

МИКРОСТРУКТУРА ИМПУЛЬСОВ ПУЛЬСАРА B1133+16 НА ЧАСТОТЕ 111 МГц

© 2024 г. М. В. Попов^{1,*}

¹Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: popov069@asc.rssi.ru

Поступила в редакцию 14.02.2023 г.

После доработки 01.04.2024 г.

Принята в печать 23.04.2024 г.

Данная работа основана на наблюдениях пульсара B1133+16, выполненных на антенной решетке БСА ПРАО на частоте 111 МГц с непрерывной регистрацией недетектированного сигнала (напряжения) в полосе 2.5 МГц, обеспечивающей временное разрешение 0.2 мкс. Из 30 наблюдательных сеансов было выбрано 570 сильных импульсов для анализа параметров микроструктуры. Такой анализ выполнен путем вычисления автокорреляционных функций отдельно для трех компонентов среднего профиля: двух крайних основных компонентов *I* и *II* и для центрального слабого компонента *S* в седловине среднего профиля. Для компонента *S* анализ микроструктуры был выполнен впервые. Построены распределения по временным масштабам τ_μ , по глубине модуляции m_μ и по параметру d , характеризующему форму микроимпульсов. Выявлены различия в некоторых параметрах для разных компонентов среднего профиля. Обсуждены обнаруженные особенности в модели радиоизлучения полого конуса с центральным компонентом, при этом считается, что радиоизлучение крайних компонентов образуется обыкновенной модой *O*, а радиоизлучение центрального компонента обеспечивается необыкновенной модой *X*. В этой интерпретации определены уровни выхода радиоизлучения над полярной шапкой, которые оказались равны 45 км и 280 км для *X* и *O* мод соответственно. Отмечена заметная деформация конуса излучения моды *X* относительно центрального компонента *S*. Представлены соображения, указывающие на пространственную структуру потока вторичной плазмы, вытянутую вдоль меридианов магнитного поля.

Ключевые слова: численные методы; межзвездный газ; показатель преломления радиоволн; ионосфера: теории, влияния ионосферы, распределение.

DOI: 10.31857/S0004629924050051 EDN: JNXCAY

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиоизлучение пульсара состоит из последовательности импульсов, следующих друг за другом с периодом повторения p . Эти импульсы разительно различаются по форме и амплитуде. Однако средний профиль импульса, полученный синхронным с периодом p сложением нескольких тысяч импульсов, является устойчивой характеристикой пульсара. Индивидуальные импульсы состоят из одного или нескольких субимпульсов, изменяющихся от импульса к импульсу по амплитуде, форме и положению (долготе) в пределах среднего профиля. Субимпульсы также обладают тонкой временной структурой — микроструктурой. Для изучения параметров микроструктуры требуется высокое временное разрешение, реализации которого препятствует влияние дисперсии радиоволн в межзвездной плазме на пути распространения радиоизлучения от пульсара до наблюдателя. Дисперсия радиоволн приво-

дит к расширению импульса в полосе приемника B на величину τ_{DM} [1]:

$$\tau_{DM} = 8.6 \times 10^6 DM \frac{B}{F^3}, \quad (1)$$

где DM — мера дисперсии в направлении на пульсар в единицах пк/см³, а F — центральная частота; если B и F выражены в мегагерцах, то τ_{DM} получается в миллисекундах.

Хэнкинс [2] в 1971 г. разработал и реализовал метод когерентной компенсации влияния дисперсии. Подробно этот метод изложен в монографии Хэнкинса и Риккета [3]. Используя свой метод, Хэнкинс [4] обнаружил микроструктуру в радиоизлучении пульсаров B0950+08 и B1133+16 по наблюдениям на 300-м радиотелескопе в Аресибо на частотах 111.5, 196.5 и 318 МГц. Импульсы пульсаров регистрировались в полосе 125 кГц, что обеспечивало временное разрешение в 8 мкс. Временной

масштаб микроструктуры для пульсара B1133+16 оказался примерно одинаковым на указанных выше частотах, 525–650 мкс. Эта публикация положила начало исследованиям микроструктуры импульсов пульсаров. Кордес и Хэнкинс [5] представили результаты для нескольких других пульсаров, включая PSR B2016+28, который продемонстрировал микроструктуру с характерным масштабом 290 мкс на частоте 318 МГц. Их результаты также показали, что временная шкала микроструктуры не зависит от частоты. Корреляционный анализ Борякова [6] выявил наличие квазипериодичностей с периодом 0.9 мс в микроструктуре PSR B2016+28. Свойства таких периодических последовательностей микроимпульсов в радиоизлучении пульсара B2016+28 более подробно исследовал Кордес [7]. Кардашев с соавторами [8] представили результаты измерения параметров микроструктуры для 9 пульсаров на частоте 102.5 МГц в наблюдениях, проведенных на БСА ПРАО с временным разрешением 10 мкс; у разных пульсаров была обнаружена микроструктура с характерными масштабами от 80 до 600 мкс. Попов, Смирнова и Согласнов [9] в 1980 г. осуществили уникальные синхронные наблюдения индивидуальных импульсов на крестообразном радиотелескопе ДКР-1000 ПРАО одновременно на трех частотах 102.5, 79 и 68 МГц для трех пульсаров: B0809+74, B0950+08 и B1133+16. Они обнаружили хорошую корреляцию микроимпульсов на этих частотах и подтвердили, что временной масштаб микроструктуры не зависит от частоты.

Исследования микроструктуры импульсов пульсаров представляют собой сложную задачу, так как необходимо организовать регистрацию недетектированного сигнала в широкой полосе частот, а последующая обработка данных требует трудоемкого индивидуального анализа автокорреляционных функций из-за большого разнообразия их формы. Поэтому такие исследования проводились нечасто. Некоторый прогресс был достигнут путем использования широкополосных систем регистрации, применяемых в РСДБ наблюдениях. Так, Попов с соавторами [10] использовали систему регистрации S2 и получили рекордное временное разрешение 62 нс в наблюдениях трех пульсаров B0950+08, B1133+16 и B1929+10. Наблюдения проводились на 70-м радиотелескопе системы дальней космической связи НАСА в Тидбинбиле (Австралия) на частоте 1650 МГц. Были измерены средние параметры микроструктуры и построены распределения этих параметров. В настоящем исследовании мы представим статистический анализ параметров микроструктуры по результатам наблюдений индиви-

дуальных импульсов на радиотелескопе БСА ПРАО на частоте 111 МГц с регистрацией сигнала в полосе 2.5 МГц, обеспечивающей временное разрешение 0.2 мкс.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Наблюдения проводились на Большой сканирующей антенне (БСА) Пушинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО) в 2022–2023 гг. Эти наблюдения проходили по программе патрулирования параметров рассеяния радиоизлучения пульсара B1133+16 на неоднородностях космической плазмы, включая земную ионосферу. Регистрация недетектированного сигнала пульсара в полосе 2.5 МГц осуществлялась непрерывно в течение 200 с, соответствующих прохождению пульсара через полуширину диаграммы направленности БСА. За время одного такого сеанса регистрировалось 168 импульсов. Наблюдения проводились два раза в неделю. Предварительный анализ результатов патрулирования параметров рассеяния опубликован в работе Попова и Смирновой [11]. В данной работе зарегистрированные данные были использованы для анализа микроструктуры индивидуальных импульсов пульсара.

Из непрерывной записи сигнала выбирались участки длительностью T_{obs} , содержащие импульс пульсара и участок шума для последующего сравнительного анализа. Для каждого выбранного импульса проводилось устранение влияния дисперсии радиоволн методом когерентной компенсации дисперсии, предложенным Хэнкинсом [3]. Детали применения этого метода к нашему случаю можно найти в работе Гирина с соавторами [12]. При мере дисперсии пульсара B1133+16, равной 4.85 пк/см^3 , время размытия импульса τ_{DM} в полосе приема составляет 75 мс. При использовании метода когерентной компенсации дисперсии из выбранного участка сигнала T_{obs} теряется доля, равная времени размытия τ_{DM} . Поэтому длительность T_{obs} составляла 160 мс (800 000 отсчетов), а после процедуры компенсации влияния дисперсии оставалось окно анализа 85 мс, из которых примерно 60 мс приходится на средний профиль импульса, как это видно из рис. 1. Этот средний профиль получен сложением 4872 импульсов, зарегистрированных в 30 наблюдательных сеансах. Средний профиль показан на рис. 1 с разрешением по времени 200 мкс.

В работе Попова и Смирновой [11] была изменена полоса декорреляции по полуширине в спектре пульсара в режиме усреднения по ансамблю

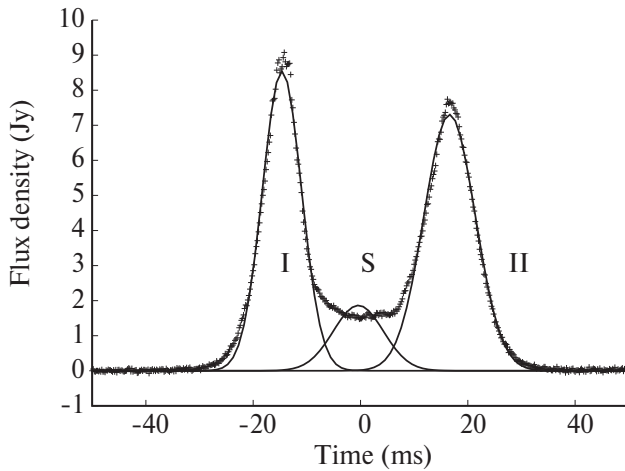


Рис. 1. Средний профиль, полученный усреднением 4872 импульсов, зарегистрированных в 30 наблюдательных сеансах. Крестиками представлены наблюдательные данные, а сплошными линиями показана аппроксимация данных набором из трех составляющих (компонентов I , S , II), заданных функцией Гаусса.

за период времени 2022–2023 гг. Этот же период наблюдений используется и в данной работе. Величина полосы декорреляции по полуширине составила $\Delta f = 5.2$ кГц. Из известного соотношения неопределенности $2\pi\delta t\Delta f = 1.0$ время рассеяния δt будет равно 30 мкс. При регистрации сигнала шаг по времени был равен 0.2 мкс. Для улучшения отношения сигнал/шум, скорректированный за влияние дисперсии, сигнал был усреднен по 50 отсчетам без потери информативности. Такие усредненные записи $I(t)$ с шагом по времени 10 мкс использовались для последующего анализа.

Сначала проводился выбор сильных импульсов согласно критерию $\frac{I_{\max} - I_{\text{off}}}{I_{\text{off}}} > 3$, где $I_{\max}$ — максимальное значение сигнала $I(t)$, а I_{off} — среднее значение сигнала вне окна импульса. По техническим параметрам радиотелескопа БСА, приведенным на сайте ПРАО, эквивалентная температура в янских в направлении в зенит и при минимальной температуре фона составляет 33 Ян. В нашем случае зенитный угол был равен 40° , а при высокой галактической широте пульсара ($b = 70^\circ$) температуру фона можно считать минимальной. Поэтому мы приняли эквивалентную температуру вне импульса равной 50 Ян. Выбранные сильные импульсы имели пиковую плотность потока, по крайней мере 150 Ян. Примеры выбранных сильных импульсов представлены на рис. 2. Эти импульсы

Таблица 1. Параметры среднего профиля

№	Параметр	Значение
1	W_I , мс	8.60(6)
2	W_S , мс	11.0(2)
3	W_{II} , мс	11.25(10)
4	F_I , Ян	8.54(6)
5	F_S , Ян	1.86(4)
6	F_{II} , Ян	7.31(5)
7	Δ_{I-II} , мс	31.25(7)
8	Δ_{I-S} , мс	14.24(7)

Примечание. В первой, второй и третьей строках приведены значения ширины компонентов среднего профиля (I , S и II) по уровню 1/2; в 4-й, 5-й и 6-й строках даны пиковые плотности потока для этих компонентов, а в строках 7 и 8 указаны расстояния между компонентами $I - II$ и $I - S$ соответственно. В скобках указаны среднеквадратические ошибки параметров в единицах последнего знака.

были подобраны таким образом, чтобы они имели заметную интенсивность одновременно в нескольких компонентах среднего профиля. В соответствии с методикой Крамера [13], средний профиль импульса пульсара В1133+16, показанный на рис. 1, был представлен тремя Гауссовыми компонентами, параметры которых приведены в табл. 1. Данные в таблице, относящиеся к первому компоненту среднего профиля, компоненту, находящемуся в седловине, и к последнему компоненту обозначены соответственно индексами I , S и II . Эти обозначения будут использоваться и в дальнейшем изложении. W_I , W_S , и W_{II} дают ширину соответствующих компонентов на уровне половины максимального значения, а F_I , F_S , F_{II} соответствуют пиковой плотности потоков; наконец, Δ_{I-II} и Δ_{I-S} представляют расстояния между максимумами компонентов. В соответствии с указанным выше критерием отбора было выбрано для анализа параметров микроструктуры 570 импульсов.

3. АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ

Для определения параметров микроструктуры традиционно используется автокорреляционная функция $R(\tau)$, которая на интервале времени T задается выражением

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T I'(t) I'(t + \tau) dt. \quad (2)$$

При анализе индивидуальных импульсов в уравнение (2) подставляется скорректированная интенсивность $I'(t) = I(t) - I_{\text{off}}$, где I_{off} — средний уровень сигнала на участке записи вне импульса. Так как мы имеем дискретные отсчеты сигнала с шагом по времени $\delta t = 10$ мкс, то на интервале в N отсчетов выражение для $R(\tau)$ принимает вид

$$R(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{k=0}^{N-m} I'(t_k) I'(t_{k+m}). \quad (3)$$

Для каждого выбранного сильного импульса вычислялись три автокорреляционных функции: $R_I(m)$, $R_S(m)$ и $R_{II}(m)$ для трех компонентов среднего профиля. Эти функции вычислялись на временном интервале 17 мс ($N = 1700$) с центром, соответствующим максимуму каждого компонента профиля и для максимального запаздывания в 10 мс ($m_{\text{max}} = 1000$). Полученные автокорреляци-

онные функции были нормированы на значение при нулевом запаздывании. Так как не все выбранные импульсы имели сильный сигнал во всех трех компонентах, то для последующего анализа было оставлено 369, 153 и 311 функций для первого компонента, седловины и второго компонента соответственно. Усредненные по этому числу импульсов АКФ представлены на рис. 3. В АКФ для каждого компонента среднего профиля присутствует шумовой пик в один отсчет в начале координат, микроструктурная деталь с временным масштабом около миллисекунды и субимпульсная деталь с масштабом 3–5 мс.

Риккет [14] получил вид АКФ для модели амплитудно-модулированного шума (АМШ). В рассмотренной модели принимаемое недетектированное излучение пульсара (напряжение) $y(t)$ определяется произведением реальной амплитудной модуляции $a(t)$ и некоррелированного комплексного

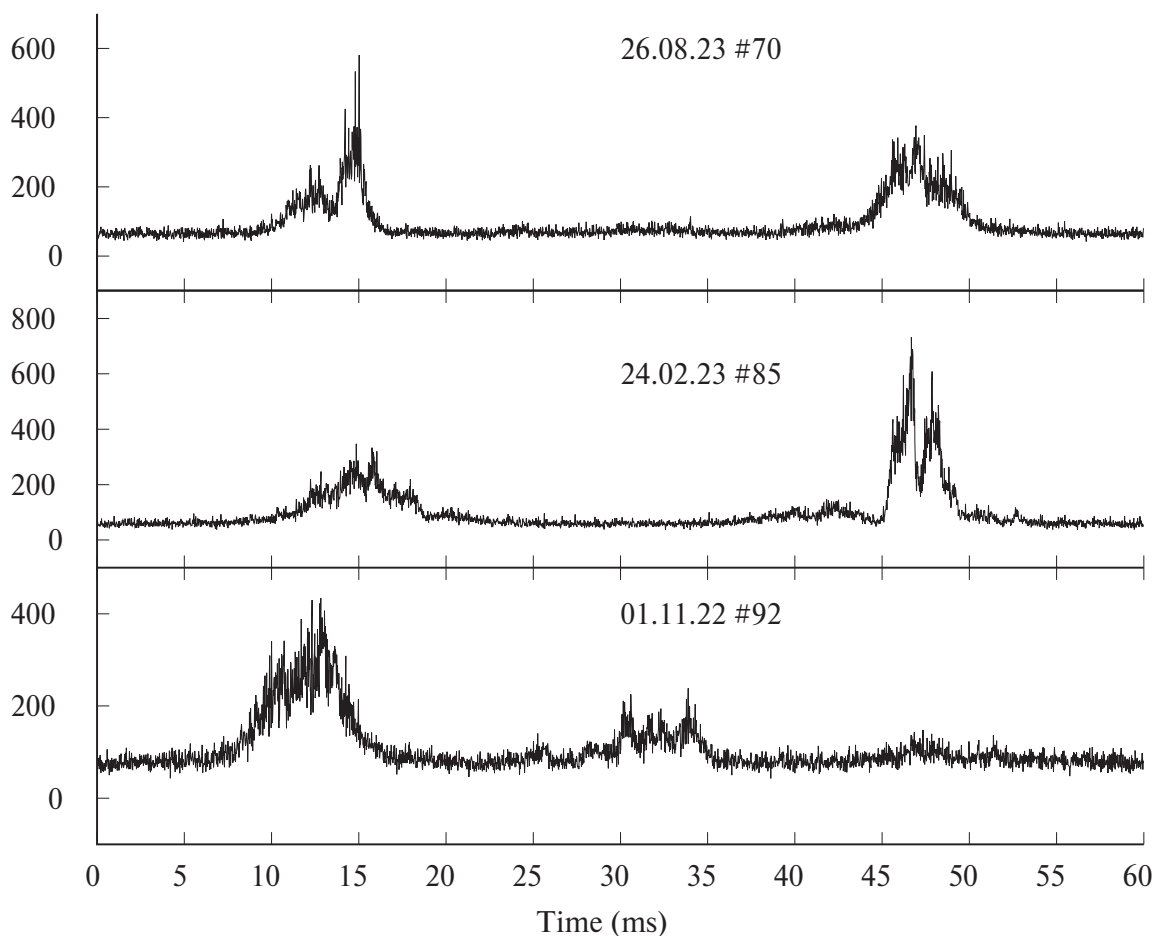


Рис. 2. Примеры сильных индивидуальных импульсов, наблюдавшихся одновременно в нескольких компонентах среднего профиля. Шкала по оси ординат дана в единицах отсчетов аналогово-цифрового преобразователя (АЦП); поток в 1 Ян соответствует примерно 50 единицам АЦП. На рисунках указаны дата наблюдения и номер импульса. Временное разрешение представленных записей составляет 200 мкс.

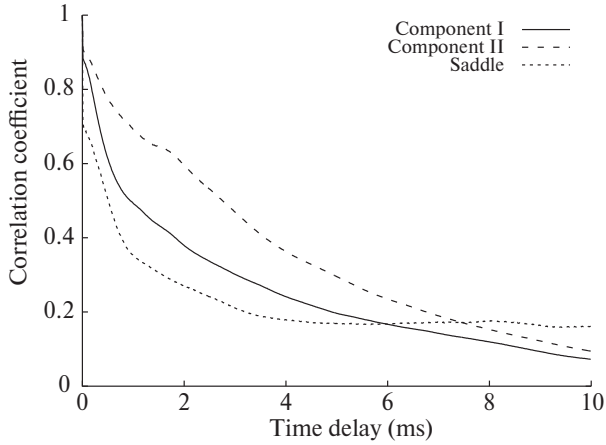


Рис. 3. Средние автокорреляционные функции для трех компонентов среднего профиля, полученные усреднением 369, 153 и 311 импульсов для *I*, *S* и *II* компонентов соответственно.

белого шума $n(t)$ с шириной полосы, равной полосе приемника B : $y(t) = a(t) n(t)$. Было показано, что АКФ для такого сигнала можно представить в виде суммы двух составляющих: АКФ от белого шума $n(t)$ и АКФ от возведенной в квадрат функции модуляции $a(t)$, причем амплитуды этих составляющих одинаковы. Таким образом, результирующая суммарная АКФ состоит из пика в начале координат шириной $1/B$, то есть в один отсчет, и АКФ квадрата огибающей с амплитудой 0.5 для нормированной АКФ.

В реальных наблюдениях пульсаров, кроме пульсарного шума $n(t)$, присутствуют шумы приемной системы с дисперсией σ_{off}^2 . Для сравнения предсказаний модели АМШ с наблюдениями необходимо исправить полученную АКФ за влияние шума приемника. Выражение для поправочного коэффициента приведено в той же работе Риккета [14, ур. (20)]. Ниже приведено это выражение в модифицированном виде

$$\varepsilon = 1 - \frac{\sigma_{\text{off}}^2}{\sigma_{\text{on}}^2} \left(1 + 2 \frac{I'_{\text{on}}}{I_{\text{off}}} \right), \quad (4)$$

где σ_{off}^2 и σ_{on}^2 — дисперсия продетектированного сигнала вне импульса и в окне импульса соответственно, а I_{off} и I'_{on} — средний уровень этого сигнала вне импульса и превышение среднего уровня над фоном на импульсе. Чтобы осуществить коррекцию следует наблюдаемые значения АКФ разделить на коэффициент ε . На рис. 3, 4, и 7 (см. ниже) АКФ показаны без такой коррекции. Учет этой поправки будет обсуждаться в разделе 5.

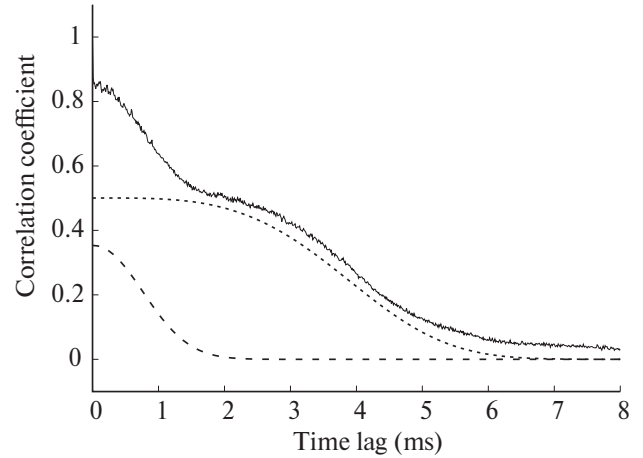


Рис. 4. Пример АКФ одного сильного импульса. Штриховой линией показана аппроксимация микроструктурной детали, а пунктирная линия соответствует аппроксимации субимпульсной составляющей АКФ.

Параметры микроструктуры и субимпульса определялись для каждого импульса путем подгонки рассчитанной АКФ экспоненциальными функциями $Y(\tau)$ со свободным показателем d

$$Y(\tau) = A \exp(-(\tau / h)^d) + C, \quad (5)$$

где A представляет амплитуду микроструктурной детали в АКФ, а полуширина этой детали (масштаб $\tau_{1/2}$) вычисляется через коэффициенты h и d как $W_{1/2} = h(\ln 2)^{1/d}$; коэффициент C упрощенно определяет вклад субимпульсной детали АКФ. Поскольку АКФ является квадратичной функцией плотности потока радиоизлучения, то глубина модуляции микроструктуры определяется как $m_{\mu} = \sqrt{A / C}$. Для субимпульсной детали мы анализировали только полуширину (временной масштаб). Коэффициент d также характеризует форму микроструктурной детали, а вместе с тем и форму микроимпульсов: $d = 2$ соответствует Гауссовой форме, а $d = 1$ — экспоненциальной. Пример аппроксимации АКФ в виде суммы функций вида (5) приведен на рис. 4. Наблюдаемая тонкая структура индивидуальных импульсов пульсара демонстрирует большое разнообразие по соотношению временных масштабов и амплитуд микроструктурной и субимпульсной составляющих. Для реализации аппроксимации этих составляющих уравнением (5) приходилось в большинстве случаев задавать начальные параметры (A , h , C и d) и интервалы по запаздыванию, на которых проводилась аппроксимация вручную. Субимпульсная составляющая всегда аппроксимировалась функцией Гаусса ($d = 2$).

4. ПАРАМЕТРЫ МИКРОСТРУКТУРЫ

Распределения измеренных параметров микро-
структуры (индекс модуляции m_μ , показатель экс-
поненты аппроксимирующей функции d , характер-
ный временной масштаб микроструктуры τ_μ и по-
луширина субимпульса W_{sub}) представлены на рис. 5,
а средние значения измеренных величин, получен-
ные по этим распределениям, и их неопределенность
на уровне среднеквадратического значения σ со-
браны в табл. 2. Задача данного исследования со-
стоит в том, чтобы сравнить параметры микрострук-
туры для трех компонентов среднего профиля. По-
казатель экспоненты аппроксимирующей функции
 d имеет одинаковое распределение и средние зна-
чения для компонентов среднего профиля *I* и *II*.
Наиболее вероятное значение $d \approx 2$, что свидетель-
ствует о том, что большинство микроимпульсов в
этих компонентах имеет форму гауссианы, а экспо-
нентальные микроимпульсы случаются редко. Для
компонента *S* среднее по распределению значение
показателя $d = 1.66 \pm 0.06$, что указывает на более
компактную структуру микроимпульсов. Распреде-
ления микроимпульсов по глубине модуляции за-
метно отличаются: компонент *II* показывает микро-
структуру с глубиной модуляции преимущественно
меньшей единицы, в то время как в компоненте *I* и
особенно в седловине встречается микроструктура
с глубиной модуляции больше 2. Временной мас-
штаб микроструктуры также отличается в трех со-
ставляющих профиля: наибольший масштаб наблю-
дается в седловине, а наименьший — в последнем
компоненте; формально эти различия по среднему
значению не превышают уровень в 2σ , но по виду
самых распределений они, несомненно, существуют.
Наиболее очевидные различия имеются для шири-

ны субимпульсов W_{sub} : в то время как первый и
последний компонент среднего профиля не разли-
чаются по этому параметру, субимпульсы в седло-
вине, в среднем, почти в два раза короче. На рис. 6
показана зависимость индекса модуляции микро-
структуры m_μ от характерного временного масштаба
микроструктуры τ_μ . Заметна общая тенденция
уменьшения индекса модуляции для более коротких
микроимпульсов. Также следует обратить внимание
на резкий дефицит микроимпульсов с масштабами
меньше 200 мкс. Этот эффект хорошо заметен и на
рис. 5, и он объясняется влиянием межзвездного
рассеяния. Как было отмечено в разделе 2, ожида-
емое время рассеяния в наших наблюдениях со-
ставляет величину примерно в 30 мкс. Эта величина
соответствует значению полосы декорреляции в
спектре 5.2 кГц. Однако, как отмечено в работе [11],
величина полосы декорреляции изменялась за пе-
риод наблюдений в интервале 1–15 кГц, соответ-
ственно изменялось и время рассеяния. Согласно
общей тенденции зависимости индекса модуляции
от масштаба микроимпульсов, микроимпульсы
короче 200 мкс, в среднем, должны иметь индекс
модуляции около 0.1. Такие слабые микроимпульсы
легче всего подавляются рассеянием.

Вычисленные АКФ были условно разделены на
несколько характерных типов: стандартные АКФ,
которые содержат одну микроструктурную и одну
субимпульсную составляющую (пример стандартной
АКФ приведен на рис. 4); АКФ, указывающие на
наличие квазипериодической структуры; АКФ, не
содержащие субимпульсной составляющей (оди-
ночные); АКФ, не содержащие микроструктурной
составляющей (гладкие); АКФ, содержащие не-
сколько микроструктурных или несколько субим-
пульсных составляющих (сложные). В табл. 3 пред-
ставлено распределение по типам АКФ для различ-
ных компонентов среднего профиля; в каждой
строке дана доля индивидуальных импульсов с со-
ответствующим типом АКФ, а в последней строке
указано общее число проанализированных импуль-
сов. Примеры импульсов с периодическими струк-
турами приведены на рис. 7.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Параметры микроструктуры для пульсара
B1133+16 исследовались многократно в разные годы
и на разных частотах, и краткий обзор этих иссле-
дований был представлен во Введении. Все авторы
отмечали заметную разницу во временных мас-
штабах микроструктуры для первого и второго ко-
мпонента среднего профиля. Особое внимание этому

Таблица 2. Параметры микроструктуры

Компонент	m_μ	d	τ_μ , мс	W_{sub} , мс
<i>I</i>	0.88 ± 0.13	1.78 ± 0.06	0.46 ± 0.06	4.2 ± 0.3
<i>S</i>	1.08 ± 0.15	1.66 ± 0.07	0.58 ± 0.07	2.4 ± 0.2
<i>II</i>	0.57 ± 0.07	1.82 ± 0.07	0.43 ± 0.05	4.5 ± 0.3

Примечание. В первом столбце указан компонент среднего
профиля, к которому относятся данные, приведенные в
следующих столбцах таблицы: m_μ — глубина модуляции
микроструктуры, d — показатель функции (5), аппроксими-
рующей микроструктурную деталь АКФ, τ_μ — временной
масштаб микроструктуры; W_{sub} — полуширина субимпульс-
ной детали в АКФ.

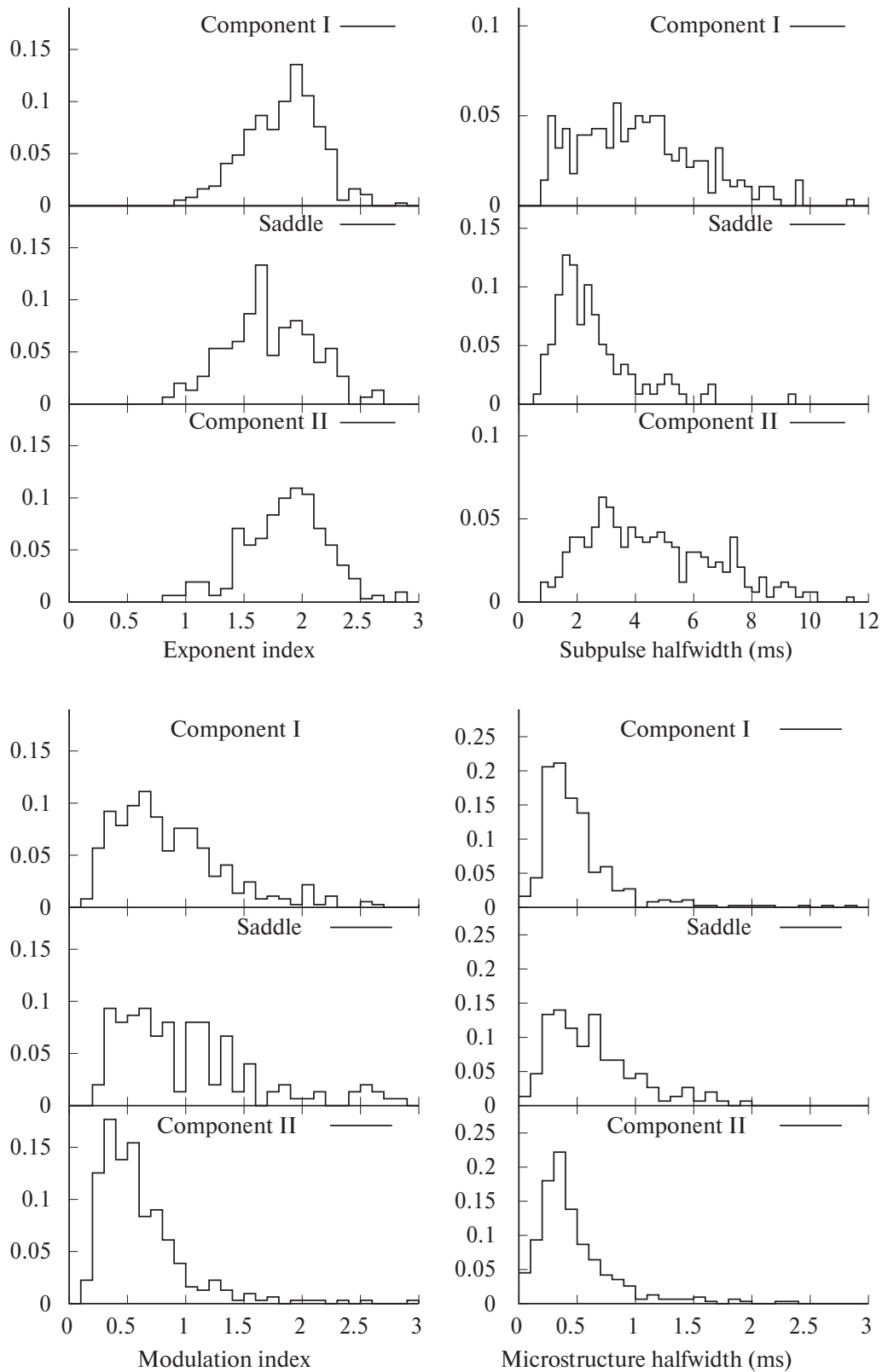


Рис. 5. Распределение проанализированных импульсов по параметрам микроструктуры: слева сверху распределение по показателю экспоненты d аппроксимирующей функции (5), слева внизу распределение по индексу модуляции m_μ , справа сверху распределение по полуширине субимпульсной детали в АКФ W_{sub} , и справа внизу — распределение по масштабу микроструктуры τ_μ . Ось ординат оцифрована на всех панелях в долях событий от общего числа проанализированных импульсов.

Таблица 3. Распределение по типам АКФ

Тип АКФ	Компонент		
	<i>I</i>	<i>S</i>	<i>II</i>
Стандартные	0.537	0.486	0.594
Периодичность	0.168	0.068	0.158
Одиночные	0.107	0.209	0.038
Гладкие	0.144	0.182	0.185
Сложные	0.039	0.028	0.028
Общее число	369	153	311

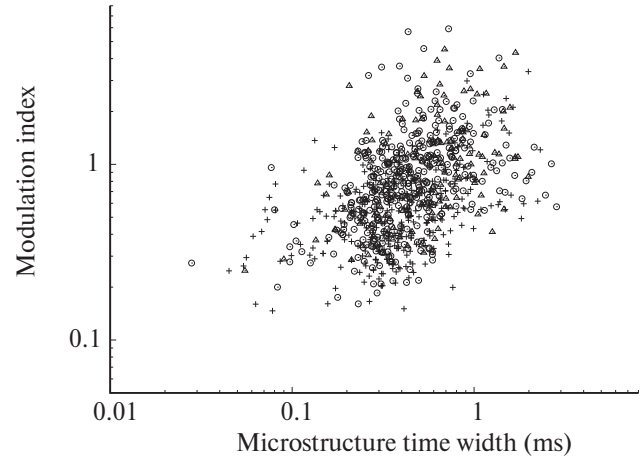


Рис. 6. Зависимость индекса модуляции от временного масштаба микроструктуры. Кругами представлены данные, относящиеся к первому компоненту среднего профиля (*I*). Крестики соответствуют последнему компоненту (*II*), а треугольники — седловине (*S*).

эффекту уделено в работе Попова с соавторами [10], которые обнаружили, что характерный масштаб микроструктуры для первого компонента равен 430 ± 30 мкс, а для второго компонента — 110 ± 20 мкс; кроме того, они выделили для второго компонента микроструктуру с очень коротким временным масштабом 11 ± 3 мкс.

В обсуждаемой работе были построены распределения параметров микроструктуры для отдельных импульсов, и распределения по временным масштабам существенно отличаются от полученных нами и представленных на рис. 5. Гистограммы в работе [10] демонстрируют рост вплоть до самых коротких интервалов 0–100 мкс, в то время как наши гистограммы имеют резкий обрыв для масштабов меньших 200 мкс. Как уже упоминалось в разделе 4,

такое различие объясняется влиянием рассеяния радиоволн на неоднородностях межзвездной плазмы. Если считать, что гладкие бесструктурные АКФ на самом деле содержат микроструктуру с короткими временными масштабами, подавленными рассеянием, то доля таких случаев (0.15–0.18) компенсирует брешь в наших гистограммах на коротких масштабах.

На рис. 8 представлена схематическая диаграмма распределения зон излучения нашего пульсара в проекции на картинную плоскость. Схема основана на модели полого конуса, предложенной Радхакришнаном и Куком [15] еще в 1969 г. Многие исследователи пульсаров использовали и уточняли эту модель. Итоги этим модификациям подвела Рэнкин в серии публикаций 1983–1993 гг. [16, 17, 18, 19, 20]. Она подробно рассмотрела свойства средних профилей, содержащих от одного до пяти компонентов. Кратко можно сформулировать результаты этого анализа так: существуют конусные и центральные компоненты профиля, причем могут быть два конуса, вложенные друг в друга — внешний конус и внутренний. Тогда, в зависимости от угла между полюсом магнитного поля и лучем зрения, образуются от одного до пяти компонентов среднего профиля. Рэнкин [20] получила эмпирические соотношения для угловой полуширины (радиуса) внутренней и внешней границы конуса: $R_{\text{in}} \approx 4.3^\circ p^{-1/2}$ и $R_{\text{ex}} \approx 5.8^\circ p^{-1/2}$ соответственно; здесь p — период пульсара в секундах. Для радиуса внешней границы внутреннего конуса (ядра) Рэнкин получила соотношение $R_c \approx 2.5^\circ p^{-1/2}$. Эти значения справедливы для частоты радиоизлучения 1 ГГц и для значения угла α между осью вращения и магнитной осью, равного 90° . С изменением α размеры конусов изменяются обратно пропорционально $\sin \alpha$, а с частотой эти размеры изменяются для внешнего конуса и для ядра различным образом, а именно, угловые размеры конусов увеличиваются с понижением частоты f как $R \propto f^{-\beta}$.

Бескин, Гуревич и Истомин [21] в 1988 г. опубликовали свое понимание теории радиоизлучения пульсаров. Они показали, что в релятивистской неоднородной плазме, покидающей магнитосферу пульсара вдоль открытых магнитных силовых линий, генерируется две моды радиоизлучения с взаимно перпендикулярным позиционным углом линейной поляризации: обыкновенная мода (О) и необыкновенная мода (Х). Необыкновенная мода распространяется прямолинейно, то есть по касательным к магнитным силовым линиям в зоне генерации радиоизлучения, а обыкновенная мода распространя-

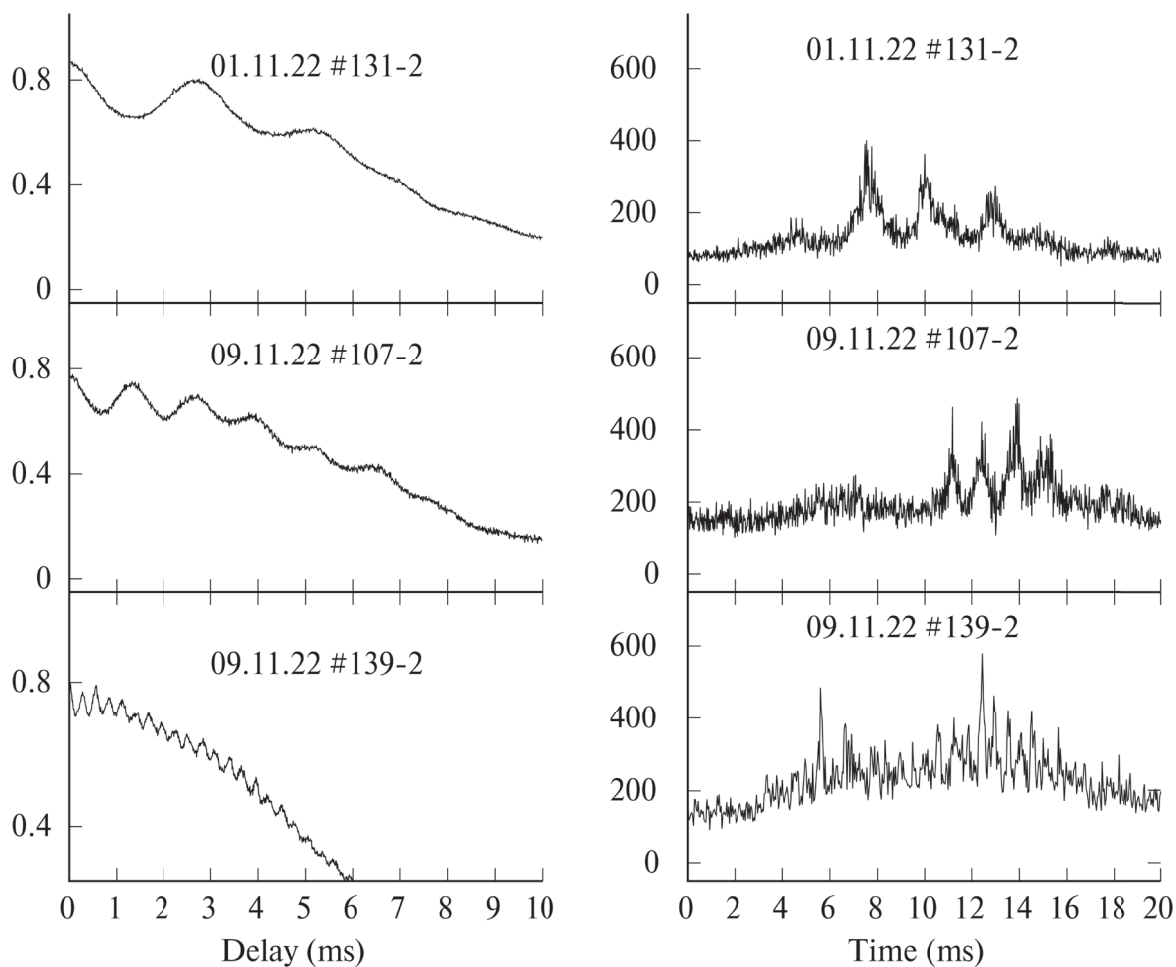


Рис. 7. Примеры квазипериодических импульсов. Слева даны автокорреляционные функции, справа показаны сами импульсы. На рисунках указаны дата наблюдения и номер импульса, последняя цифра соответствует номеру компонента среднего профиля. Для импульса № 107, наблюдавшегося во втором компоненте среднего профиля (II) 09.11.2022, временная шкала в нижнем правом окне растянута вдвое относительно оцифровки оси абсцисс.

ется вдоль магнитных силовых линий до некоторого уровня выхода. Таким образом, обыкновенная мода излучения формирует внешний конус, а необыкновенная — внутренний. Бескин, Гуревич и Истомин [21] получили теоретические оценки индекса β изменения угловых размеров конусов, соответствующих О и Х модам. По этим оценкам $\beta = 0.14$ и $\beta = 0.29$ для внутреннего и внешнего радиуса О-конуса. Таким образом предсказывается увеличение расстояния между компонентами среднего профиля, а также и расширение самих компонентов профиля с понижением частоты радиоизлучения. Эти оценки нашли удовлетворительное подтверждение в наблюдательных измерениях, приведенных в работе Рэнкин [16]. Она получила значения $\beta = 0.29$ и $\beta = 0.19$ для расстояния между компонентами и для угловой ширины компонентов соответственно для пульсара B1133+16.

Все эти сведения приведены для того, чтобы как-то обосновать схему зон излучения, приведенную на рис. 8. Эта схема основана на приведенных выше соображениях и базируется на наблюдаемых параметрах среднего профиля пульсара B1133+16, приведенных в табл. 1. Буквой Р на схеме обозначен магнитный полюс, а линии РС, РD, РЕ, РF и РG соответствуют проекциям магнитных меридианов, вдоль которых предполагается наличие вторичной плазмы, ответственной за генерацию радиоизлучения. Инициаторами вторичной плазмы являются электрические разряды, происходящие в вакуумном зазоре полярной шапки [22]. Как показал Бескин [23], эти электрические разряды обладают свойством самоизоляции (экранирования) и не могут действовать близко друг от друга. Напряженность электрического поля в вакуумном зазоре над полярной шапкой достигает величин 10^{10} вольт, и

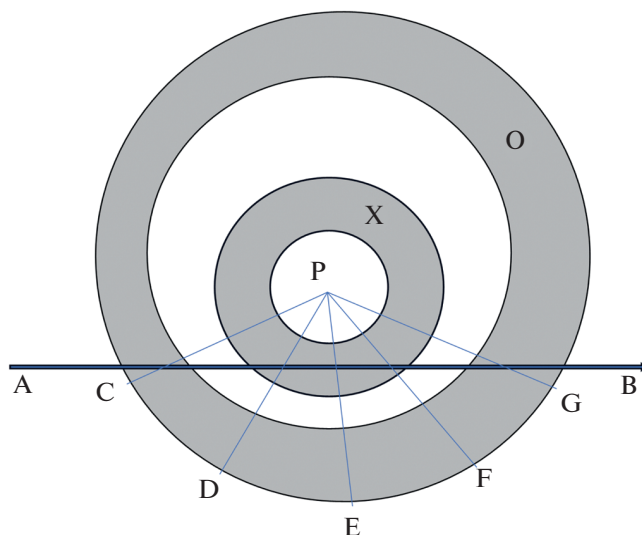


Рис. 8. Схема конусов излучения в проекции на картинную плоскость. Точка Р обозначает магнитный полюс. Линия АВ показывает траекторию луча зрения. Затененные зоны О и Х представляют зоны выхода излучения О-моды и Х-моды. Угловой размер линии АВ составляет 25° .

электроны в разряде ускоряются до энергий в миллионы МэВ [24]. Как впервые показал Старрок [25] электроны с такими энергиями, двигаясь по искривленным магнитным силовым линиям, излучают гамма-кванты, которые, в свою очередь, порождают в магнитном поле электрон-позитронные пары, и происходит лавинообразное образование вторичной плазмы. Эта релятивистская неоднородная плазма и является источником когерентного радиоизлучения. Все эти представления и характеристики заимствованы из обзора Бескина [24].

Из-за высоких значений γ -фактора ($\gamma > 10^6$) и ускоряемые частицы, и излучаемые гамма-кванты не могут заметно отклоняться от плоскости магнитного меридиана, в котором зародился электрический разряд. Тогда общую пространственную структуру вторичной плазмы можно представить в виде «заванески» в плоскости магнитного меридиана. На рис. 8 активные зоны обозначены линиями РС, РD, РЕ, РF и РG; такие зоны в действительности имеют определенную угловую ширину, по крайней мере, равную $1/\gamma$ вторичной плазмы.

Базируясь на наблюдаемых параметрах средних профилей и на изменении с долготой позиционного угла плоскости линейной поляризации, Лайн и Манчестер [26] определили для большого числа пульсаров углы между осью вращения и магнитной осью (α) и между магнитной осью и лучем зрения (ξ) при нулевой долготе. Для пульсара В1133+16

они получили следующие значения: $\alpha = 51.3^\circ$ и $\xi = 3.7^\circ$. На рис. 8 линия АВ, соответствующая прохождению луча зрения через сечение конусов излучения в ходе вращения пульсара, проходит на минимальном угловом расстоянии $\xi = 3.7^\circ$ от магнитного полюса Р. Площади О и Х, покрытые серым тоном, обозначают зоны выхода радиоизлучения О и Х моды соответственно. Внешние и внутренние границы О-моды не являются концентрическими окружностями, так как наблюдаемые ширины первого и второго компонента среднего профиля заметно отличаются (см. таблицу и рисунок). Схема также отражает тот факт, что максимум компонента седловины не лежит посередине между компонентами I и II. Общий угловой размер наблюдаемого среднего профиля (рис. 1) составляет по уровню 0.1 около 20° (угол, который проходит линия АВ от края конуса вблизи точки С до края конуса вблизи точки G). Таким образом, схема на рис. 8 отражает основные параметры среднего профиля.

Обратимся теперь к выявленным свойствам субимпульсов. Из рисунка и таблицы следует, что характерная ширина субимпульсов в седловине почти в 2 раза меньше, чем ширина субимпульсов в компонентах I и II при одинаковой ширине соответствующих компонентов среднего профиля. Из нашей схемы видно, что в компонентах I и II (О мода) луч зрения скользит под малым углом к направлению вытянутости зоны активности, в то время как в седловине (Х мода), луч зрения проходит перпендикулярно к такой зоне активности; соответственно, время действия излучения О моды длиннее, чем время действия излучения Х моды (луч зрения быстро уходит из диаграммы излучения). Характерная полуширина субимпульсной детали в АКФ компонента S составляет 2.4 мс ($0.73^\circ = 0.013$ радиан). Как было указано в разделе 3, АКФ субимпульсной детали аппроксимировалась функцией Гаусса; при этом форма субимпульса также описывается гауссианой, ширина которой в $\sqrt{2}$ меньше, то есть угловая ширина субимпульса ψ меньше 0.01 радиан. Тогда для бесконечно узкой зоны излучения $\psi \approx 1/\gamma$, и $\gamma \gtrsim 100$. Как видно из нашей схемы (рис. 8), в области пересечения луча зрения АВ с конусом Х моды может оказаться несколько зон активности (на рис. 8 — РD, РЕ, РF), и тогда будут наблюдаться несколько субимпульсов на угловом расстоянии около 2.5° или 8 мс. Дополнительный максимум на этой временной задержке можно заметить в средней автокорреляционной функции для компонента S на рис. 3; подобного подъема нет в средних АКФ для компонентов I и II.

Распределение по типам АКФ, представленное в табл. 3, хорошо согласуется с параметрами зон излучения, показанными на рис. 8. Малое число периодических структур в компоненте S связано с короткой экспозицией активных зон X моды на луче зрения наблюдателя. По этой же причине наблюдается избыток одиночных микроимпульсов и их повышенный индекс модуляции, показанный в табл. 2.

Параметры микроструктуры заметно различаются для трех компонентов среднего профиля (см. рис. 6 и табл. 2). В то время как форма микроимпульсов, определяемая показателем степени d в уравнении (5), практически одинакова, индекс модуляции m_μ и характерный временной масштаб микроструктуры τ_μ различны для разных компонентов среднего профиля. Самый большой масштаб, $\tau_\mu = 0.58 + 0.07$ мс, оказался у компонента в седловине (S), а самый короткий, $\tau_\mu = 0.43 + 0.05$ мс — у последнего компонента (II). Параметры микроструктуры для компонента S впервые измерены в нашей работе, а разница временных масштабов для компонентов I и II отмечалась многими исследователями (см., напр., [4, 8]). Кардашев с соавторами [8] определили характерный масштаб микроструктуры на частоте 102.5 МГц для компонентов I и II как 0.60 мс и 0.56 мс соответственно. В другой работе [9] были измерены масштабы микроструктуры одновременно на трех частотах, 102.5, 78.9 и 67.5 МГц. Эти масштабы оказались примерно одинаковыми на трех частотах и для обоих компонентов, и заключены в интервале от 0.45 мс до 0.60 мс.

Общепризнанным объяснением проявления микроструктуры в импульсах пульсаров считается наличие пространственно-временных неоднородностей в потоке вторичной релятивистской плазмы, ответственной за генерацию радиоизлучения (см., напр., [27]). Разница в характеристиках микроструктуры разных компонентов PSR B1133+16 указывает на то, что механизм излучения, который создает микроимпульсы, зависит от азимута относительно оси полого конуса. Возможно, асимметрия в структуре магнитного поля полярной шапки может вызвать азимутально-зависимые свойства группировки плазмы, а также сказываются эффекты распространения, которые приводят к наблюдаемым различиям.

Влияние рассеяния на параметры микроструктуры проявляется в форме полученных АКФ. Согласно модели амплитудно-модулированного шума (АМШ) [14], нормированная АКФ содержит на нулевом сдвиге пик с амплитудой $1/2$ и шириной $\tau_0 = 1/B$, где B — полоса приемника. Кордес [28]

интерпретировал пульсарный шум как дробовой шум, отражающий свойства когерентного излучения пульсара. Если в наблюдаемой АКФ, исправленной за вклад шумов приемной системы по формуле (4), амплитуда пика в начале координат превышает $1/2$, значит, присутствует неразрешенная микроструктура с масштабами меньше $1/B$, а в случае, когда амплитуда этого пика меньше $1/2$, присутствуют эффекты сглаживания сигнала. Одним из таких эффектов является рассеяние радиоволн на неоднородностях межзвездной плазмы. На частоте 111 МГц время рассеяния составляет 50–100 мкс; основываясь на таком предсказании мы намеренно усреднили сигнал, полученный после исправления за влияние дисперсии, по 50 отсчетов для улучшения отношения сигнал/шум. Таким образом, полученный сигнал уже не подходит для использования АМШ. Действительно, пик в наших АКФ на нулевом запаздывании, еще до коррекции за вклад от шумов приемника, имеет амплитуду существенно меньше $1/2$ (см. рис. 3 и 4). После коррекции наших АКФ по формуле (4) амплитуда пика сводится к нулю!

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Высота выхода радиоизлучения. В своей интерпретации полученных результатов мы использовали традиционную модель полого конуса [15] и базировались на представлении о проявлении двух мод радиоизлучения: обыкновенной (O) и необыкновенной (X) [21]. Мы считаем, что средний профиль пульсара B1133+16 можно отнести к $O-X-O$ типу, то есть, внешние компоненты среднего профиля (I и II) излучаются обыкновенной модой, а центральный компонент в седловине (S) образован необыкновенной модой (см. рис. 8). Тогда по полной угловой ширине внешнего конуса и центрального конуса можно оценить, соответственно, поперек, высоту над полярной шапкой отрыва от направления магнитных силовых линий излучения обыкновенной моды и, во-вторых, высоту генерации излучения обеих мод. Уравнение для последней замкнутой силовой линии в полярных координатах выглядит так:

$$r(\phi) = R_L \sin^2 \phi, \quad (6)$$

где R_L — радиус светового цилиндра ($R_L = pc/2\pi = 5.67 \times 10^4$ км), p — период следования импульсов, а угол ϕ отсчитывается от направления магнитной оси. Наблюдаемая долгота импульса λ , которая отложена в миллисекундах по оси X на рис. 1, связана

с углом ϕ соотношением $\lambda = \frac{3}{2}\phi$, так как радиоизлучение выходит по касательной к магнитным силовым линиям. Полную наблюдаемую ширину по долготе для О и Х компонентов можно получить из параметров среднего профиля, приведенных в табл. 1. Для данной цели полуширину компонентов будем брать по уровню 1/10, и табличные значения следует умножить на коэффициент $k = \sqrt{(\ln 10 / \ln 2)} = 1.82$. Так, для внешнего конуса излучения (О мода) полуширина профиля по уровню 0.1 составит по долготе λ величину $\Delta\lambda = 0.5\Delta_{I-II} + 0.5W_{II} \times 1.82 = 25.85$ мс, или 0.137 радиан. Тогда из уравнения (6), подставляя $\phi = \frac{2}{3}\Delta\lambda$, получим для уровня выхода излучения О моды соотношение

$$r_0 = R_L \sin^2\left(\frac{2}{3}\Delta\lambda\right) \approx R_L \frac{4}{9}(\Delta\lambda)^2, \quad (7)$$

справедливое для малых значений $\Delta\lambda$. Необходимо еще сделать коррекцию величины $\Delta\lambda$ за влияние угла α между осью вращения и магнитной осью,

$$\Delta\lambda_{cor} = \Delta\lambda \sin \alpha = 0.137 \times 0.78 = 0.106,$$

для $\alpha = 51.3^\circ$. Для внутреннего конуса излучения (Х мода) полуширина профиля по уровню 0.1 составит по долготе λ величину $\Delta\lambda = 0.5W_S \times 1.82 = 10.0$ мс, или 0.053 радиан, а с поправкой за влияние угла α $\Delta\lambda_{cor} = 0.041$ радиан. С учетом этих поправок были получены следующие оценки высоты над полярной шапкой для выхода излучения О и Х моды: 280 км и 45 км соответственно; неопределенность этих оценок составляет около 10%.

В связи с этими оценками можно упомянуть определения расстояния между областями радиоизлучения в компонентах I и II, полученные путем сравнения динамических спектров, обусловленных эффектами рассеяния радиоволн на неоднородностях межзвездной плазмы. Гупта с соавторами [29] в результате анализа периодической структуры в динамических спектрах на частоте 327 МГц получил ограничение на расстояние между областями радиоизлучения в компонентах I и II, $D_{I-II} > 30$ км, что соответствует ограничению на высоту зоны радиоизлучения $r_0 > 260$ км. Эти оценки хорошо согласуются с нашими результатами.

В другом исследовании Смирнова и Шишов [30] на частоте 102.5 МГц также путем анализа спектров для компонентов I и II получили оценку на рас-

стояние между областями радиоизлучения $D_{I-II} \approx 300$ км, что соответствует высоте 4500 км над поверхностью нейтронной звезды. В работе [31] рассмотрены особенности определения локализации излучающих областей в магнитосфере пульсара путем анализа спектров, искаженных эффектами межзвездного рассеяния. Там же приведен обзор таких исследований.

2. Деформация конуса излучения. На высоте выхода излучения О моды может проявиться деформация конуса открытых магнитных силовых линий, вызванная вращением нейтронной звезды: за пределом светового цилиндра твердотельное вращение поля невозможно, и силовые линии отстают от вращения и оказывают натяжение на силовые линии внутри светового цилиндра так, что силовые линии на переднем фронте профиля излучения О моды поджимаются, а в конце профиля растягиваются. Такой эффект действительно проявляется в измеренных параметрах среднего профиля, а именно, полуширина компонента I заметно меньше полуширины компонента II почти на 25%. По этой же причине компонент S не находится в середине внешнего конуса, а смещен вперед на 8%.

3. Пространственная структура потока вторичной плазмы. Различная ширина субимпульсов в крайних (О мода) и центральном компоненте среднего профиля, а также некоторые особенности распределения по типам АКФ микроструктуры указывают на вытянутую в плоскости магнитного меридиана пространственную структуру потока вторичной релятивистской плазмы в магнитосфере пульсара. Такой же вывод был сделан Поповым и Зибем [32] в результате анализа кросс-корреляционных функций флуктуаций интенсивности радиоизлучения для 12 пульсаров на частоте 1700 МГц.

4. Механизм формирования микроструктуры. Наблюдаемые различия в характеристиках микроструктуры для разных компонентов PSR B1133+16 указывают на то, что механизм формирования микроструктуры, которая отражает пространственно-временные характеристики потока вторичной плазмы, зависит от асимметрии относительно оси вращения электрического поля полярной шапки и магнитного поля в области рождения вторичной плазмы; также могут сказываться эффекты распространения. Эти вопросы требуют теоретического рассмотрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *D. R. Lorimer and M. Kramer*, Handbook of Pulsar Astronomy (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012).
2. *T. H. Hankins*, 169, 487 (1971).
3. *T. H. Hankins and B. J. Rickett*, in Methods in computational physics. Vol. 14. Radio astronomy (New York: Academic Press, Inc., 1975), p. 55.
4. *T. H. Hankins*, 177, L11 (1972).
5. *J. M. Cordes and T. H. Hankins*, Bull. Amer. Astron. Soc. 5, 18 (1973).
6. *V. Boriakoff*, Pulsar Radiofrequency Observations with a Digital Pulsar Processor, PhD thesis (New York, Cornell University, 1973).
7. *J. M. Cordes*, 208, 944 (1976).
8. *Н. С. Кардашев, А. Д. Кузьмин, Н. Я. Николаев, А. Ю. Новиков, и др.*, Астрон. журн. 55, 1024 (1978).
9. *М. В. Попов, Т. В. Смирнова, В. А. Согласнов*, Астрон. журн. 64, 1013 (1987).
10. *M. V. Popov, N. Bartel, W. H. Cannon, A. Yu. Novikov, V. I. Kondratiev, and V. I. Altunin*, Astron. and Astrophys. 396, 171 (2002).
11. *M. V. Popov and T. V. Smirnova*, Astron. Rep. 68(5), 1129 (2024).
12. *I. A. Girin, S. F. Likhachev, A. S. Andrianov, M. S. Burgin, M. V. Popov, A. G. Rudnitskiy, V. A. Soglasnov, and V. A. Zuga*, Astronomy and Computing 45, id. 100754 (2023).
13. *M. Kramer, R. Wielebinski, A. Jessner, J. A. Gil, and J. H. Seiradakis*, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 107, 515 (1994).
14. *B. J. Rickett*, 197, 185 (1975).
15. *V. Radhakrishnan and D. J. Cooke*, Astrophys. Letters 3, 225 (1969).
16. *J. M. Rankin*, 274, 359 (1983).
17. *J. M. Rankin*, 274, 333 (1983).
18. *J. M. Rankin*, 301, 901 (1986).
19. *V. Radhakrishnan and J. M. Rankin*, 352, 258 (1990).
20. *J. M. Rankin*, 405, 285 (1993).
21. *V. S. Beskin, A. V. Gurevich, and Ia. N. Istomin*, Astrophys. Space Sci. 146(2), 205 (1988).
22. *M. A. Ruderman and P. G. Sutherland*, 196, 51 (1975).
23. *V. S. Beskin*, Soviet Astron. 26, 443 (1982).
24. *В. С. Бескин*, Успехи физ. наук 188(4), 377 (2018).
25. *P. A. Sturrock*, 164, 529 (1971).
26. *A. G. Lyne and R. N. Manchester*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 234, 477 (1988).
27. *D. Mitra, M. Arjunwadkar, and J. M. Rankin*, 806(2), id. 236 (2015).
28. *J. M. Cordes*, 210, 780 (1976).
29. *Ya. Gupta, N. D. Ramesh Bhat, and A. Pramesh Rao*, 520(1), 173 (1999).
30. *Т. В. Смирнова, В. И. Шишов*, Письма в Астрон. журн. 15(3), 443
31. *M. V. Popov, N. Bartel, A. S. Andrianov, M. S. Burgin, et al.*, 954(2), id. 126 (2023).
32. *M. V. Popov and W. Sieber*, Soviet Astron. 34, 471 (1990).

MICROSTRUCTURE IN RADIO EMISSION OF THE PULSAR B1133+16 AT A FREQUENCY OF 111 MHZ

M. V. Popov¹

¹*Astrospace Center of P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: popov069@asc.rssi.ru*

This study is based on observations of the pulsar B1133+16 conducted on the BSA PRAO antenna array at a frequency of 111 MHz with continuous recording of undetected signal (voltage) in the 2.5 MHz band, providing time resolution 0.2 microseconds. From 30 observing sessions, 570 strong pulses were selected for the subsequent analysis of microstructure parameters. The analysis was performed by computing autocorrelation functions separately for the three components of the mean profile: two extreme main components *I* and *II* and for the central weak component *S* in the profile saddle. For the component *S* microstructure analysis was performed for the first time. Distributions have been constructed by the following parameters: time scales τ_μ , modulation depth m_μ , and the parameter d , which characterizes the shape of the micropulses. Noticeable differences were found in some parameters for different profile components. The discovered features were interpreted in the model of hollow cone with a central component. It was believed that the radio emission of the extreme components (*I* and *II*) is generated by ordinary mode O, and the radio emission of the central component is provided by extraordinary mode X. Under this interpretation the radio emission output heights above the polar cap, were estimated to be 45 and 280 km for the X and O modes, respectively. A noticeable deformation of the X mode emission cone relative to the central component *S* was mentioned. Considerations are presented that point to the spatial structure of the secondary plasma flow, elongated along the meridians of the magnetic field.

Keywords: numerical methods; interstellar gas; index refraction of radio waves; ionosphere: theories, influence of the ionosphere, distribution.