны, наблюдения на низких радиочастотах сопряжены с особыми трудностями. В первую очередь ионосфера, которая также как и межзвездная среда, является замагниченной плазмой, может существенно исказить астрофизический сигнал. Будучи динамически активной средой, ионосфера и, соответственно, мера вращения ионосферы меняется значительно на коротких временных масштабах. Если время накопления сигнала превышает характерный временной масштаб изменения характери-

стик ионосферы, астрофизический сигнал может быть значительно деполяризован.

Чтобы устранить эффект ионосферы, разработано множество различных техник [Sotomayor-Beltran et al., 2013; Lenc et al., 2016]. Наиболее распространенным методом моделирования ионосферы является приближение тонкой ионосферы, в рамках которого ионосфера представляет из себя исчезающе тонкий слой замагниченной плазмы, находящийся на расстоянии 450 км от земной поверхности. Вклад ионосферы в меру вращения  $RM_{\text{iono}}$  пульсаров составляет 1–4 рад  $\text{м}^{-2}$ .

На сегодняшний момент существует несколько крупных проектов, которые осуществляют зондирование неба в низких радиочастотах. Одним из них является радиоинтерферометр LoFAR (LOW Frequency ARray), сделанный по принципу фазированной решетки [van Haarlem et al., 2013]. В данной работе мы использовали наблюдения пяти пульсаров, проведенных с помощью данного телескопа с целью исследования модели тонкой ионосферы. Ниже приведены детали нашего исследования.

## НАБЛЮДЕНИЯ

Для исследования были использованы наблюдения пяти пульсаров: J0332+5434, J0814+7429, J0826+2637, J1136+1551, J1921+2153. В общей сложности было использовано примерно 3.5 года наблюдений (2013.09.06–2017.04.30). Все наблюдения были проведены на четырех немецких станциях LoFAR (DE601, DE603, DE605, DE609) в рамках проекта GLOW (German Long-wavelength Consortium) в частотном диапазоне 100–200 МГц. Наблюдения пульсаров проводились раз в 7 дней. Время накопления сигнала составило примерно два часа для J0332+5434 (DE605), J0826+2637 (DE603), J1136+1551 (DE601), J1921+2153 (DE605). Также были проведены специальные наблюдательные сессии с целью исследования систематик на малых временных масштабах, в рамках которых время накопления составило более десяти часов: J0332+5434 (DE609), J0814+7429 (DE605), J1136+1551 (DE601).

## МОДЕЛЬ ТОНКОЙ ИОНОСФЕРЫ

Используя приближение тонкой ионосферы, уравнение для меры фарадеевского вращения в ионосферном слое может быть переписано в следующей форме:

$$RM_{\text{iono}} = 2.6 \cdot 10^{-17} \text{STEC} \cdot B_{\text{iono}} \text{ рад м}^{-2},$$

где STEC (Slant Total Electron Content) колонковая плотность электронов на луче зрения [ $\text{м}^{-2}$ ],  $B_{\text{iono}}$  значение напряженности магнитного поля в ионосферном слое. Для вычисления  $RM_{\text{iono}}$  был использован общедоступный код  $R_{\text{mextract}}$  [<https://github.com/lofar-astron/RMextract9>]. Для вычисления  $B_{\text{iono}}$  были использованы три геомагнитные карты: EMM, IGRF, POMME10. Для моделирования электронной плотности на луче зрения STEC были использованы семь общедоступных ионосферных карт, разработанных разными научными группами: uqrg, jplg, ehrg, igsg, esag, upcg, codg [<https://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/ionex1.pdf>]. Несмотря на то, что

ионосферные карты разработаны с помощью идентичных данных GPS, опубликованные значения колонковой плотности разнятся в зависимости от интерполяционных методов, которые используются в той или иной группе. На рис. 1 представлен пример применения модели тонкой атмосферы (jplg+EMM) к данным пульсара J0332+5434 (DE609).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. ЗАКЛЮЧЕНИЯ

В данной работе был проведен анализ изменения меры вращения пульсаров при прохождении их сигналов через ионосферу. Предполагалось, что на рассматриваемых временных масштабах (меньше четырех лет) вклад межзвездной среды в вариации меры вращения пульсаров пренебрежимо мал, т. е. вклад в вариации  $RM$  пульсаров происходит исключительно за счет ионосферы. В ходе исследования было обнаружено, что разница между тремя рассмотренными геомагнитными картами (EMM, IGRF, POMME10) ничтожно мала, и все три демонстрируют одинаковую точность при моделировании фарадеевского вращения в ионосфере. В свою очередь при использовании различных ионосферных карт электронных плотностей точность моделирования фарадеевского вращения разнится. Ионосферные карты uqrg и jplg продемонстрировали наилучший результат. В ходе исследования было также обнаружено, что ансамбль остаточных уклонений пульсаров  $RM_{\text{res}} = RM_{\text{obs}} - RM_{\text{ion}}$  не является белым гауссовым шумом, а содержит детерминистические и стохастические систематик. Среди детерминистических систематик был обнаружен гармонический сигнал с периодом в один день (см. рис. 2), а также линейный тренд, который становится существенным на временных интервалах больше года. Стохастическая составляющая представляет из себя коррелированный шум с лоренцевским спектром. Лоренцевский спектр ведет себя как красный шум на малых временных масштабах и выходит на белый шум на больших временных масштабах. По сути, уровень данного белого шума и определяет нашу чувствительность к астрофизическим

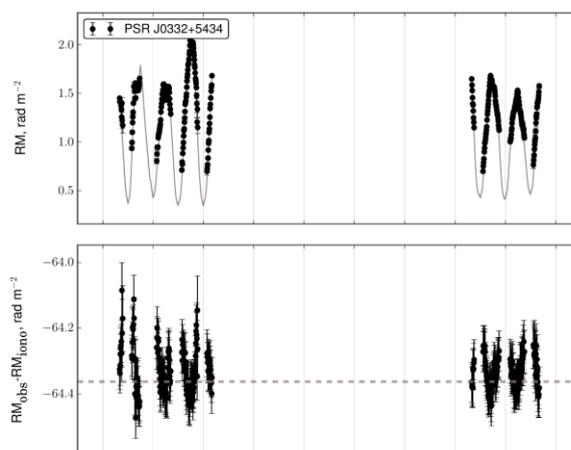


Рис. 1. Применение модели тонкой атмосферы (jplg+EMM) к данным пульсара J0332+5434. Верхний рисунок: черными точками показаны измерения меры вращения; серая линия показывает модельное значение. Нижний рисунок: остаточные уклонения  $RM_{\text{obs}} - RM_{\text{ion}}$

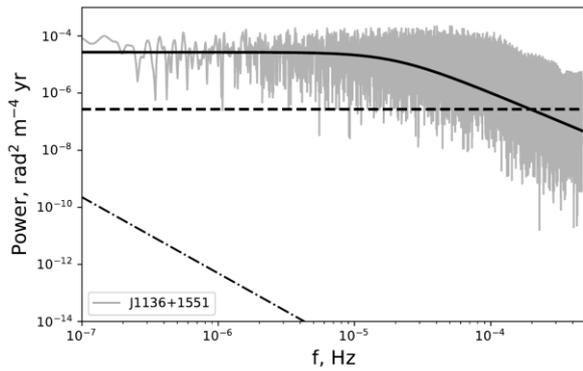


Рис. 2. Спектр остаточных уклонений J1136+1551 после учета всех детерминистических систематик. Черная сплошная линия показывает теоретический лоренцевский спектр. Пунктирная линия показывает уровень белого шума измерений RM пульсара. Наклонная пунктирная линия показывает теоретический астрофизический сигнал, связанный с турбулентностью межзвездной среды

вариациям меры вращения пульсаров. Для ионосферных карт `uqrg` и `jr1g`, которые продемонстрировали наилучший результат в рамках данной работы, это значения составляет 0.06–0.07 рад м<sup>-2</sup>. Более подробно с анализом и результатами можно ознакомиться в [Porayko et al., 2019].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Armstrong J.W., Rickett B.J., Spangler S.R. Electron density power spectrum in the local interstellar medium // *ApJ*. 1995. V. 443. P. 209–221.
- Bates S.D., Lorimer D.R., Verbiest J.P.W. The pulsar spectral index distribution // *MNRAS*. 2013. V. 431. P. 1352–1358.
- Cordes J.M., Lazio T.J.W. NE2001.I. A New Model for the Galactic Distribution of Free Electrons and its Fluctuations // *ArXiv Astrophysics e-prints*. 2002.
- Johnston S., Karastergiou A., Mitra D., Gupta Y. Multifrequency integrated profiles of pulsars // *MNRAS*. 2008. V. 388. P. 261–274.
- Lenc E., et al. Low-frequency Observations of Linearly Polarized Structures in the Interstellar Medium near the South Galactic Pole // *ApJ*. 2016. V. 830. P. 38.
- van Haarlem M. P., et al. LOFAR: The LOw-Frequency Array // *A&A*. 2013. V. 556. P. A2.
- Sotomayor-Beltran C., et al. Calibrating high-precision Faraday rotation measurements for LOFAR and the next generation of low-frequency radio telescopes // *A&A*. 2013. V. 552, id.A58. P. 13.
- Tiburzi C. et al. On the usefulness of existing Solar-wind models for pulsar timing corrections // 2019. *ArXiv Astrophysics e-prints*.
- Porayko N.K., et al. Testing the accuracy of the ionospheric Faraday rotation corrections through LOFAR observations of bright northern pulsars. 2019. V.483. P. 4100–4113.