

РАДИОАСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra22.02.093>

УДК 524.354.4; 52-17

PACS numbers: 97.60.Gb,
98.38.Am

А. А. СКОРИК, О. М. УЛЬЯНОВ, В. В. ЗАХАРЕНКО,
А. И. ШЕВЦОВА, Я. Ю. ВАСИЛЬЕВА,
М. С. ПЛАХОВ, И. П. КРАВЦОВ

Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Мистецтв, 4, г. Харьков, 61002, Украина

E-mail: skoryk.a@rian.kharkov.ua, oulyanov@rian.kharkov.ua, zakhar@rian.kharkov.ua

ТОНКАЯ СТРУКТУРА АНОМАЛЬНО ИНТЕНСИВНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПУЛЬСАРА J0814+7429 В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Предмет и цель работы: Исследуется тонкая структура аномально интенсивных импульсов пульсара J0814+7429 (B0809+74). Изучение тонкой структуры радиоизлучения этого пульсара проводится с целью определения ее параметров в самой низкочастотной области спектра, доступной при наблюдениях с поверхности Земли.

Методы и методология: С помощью спектрального и корреляционного анализа данных, зарегистрированных на радиотелескопе УТР-2, получают оценки меры рассеяния в межзвездной плазме.

Результаты: Обнаружено два характерных временных масштаба тонкой структуры аномально интенсивных импульсов пульсара J0814+7429. Установлено, что наиболее интенсивные импульсы, которые генерирует пульсар J0814+7429 в декаметровом диапазоне, могут иметь длительность порядка $2 \div 3$ мс. Эти импульсы излучаются короткими сериями. В некоторых случаях они излучаются на фоне “длинной” субимпульсной компоненты, образующей низкоинтенсивное плато.

Заключение: Самый короткий временной масштаб корреляции радиоизлучения у пульсара J0814+7429 соответствует удвоенной постоянной времени рассеяния импульсной характеристики межзвездной среды. Более длинный масштаб тонкой структуры его радиоизлучения может объясняться излучением коротких серий узких импульсов или относительно широких импульсов, которые генерируются внутри магнитосферы этого пульсара.

Ключевые слова: деконволюция, импульс, магнитосфера, мера рассеяния, плазма, пульсар

1. Введение

В настоящей работе проводится поиск и анализ тонкой структуры радиоизлучения аномально интенсивных импульсов (АИИ) пульсара J0814+7429 в декаметровом диапазоне. Пульсар J0814+7429 является одним из ближайших к Земле пульсаров. Он находится на расстоянии 0.43 кпк и имеет меру дисперсии DM (Dispersion Measure) (5.753 ± 0.002) пк·см⁻³ [1]. По данным каталога ATNF [2, 3] DM этого пульсара равна 5.733 пк·см⁻³. Период его вращения составляет ≈ 1.29 с. Тонкой структурой радиоизлучения называются флуктуации интенсивности внутри индивидуальных импульсов пульсаров, происходящие на временных интервалах, более коротких, чем

длительность субимпульсов [4–7] и/или длительность АИИ, поскольку АИИ короче субимпульсов (см. ниже). Главными наблюдательными характеристиками тонкой структуры являются характерное время жизни (или время когерентности тонкой структуры) и полоса декорреляции. Время когерентности – это характерный интервал времени, в течение которого коэффициент автокорреляции исследуемой структуры падает в 4 раза. Поскольку тонкая структура излучается на фоне других компонент и не излучается в чистом виде, ее время когерентности принято оценивать по характерному излому автокорреляционной функции (АКФ) [4, 7]. Тонкая структура радиоизлучения пульсаров наблюдается в широком диапазоне длин волн, а время ее когерентности увеличивается с понижением частоты наблюдений [8].

Тонкую структуру радиоизлучения пульсаров в дециметровом диапазоне исторически назы-

© А. А. Скорик, О. М. Ульянов, В. В. Захаренко,
А. И. Шевцова, Я. Ю. Васильева, М. С. Плахов,
И. П. Кравцов, 2017

вают микроимпульсами. Микроимпульсы получили свое название из-за того, что характерное время их автокорреляции составляло микросекунды. Они могут возникать квазипериодически внутри главного окна импульса [9]. Например, у пульсара J0814+7429 наблюдалось более 100 квазипериодических микроимпульсов на частотах 70, 80 и 103 МГц [10]. Следует отметить, что квазипериод микроструктуры варьируется у микроимпульсов от одного индивидуального импульса к другому. Авторы [10] утверждают, что у данного пульсара квазипериодичность наблюдается достаточно редко. Микроструктура также слабо коррелирует от импульса к импульсу, и период микроимпульсов сохраняется всего для нескольких оборотов нейтронной звезды [11]. В процитированных работах было выделено два характерных масштаба микроструктуры (с “короткой” шкалой $\tau_\mu < 400$ мкс и “длинной” шкалой $\tau_\mu > 400$ мкс). По аналогии с микроструктурой наиболее “короткие” компоненты импульсного излучения, наблюдаемые в декаметровом диапазоне, можно было бы назвать миллиструктурой, но здесь и далее мы будем использовать термин “тонкая структура” как наиболее общий термин, объединяющий все возможные временные масштабы флуктуаций интенсивности радиоизлучения пульсара или в окне одного субимпульса, или в более коротком окне одного АИИ (см. пояснения ниже). В настоящей работе будет показано, что в радиоизлучении исследуемого пульсара имеются компоненты с более короткими интервалами корреляции, чем характерная ширина субимпульсов и чем характерная ширина АИИ.

Поиск тонкой структуры радиоизлучения АИИ пульсаров на низких частотах усложняется сильным влиянием среды распространения на их радиоизлучение. Влияние среды распространения проявляется в эффектах дисперсионного запаздывания, уменьшения полосы декорреляции радиоизлучения, рассеяния радиоимпульсов на пространственных неоднородностях электронной концентрации межзвездной среды (МЗС) и в эффекте Фарадея (вращение плоскости линейной поляризации на пути распространения радиоизлучения). Влияние этих эффектов заметно растет с понижением частоты наблюдений и увеличением расстояния от наблюдателя до пульсара. Из-за низкого отношения сигнал/шум S/N почти не-

возможно зафиксировать обычный индивидуальный импульс даже у самых близких пульсаров. Оценка чувствительности, необходимой для обнаружения индивидуальных импульсов, будет сделана в следующем разделе.

Однако в декаметровом диапазоне были обнаружены импульсы с аномальной интенсивностью, которая превышала средний уровень в десятки и сотни раз, [12–15]. Соотношение S/N у АИИ позволяет исследовать быстрые вариации интенсивности (тонкую структуру) индивидуальных импульсов, но вероятность регистрации таких АИИ составляет всего $1 \div 2$ %, и чем выше интенсивность импульса, тем меньше вероятность его регистрации. Регистрация быстрых вариаций в радиоизлучении пульсаров является, пожалуй, единственным методом, с помощью которого можно исследовать плазму с быстро изменяющимися параметрами. Такая плазма присутствует в верхней магнитосфере пульсаров и в пульсарном ветре.

Рассеяние сигнала в среде распространения ограничивает минимально возможный (т. е. “короткий”) масштаб тонкой структуры АИИ в радиоизлучении пульсаров. Другими словами, все импульсы с шириной, существенно меньшей, чем характерное время рассеяния на данной частоте, после распространения сквозь МЗС будут иметь одинаковую ширину, равную ширине импульсной характеристики среды распространения. Это следует непосредственно из свойств интеграла Дюамеля. Поэтому оценка постоянной времени рассеяния $\tau_{sc}(f)$ на различных частотах тесно связана с задачей поиска и анализа тонкой структуры АИИ.

Постоянная времени рассеяния радиоизлучения пульсара увеличивается с понижением частоты как $\tau_{sc}(f) \sim f^{-4}$ для нормального закона распределения пространственных неоднородностей электронной концентрации и как $\tau_{sc}(f) \sim f^{-4.4}$ для колмогоровского закона.

По данным работы [14] характерная ширина субимпульсов пульсара J0814+7429 в декаметровом диапазоне на частоте $F_c = 23.7$ МГц составляет 8° , что соответствует ≈ 30 мс. Оценка постоянной времени рассеяния радиоизлучения пульсара J0814+7429 в низкочастотной области спектра дана в работе [15] и составляет (3.0 ± 0.5) мс на частоте 23.7 МГц. В процитированной работе оценены также ширина индивидуальных АИИ

(16.33 мс) и ширина среднего профиля (125.84 мс) на уровне интенсивности 0.5.

В работах [14, 15], в отличие от настоящей работы, использован алгоритм постдетекторной компенсации влияния дисперсионного запаздывания. Но даже с постдетекторной компенсацией влияния дисперсии сравнение характерной ширины АИИ и характерной ширины субимпульса показывает, что АИИ излучаются на фоне субимпульсов. Последние служат как бы подложкой или фоном для АИИ. Это утверждение более детально будет обосновано ниже по наблюдательным данным, полученным с использованием когерентного механизма компенсации дисперсионной задержки. Далее все характерные временные масштабы, обнаруженные в радиоизлучении пульсара J0814+7429, которые будут меньше характерной длительности субимпульса (30 мс), мы будем интерпретировать как характерную ширину тонкой структуры субимпульса. Аналогичные длительности в радиоизлучении данного пульсара, которые будут короче, чем характерная ширина АИИ (16 мс), будут интерпретироваться как характерная ширина тонкой структуры АИИ.

В декаметровом диапазоне исследования и самих субимпульсов, и их тонкой структуры практически не проводились. На данный момент существует всего несколько публикаций на эту тему. Так, в работе [16] приведены результаты наблюдений пульсара J0814+7429 на частоте 25 МГц с использованием радиотелескопа УТР-2. У пульсара был обнаружен дрейф субимпульсов с периодами второго рода $P_2 = 60$ мс и $P_3 = 11P_0$, где P_0 – период вращения пульсара, P_2 – характерный интервал между субимпульсами в окне главного импульса, P_3 – характерное время между двумя субимпульсами, которые регистрируются в одной фазе среднего профиля. Кроме этого, была зарегистрирована тонкая структура радиоизлучения с характерным временным масштабом $2 \div 4$ мс. Вероятнее всего, в цитируемой работе была зарегистрирована тонкая структура АИИ, хотя самого термина АИИ на момент публикации работы [16] еще не существовало. Авторам удалось зафиксировать около 10 мощных АИИ (уровень $S/N > 15$). По этим АИИ была построена усредненная АКФ с аппаратным временным разрешением 100 мкс. Тонкая структура АИИ проявлялась как в усредненной АКФ, так и в АКФ индивидуальных импульсов.

В работе [17] была обнаружена миллисекундная тонкая структура в радиоизлучении индивидуального импульса пульсара J0953+0755. У данного пульсара были обнаружены вариации меры дисперсии внутри АИИ на масштабе 5 мс. Были зарегистрированы 4 компонента АИИ, которые разделились на пару четных и нечетных компонент с разными DM ((2.972 ± 0.00012) и (2.973 ± 0.00012) пк · см⁻³). Анализ тонкой структуры проводился отдельно для каждой пары компонент. Полученное время когерентности их радиоизлучения оказалось приблизительно одинаковым для обеих пар и составляло ≈ 1 мс. С помощью такого подхода у АИИ пульсара J0953+0755 были обнаружены два характерных масштаба тонкой структуры его радиоизлучения с “короткой” шкалой в 1 мс и “длинной” шкалой в 5 мс.

Исследования тонкой структуры субимпульсов и АИИ радиоизлучения пульсаров является актуальной задачей. Расширение этих исследований в низкочастотную область позволит вплотную подойти к зондированию верхней магнитосферы пульсара и/или пульсарного ветра.

Целью настоящей работы является определение параметров тонкой структуры АИИ в радиоизлучении пульсара J0814+7429 в самой низкочастотной области спектра, доступной при наблюдениях с поверхности Земли.

2. Наблюдения и методы обработки

Наблюдения пульсара J0814+7429 были проведены 2 декабря 2013 г. на декаметровом радиотелескопе УТР-2 [18–23]. Антенная система телескопа представляет собой фазированную антенную решетку Т-образной формы и состоит из 2040 широкополосных диполей Надененко с одной линейной поляризацией [18]. Сессия наблюдений длилась 1 ч. Регистрация сигнала осуществлялась с помощью цифрового двухканального приемника DSPZ [24]. Наблюдения проводились в волновом (waveform) одноканальном режиме (прямая запись оцифрованных данных после аналого-цифрового преобразователя) с частотой дискретизации 66 МГц. Диапазон регистрируемых частот простирался от 0 до 33 МГц.

Волновой режим регистрации позволяет получить максимальную информацию о сигнале, т. к. сохраняет и амплитуду, и фазу регистрируемого

излучения [25]. Дальнейший анализ можно проводить с различным временным Δt и частотным Δf разрешением, удовлетворяющим соотношению $\Delta t \sim 1/\Delta f$. Однако волновой режим является ресурсозатратным. Он требует большого объема дискового пространства для хранения данных и оперативной памяти для обработки информации.

Оценку чувствительности, которая необходима для обнаружения индивидуальных импульсов с соотношением $S/N = 1$, в единицах спектральной плотности потока S , приведенной к одной поляризации, для радиоизлучения данного пульсара можно провести по стандартной формуле $S(f, l, m) = \frac{kT(f, l, m)}{A_{eff}(f, l, m)\sqrt{\Delta t \cdot \Delta F}}$ (здесь k – постоянная Больцмана; $T(f, l, m)$ – яркостная температура галактического фона на частоте f в направлении (l, m) ; $A_{eff}(f, l, m)$ – эффективная площадь радиотелескопа; l, m – направляющие косинусы углов (вершины обоих углов находятся в фазовом центре УТР-2) между направлениями на запад и на источник и между направлениями на юг и на источник; Δt – время интегрирования/накопления; ΔF – полоса интегрирования. Тогда по данным карты яркостной температуры галактического фона на частоте 20 МГц [21, 22] для направления на пульсар J0814+7429 получим $T(20, l_{PSR}, m_{PSR}) = 25$ К. Откуда для $\Delta t = 0.5$ мс, $\Delta F = 3$ МГц и $A_{eff}(20, l_{PSR}, m_{PSR}) = 10^5$ м² найдем оценку $S(20, l_{PSR}, m_{PSR}) = 8.912$ Ян (1 Ян = 10^{-26} Вт/(м² · Гц)).

Компенсация частотно-временной дисперсионной задержки проводилась двумя методами. С помощью постдетекторной компенсации дисперсионной задержки была обработана вся часовая серия наблюдений. Для получения среднего профиля и визуального поиска АИИ на динамических спектрах пульсара мы использовали прицельное значение $DM = 5.752$ пк · см⁻³, которое совпадает с усредненным значением меры дисперсии из работы [26] при использовании одного и того же шаблона импульса (см. [26], табл. 3), в диапазоне от декаметровых до дециметровых волн. Когерентный метод компенсации влияния дисперсии [27] применялся нами не для всей серии наблюдений, а отдельно для каждого обнаруженного АИИ на временных масштабах ± 120 с вокруг максимума интенсивности. Значение DM уточнялось в ходе анализа по максимальной ин-

тенсивности отдельно для каждого зарегистрированного АИИ.

Для дальнейшего анализа тонкой структуры радиоизлучения индивидуальных импульсов мы применяли цифровой полосовой фильтр с полосой пропускания 18 ÷ 30 МГц. Эта частотная полоса выбрана с учетом особенностей декаметрового диапазона наблюдений и параметров радиотелескопа УТР-2. Эффективная площадь радиотелескопа падает на частотах выше 30 МГц. На низких частотах возрастает уровень помех земного происхождения, уровень шумов космического фона Галактики [28] и наблюдаются сильные ионосферные мерцания [29]. При этом интенсивность излучения пульсара с понижением частоты падает из-за низкочастотного завала в спектре [30–32]. Это приводит к тому, что для радиотелескопа УТР-2 отношение S/N радиоизлучения пульсара значительно снижается за пределами выбранной полосы.

Далее полная полоса анализа 18 ÷ 30 МГц была разделена на 4 субполосы, каждая шириной 3 МГц. Значения центральных частот в этих субполосах равнялись $f_c = 19.5, 22.5, 25.5$ и 28.5 МГц. С одной стороны, из-за сильной зависимости постоянной времени рассеяния от частоты целесообразно уменьшать полосу анализа. С другой стороны, уменьшение уровня S/N из-за недостаточного накопления в спектральной области ухудшает чувствительность и может привести к потере любой информации о сигнале. Именно поэтому мы выбрали компромиссные параметры обработки.

Мы использовали различные значения времени интегрирования сигнала. Основные результаты получены с временным и частотным разрешением динамического спектра $\Delta t = 0.5$ мс, $\Delta f_{sp} = 8$ ГГц. Временное разрешение выбрано исходя из предварительно известного характерного времени рассеяния радиоизлучения для J0814+7429, равного $\tau_{sc} = (3 \pm 0.5)$ мс на частоте 23.7 МГц.

Поиск тонкой структуры АИИ выполнялся с помощью корреляционного и спектрального анализа [27, 33]. Накапливая динамический спектр импульса в каждой субполосе, мы получали четыре временных профиля АИИ, каждый из которых соотносился со своей центральной частотой. Поскольку окно анализа во временной области составляло 200 мс (см. ниже), в него заведомо

попадала и субимпульсная компонента радиоизлучения исследуемого пульсара. Из приведенных рассуждений следует, что можно говорить о структуре радиоизлучения субимпульс + АИИ, т. к. в исследуемом окне всегда зримо или незримо присутствует субимпульс (если нет эффекта нуллинга, который невозможно исследовать в декаметровом диапазоне). На фоне субимпульсов может наблюдаться или не наблюдаться АИИ. Если АИИ наблюдается, то именно его вклад в зарегистрированную интенсивность радиоизлучения (соответственно и в значимый отклик в АКФ) является определяющим. Но поскольку нас интересуют только самые “короткие” характерные временные масштабы радиоизлучения, ниже мы будем говорить только о тонкой структуре радиоизлучения АИИ, делая в нужных местах соответствующие оговорки для субимпульсов. При этом спектральный и корреляционный анализ проводился по отношению ко всему окну радиоизлучения выбранного поддиапазона в 200 мс безотносительно к тому, обнаружена в нем структура субимпульс + АИИ или нет.

Нами были получены две группы профилей АИИ, которые можно классифицировать, как профили с “короткой” и “длинной” временными шкалами (здесь и ниже “короткая” и “длинная” шкалы определены по отношению к длительности АИИ как более узкого и интенсивного компонента структуры субимпульс + АИИ). Пример динамических спектров однокомпонентных АИИ с “короткой” и “длинной” временными шкалами в полосе $18 \div 30$ МГц и временных профилей АИИ, просуммированных отдельно в 4 субполосах, показан на рис. 1. Дисперсионная задержка скомпенсирована когерентным методом с $DM = 5.752$ пк · см⁻³. Это значение DM соответствует ранее полученным значениям на радиотелескопе УТР-2 [26]. Существует еще одна оценка DM для так называемой динамической модели излучения этого пульсара: $DM = (5.733 \pm 0.001)$ пк · см⁻³ [34]. Временное окно анализа длительностью порядка 200 мс использовалось нами для повышения отношения S/N и увеличения контрастности АКФ.

3. Результаты и обсуждение.

Из всей серии наблюдений были отобраны девять АИИ пульсара J0814+7429 с минимальным влиянием внешних радиопомех, у которых в максимум

интенсивности $S/N > 10$ хотя бы в одной из четырех субполос.

Для каждого временного профиля импульса в окне 200 мс в четырех субполосах рассчитывалась АКФ (ρ – коэффициент корреляции), по которой оценивалась характерная ширина импульса $\tau(f_c)$. На рис. 2 приведены графики АКФ интенсивности АИИ пульсара J0814+7429 на частоте 22.5 МГц с временным разрешением $\Delta\tau = 0.5$ мс, накопленные в полосе $\Delta F = 3$ МГц. Из рис. 2 видно, что АКФ разделены на две группы, которые соответствуют более коротким и более длинным временам корреляции.

Отметим, что АКФ АИИ с “короткой” шкалой группируются более плотно. Для АИИ с “короткой” шкалой характерные ширины АКФ и связанные с ними постоянные времени рассеяния отличаются слабо. АИИ с “длинной” шкалой, напротив, имеют большой разброс в значениях характерной ширины АКФ. Значению характерной ширины исследуемой импульсной компоненты, оцененному на уровне 0.5 от ее максимальной интенсивности, соответствует коэффициент корреляции 0.25 для нормированной АКФ. Оценки характерной ширины различных импульсных компонент радиоизлучения пульсара J0814+7429 на частотах 22.5 и 25.5 МГц приведены в табл. 1. Среднеквадратичное отклонение σ времени рассеяния возможно рассчитать только для АИИ с “длинной” шкалой. Оно составляет ≈ 2 мс. Для АИИ с “короткой” шкалой в табл. 1 приведены только минимальные оценки погрешности.

О наличии тонкой структуры в радиоизлучении АИИ свидетельствуют сравнение характерной ширины среднего профиля с аналогичной шириной индивидуального АИИ (см. рис. 3), а также характерные изломы усредненных АКФ с временным масштабом τ_{fc} (см. рис. 4). По ширине изломов данных АКФ мы оценивали время корреляции импульсных компонент радиоизлучения с “короткой” и “длинной” шкалами. В ряде случаев в профилях АКФ были выявлены локальные максимумы. Присутствие этих максимумов свидетельствует о наличии расщеплений в профиле АИИ (см. рис. 5).

Характерные ширины “короткой” и “длинной” шкал АИИ $\tau_{sh}(f_c)$ и $\tau_{mg}(f_c)$ оценивались нами на двух центральных частотах ($f_c = 22.5, 25.5$ МГц) для нормированной АКФ на уровне ко-

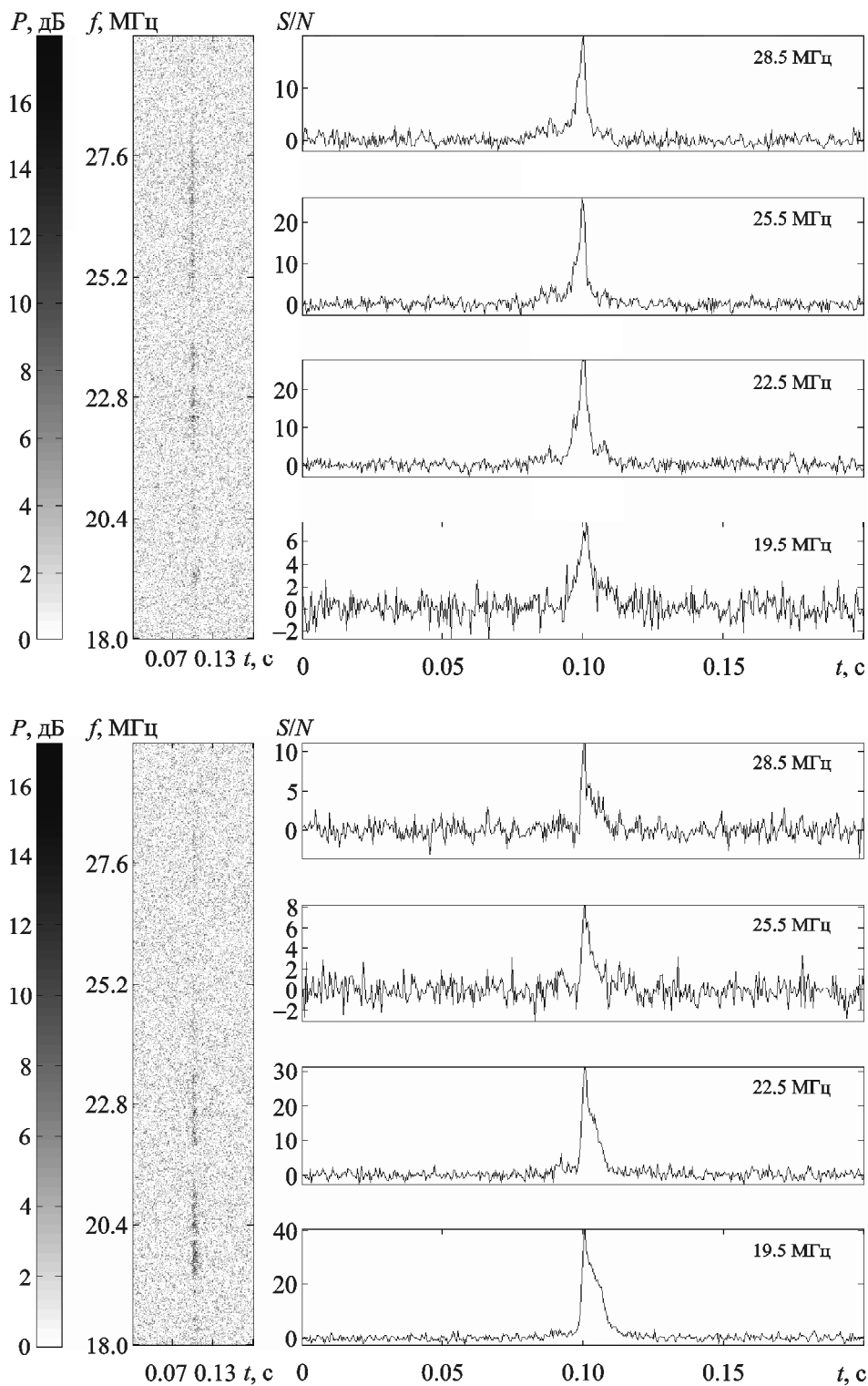


Рис. 1. Однокомпонентные АИИ пульсара J0814+7429 с “короткими” (верхняя панель) и “длинными” (нижняя панель) характерными временными масштабами в близких частотных диапазонах: динамический спектр АИИ в диапазоне 18 ÷ 30 МГц (слева на каждой панели) и 4 временных профиля, полученные в диапазонах с центральными частотами $f_c = 19.5, 22.5, 25.5$ и 28.5 МГц (справа на каждой панели). Временное и частотное разрешение динамического спектра – $\Delta\tau = 0.5$ мс и $\Delta f_{sp} = 8$ кГц; временное окно каждого импульса – 200 мс; полоса интегрирования индивидуальных импульсов – $\Delta F = 3$ МГц в каждом диапазоне. На верхней панели видно, что в диапазонах с центральными частотами 22.5, 25.5 и 28.5 МГц АИИ с “короткой” временной шкалой излучаются на фоне слабоинтенсивных субимпульсов

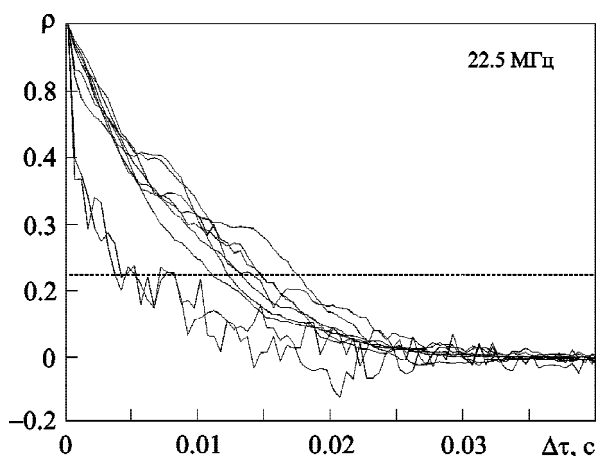


Рис. 2. АКФ девяти индивидуальных АИИ пульсара J0814+7429, зарегистрированных на частоте 22.5 МГц. Две характерные ширины АКФ соответствуют компонентам АИИ радиоизлучения пульсара J0814+7429 с “короткой” и “длинной” шкалами. Временное разрешение – $\Delta\tau = 0.5$ мс, частотное разрешение – $\Delta F = 3$ МГц, пунктиром указан уровень 0.25 от максимума АКФ для компоненты АИИ с “длинной” шкалой

Таблица 1. Характерная ширина тонкой структуры АИИ радиоизлучения пульсара J0814+7429

| f_c , МГц | 22.5 | 25.5 |
|--|-----------------|-------------------|
| τ_{sh} , мс (“короткая шкала”) | $9.7 \pm 0.8^*$ | $7.04 \pm 0.24^*$ |
| τ_{lng} , мс (“длинная шкала”) | 13.0 | 13.44 |
| σ (“длинная шкала”) | 1.5 | 1.7 |

*минимаксная оценка погрешности

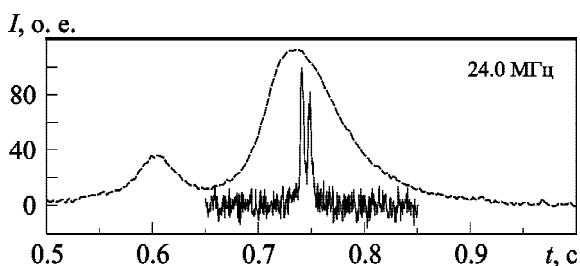


Рис. 3. Сравнение характерных временных масштабов среднего профиля (штриховая кривая) и индивидуально-го АИИ (сплошная кривая) пульсара J0814+7429 на частоте 24 МГц. Интенсивности I обоих профилей нормированы к 100

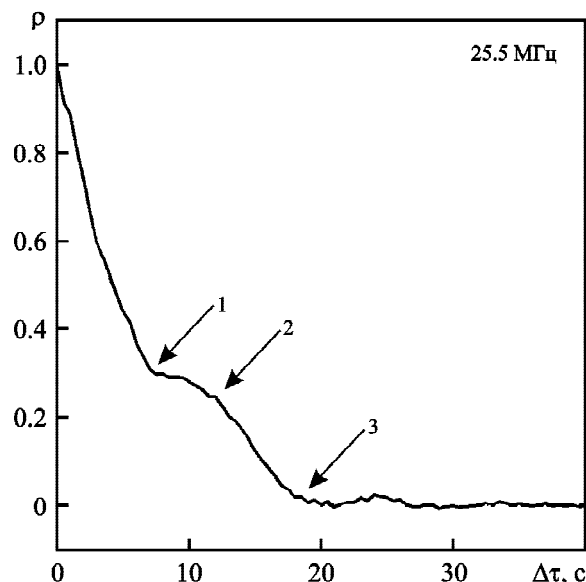
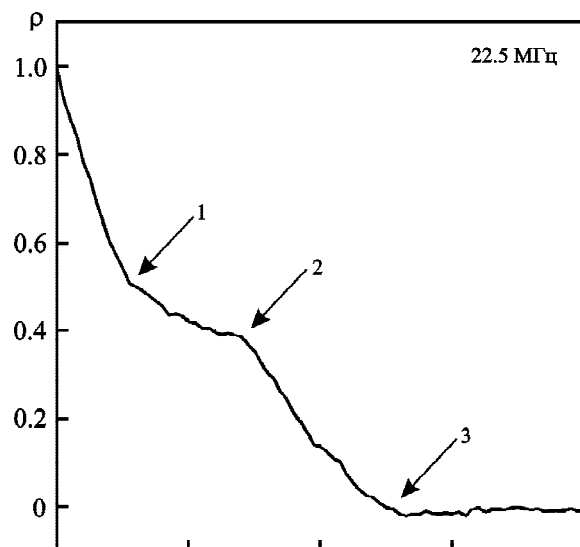


Рис. 4. Пример регистрации тонкой структуры АИИ радиоизлучения пульсара J0814+7429 с “короткой” и “длинной” шкалами: АКФ профиля АИИ на частотах $f_c = 22.5$ и 25.5 МГц с временным разрешением $\Delta\tau = 0.5$ мс. Стрелками под номером 1 указано положение излома АКФ, который соответствует зарегистрированным АИИ с “короткой” временной шкалой (характерное время корреляции соответственно равно $\tau_{sh} = 5$ мс на частоте $f_c = 22.5$ МГц (верхняя панель) и $\tau_{sh} = 7$ мс на частоте $f_c = 25.5$ МГц (нижняя панель)). Второй излом (стрелки под номером 2) на этих АКФ характеризует “длинную” временную шкалу тонкой структуры АИИ. Он соответствует времени корреляции $\tau_{lng} = 14$ мс на частоте 22.5 МГц и $\tau_{lng} = 11.5$ мс на частоте 25.5 МГц. Излом под номером три вблизи нулевого коэффициента корреляции соответствует уже всей ширине АИИ

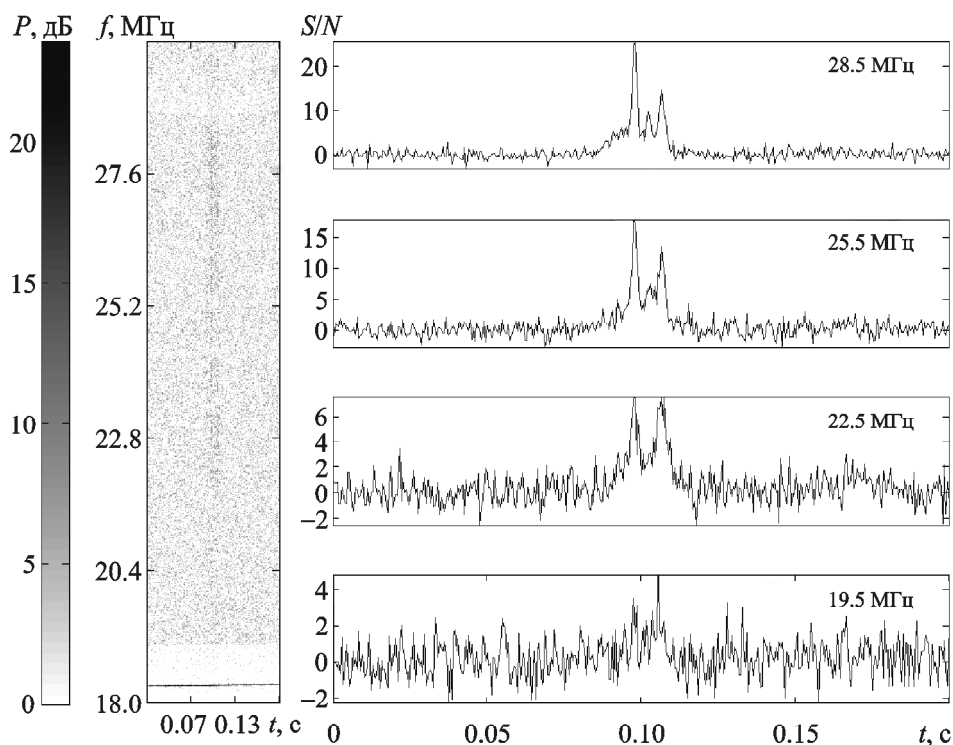


Рис. 5. Пример тонкой структуры АИИ пульсара J0814+7429 с несколькими компонентами, существующими одновременно: левая панель – динамический спектр в диапазоне 18 ÷ 30 МГц; правая панель – 4 временных профиля, просуммированных в субполосах по 3 МГц на центральных частотах $f_c = 19.5, 22.5, 25.5$ и 28.5 МГц. Временное и частотное разрешение для динамических спектров: $\Delta t = 0.5$ мс и $\Delta f_{sp} = 8$ кГц

эффицента корреляции 0.25 (см. рис. 2). Этот уровень АКФ соответствует уровню интенсивности 0.5 в профиле исследуемой компоненты импульса. Поскольку мы проанализировали всего 9 АКФ (2 для АИИ с “короткой” шкалой и 7 для АИИ с “длинной” шкалой) среднее квадратичное отклонение таких оценок было определено только для компонент с “длинной” шкалой. Для структуры радиоизлучения с “короткой” шкалой были получены только минимаксные оценки.

В нашей интерпретации характерная длительность обнаруженной при анализе АКФ “короткой” шкалы АИИ пульсара J0814+7429 примерно равна удвоенной длительности постоянной времени рассеяния на пространственных неоднородностях электронной концентрации МЗС. Такая оценка в зарегистрированных нами АИИ с “короткой” шкалой следует из того, что скорость нарастания переднего фронта и скорость спадания заднего фронта у “коротких” АИИ соизмеримы (см. рис. 6, импульс № 3). Это говорит в пользу примерного равенства характерной ширины исходных “коротких” АИИ и характерной ширины

импульсной характеристики среды распространения. В тех же случаях, когда передний фронт зарегистрированных АИИ является довольно крутым (см. рис. 6, импульсы № 6, 8, 9), наблюдаемые АИИ относятся к импульсам с “длинной” шкалой.

Обнаруженная “длинная” шкала АИИ радиоизлучения этого же пульсара в нашей интерпретации соотносится с излучением более широких (по сравнению с постоянной времени рассеяния) импульсов в магнитосфере самого пульсара или с серией коротких импульсов, следующих друг за другом. Интервалы следования этих импульсов таковы, что в системе отсчета наблюдателя, вследствие свертки с импульсной характеристикой среды распространения, короткие импульсы не разрешаются, образуя протяженную компоненту АИИ. Для принятой интерпретации можно провести деконволюцию обоих типов импульсов. После деконволюции самые интенсивные зарегистрированные импульсы будут приведены к той форме, которая была у этих импульсов в магнитосфере пульсара.

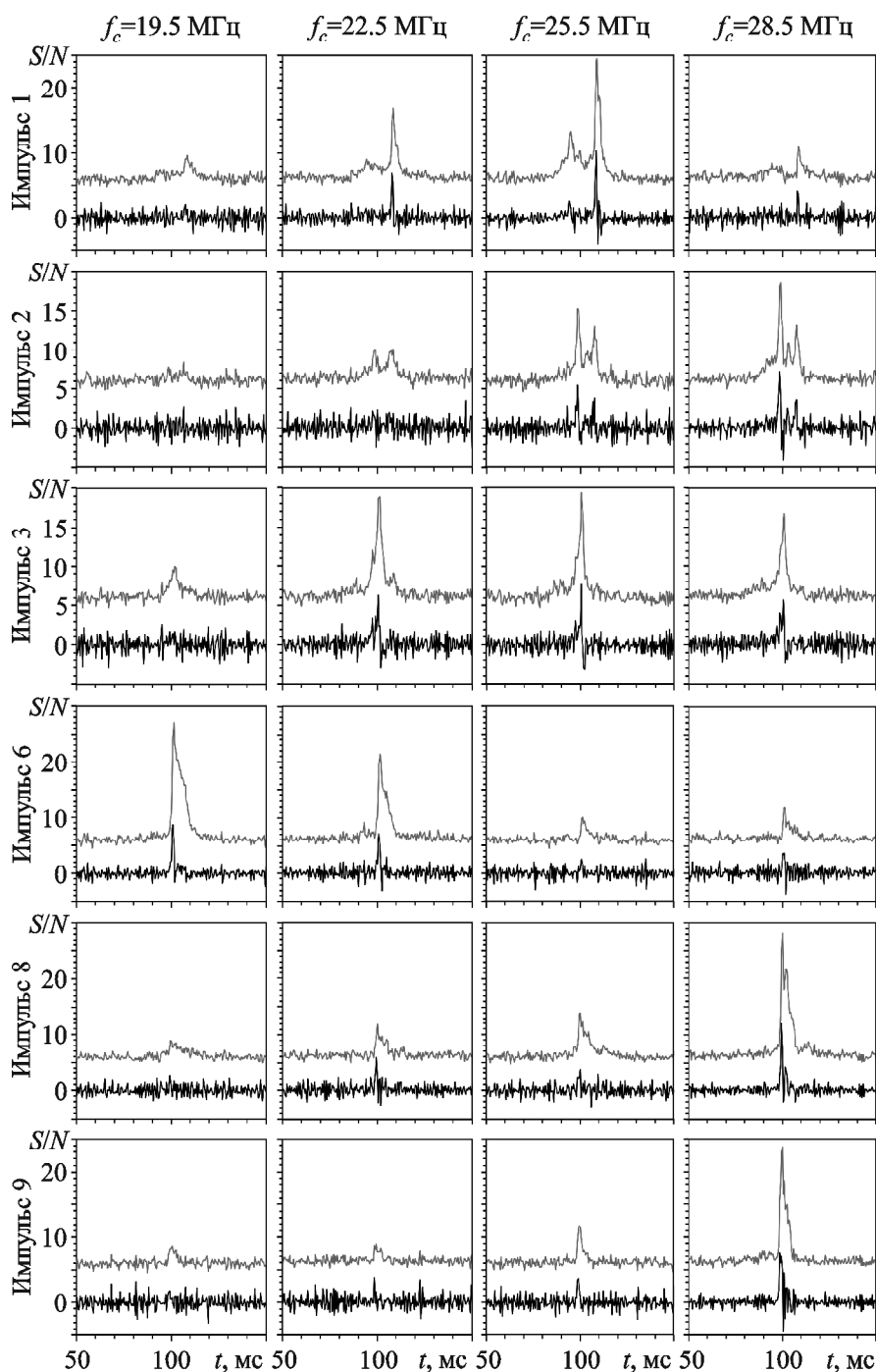


Рис. 6. Различные АИИ пульсара J0814+7429 с “короткой” и “длинной” компонентами радиоизлучения: верхние профили – импульсы зарегистрированные на радиотелескопе УТР-2 (серые кривые); нижние профили (черные кривые) соответствуют верхним профилям после их деконволюции. Верхние профили приведены в относительных единицах. Нижние профили приведены в единицах отношения сигнал/шум S/N . Все АИИ, которые были зарегистрированы в данной сессии наблюдений, пронумерованы в порядке их регистрации числами от 1 до 9

Мы предлагаем следующую модель. Среду распространения от зоны генерации радиоизлучения до наблюдателя можно условно разделить на характерные слои: верхняя магнитосфера, пуль-

сарный ветер, МЗС, межпланетная среда и ионосфера Земли [35]. Все слои, за исключением верхней магнитосферы пульсара, имеют турбулентную структуру, параметры которой могут варьировать-

ся во времени. В верхней магнитосфере пульсара турбулентность должна быть подавлена относительно сильным магнитным полем. Модель турбулентной среды может быть представлена колмогоровским или нормальным спектрами пространственных неоднородностей электронной концентрации. Рассмотрим колмогоровский пространственный спектр турбулентности:

$$P_{\delta n_e}(q) = C_n^2 q^{-\beta}, \quad 2\pi/L_H \leq q \leq 2\pi/L_L, \quad \delta n_e \sim n_e, \quad (1)$$

где $P_{\delta n_e}(q)$ – спектральная плотность мощности пространственных флуктуаций электронной концентрации плазмы на луче зрения; $q = 2\pi/L$ – волновое число или пространственная гармоника, L – пространственный масштаб турбулентности; $\beta = 11/3$ – спектральный индекс для колмогоровского пространственного спектра насыщенной турбулентности и $\beta = 4$ – аналогичный индекс для нормального пространственного спектра турбулентности; L_H – внешний масштаб турбулентности; L_L – внутренний масштаб турбулентности; C_n^2 – коэффициент, характеризующий интенсивность турбулентности, т. е. степень пространственной неоднородности электронной концентрации в плазме $\delta n_e / \langle n_e \rangle$, δn_e – флуктуации электронной концентрации, $\langle n_e \rangle$ – средняя концентрация электронов.

Используя уравнение (1) можно получить оценку флуктуаций электронной концентрации $\langle \delta n_e^2 \rangle$:

$$\langle \delta n_e^2 \rangle = \int_{q_L}^{q_H} P_{\delta n_e}(q) dq, \quad q_L = 2\pi/L_H, \quad q_H = 2\pi/L_L.$$

Согласно данным, приведенным в [36], $\langle C_n^2 \rangle$ можно представить как

$$\langle C_n^2(f_c, \Delta f) \rangle = 2 \cdot 10^{-3} f_c^\mu D^{-\mu/2} \Delta f^{-(\mu-2)/2}, \quad (2)$$

где f – частота, ГГц; D – расстояние между источником и наблюдателем, кпк; Δf – полоса декорреляции, МГц; $\langle C_n^2 \rangle$ – среднее значение интенсивности турбулентности на луче зрения, $m^{-20/3}$ (для колмогоровского спектра пространственных неоднородностей электронной концентрации); $\mu = 2\beta/(\beta - 2)$ – спектральный индекс в области частотного спектра турбулентности.

Учитывая, что $\Delta f = 1.16/(2\pi\tau_{sc}(f))$ [37] из уравнения (2) получим

$$\langle C_n^2(f_c, \tau_{sc}) \rangle = 2 \cdot 10^{-3} f_c^\mu D^{-\mu/2} (2\pi\tau_{sc}(f_c)/1.16)^{(\mu-2)/2}. \quad (3)$$

Запишем уравнение (3) в явном виде для нормального и колмогоровского распределений пространственных масштабов турбулентности:

$$\langle C_{n_N}^2(f_c, \tau_{sc}) \rangle = 2 \cdot 10^{-3} f_c^4 D^{-2} 2\pi\tau_{sc}(f_c)/1.16, \quad (4)$$

$$\langle C_{n_K}^2(f_c, \tau_{sc}) \rangle = 2 \cdot 10^{-3} f_c^{4.4} D^{-2.2} (2\pi\tau_{sc}(f_c)/1.16)^{1.2}. \quad (5)$$

Здесь индексы N и K соответствуют нормальному и колмогоровскому законам распределения пространственных масштабов турбулентности.

Аналогично тому, как это сделано в работах [37–39], определим интегральную характеристику среды распространения, которую принято называть мерой рассеяния (SM – Scattering Measure):

$$SM = \int_0^D C_n^2(s) ds,$$

где ds – дифференциал длины на луче зрения.

Теперь по наблюдательным данным можно рассчитать меру рассеяния в направлении на пульсар J0814+7429 для близких частотных диапазонов. Результаты наших оценок, SM_N и SM_K (индексы N и K соответствуют нормальному и колмогоровскому законам распределения пространственных неоднородностей электронной концентрации), приведены в табл. 2.

В табл. 2 использованы две оценки расстояния до исследуемого пульсара. Они взяты из данных каталога ATNF. Можно видеть, что при колмогоровском спектре пространственных неоднородностей электронной концентрации сигналы рассеиваются значительно сильнее, чем при нормальном спектре тех же неоднородностей.

Поскольку мера рассеяния является интегральной характеристикой, ее можно представить суммой аналогичных характеристик, которые формируются в каждом слое среды распространения. Проиндексировав слои от источника излучения к наблюдателю индексами: HPM , PW , ISM , IPM , EI , – которые соответственно обозначают верх-

Таблица 2. Оценки меры рассеяния в направлении на пульсар J0814+7429

| f_c , МГц | 22.5 | | 25.5 | |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $\tau_{sc}(f_c)$, мс | $4.9 \pm 0.8^*$ | | $3.5 \pm 0.24^*$ | |
| D , кпк | 0.43^{**} | 0.37^{***} | 0.43^{**} | 0.37^{***} |
| SM_N , кпк \cdot м $^{-20/3}$ | $3.16 \cdot 10^{-5}$ | $3.68 \cdot 10^{-5}$ | $3.73 \cdot 10^{-5}$ | $4.33 \cdot 10^{-5}$ |
| $\lg(SM_N)$ | -4.5 | -4.435 | -4.428 | -4.363 |
| SM_K , кпк \cdot м $^{-20/3}$ | $6.3 \cdot 10^{-5}$ | $7.54 \cdot 10^{-5}$ | $7.29 \cdot 10^{-5}$ | $8.74 \cdot 10^{-5}$ |
| $\lg(SM_K)$ | -4.201 | -4.123 | -4.134 | -4.056 |

*минимаксная оценка погрешности

**расстояние из каталога ATNF [2, 3]

***оценка расстояния по мере дисперсии из каталога ATNF [2, 3]

ную магнитосферу пульсара (High Pulsar Magnetosphere), пульсарный ветер (Pulsar Wind), МЗС (Interstellar Medium), межпланетную среду (Interplanetary Medium) и ионосферу Земли (Earth Ionosphere) запишем:

$$SM = \int_0^{D_{HPM}} C_{n_{HPM}}^2 ds + \int_{D_{HPM}}^{D_{PW}} C_{n_{PW}}^2 ds + \int_{D_{PW}}^{D_{ISM}} C_{n_{ISM}}^2 ds + \int_{D_{ISM}}^{D_{IPM}} C_{n_{IPM}}^2 ds + \int_{D_{IPM}}^{D_{EI}} C_{n_{EI}}^2 ds,$$

где D_{HPM} , D_{PW} , D_{ISM} , D_{IPM} , D_{EI} – расстояния от источника излучения до верхней границы (дальней по отношению к источнику излучения) соответствующего слоя в среде распространения.

Из данных наблюдения мерцаний на неоднородностях электронной концентрации в межпланетной плазме следует, что полоса их декорреляции превышает 10 МГц [29]. Тогда дополнительный вклад в результирующую постоянную времени рассеяния из-за наличия этих неоднородностей не превышает 0.1 мкс. Это на четыре порядка меньше, чем разность характерных временных масштабов “длинной” и “короткой” шкал (см. табл. 1). Отсюда очевидно, что

$$\int_{D_{PW}}^{D_{ISM}} C_{n_{ISM}}^2 ds \gg \int_0^{D_{HPM}} C_{n_{HPM}}^2 ds + \int_{D_{HPM}}^{D_{PW}} C_{n_{PW}}^2 ds + \int_{D_{ISM}}^{D_{IPM}} C_{n_{IPM}}^2 ds + \int_{D_{IPM}}^{D_{EI}} C_{n_{EI}}^2 ds. \quad (6)$$

Из уравнений (4), (5) и неравенства (6) следует, что основной вклад в постоянную времени рассеяния обеспечивается МЗС, а не всеми остальными слоями на пути распространения излучения. Как видно из табл. 1, АИИ с “длинной” шкалой имеют длительность в 1.3 раза большую, чем структура с “короткой” шкалой, на частоте 22.5 МГц и почти в 2 раза большую на частоте 25.5 МГц. Если предположить, что эту дополнительную длительность можно обеспечить за счет рассеяния в плазме с быстро изменяющимися параметрами (т. е. в плазме верхней магнитосферы пульсара, пульсарного ветра, межпланетной среды и ионосферы Земли), то мы приходим к противоречию между уравнениями (4), (5) и неравенством (6). С другой стороны, плазма МЗС в течении 10 ÷ 20 мин свои параметры существенно не изменяет.

Из приведенных рассуждений следует, что наше предположение о том, что радиоизлучение с “длинной” шкалой, по-видимому, генерируется в самой магнитосфере пульсара не лишено оснований. Дальнейшие исследования позволят более детально прояснить природу радиоизлучения с “короткой” и “длинной” шкалами у этого пульсара.

Мы обнаружили, что у некоторых особенно мощных АИИ тонкая структура расщепляется на несколько компонент. Об этом свидетельствуют временные профили на рис. 5. В данном случае “короткая” и “длинная” компоненты радиоимпульса существуют совместно. Это отчетливо видно на рис. 5 в трех верхних субполосах регистрации. В этих субполосах тонкая структура с “короткой” шкалой расположена на “пьеде-

стале”, образованном “длинной” субимпульсной компонентой.

Общепринятой моделью, которая описывает влияние рассеяния на пространственных неоднородностях электронной концентрации МЗС в системе отсчета наблюдателя, является модель тонкого фазового экрана. В этой модели огибающая импульсной характеристики среды распространения $h(t, f)$ описывается простейшим уравнением, в которое входит всего один параметр – постоянная времени рассеяния $\tau_{sc}(f)$:

$$\begin{cases} h(t, f) = \exp(-t/\tau_{sc}(f)), & t \geq 0; \\ h(t, f) = 0, & t < 0. \end{cases}$$

Именно этот параметр мы оценивали из полученных данных, для того чтобы рассчитать меру рассеяния и провести деконволюцию зарегистрированных процессов.

По нашим данным, взятым из анализа АКФ индивидуальных импульсов, характерные масштабы “короткой” временной шкалы разных импульсов в разных частотных субполосах лежат в пределах $\tau_{sh} \approx 7 \div 10$ мс, что несколько больше характерных масштабов $\tau_{sh} = 2 \div 4$ мс, известных ранее на частоте 25 МГц на радиотелескопе УТР-2 [16]. По соображениям, которые рассмотрены выше, мы оцениваем постоянную времени рассеяния как $\tau_{sc}(f_c) = \tau_{sh}(f_c)/2$.

Теперь рассмотрим алгоритм деконволюции зарегистрированных импульсов $S_{obs}(\tau, f_c)$. Свертка импульсов, которые генерируются в магнитосфере пульсара, с импульсной характеристикой МЗС определяется уравнением

$$S_{obs}(\tau, f_c) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{PSR}(t, f_c) h(\tau - t, f_c) dt. \quad (7)$$

Здесь $S_{PSR}(t, f_c)$, $S_{obs}(\tau, f_c)$ – огибающие исходного процесса, который был сгенерирован в магнитосфере пульсара, и процесса, зарегистрированного радиотелескопом, соответственно.

Пусть каждому из процессов и импульсной характеристике среды распространения, $S_{PSR}(t, f_c)$, $S_{obs}(\tau, f_c)$ и $h(t, f_c)$, соответствуют их спектральные образы: $\dot{G}_{PSR}(\Omega, f_c)$, $\dot{G}_{obs}(\Omega, f_c)$, $\dot{H}_{ISM}(\Omega, f_c)$ (здесь Ω – аргумент фурье-образа). Тогда, в силу свойств преобразования Фурье, свертке из уравнения (7) соответствует спектральный образ

$\dot{G}_{PSR}(\Omega, f_c) \dot{H}_{ISM}(\Omega, f_c)$, где $\dot{H}_{ISM}(\Omega, f_c)$ – спектр импульсной характеристики МЗС. Теперь запишем уравнение (7) в спектральной области:

$$\begin{aligned} \dot{G}_{obs}(\Omega, f_c) &= \dot{G}_{PSR}(\Omega, f_c) \dot{H}_{ISM}(\Omega, f_c), \\ -\infty < \Omega < \infty. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\dot{G}_{PSR}(\Omega, f_c) = \dot{G}_{obs}(\Omega, f_c) / \dot{H}_{ISM}(\Omega, f_c). \quad (8)$$

Переводя уравнение (8) во временную область получим

$$S_{PSR}(t, f_c) = IFFT[\dot{G}_{obs}(\Omega, f_c) / \dot{H}_{ISM}(\Omega, f_c)],$$

где $IFFT[\dots]$ – оператор обратного преобразования Фурье.

Проведя деконволюцию зарегистрированных импульсов в соответствии с изложенным алгоритмом, мы восстановили огибающие исходных процессов, происходивших в магнитосфере пульсара. Там, где соотношение S/N было достаточно велико, удалось восстановить импульсные компоненты, форма которых практически не искажена влиянием рассеяния (см. рис. 6).

Данные рис. 6 показывают, что в декаметровом диапазоне деконволюция дает хорошие результаты только для зарегистрированных АИИ с соотношением $S/N > 20$. При меньшем отношении S/N деконволюцию целесообразно проводить только с дополнительным накоплением либо в области АКФ, либо в области спектральной плотности мощности. В ряде случаев импульсы, восстановленные после деконволюции (импульс № 1, $f_c = 25.5$ МГц; импульс № 6, $f_c = 19.5$ и 22.5 МГц; импульсы № 8 и № 9, $f_c = 28.5$ МГц), имеют длительность, соизмеримую с временным разрешением, выбранным для анализа данных. Как правило, такие узкие импульсы излучаются либо короткими сериями, либо в начале низкоинтенсивного плато (см. импульс № 3, $f_c = 25.5$ МГц; импульс № 6, $f_c = 28.5$ МГц). При выбранных параметрах временного и частотного разрешения и имеющихся ограничениях по чувствительности мы не можем разрешить “длинную” импульсную компоненту, хотя не исключено, что она также состоит из серии коротких, но менее интенсивных импульсов (это следует из совместного анализа заре-

гистрированного и восстановленного импульсов № 8 и № 9 в диапазоне с центральной частотой $f_c = 28.5$ МГц).

Мы усреднили все девять профилей импульсов (независимо от наличия или отсутствия АИИ в области анализируемых долгот) в каждом из выбранных диапазонов, привязав каждый из профилей к фазе субимпульса. Для этих профилей были построены соответствующие АКФ. Полученные результаты приведены на рис. 7.

На рис. 7 видна субимпульсная компонента радиоизлучения. Ее ширина, определенная с помощью АКФ зарегистрированных АИИ, составляет порядка $30 \div 40$ мс в диапазоне $22.5 \div 28.5$ МГц, как и было установлено ранее в работе [14]. С помощью совместного анализа обоих типов АКФ легко интерпретируются изломы в АКФ зарегистрированных АИИ. Как правило, эти изломы связаны с наличием “короткой” и “длинной” компонент излучения АИИ. Такие компоненты присущи диапазонам с $f_c = 22.5, 25.5$ и 28.5 МГц, но плохо определяются в диапазоне с $f_c = 19.5$ МГц из-за низкого отношения S/N . В ряде случаев изломы в АКФ зарегистрированных АИИ связаны с расщеплением внутри самих АИИ. Либо оба эффекта присутствуют одновре-

менно (см. рис. 7, $f_c = 25.5$, и 28.5 МГц). Таким образом, совместный анализ АКФ двух типов АИИ (зарегистрированных АИИ и АИИ после деконволюции) дает оценки “короткой” и “длинной” шкал АИИ, которые приведены в табл. 3.

Сама процедура усреднения по девяти временным интервалам длительностью 200 мс, синфазным относительно фазы субимпульса, пока не привела к достаточному накоплению. Но она проиллюстрировала целесообразность и возможность такого накопления. В этом направлении предложенный метод деконволюции импульсов и будет развиваться далее.

Наличие в декаметровом радиоизлучении пульсара J0814+7429 очень коротких ($\approx 2 \div 3$ мс) интенсивных импульсов ($S/N \sim 10$ после деконво-

Таблица 3. Оценки длительности “короткой” и “длинной” шкалы АИИ пульсара J0814+7429 после использования процедуры деконволюции

| f_c , МГц | $\Delta\tau_{ACF}$, мс | |
|-------------|-------------------------|-----------------|
| | “короткая шкала” | “длинная шкала” |
| 22.5 | 3 | 10 |
| 25.5 | 2 | 9 |
| 28.5 | 1 ÷ 3 | 10 |

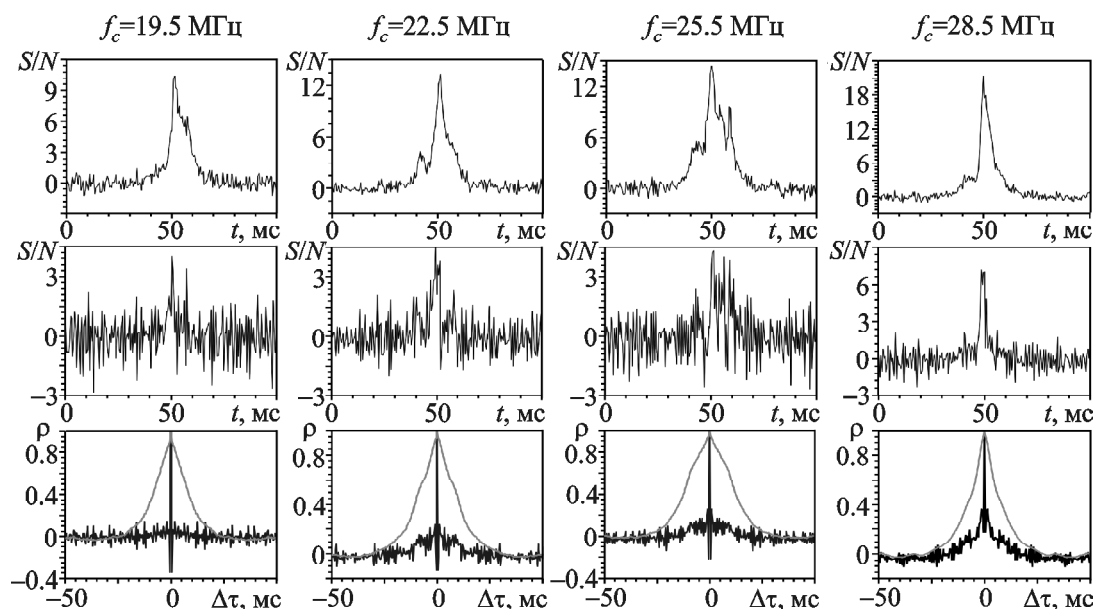


Рис. 7. Усредненные профили АИИ до (верхняя панель) и после (центральная панель) деконволюции и соответствующие им АКФ (нижняя панель). Данные профили усреднены с привязкой к фазе субимпульса. Совместный анализ усредненных АИИ и их АКФ, полученных до (серые кривые) и после (черные кривые) процедуры деконволюции, позволяет выявить не только элементы расщепления в профилях оригинальных импульсов, но и оценить длительность наиболее тонких деталей ($\tau \approx 1 \div 3$ мс), которые генерируются в магнитосфере пульсара

люции) дает основания надеяться на потенциальную возможность разрешения его верхней магнитосферы с помощью анализа меры дисперсии и меры вращения для этих импульсов в зависимости от фазы импульса и центральной частоты наблюдений.

Результаты, которые получены при деконволюции АИИ, позволяют говорить о том, что выбранная модель учета рассеяния (модель тонкого фазового экрана) не является идеальной. Это видно из того, что в профилях восстановленных импульсов с наибольшей интенсивностью (импульсы № 1, $f_c = 25.5$ МГц; № 2, $f_c = 28.5$ МГц; № 3, $f_c = 25.5$ МГц; № 6, $f_c = 19.5$ МГц; № 9, $f_c = 28.5$ МГц) наблюдается интенсивный отрицательный выброс, которого не должно быть при адекватном учете реального, а не модельного рассеяния. В ряде случаев интенсивный отрицательный выброс не наблюдается. Если считать, что наличие/отсутствие отрицательного выброса свидетельствует о неточной/точной оценке такого параметра, как постоянная времени рассеяния, то приведенный алгоритм деконволюции можно будет адаптировать к поиску динамических изменений постоянной времени рассеяния. Это будет весомым вкладом в исследовании среды распространения, в том числе и верхней магнитосферы пульсара.

4. Выводы

В настоящей работе был проведен поиск тонкой структуры радиоизлучения у АИИ пульсара J0814+7429 в декаметровом диапазоне длин волн. Было зафиксировано 9 АИИ в диапазоне частот $18 \div 30$ МГц, для которых были оценены характерные временные интервалы корреляции радиоизлучения в четырех частотных субполосах. По характерным ширинам индивидуальных АКФ зарегистрированные импульсы разделились на две группы. В одной из них присутствует радиоизлучение с “короткой” временной шкалой с характерным интервалом корреляции $7 \div 10$ мс, в другой группе присутствует радиоизлучение с “длинной” временной шкалой с характерным интервалом корреляции порядка 13 мс.

Форма импульсов с “короткими” временными масштабами указывает на то, что их постоянная

времени рассеяния составляет примерно половину их корреляционного интервала.

Использован алгоритм деконволюции зарегистрированных импульсов. Этот алгоритм позволил в значительной степени устранить влияние рассеяния радиоизлучения на форму огибающих импульсов и привести наиболее интенсивные наблюдаемые импульсы к форме, близкой к той, которую они имеют в магнитосфере пульсара.

Показана возможность адаптации алгоритма деконволюции к динамическим изменениям постоянной времени рассеяния.

Установлено, что наиболее интенсивные импульсы, которые генерирует пульсар J0814+7429 в декаметровом диапазоне, могут иметь длительность около $2 \div 3$ мс. Эти импульсы излучаются короткими сериями. В некоторых случаях они излучаются на фоне “длинной” субимпульсной компоненты, образующей низкоинтенсивное плато.

Получены оценки меры рассеяния излучения в направлении на пульсар J0814+7429.

Полученные нами результаты подтверждают обнаружение тонкой структуры радиоизлучения АИИ пульсара J0814+7429 в декаметровом диапазоне и уточняют ее параметры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Popov M. V. and Smirnova T. V. The drift behavior of PSR 0809+74 // *Sov. Astron.* – 1982. – Vol. 26. – P. 439–442.
2. Manchester R. N., Hobbs G. B., Teoh A., and Hobbs M. The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue // *Astron. J.* – 2005. – Vol. 129, No. 4. – P. 1993–2006. DOI: 10.1086/428488
3. ATNF Pulsar Catalog. [Электронный ресурс]. [Дана обращения 21.12.2016]. Режим доступа: <http://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat/>
4. Hankins T. H. Microsecond Intensity Variations in the Radio Emissions from CP 0950 // *Astrophys. J.* – 1971. – Vol. 169. – P. 487–494. DOI: 10.1086/151164
5. Rickett B. J. Interstellar scattering and scintillation of radio waves // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* – 1977. – Vol. 15. – P. 479–504. DOI: 10.1146/annurev.aa.15.090177.002403
6. Cordes J. M. Pulsar timing. II - Analysis of random walk timing noise - Application to the Crab pulsar // *Astrophys. J.* – 1980. – Vol. 237. – P. 216–226. DOI: 10.1086/157861
7. Rickett B. J., Hankins T. H., and Cordes J. M. The radio spectrum of micropulses from pulsar PSR 0950 + 08 // *Astrophys. J.* – 1975. – Vol. 201. – P. 425–430. DOI: 10.1086/153904

8. Smirnova T. V., Soglasnov V. A., Popov M. V., and Novikov A. Y. Dual-Frequency Correlation of Pulsar Micropulses // *Sov. Astron.* – 1986. – Vol. 30. – P. 51–56.
9. Кузьмин А. Д. Пульсары. – М.: Наука, 1989. – 159 с.
10. Popov M. V., Smirnova T. V., and Soglasnov V. A. Microstructure of Pulsars PSR:0809+74 PSR:0950+08 and PSR:1133+16 in the 67-102-MHz Range // *Sov. Astron.* – 1987. – Vol. 31. – P. 529–536.
11. Cordes J. M. Correlation analyses of microstructure and noise-like intensity fluctuations from pulsar 2016+28 // *Astrophys. J.* – 1976. – Vol. 208. – P. 944–954. DOI: 10.1086/154683
12. Ульянов О. М., Захаренко В. В., Коноваленко А. А., Лекашо А., Розолен К., Рукер Х.О. Обнаружение индивидуальных импульсов пульсаров В0809+74; В0834+06; В0943+10; В0950+08; В1133+16 в дециметровом диапазоне волн // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2006. – Т. 11, № 2. – С. 113–133.
13. Ульянов О. М., Дешпанде А., Захаренко В. В., Асгекар А., Шанкар У. Двухчастотные наблюдения шести пульсаров с использованием УТР-2 и GEETEE радиотелескопов // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2007. – Т. 12, № 1. – С. 5–19.
14. Ulyanov O. M., Zakharenko V. V., and Bruck Y. M. The parameters of pulsar subpulse emission at decameter wavelengths // *Astron. Rep.* – 2008. – Vol. 52, Is. 11. – P. 917–924. DOI: 10.1134/S1063772908110061
15. Ulyanov O. M. and Zakharenko V. V. Energy of anomalously intense pulsar pulses at decameter wavelengths // *Astron. Rep.* – 2012. – Vol. 56, Is. 6. – P. 417–429. DOI: 10.1134/S1063772912060054
16. Novikov A. Yu., Popov M. V., Soglasnov V. A., Bruk Yu. M., and Ustimenko B. Yu. Observations of pulsar PSR 0809+74 at a frequency of 25 MHz with a time resolution of 100 microsec // *Sov. Astron.* – 1984. – Vol. 28. – P. 199–201.
17. Ulyanov O. M., Skoryk A. O., Shevtsova A. I., Plakhov M. S., and Ulyanova O. O. Detection of the fine structure of the pulsar J0953+0755 radio emission in the decametre wave range // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2016. – Vol. 455, Is. 1. – P. 150–157. DOI: 10.1093/mnras/stv2172
18. Мень А. В., Содин Л. Г., Шарыкин Н. К., Брук Ю. М., Мельяновский П. А., Инютин Г. А., Гончаров Н. Ю. Принцип построения и характеристики антенн радиотелескопа УТР-2 // *Антенны.* – М.: Связь, 1978. – Вып. 26. – С. 15–57.
19. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп дециметрового диапазона волн УТР-2 // *Антенны.* – М.: Связь, 1978. – Вып. 26. – С. 3–14.
20. Zakharenko V. V., Sharykin N. K., and Rudavin E. R. Modernization of commutation devices and an improvement of main parameters of the UTR-2 radio telescope // *Кинематика и физика небесных тел.* – 2005. – Т. 21, № 5-додаток. – С. 90–92.
21. Konovalenko A., Zarka P., Zakharenko V., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Stanislavsky A., Kalinichenko N., Koliadin V., Melnik V., Dorovskiy V., Shepelev V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Vasylieva I., Gridin A., Kulishenko V., Reznik A., Reznichenko A., Kvasov G., Khristenko A., Litvinenko G., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Denis L., Coffre A., Griefmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Ryabov V., Mann G., Brazhenko A., and Koshovyy V. State-of-the-art of low frequency radio astronomy, relevant antenna systems and international cooperation in Ukraine // 2015 Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT): Proc. conf. / P. L. Tokarskii ed. – Kharkiv, Ukraine. – 2015. – P. 1–5. DOI: 10.1109/ICATT.2015.7136772
22. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovskiy V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Litvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshin O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griefmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., and Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT // *Exp. Astron.* – 2016. – Vol. 42, Is. 1. – P. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
23. Ulyanov O. M., Sidorchuk M. A., Zakharenko V. V., Yerin S. N., Bubnov I. N., Skoryk A. O., Shevtsova A. I., Plakhov M. S., Mukha D. V., and Rudavin E. R. New technique of testing and calibration of the UTR-2 radio telescope // 2015 Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT): Proc. conf. / P. L. Tokarskii ed. – Kharkiv, Ukraine. – 2015. – P. 18–23. DOI: 10.1109/ICATT.2015.7136783
24. Ryabov V. B., Vavriv D. M., Zarka P., Ryabov B. P., Kozhin R., Vinogradov V. V., and Denis L. A low-noise, high-dynamic-range, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz // *Astron. Astrophys.* – 2010. – Vol. 510. – id. A16. DOI: 10.1051/0004-6361/200913335
25. Zakharenko V. V., Nikolaenko V. S., Ulyanov O. M., and Motiyenko R. A. A waveform receiver for continuous registration of fast processes in pulsar radio emission // 2007 International Kharkov Symp. on Physics and Engrg. of Millimeter and Sub-Millimeter Waves (MSMW): Proc. Symp. – Kharkiv, Ukraine. – 2007. – Vol. 2. – P. 745–747. DOI: 10.1109/MSMW.2007.4294800
26. Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Konovalenko A. A., Ulyanov O. M., Serylak M., Zarka P., Griefmeier J.-M., Cognard I., and Nikolaenko V. S. Detection of decametre-wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2013. – Vol. 431, Is. 4. – P. 3624–3641. DOI: 10.1093/mnras/stt470
27. Hankins T. H. and Rickett B. J. Pulsar signal processing. In: *Methods in Computational Physics: advances in research and applications.* Volume 14 - Radio astronomy / B. Alder, S. Fernbach, M. Rotenberg, eds. – New York: Academic Press, 1975. – P. 55–129.

28. Sidorchuk M. A., Ulyanov O. M., Shepelev V. A., Mukha D. V., Brazhenko A. I., Vashchishin R. V., and Frantzenenko A. V. Large-scale structure of the Northern sky at decametric waves // Scientific Workshop – Astrophysics with E-LOFAR. – Hamburg, Germany. – 2008. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.hs.uni-hamburg.de/DE/Ins/Lofar/lofar_workshop/poster_abstracts.html#poster27
29. Kalinichenko N. N. A search for compact decametric radio sources in supernova remnants using the interplanetary scintillation technique // *Astrophys. Space Sci.* – 2009. – Vol. 319, Is. 2. – P. 131–138. DOI: 10.1007/s10509-008-9960-y
30. Bruk Yu. M., Davies J. G., Kuz'min A. D., Lyne A. G., Malofeev V. M., Rowson B., Ustimenko B. Yu., and Shitov Yu. P. Radio-emission spectra of five pulsars in the 17-1420 MHz range // *Sov. Astron.* – 1978. – Vol. 22. – P. 588–593.
31. Izvekova V. A., Kuzmin A. D., Malofeev V. M., and Shitov Yu. P. Radio spectra of pulsars. I. Observations of flux densities at meter wavelengths and analysis of the spectra // *Astrophys. Space Sci.* – 1981. – Vol. 78, Is 1. – P. 45–72. DOI: 10.1007/BF00654022
32. Malofeev V. M., Gil J. A., Jessner A., Malov I. F., Seiradakis J. H., Sieber W., and Wielebinski R. Spectra of 45 pulsars // *Astron. Astrophys.* – 1994. – Vol. 285. – P. 201–208.
33. Rickett B. J. Amplitude-modulated noise - an empirical model for the radio radiation received from pulsars // *Astrophys. J.* – 1975. – Vol. 197. – P. 185–191. DOI: 10.1086/153501
34. Hassall T. E., Stappers B. W., Hessels J. W. T., Kramer M., Alexov A., Anderson K., Coenen T., Karastergiou A., Keane E. F., Kondratiev V. I., Lazaridis K., van Leeuwen J., Noutsos A., Serylak M., Sobey C., Verbiest J. P. W., Weltevrede P., Zagkouris K., Fender R., Wijers R. A. M. J., Bähren L., Bell M. E., Broderick J. W., Corbel S., Daw E. J., Dhillon V. S., Eisloffel J., Falcke H., Grießmeier J.-M., Jonker P., Law C., Markoff S., Miller-Jones J. C. A., Osten R., Rol E., Scaife A. M. M., Scheers B., Schellart P., Spreuw H., Swinbank J., ter Veen S., Wise M. W., Wijnands R., Wucknitz O., Zarka P., Asgekar A., Bell M. R., Bentum M. J., Bernardi G., Best P., Bonafede A., Boonstra A. J., Brentjens M., Brouw W. N., Brüggen M., Butcher H. R., Ciardi B., Garrett M. A., Gerbers M., Gunst A. W., van Haarlem M. P., Heald G., Hoeft M., Holties H., de Jong A., Koopmans L. V. E., Kuniyoshi M., Kuper G., Loose G. M., Maat P., Masters J., McKean J. P., Meulman H., Mevius M., Munk H., Noordam J. E., Orrù E., Paas H., Pandey-Pommier M., Pandey V. N., Pizzo R., Polatidis A., Reich W., Röttgering H., Sluman J., Steinmetz M., Sterks C. G. M., Tagger M., Tang Y., Tasse C., Vermeulen R., van Weeren R. J., Wijnholds S. J., and Yatawatta S. Wide-band simultaneous observations of pulsars: disentangling dispersion measure and profile variations // *Astron. Astrophys.* – 2012. – Vol. 543. – id. A66. DOI:10.1051/0004-6361/201218970
35. Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Mukha D. V., and Serezhkina A. A. Investigation of the Earth ionosphere using the radio emission of pulsars // *Baltic Astron.* – 2013. – Vol. 22, Is. 1. – P. 53–65. DOI: <https://doi.org/10.1515/astro-2017-0147>
36. Kuzmin A. D. and Losovsky B. Ya. Measurements of the scattering of pulsars radio emission. Statistical uniformity of large-scale plasma turbulence in the near Galaxy // *Astron. Astrophys. Trans.* – 2007. – Vol. 26, Is. 6. – P. 597–604. DOI: 10.1080/10556790701610282
37. Cordes J. M. and Lazio T. J. W. NE2001. I. A New Model for the Galactic Distribution of Free Electrons and its Fluctuations // *ArXiv Astrophysics e-prints*. [Электронный ресурс] 2002. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0207156>
38. Cordes J. M., Ananthakrishnan S., and Dennison B. Radio wave scattering in the galactic disk // *Nature.* – 1984. – Vol. 309, No. 5970. – P. 689–691. DOI: 10.1038/309689a0
39. Cordes J. M., Pidwerbetsky A., and Lovelace R. V. E. Refractive and diffractive scattering in the interstellar medium // *Astrophys. J.* – 1986. – Vol. 310, Is. 2. – P. 737–767. DOI: 10.1086/164728

REFERENCES

1. POPOV, M. V. and SMIRNOVA, T. V., 1982. The drift behavior of PSR 0809+74. *Sov. Astron.* vol. 26, pp. 439–442.
2. MANCHESTER, R. N., HOBBS, G. B., TEOH, A. and HOBBS, M., 2005. The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue. *Astron. J.* vol. 129, no. 4, pp. 1993–2006. DOI: 10.1086/428488
3. ATNF PULSAR CATALOG. [online]. [viewed 21 December 2016]. Available from: <http://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat/>
4. HANKINS, T. H., 1971. Microsecond Intensity Variations in the Radio Emissions from CP 0950. *Astrophys. J.* vol. 169, pp. 487–494. DOI: 10.1086/151164
5. RICKETT, B. J., 1977. Interstellar scattering and scintillation of radio waves. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* vol. 15, pp. 479–504. DOI: 10.1146/annurev.aa.15.090177.002403
6. CORDES, J. M., 1980. Pulsar timing. II – Analysis of random walk timing noise - Application to the Crab pulsar. *Astrophys. J.* vol. 237, pp. 216–226. DOI: 10.1086/157861
7. RICKETT, B. J., HANKINS, T. H. and CORDES, J. M., 1975. The radio spectrum of micropulses from pulsar PSR 0950+08. *Astrophys. J.* vol. 201, pp. 425–430. DOI: 10.1086/153904
8. SMIRNOVA, T. V., SOGLASNOV, V. A., POPOV, M. V. and NOVIKOV, A. Y., 1986. Dual-Frequency Correlation of Pulsar Micropulses. *Sov. Astron.* vol. 30, pp. 51–56.
9. KUZ'MIN, A. D., 1989. *Pulsars*. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
10. POPOV, M. V., SMIRNOVA, T. V. and SOGLASNOV, V. A., 1987. Microstructure of Pulsars PSR:0809+74 PSR:0950+08 and PSR:1133+16 in the 67-102-MHZ Range. *Sov Astron.* vol. 31, pp. 529–536.
11. CORDES, J. M., 1976. Correlation analyses of microstructure and noiselike intensity fluctuations from pulsar 2016+28. *Astrophys. J.* vol. 208, pp. 944–954. DOI: 10.1086/154683
12. ULYANOV, O. M., ZAKHARENKO, V. V., KONOVALENKO, A. A., LECACHEUX, A., ROSOLEN, K. and RUCKER, H. O., 2006. Detection of Individual Pul-

- ses from Pulsars B0809+74, B0834+06, B0943+10, B0950+08+10 and B1133+16 in the Decameter Wavelengths. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 11, no. 2, pp. 113–133 (in Russian).
13. ULYANOV, O. M., DESHPANDE, A., ZAKHARENKO, V. V., ASGEKAR, A. and SHANKAR, U., 2007. Two-Frequency Observations of Six Pulsars Using UTR-2 and GEETEE Radio Telescopes. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 12, no. 1, pp. 5–19 (in Russian).
 14. UL'YANOV, O. M., ZAKHARENKO, V. V. and BRUCK, Y. M., 2008. The parameters of pulsar subpulse emission at decameter wavelengths. *Astron. Rep.* vol. 52, is. 11, pp. 917–924. DOI: 10.1134/S1063772908110061
 15. UL'YANOV, O. M. and ZAKHARENKO, V. V., 2012. Energy of anomalously intense pulsar pulses at decameter wavelengths. *Astron. Rep.* vol. 56, is. 6, pp. 417–429. DOI: 10.1134/S1063772912060054
 16. NOVIKOV, A. YU., POPOV, M. V., SOGLASNOV, V. A., BRUK, YU. M. and USTIMENKO, B. YU., 1984. Observations of pulsar PSR 0809+74 at a frequency of 25 MHz with a time resolution of 100 microsec. *Sov. Astron.* vol. 28, pp. 199–201.
 17. ULYANOV, O. M., SKORYK, A. O., SHEVTSOVA, A. I., PLAKHOV, M. S. and ULYANOVA, O. O., 2016. Detection of the fine structure of the pulsar J0953+0755 radio emission in the decametre wave range. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 455, is. 1, pp. 150–157. DOI: 10.1093/mnras/stv2172
 18. MEGN, A. V., SODIN, L. G., SHARYKIN, N. K., BRUK, YU. M., MELIANOVSKII, P. A., INYUTIN, G. A. and GONCHAROV, N. YU., 1978. Design principles and characteristics of the antennas of the UTR-2 radio telescope. In: *Anteny*. Moscow, USSR: Svyaz' Publ. no. 26, pp. 15–57 (in Russian).
 19. BRAUDE, S. YA., MEGN, A. V. and SODIN, L. G., 1978. Decameter wave band radio telescope UTR-2. In: *Anteny*. Moscow, USSR: Svyaz' Publ. no. 26, pp. 3–14 (in Russian).
 20. ZAKHARENKO, V. V., SHARYKIN, N. K. and RUDAVIN, E. R., 2005. Modernization of commutation devices and an improvement of main parameters of the UTR-2 radio telescope. *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel. Suppl.* vol. 21, no. 5, pp. 90–92.
 21. KONOVALENKO, A., ZARKA, P., ZAKHARENKO, V., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEPIN, S., TOKARSKY, P., STANISLAVSKY, A., KALINICHENKO, N., KOLIADIN, V., MELNIK, V., DOROVSKIY, V., SHEPELEV, V., KOVAL, A., BUBNOV, I., YERIN, S., VASYLIEVA, I., GRIDIN, A., KULISHENKO, V., REZNIK, A., REZNICHENKO, A., KVASOV, G., KRISTENKO, A., LITVINENKO, G., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., DENIS, L., COFFRE, A., GRIEBMEIER, J.-M., TAGGER, M., GIRARD, J., CHARRIER, D., RYABOV, V., MANN, G., BRAZHENKO, A. and KOSHOVYY, V., 2015. State-of-the-art of low frequency radio astronomy, relevant antenna systems and international cooperation in Ukraine. In: *Proc. of 2015 Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*. Kharkiv, Ukraine. pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICATT.2015.7136772
 22. KONOVALENKO, A., SODIN, L., ZAKHARENKO, V., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEPIN, S., TOKARSKY, P., MELNIK, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., KOLIADIN, V., SHEPELEV, V., DOROVSKIY, V., RYABOV, V., KOVAL, A., BUBNOV, I., YERIN, S., GRIDIN, A., KULISHENKO, V., REZNICHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., REZNIK, A., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., KRISTENKO, A., SHEVCHENKO, V. V., SHEVCHENKO, V. A., BELOV, A., RUDAVIN, E., VASYLIEVA, I., MIROSHNICHENKO, A., VASILENKO, N., OLYAK, M., MYLOSTNA, K., SKORYK, A., SHEVTSOVA, A., PLAKHOV, M., KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., LYTVINENKO, O., SHEVCHUK, N., ZHOUK, I., BOVKUN, V., ANTONOV, A., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., BRAZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHIN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A., GRIEBMEIER, J.-M., TAGGER, M., GIRARD, J., CHARRIER, D., BRIAND, C. and MANN, G., 2016. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* vol. 42, is. 1, pp. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
 23. ULYANOV, O. M., SIDORCHUK, M. A., ZAKHARENKO, V. V., YERIN, S. N., BUBNOV, I. N., SKORYK, A. O., SHEVTSOVA, A. I., PLAKHOV, M. S., MUKHA, D. V. and RUDAVIN, E. R., 2015. New technique of testing and calibration of the UTR-2 radio telescope. In: *Proc. of 2015 Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*. Kharkiv, Ukraine. pp. 18–23. DOI: 10.1109/ICATT.2015.7136783
 24. RYABOV, V. B., VAVRIV, D. M., ZARKA, P., RYABOV, B. P., KOZHIN, R., VINOGRADOV, V. V. and DENIS, L., 2010. A low-noise, high-dynamic-range, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz. *Astron. Astrophys.* vol. 510, id. A16. DOI: 10.1051/0004-6361/200913335
 25. ZAKHARENKO, V. V., NIKOLAENKO, V. S., ULYANOV, O. M. and MOTIYENKO, R. A., 2007. A waveform receiver for continuous registration of fast processes in pulsar radio emission. *2007 International Kharkov Symp. on Physics and Engrg. of Millimeter and Sub-Millimeter Waves (MSMW) Symp. Proceedings*. Kharkov, Ukraine. vol. 2, pp. 745–747. DOI: 10.1109/MSMW.2007.4294800
 26. ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., KONOVALENKO, A. A., ULYANOV, O. M., SERYLAK, M., ZARKA, P., GRIEBMEIER, J.-M., COGNARD, I. and NIKOLAENKO, V. S., 2013. Detection of decametre-wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 431, is. 4, pp. 3624–3641. DOI: 10.1093/mnras/stt470
 27. HANKINS, T. H. and RICKETT, B. J., 1975. Pulsar signal processing. In: B. ALDER, S. FERNBACH, M. ROTENBERG, eds. *Methods in Computational Physics: advances in research and applications. Volume 14 – Radio astronomy*. New York: Academic Press, pp. 55–129.

28. SIDORCHUK, M. A., ULYANOV, O. M., SHEPELEV, V. A., MUKHA, D. V., BRAZHENKO, A. I., VASHCHISHIN, R. V. and FRANTZUSENKO, A. V., 2008. Large-scale structure of the Northern sky at decametric waves. In: *Scientific Workshop – Astrophysics with E-LOFAR*. [online]. Available from: http://www.hs.uni-hamburg.de/DE/Ins/Lofar/lofar_workshop/poster_abstracts.html#poster27
29. KALINICHENKO, N. N., 2009. A search for compact decametric radio sources in supernova remnants using the interplanetary scintillation technique. *Astrophys. Space Sci.* vol. 319, is 2, pp. 131–138. DOI: 10.1007/s10509-008-9960-y
30. BRUK, YU. M., DAVIES, J. G., KUZ'MIN, A. D., LYNE, A. G., MALOFEEV, V. M., ROWSON, B., USTIMENKO, B. YU. and SHITOV, YU. P., 1978. Radio-emission spectra of five pulsars in the 17-1420 MHz range. *Sov. Astron.* vol. 22, pp. 588–593.
31. IZVEKOVA, V. A., KUZMIN, A. D., MALOFEEV, V. M., and SHITOV, YU. P., 1981. Radio spectra of pulsars. I. Observations of flux densities at meter wavelengths and analysis of the spectra. *Astrophys. Space Sci.* vol. 78, is. 1, pp. 45–72. DOI: 10.1007/BF00654022
32. MALOFEEV, V. M., GIL, J. A., JESSNER, A., MALOV, I. F., SEIRADAKIS, J. H., SIEBER, W. and WIELEBINSKI, R., 1994. Spectra of 45 pulsars. *Astron. Astrophys.* vol. 285, pp. 201–208.
33. RICKETT, B. J., 1975. Amplitude-modulated noise – an empirical model for the radio radiation received from pulsars. *Astrophys. J.* vol. 197, pp. 185–191. DOI: 10.1086/153501
34. HASSALL, T. E., STAPPERS, B. W., HESSELS, J. W. T., KRAMER, M., ALEXOV, A., ANDERSON, K., COENEN, T., KARASTERGIU, A., KEANE, E. F., KONDRATIEV, V. I., LAZARIDIS, K., VAN LEEUWEN, J., NOUTSOS, A., SERYLAK, M., SOBEY, C., VERBIEST, J. P. W., WELTEVREDE, P., ZAGKOURIS, K., FENDER, R., WIJERS, R. A. M. J., BÄHREN, L., BELL, M. E., BROWDERICK, J. W., CORBEL, S., DAW, E. J., DHILLON, V. S., EISLÖFFEL, J., FALCKE, H., GRIEBMEIER, J.-M., JONKER, P., LAW, C., MARKOFF, S., MILLER-JONES, J. C. A., OSTEN, R., ROL, E., SCAIFE, A. M. M., SCHEERS, B., SCHELLART, P., SPREUW, H., SWINBANK, J., TER VEEN, S., WISE, M. W., WIJNANDS, R., WUCKNITZ, O., ZARKA, P., ASGEKAR, A., BELL, M. R., BENTUM, M. J., BERNARDI, G., BEST, P., BONAFEDE, A., BOONSTRA, A. J., BRENTJENS, M., BROUW, W. N., BRÜGGEN, M., BUTCHER, H. R., CIARDI, B., GARRETT, M. A., GERBERS, M., GUNST, A. W., VAN HAARLEM, M. P., HEALD, G., HOEFT, M., HOLTIES, H., DE JONG, A., KOOPMANS, L. V. E., KUNIIYOSHI, M., KUPER, G., LOOSE, G. M., MAAT, P., MASTERS, J., MCKEAN, J. P., MEULMAN, H., MEVIUS, M., MUNK, H., NOORDAM, J. E., ORRÚ, E., PAAS, H., PANDEY-POMMIER, M., PANDEY, V. N., PIZZO, R., POLATIDIS, A., REICH, W., RÖTGERING, H., SLUMAN, J., STEINMETZ, M., STERKS, C. G. M., TAGGER, M., TANG, Y., TASSE, C., VERMEULEN, R., VAN WEEREN, R. J., WIJNHOLDS, S. J. and YATAWATTA, S., 2012. Wide-band simultaneous observations of pulsars: disentangling dispersion measure and profile variations. *Astron. Astrophys.* vol. 543, id. A66. DOI:10.1051/0004-6361/201218970
35. ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I., MUKHA, D. V. and SEREDKINA, A. A., 2013. Investigation of the Earth ionosphere using the radio emission of pulsars. *Baltic Astron.* vol. 22, is. 1, pp. 53–65. DOI: <https://doi.org/10.1515/astro-2017-0147>
36. KUZMIN, A. D. and LOSOVSKY, B. YA., 2007. Measurements of the scattering of pulsars radio emission. Statistical uniformity of large-scale plasma turbulence in the near Galaxy. *Astron. Astrophys. Trans.* vol. 26, is. 6, pp. 597–604. DOI: 10.1080/10556790701610282
37. CORDES, J. M. and LAZIO, T. J. W., 2002. NE2001. I. A New Model for the Galactic Distribution of Free Electrons and its Fluctuations. *ArXiv Astrophysics e-prints* [online]. Available from: <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0207156>
38. CORDES, J. M., ANANTHAKRISHNAN, S. and DENNISON, B., 1984. Radio wave scattering in the galactic disk. *Nature.* vol. 309, no. 5970, pp. 689–691. DOI: 10.1038/309689a0
39. CORDES, J. M., PIDWERBETSKY, A. and LOVELACE, R. V. E., 1986. Refractive and diffractive scattering in the interstellar medium. *Astrophys. J.* vol. 310, is. 2, pp. 737–767. DOI: 10.1086/164728

A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, V. V. Zakharenko,
A. I. Shevtsova, I. Y. Vasylieva, M. S. Plakhov,
and I. P. Kravtsov

Institute of Radio Astronomy, National Academy
of Sciences of Ukraine,
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

FINE STRUCTURE OF ANOMALOUSLY INTENSE PULSES OF PSR J0814+7429 RADIO EMISSION IN THE DECAMETER RANGE

Purpose: The fine structure of the anomalously intense pulses of PSR J0814+7429 (B0809+74) has been studied. The pulsar radio emission fine structure is investigated to determine its parameters in the lowest part of spectrum available for ground-based observations.

Design/methodology/approach: The scattering measure in the interstellar plasma have been estimated using the spectral and correlation analyses of pulsar data recorded by the UTR-2 radio telescope.

Results: Two characteristic time scales of the anomalously intense pulses fine structure of the PSR J0814+7429 radio emission have been found. The strongest pulses of this pulsar in the decameter range can have a duration of about 2–3 ms. These pulses are emitted in short series. In some cases, they are emitted over the low-intensity plateau consisting of the “long” sub-pulse component.

Conclusions: The narrowest correlation scale of pulsar J0814+7429 radio emission corresponds to the doubled scattering time constant of the interstellar medium impulse response. Broader scale of the fine structure of its radio emission can be explained by the radiation of a short series of narrow pulses or relatively broad pulses inside this pulsar magnetosphere.

Key words: deconvolution, pulse, magnetosphere, scattering measure, plasma, pulsar

*A. O. Skorik, O. M. Ulyanov, V. V. Zaharenko,
A. I. Shevcova, Ya. Yu. Vasyleva, M. S. Plakhov,
I. P. Kravtsov*

Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна

**ТОНКА СТРУКТУРА АНОМАЛЬНО ІНТЕНСИВНИХ
ІМПУЛЬСІВ ПУЛЬСАРА J0814+7429
У ДЕКАМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ**

Предмет і мета роботи: Вивчається тонка структура аномально інтенсивних імпульсів пульсара J0814+7429 (B0809+74). Дослідження тонкої структури радіовипромінювання цього пульсара виконуються з метою визначення її параметрів у найнижчому частотному діапазоні спектра, що є доступним для спостережень з поверхні Землі.

Методи і методологія: За допомогою спектрального та кореляційного аналізу даних, зареєстрованих на радіотелескопі

УТР-2, отримуються оцінки міри розсіяння у міжзоряній плазмі.

Результати: Виявлено два характерних часових масштаби тонкої структури аномально інтенсивних імпульсів пульсара J0814+7429. Встановлено, що найінтенсивніші імпульси, які генерує пульсар J0814+7429 у декаметровому діапазоні, можуть мати тривалість близько $2 \div 3$ мс. Ці імпульси випромінюються короткими серіями. В деяких випадках вони випромінюються на тлі “довгої” субімпульсної компоненти, що утворює низькоінтенсивне плато.

Висновок: Найкоротший часовий масштаб кореляції радіовипромінювання пульсара J0814+7429 відповідає подвійній сталій часу розсіяння імпульсної характеристики міжзоряного середовища. Довший масштаб тонкої структури його радіовипромінювання може пояснюватись випромінюванням коротких серій вузьких імпульсів або відносно широких імпульсів, що генеруються всередині магнітосфери цього пульсара.

Ключові слова: деконволюція, імпульс, магнітосфера, міра розсіяння, плазма, пульсар

Статья поступила в редакцию 27.12.2016