

РАДІОАСТРОНОМІЯ І АСТРОФІЗИКА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra23.02.079>

УДК 524.354.4, 52-17

PACS numbers: 97.60.Gb,
98.38.Am

В. В. ЗАХАРЕНКО, И. П. КРАВЦОВ, Я. Ю. ВАСИЛЬЕВА,
А. А. КОНОВАЛЕНКО, О. М. УЛЬЯНОВ, В. Л. КОЛЯДИН
Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Мистецтв, 4, г. Харьков, 61002 Украина
E-mail: zakhar@rian.kharkov.ua

ПОИСК НИЗКОИНТЕНСИВНЫХ ПОМЕХ И РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИЕНТНЫХ СИГНАЛОВ В ДАННЫХ ДЕКАМЕТРОВОГО ОБЗОРА СЕВЕРНОГО НЕБА

Предмет и цель работы: Самой сложной задачей исследования транзистентных сигналов является доказательство их космического происхождения. В декаметровом диапазоне не существует ни одного радиотелескопа, который по эффективной площади (а значит, и по мгновенной чувствительности) хотя бы приближался к параметрам УТР-2. Это исключает возможность подтверждения космического происхождения низкоинтенсивных сигналов на каком-либо другом независимом радиотелескопе данного диапазона. Поэтому важность проведения всевозможных тестов для проверки возможного помехового происхождения сигналов-кандидатов нельзя переоценить. В работе проводится анализ распределений характеристик обнаруженных транзистентных сигналов и поиск возможных низкоинтенсивных помех в данных декаметрового обзора пульсаров и источников транзистентного излучения северного неба.

Методы и методология: Обработка данных обзора с целью поиска симметричных по времени запаздывания помех из-за мерцаний на неоднородностях ионосферной плазмы, имеющих частотно-временные зависимости, которые похожи на дисперсионное запаздывание в межзвездной среде.

Результаты: Сравнение распределений таких характеристик, как сигнал/шум и мера дисперсии, показывает существенное отличие протектированных в проводимом обзоре сигналов от гипотетических помех, которые имели бы такое же значение смещения нижних частот рабочего диапазона по отношению к верхним, но вместо запаздывания характеризовались бы опережением. Эти различия подтверждают гипотезу о том, что обнаруженные в проводимом обзоре транзистентные сигналы порождаются источниками космического радиоизлучения.

Заключение: Расширение конуса радиоизлучения различных типов нейтронных звезд, большое угловое и временное рассеяние в декаметровом диапазоне может объяснить детектирование большого количества одиночных сигналов с уникальными значениями мер дисперсии, т. е. ряда источников транзистентного излучения.

Ключевые слова: обзор, одиночный импульс, помеха, мера дисперсии, мерцания, декаметровый диапазон

1. Введение

Одной из характерных черт современной наблюдательной астрономии является чрезвычайно возросшее количество наблюдательных данных. Яркий тому пример – проводимый на радиотелескопе УТР-2 декаметровый обзор северного неба с целью поиска пульсаров и источников транзистентного излучения (в дальнейшем Обзор) [1–7]. Необходимость практически полной автоматизации процессов поиска объектов по определенным признакам (включая и создание самообучающихся алгоритмов – machine learning и deep learning)

требует очень тщательно подходить к первоначальному выбору критериев автоматического поиска и предусматривать значительное число тестов, отсеивающих ложноположительные результаты. В самой полной мере это касается как раз изучения транзистентных сигналов (в дальнейшем транзистентов), которые невозможно наблюдать многократно, а, следовательно, критерии отбора сигналов должны быть заранее выбраны очень жесткими. Примером первоначально неудачного подхода могут служить результаты детектирования сигналов в радиообсерватории Парк, часть которых затем была выделена в особую группу – перитоны [8]. Дальнейшее их изучение показало, что с очень большой вероят-

© В. В. Захаренко, И. П. Кравцов, Я. Ю. Васильева,
А. А. Коноваленко, О. М. Ульянов, В. Л. Колядин, 2018

ностью это были сигналы от микроволновой печи в моменты выключения магнетрона, спектр которых был близок к спектру, который имеют короткие широкополосные сигналы нейтронных звезд из-за дисперсии в межзвездной среде (МЗС) с частотной зависимостью f^{-2} . Установить, являлись ли принятые сигналы помехами или были порождены космическими источниками, стало возможным только с помощью анализа всех доступных характеристик сигнала (включая локальное время прихода) и учета направления боковых лепестков радиотелескопа.

Поэтому основной задачей после записи и предварительной обработки (очистки от мощных помех и устранения дисперсионной задержки – дедиспергирования) всех данных Обзора является отсеивание низкоинтенсивных помех, которые могут проявиться при накоплении сигналов по частоте. Нужно сказать, что не только важным, но и практически единственным имеющимся в распоряжении исследователей критерием является дисперсионное запаздывание в МЗС космических широкополосных коротких сигналов (длительностью единицы–десятки миллисекунд). Увеличение времени рассеяния к низким частотам (которое было обнаружено у так называемого “Logimer burst”) может быть надежным критерием только в том случае, когда сигнал превышает шум в парциальной полосе (например 4 МГц) более чем в 8–10 раз (точка с интенсивностью $1/e \approx 0.3679$ от максимума должна заметно превышать шум). Такое превышение сигнала над шумом в декаметровом диапазоне даже на крупнейшем радиотелескопе мира для транзиентных радиоастрономических сигналов получить не удается.

Не имея возможности опереться на дополнительные критерии доказательства космического происхождения излучения, мы имеем возможность исключить все известные источники предполагаемых низкоинтенсивных помех, частотные зависимости которых близки к зависимостям транзиентных сигналов. Самым важным, с нашей точки зрения, явился тест, в котором был проведен поиск сигналов, имеющих временную задержку не f^{-2} , а $-f^{-2}$, т. е. когда низкие частоты опережают высокие с такой же абсолютной временной задержкой. Ценность этого теста состоит в двух важных аспектах. Во-первых, часто

встречающаяся на декаметровых волнах модуляция интенсивности континуальных источников излучения ионосферными мерцаниями имеет достаточно широкий спектр и похожий частотный наклон (рис. 1). Априори нельзя исключить того, что значительная часть принятых сигналов является короткими по времени мерцаниями космического радиоизлучения на ионосферных неоднородностях. И, что очень важно, запаздывание и опережение нижних частот по отношению к верхним встречается при мерцаниях с приблизительно одинаковой вероятностью. Поэтому проверка наличия сигналов с задержкой между частотами, пропорциональной $-f^{-2}$, предположительно позволит выявить долю сигналов, порожденных мерцаниями (и с зависимостью f^{-2}). И, во-вторых, если использовать инвертированные по времени данные наблюдений (рис. 2), а не создавать программу дедиспергирования под “обратную” меру дисперсии DM , то можно проверить, не продуцирует ли имеющаяся программа обработки какие-либо артефакты.

Надо сказать, что по затрачиваемому времени счета этот тест дольше обычного конвейера обработки данных, применяемого в Обзоре. Но характерные черты сигналов с “прямой” и “обратной” мерами дисперсии можно получить уже при анализе части данных. Именно результатам этого теста и выводам из них посвящена настоящая статья.

Во втором разделе описаны особенности отбора “кандидатов” (предположительно транзиентов космического происхождения) в Обзоре и влияние на них таких параметров, как ширина импульса и его широкополосность. В третьем разделе приведены результаты сравнения примерно 85 % данных Обзора с “прямой” мерой дисперсии и 10 %, обработанных с “обратной” мерой дисперсии. В четвертом разделе проведено обобщение полученных результатов, сделаны выводы о предполагаемых источниках радиоизлучения и намечены перспективные направления дальнейших исследований.

2. Критерии отбора данных

Как уже было упомянуто выше, конвейерная обработка данных Обзора служит для очистки от мощных радиопомех [4], устранения дисперсионной задержки с определенным шагом в диапазо-

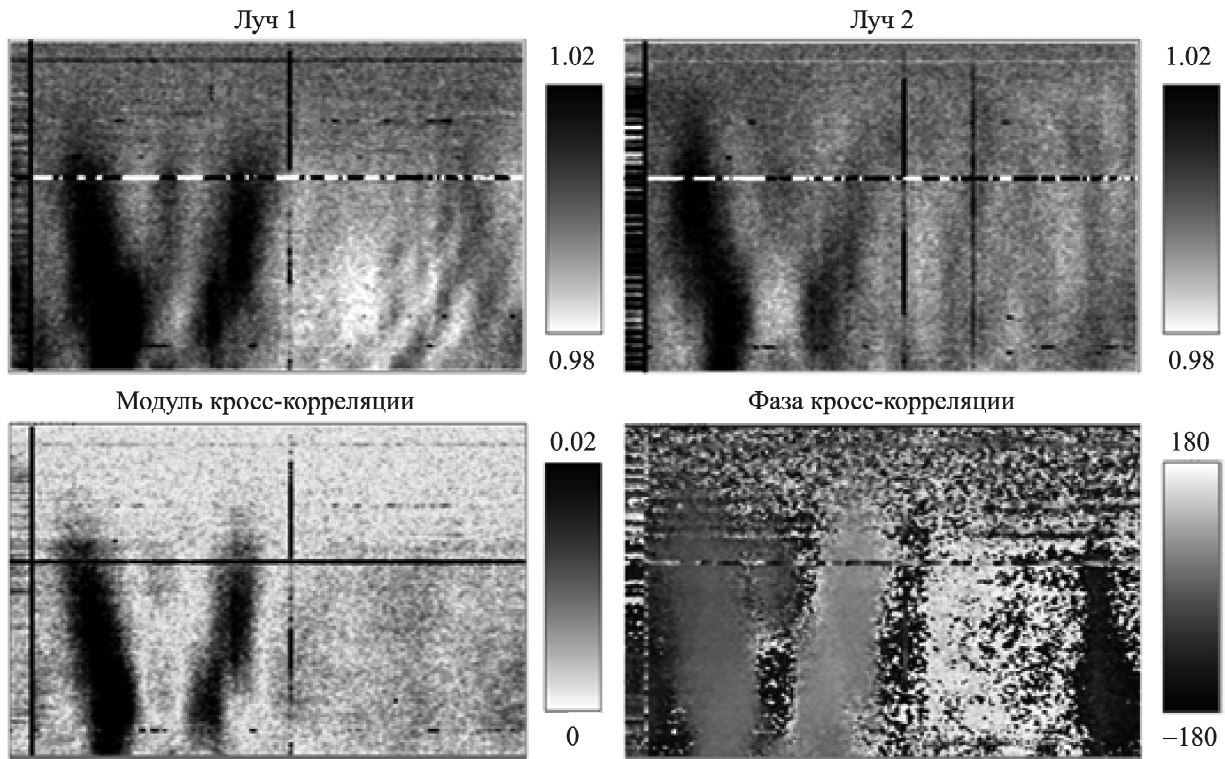


Рис. 1. Примеры широкополосных мерцаний с различным частотно-временным наклоном. Длительность кадра составляет 120 с

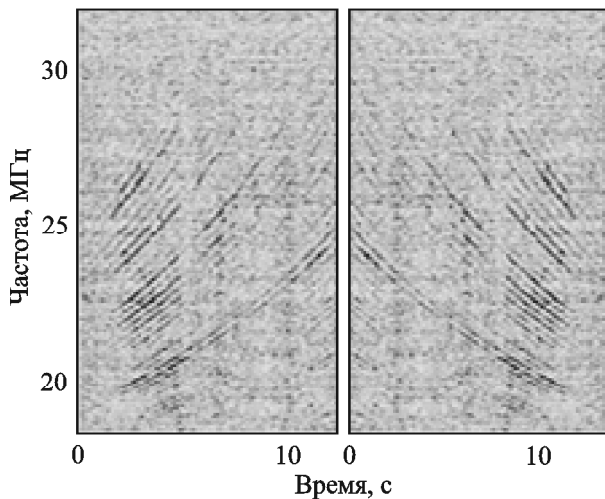


Рис. 2. Сигналы пульсара B0809+74 инвертированы во времени для анализа с “обратной” дисперсионной зависимостью (слева). Справа для сравнения приведены исходные данные

не $0 \div 30$ пк/см³, а также последующего суммирования данных по частотам. При анализе индивидуальных событий возможности редукции данных ограничены. Их исходный объем составляет

около ста терабайт. Для слепого поиска транзитных сигналов во всем диапазоне DM с шагом 0.01 пк/см³ суммирование 4096 частотных каналов с разным временным сдвигом между ними требуется проводить 3000 раз (пояснение дано ниже). Поэтому после обработки количество данных уменьшается всего на $\approx 27\%$.

Как было упомянуто в [9], ширина импульсов для известных пульсаров сопоставима (или больше) с временной разрешающей способностью в Обзоре (8 мс). Модельные расчеты потери чувствительности при неточном совпадении истинной меры дисперсии и пробной (с которой проводится операция дедиспергирования) в предположении, что импульс имеет прямоугольную форму, можно провести по формуле [10]:

$$\frac{F_{\delta DM}}{F} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \zeta^{-1} \text{erf}(\zeta). \quad (1)$$

Здесь $F_{\delta DM}$ – поток, рассчитанный с ошибкой по мере дисперсии δDM ; F – истинный поток; $\text{erf}(\dots)$ – функция ошибок; ζ – безразмерная функция,

$$\zeta = 6.91 \cdot 10^{-3} \delta DM \frac{\Delta f}{Wf}, \quad (2)$$

где Δf – полоса частот (16 МГц), W – длительность сигнала (100 мс), f – центральная частота (0.024 ГГц). При этих параметрах и допустимом ухудшении соотношения (1) не больше, чем на 5 %, значение δDM , полученное из (1) и (2) должно быть меньше 0.005 пк/см³. То есть при “слепом” поиске сигналов пульсаров и транзиентов для получения результатов при незначительных потерях в соотношении сигнал/шум желательно иметь шаг пробной меры дисперсии не более 0.01 пк/см³. При уменьшении W (что справедливо для реального сигнала) значение δDM должно прямопропорционально уменьшаться, что следует из формулы $W = \Delta t = \frac{10^{16}}{2.4210331} DM (f_{\min}^{-2} - f_{\max}^{-2})$.

На рис. 3 приведен пример дедиспергирования со значением $\delta DM = 0.01$ пк/см³.

По оси абсцисс дано время в секундах (нижняя шкала) и в отсчетах с $\Delta f = 8$ мс (верхняя шкала). Если предположить, что ширина импульса W равна 0.1 с (примерно 12 отсчетов), то очевидно, что значительная часть импульса даст вклад при накоплении по частоте, и проигрыш $(1 - F_{\delta DM}/F)$ составит упомянутые 5 %. Если же W равна, например 0.032 с (4 отсчета), то, в зависимости от того, какая часть в спектре будет считаться центральной (или где будет максимальная плотность потока транзиента), поте-

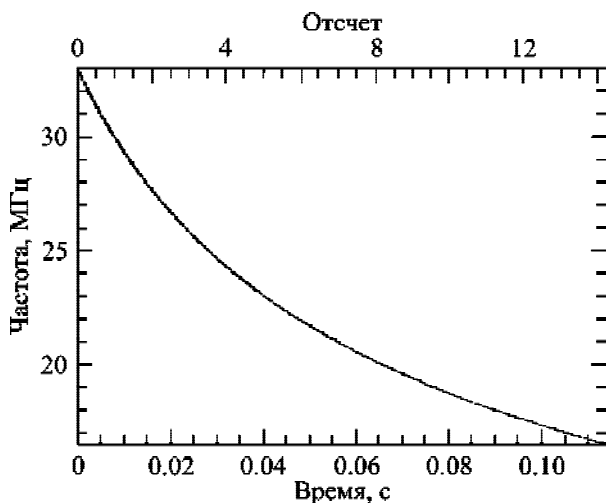


Рис. 3. Пример дедиспергирования со значением $\delta DM = 0.01$ пк/см³

ри сигнала при интегрировании будут значительно существеннее (в 3 ÷ 5 раз больше). Это значит, что для коротких сигналов первоначальное определение пробной DM требует уточнения для получения максимального превышения сигнала над шумом. Следует также отметить, что увеличение шага с 0.01 пк/см³ до, например, 0.002 пк/см³ приведет к увеличению времени счета примерно в 5 раз, поскольку операция дедиспергирования является самой затратной по использованному компьютерному времени. Кроме того, в 5 раз увеличатся затраты на выбор транзиентных сигналов исследователем во время визуального анализа полученных результатов. Поэтому ясно, что шаг по мере дисперсии был выбран также из соображений минимизации времени обработки.

Поскольку первичная очистка от радиопомех направлена только на устранение сигналов с нулевой (широкополосных коротких сигналов) и “бесконечной” (узкополосных постоянно существующих сигналов) мерой дисперсии, то очистка не касается сколько-нибудь диспергированных или каким-то образом модулированных по частоте сигналов. Так как типы радиопомех очень разнообразны, конвейер первичной обработки детектирует от нескольких единиц до нескольких сотен тысяч “событий” за сеанс наблюдений длительностью от 10 до 15 ч. Следует остановиться на выборе порога 5.5σ , где σ – среднеквадратическое отклонение. При наличии только шумовых сигналов с нормальным распределением этого значения было бы вполне достаточно. Однако трудно предположить, что помехи искусственного происхождения будут подчиняться нормальному закону хотя бы потому, что под широкополосными станциями выделены определенные частоты. Как показывает опыт, количество детектируемых событий существенно выше, того, что ожидается для белого шума, и оператору приходится визуально отсеивать подавляющее большинство сигналов. То есть для реальной ситуации порог оказывается заниженным. Но, учитывая то, что при выбранном шаге по мере дисперсии мы зачастую не попадаем в максимум соотношения сигнал/шум для широкополосных сигналов космического происхождения, приходится использовать выбранный порог детектирова-

ния 5.5σ . Далее будет показано, что еще одним ценным аспектом применения теста с “обратной” мерой дисперсии будет возможность переопределения порога детектирования.

Обычно все помехи концентрируются в области нулевой меры дисперсии. Они имеют шанс проявиться при значениях DM более $2 \div 3$ пк/см³, но только в том случае, если закон частотно-временной зависимости очень точно соответствует закону дисперсии (f^{-2}). Отличие показателя степени от 2 только на один процент (0.02) приводит к тому, что широкополосный сигнал (например $20 \div 25$ МГц) при дедиспергировании

“вываливается” из окна шириной ± 80 мс какой-то своей частью (“подсвеченная” центральная часть спектрограммы импульса на рис. 4, правый верхний угол). В этом отношении широкополосный телескоп УТР-2 дает кардинальный выигрыш при отсеивании помех с частотной зависимостью, отличной от закона дисперсии, по сравнению с узкополосными системами (см., например, [11]).

Для удаления радиопомех используются визуальный контроль и программа полуавтоматического определения параметров транзитных сигналов (выбор участка остается за оператором).

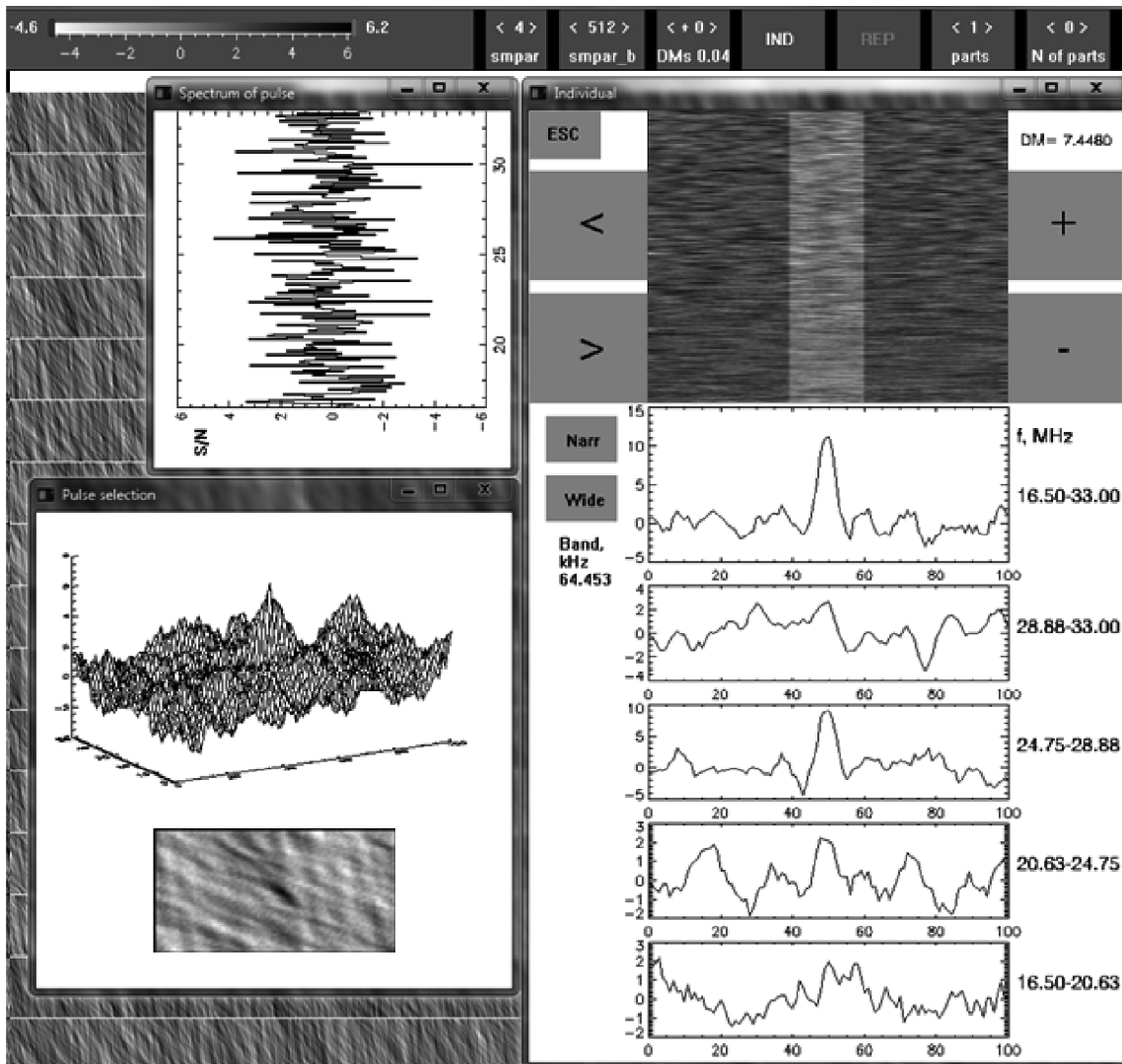


Рис. 4. Пример анализа данных сигналов-кандидатов: слева сверху – усреднение по времени, слева внизу – зависимость “мера дисперсии – время” в трехмерном и двухмерном виде, справа сверху – дедиспергированная спектрограмма импульса и справа внизу – усреднение по частоте во всей полосе и в четырех смежных полосах. Мера дисперсии сигнала, при которой достигается соотношение сигнал/шум около 12, равна 7.448 пк/см³ (при первичном анализе соотношение сигнал/шум ≈ 7)

ром, но максимум соотношения сигнал/шум в интервале по времени 0.5 с и по мере дисперсии 0.2 пк/см³ определяется программой). Исследователь отмечает на двумерной зависимости “мера дисперсии – время” одиночные события, которые не относятся к каким-либо структурам, т. к. обычно радиопомехи проявляются в виде наклонных “лучей” повышенной интенсивности. Кроме того, игнорируются одиночные отсчеты с соотношением сигнал/шум менее 6σ.

Результатом является файл данных, который включает:

- положение центра луча в момент прихода транзитного сигнала,
 - время прихода этого сигнала,
- (по этим двум параметрам вычисляются координаты J2000 с учетом звездного времени на момент фиксации транзитного сигнала),
- пробную меру дисперсии, при которой существует максимальное соотношение сигнал/шум и

– максимальное значение соотношения сигнал/шум.

Далее данные, в которых обнаружен транзит, анализируются специальной программой, показывающей одновременно различные характеристики сигнала. Пример анализа приведен на рис. 4. В левом нижнем углу в трехмерном и двумерном виде приведена зависимость “мера дисперсии – время”. В центре каждой панели можно легко выделить повышение интенсивности. На двумерной панели это повышение имеет характерную форму (овал с наклоном от левого верхнего угла к правому нижнему). Поскольку на этой панели представлены 50 шагов по мере дисперсии (по вертикали) и 100 по времени (по горизонтали), видно, что этот овал включает несколько десятков точек. Наглядное объяснение возникновения подобного максимума интенсивности приведено на рис. 5. Этот факт будет важен при сравнении сигналов-кандидатов с радиопомехами.

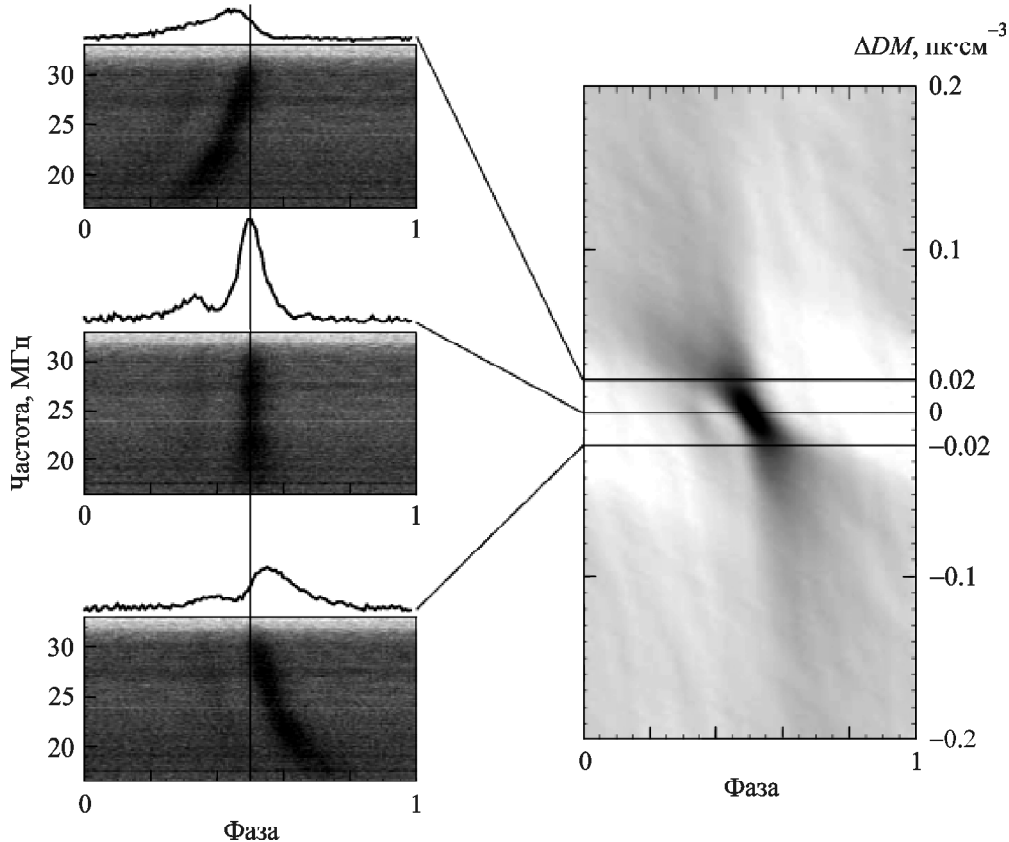


Рис. 5. Максимальный отклик на зависимости “мера дисперсии – время” возникает при совпадении пробной DM , с которой проводится дедиспергирование, и истинной DM сигнала (для пульсаров – после проведения накопления ряда импульсов – на оси абсцисс эту роль выполняет фаза периода). При пробной DM меньше истинной, максимум накопленного по частоте сигнала смещается к более позднему времени, при пробной DM больше истинной – к более раннему [9]

Наиболее важный вопрос – не являются ли сигналы, подобные представленным на рис. 4, типичными не только для импульсов пульсаров (примеры будут приведены ниже), но и для источников континуального излучения, интенсивность которого сильно модулируется эффектами мерцаний (см. рис. 2)?

Несмотря на то, что при обработке данных Обзора используется фильтр верхних частот с частотой среза 0.25 Гц, можно предположить, что наиболее интенсивные и короткие повышения интенсивности континуальных источников могут проходить сквозь фильтр и отображаться в виде, похожем на транзитные сигналы. Кроме того, можно предположить, что временная задержка (которая для транзитных сигналов пропорциональна f^{-2}) для континуальных сигналов, подвергшихся воздействию мерцаний, может иметь и обратный знак ($-f^{-2}$). Можно предположить также, что программа конвейерной обработки ошибочно идентифицирует как широкополосные транзитные сигналы случайно совпадающие наборы узкополосных радиопомех.

Для проверки этих предположений был проведен анализ записей в первую очередь при тех положениях луча антенны, которые имели максимальный зенитный угол ($z = 50^\circ \div 60^\circ$, т. е. склонение $\delta = -10^\circ \div 0^\circ$). При этих значениях должны максимально проявиться эффекты мерцаний и детектирования искусственных радиопомех.

Была разработана программа инвертирования спектрограмм по времени, что позволило представить гипотетические сигналы с опережением по низким частотам (с задержкой, пропорциональной $-f^{-2}$) как подобные транзитным сигналам космического происхождения с задержкой между нижними и верхними частотами, пропорциональной $+f^{-2}$. Программы следующих этапов обработки не будут “знать”, какой сигнал приходит на их вход, и будут обрабатывать одинаково как реальные, так и гипотетические сигналы.

На настоящий момент проведена обработка примерно 95 % данных Обзора, а в тесте с “обратной” мерой дисперсии обработано около 10 %. Важнейшее отличие заключается в том, что среди сигналов, продетектированных с “обратной” мерой дисперсии, не найдено пока ни одного, который удовлетворял бы всем требованиям, предъявляемым к сигналам-кандидатам:

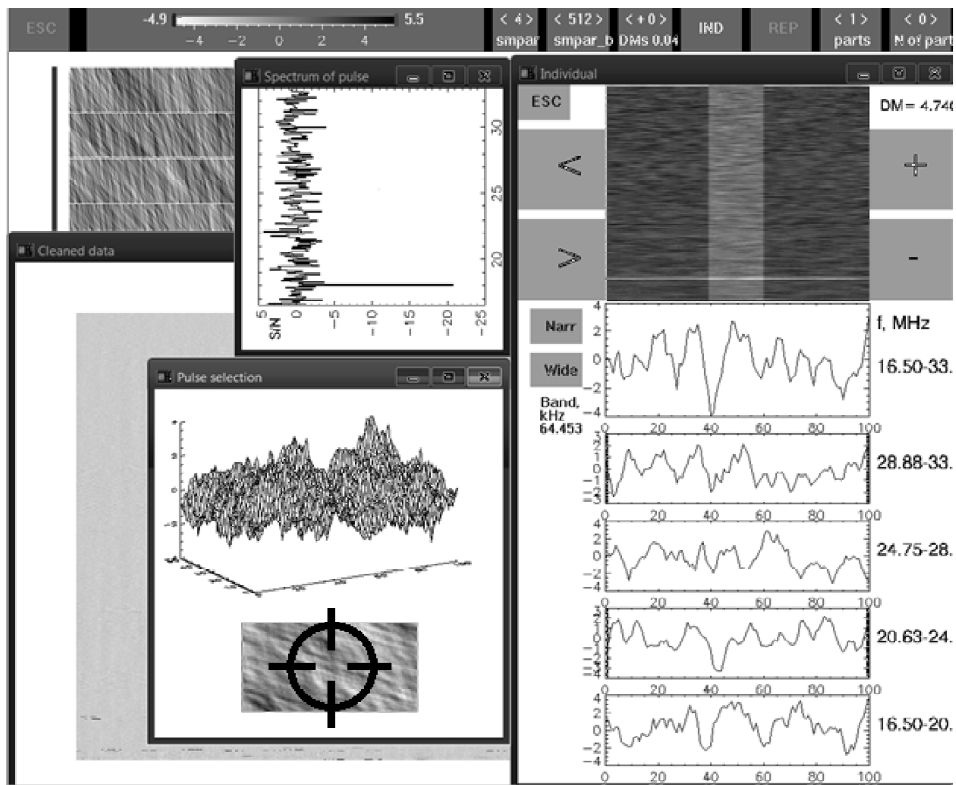
наличие достаточной широкополосности, присутствие выраженного максимума как в суммарной полосе анализа, так и в субполосах отдельно, и т. д. Сравнение приведено на рис. 6.

3. Результаты

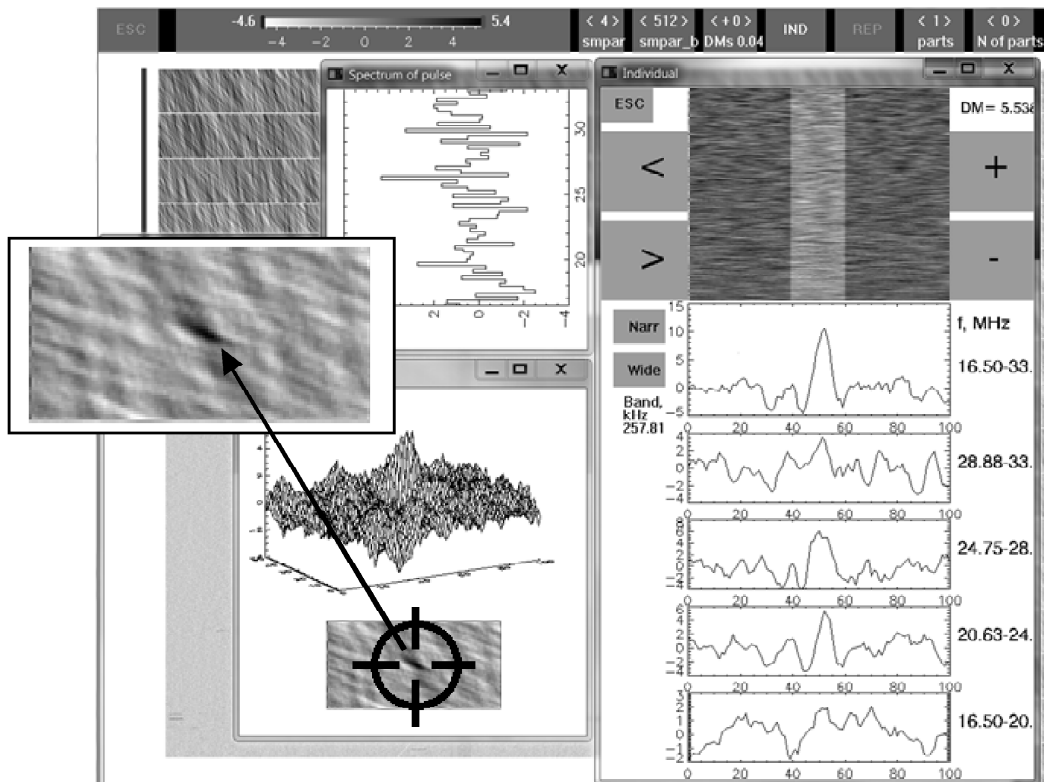
Поскольку на конец 2017 г. выделено около тысячи сигналов-кандидатов (при 410 “полосках” – записях лучей радиотелескопа УТР-2 с длительностью сеанса от 10 до 15 ч), средняя частота детектирования составляет примерно одно событие за 5 ч наблюдений. Длительность проверенных на настоящий момент данных с “обратной” мерой дисперсии составляет около 500 ч. И поскольку ни одного сигнала с “обратной” мерой дисперсии, соответствующего всем критериям, не выявлено, можно утверждать, что вероятность детектирования сигналов-кандидатов в этом случае на два порядка ниже. Несмотря на то, что полноценных кандидатов в записях с “обратной” мерой дисперсии не выявлено, мы провели сравнение между сигналами с “прямой” мерой дисперсии и теми сигналами с “обратной” мерой дисперсии, которые превысили выбранный порог обнаружения. Очень важно, что это дает возможность выбора нового порога (например 8σ), отсекающего все сигналы, продетектированные с “обратной” мерой дисперсии.

На рис. 6, а приведен пример детектирования сигнала с “обратной” DM . На правой части рис. 6, а видно, что в суммарной полосе существует слабый максимум, но в субполосах соответствующего максимума не наблюдается. Для наглядности на двумерной зависимости “мера дисперсии – время” на рис. 6, а, б обозначены центры.

На рис. 6, а, который был получен при обработке инверсной спектрограммы и дал максимум соотношения сигнал/шум (≈ 7) при мере дисперсии -4.560 пк/см³, в центре зависимости “мера дисперсии – время” не видно признака существования наклонного овала, показанного на рис. 5. То есть программа отбора кандидатов зафиксировала превышение порога в нескольких точках (не менее двух), но они не являются частью относительно большого количества точек характерного овала. А на рис. 6, б этот наклонный овал хорошо виден (показан на выноске). Что это означает с точки зрения спектра сигнала? Из рис. 5 хорошо видно, что непрерывный овал получен из достаточно продолжительного широ-



а



б

Рис. 6. Различия в детектировании помехи (а) с $DM = -4.74$ пк/см³ и транзиента (б) с $DM = 5.538 - 4.74$ пк/см³. В центре двумерной зависимости “мера дисперсии – время” на рис. 6, б виден наклонный овал

кополосного сигнала. Представим, что сигнал имеет максимум только на некоторых частотах, разнесенных достаточно далеко в спектре (например на частотах 20, 25 и 30 МГц на рис. 5, левые панели), а длительность его составляет один отсчет. Тогда при малейшем изменении пробной меры дисперсии просуммированный по частоте сигнал “развалится”, т. е. значение соотношения сигнал/шум станет близким к 1, что и происходит с сигналами помех.

Очевидно, что при первичной обработке в случае широкополосного слабого сигнала, если пробная DM неточно совпадает с истинной DM импульса, то, подстраивая DM с шагом 0.002 пк/см³ при обработке “коротким” конвейером, можно значительно улучшить соотношение сигнал/шум (см. рис. 3 и 5). Для случайных максимумов интенсивности или случайно совпавших нескольких узкополосных помех такого эффекта не наблюдается.

На рис. 7 отдельно выделены двумерные зависимости “мера дисперсии – время” (± 25 шагов по DM со значением шага 0.004 пк/см³ и ± 50 шагов по времени с интервалом 8 мс) для сигналов, протестированных с “прямой” и “обратной” мерами дисперсии. На рисунке явно заметно характерное различие между сигналами-кандидатами (слева) и сигналами, найденными при анализе с дисперсионной зависимостью, пропорциональной $-f^{-2}$. Характерный овал для сигналов-кандидатов виден в случае каждого сигнала с “прямой” мерой дисперсии. Небольшие сдвиги от центра связаны с тем, что для максимизации соотношения сигнал/шум были подобраны более точная пробная мера дисперсии и временной отсчет, при которых существует максимум сигнала.

Для сигналов, найденных для “обратной” меры дисперсии ($-f^{-2}$), такого широкого максимума с наклонным овалом не наблюдается. Как показано на рис. 6, *a*, помехи и шумы могут создать максимум сигнала, превышающий порог обнаружения 5.5σ . Но дальнейшие попытки увеличить соотношение сигнал/шум при анализе “коротким” конвейером (при варьировании DM в пределах 0.01 пк/см³) результата практически не улучшают. Это становится очевидным при сравнении распределений соотношения сигнал/шум для сигналов с дисперсионным запаздыванием f^{-2} и $-f^{-2}$. На рис. 8 показаны (в логарифмических координатах)

соотношения сигнал/шум для протестированных сигналов с “прямой” (рис. 8, *a*) и “обратной” (рис. 8, *b*) мерами дисперсии.

Различие очевидно не только в значениях соотношения сигнал/шум, но и в распределении данных на гистограмме. Количество сигналов N с “обратной” мерой дисперсии равно 100, только один из них превышает значение соотношения сигнал/шум, равное $7 (7.11\sigma)$. Для сигналов-кандидатов соотношение сигнал/шум достигает 25, причем в распределении присутствует степенной “хвост”, который характерен для распределения вероятности появления аномально интенсивных и гигантских импульсов пульсара в зависимости от их энергии.

Что касается количества зарегистрированных сигналов-кандидатов и тех, которые превысили уровень детектирования, полученный при данном тестировании, то из более 1000 сигналов тех, которые превосходят значение соотношения сигнал/шум, равное 8, оказывается около трети (380).

Следующая характеристика – распределение количества кандидатов по мере дисперсии. Автоматические и полуавтоматические процедуры отбора позволили отсеять большое количество мощных радиопомех, расположенных вблизи нулевых мер дисперсии. Интервал мер дисперсии от 2 до 30 пк/см³ примерно соответствует расстояниям $0.1 \div 1.5$ пк в направлении на центр Галактики и несколько большим расстояниям в других направлениях (рис. 9).

На рис. 10 приведено распределение, полученное в предыдущей нашей работе [3] для 550 сигналов-кандидатов, протестированных на начало 2017 г. в текущем Обзоре. На рисунке можно сравнить характерного вида распределение транзитов по DM (*a*) со смоделированным на основании параметров известных пульсаров распределением (*b*) для пульсаров, которые предположительно можно будет наблюдать в проекте SKA (Square Kilometer Array) [12]. Вид гистограмм очень схож. Он объясняется тем, что вначале удаление от наблюдателя приводит к увеличению области, где располагаются источники (пульсары или транзиты). Но затем светимость слабых источников делает их необнаружимыми для радиотелескопа. И, самое главное, из-за увеличения рассеяния импульсного радиоизлучения в МЗС с ростом расстояния до его источника импульсы уменьшаются по амплитуде, “разма-

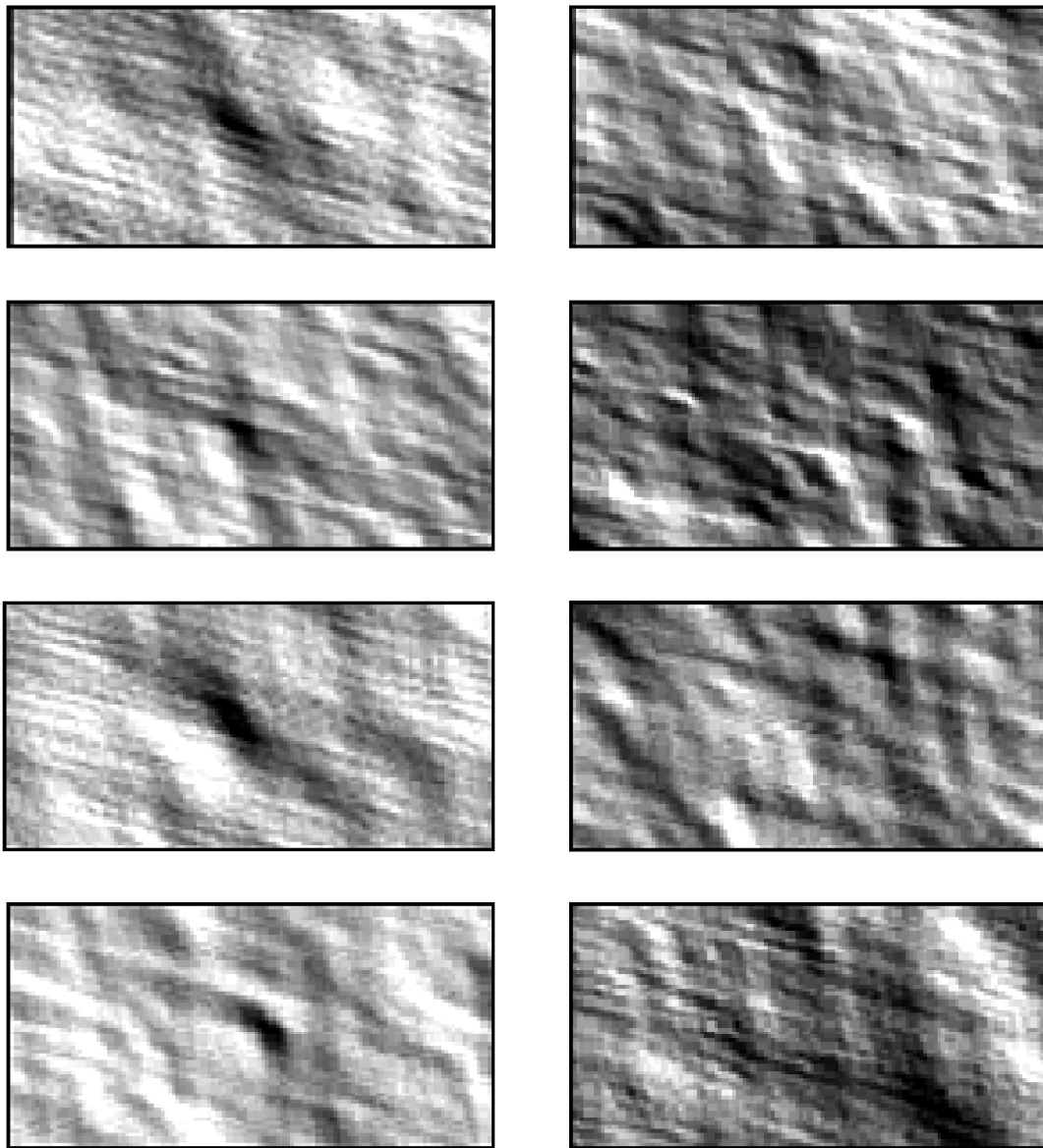


Рис. 7. Двумерные зависимости “мера дисперсии – время” (± 0.1 пк/см³ по DM и ± 400 мс по времени): сигналы-кандидаты, найденные в Обзоре, (слева); зависимости для “обратной” меры дисперсии, дисперсионное запаздывание пропорционально $-f^{-2}$, (справа). Для сигналов-кандидатов характерно наличие наклонного овала повышенной интенсивности в центре двумерной зависимости. Для сигналов, найденных при инвертировании спектрограмм, такого широкого максимума не наблюдается

зываются” по времени, и последовательно идущие импульсы становятся неразличимыми. Эти два фактора приводят к тому, что за максимумом гистограммы следует падение числа обнаруживаемых импульсных источников излучения до минимума. С понижением частоты из-за роста примерно в 4-й степени постоянной времени рассеяния максимум на диаграмме должен появляться при все меньших значениях DM , что

соответствует поведению гистограмм на приведенном рисунке.

Этот рисунок важен для понимания того, какой вид распределения свидетельствует о детектировании источников космического излучения. Сравним результаты, полученные для сигналов с “прямой” и “обратной” мерами дисперсии. На рис. 11 приведено распределение примерно 1000 сигналов-кандидатов (*a*), найденных при об-

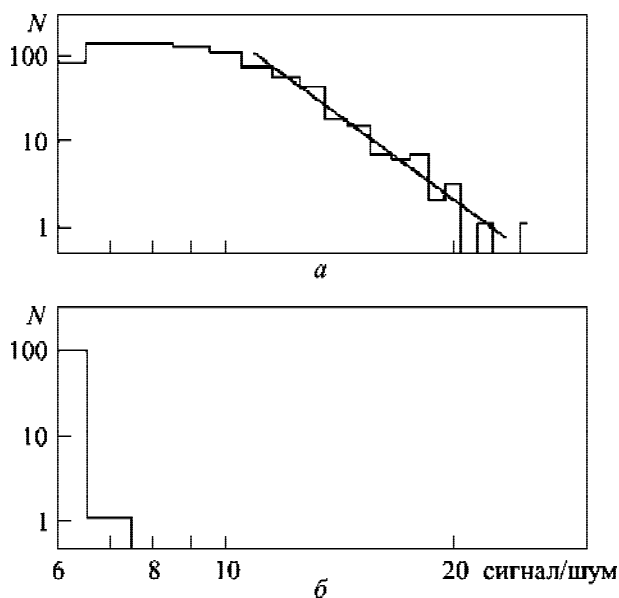


Рис. 8. Соотношение сигнал/шум (в логарифмических координатах) для протектированных сигналов с “прямой” (а) и “обратной” (б) мерами дисперсии

работке данных Обзора (“прямая” DM). Как видно, более полная выборка (1000 событий, рис. 11, а) имеет практически такой же характерный вид, как и предыдущая (550 событий, рис. 10, а). На рис. 11, б показано распределение сигналов, протектированных с “обратной” мерой дисперсии (100 событий). Оно имеет совершенно другую форму. Максимум находится на малых значениях меры дисперсии (3 пк/см^3 – 15 % от общего количества событий). Сигналов же с DM в интервале $10 \div 30 \text{ пк/см}^3$ всего около 25 % от общего числа. Поскольку максимум гистограммы тяготеет к малым мерам дисперсии, поведение гистограммы гораздо легче объяснить наличием широкополосных помех с частотной зависимостью близкой к $-f^{-2}$, которые длятся всего несколько десятков секунд.

Дополнительно следует сказать, что некоторые сигналы имеют достаточно близкие значения мер дисперсии. Если они исходят из одной и

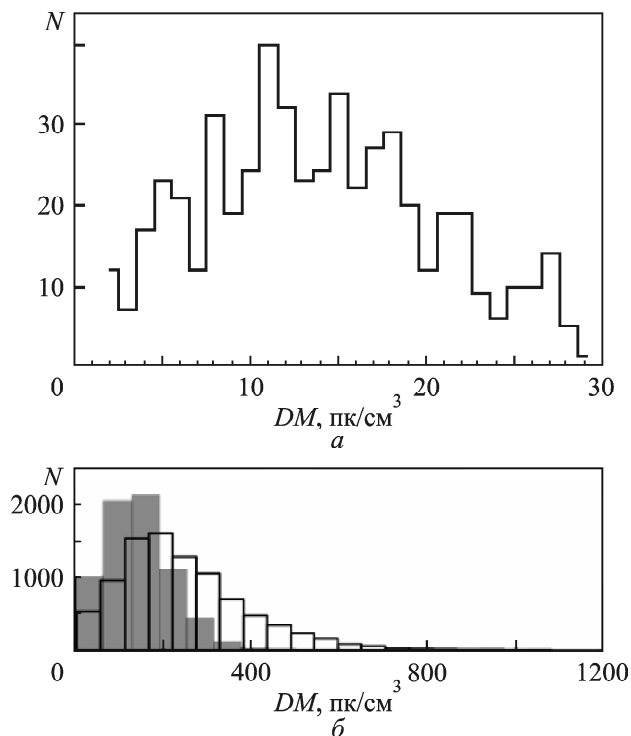


Рис. 10. Сравнение характерного вида гистограмм распределения обнаруживаемых источников импульсного радиоизлучения в данном Обзоре (а) и прогнозируемого обнаружения в проекте SKA (б) [3] в зависимости от меры дисперсии

той же области неба, то следует проверить, не порождаются ли эти сигналы источниками повторяющегося излучения, такими как нормальные радиопульсары или вращающиеся радиотранзиенты.

И еще одно распределение говорит в пользу детектирования именно космических сигналов. После определения галактических координат рассчитывалось распределение кандидатов по галактической широте b (рис. 12, а). Несмотря на то, что нейтронные звезды концентрируются в области центральной части диска Галактики, на таких небольших расстояниях (сотни парсек) этот эффект заметен слабо. Распределение близких пульсаров это подтверждает (рис. 12, б).



Рис. 9. Схематически представлена область Галактики, доступная для наблюдений в настоящем Обзоре

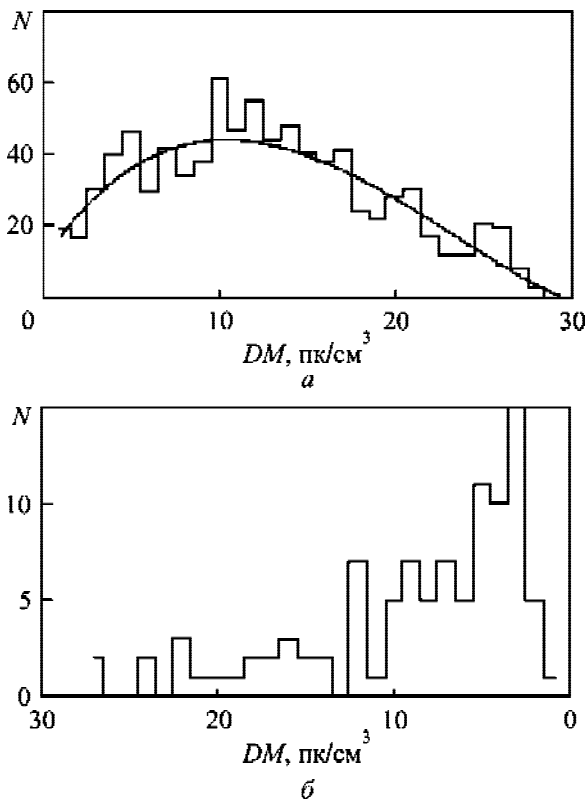


Рис. 11. Гистограммы распределений по мере дисперсии примерно 1000 сигналов-кандидатов, протектированных в Обзоре (а) и 100 сигналов с “обратными” мерами дисперсии (б)

Тем не менее очевидно, что полученное распределение достаточно симметрично относительно диска Галактики и более половины найденных событий располагаются в интервале $-30^\circ \div 30^\circ$. Кроме того, следует отметить, что детектированию импульсных сигналов в направлении центра и антицентра Галактики при малых b сильно мешает заметное увеличение яркостной температуры галактического фона (см. рис. 6 в [9]). Этим может объясняться отсутствие увеличения количества транзиентов при малых b (рис. 12, а).

4. Выводы и перспективы

Столь большое число выявленных транзиентных сигналов, значения мер дисперсий которых надежно отличимы от значений мер дисперсий известных пульсаров и друг от друга, требует объяснения. Мы считаем, что оно может быть следующим.

Поскольку конус излучения пульсаров расширяется примерно в 2 раза [9] даже в случае близ-

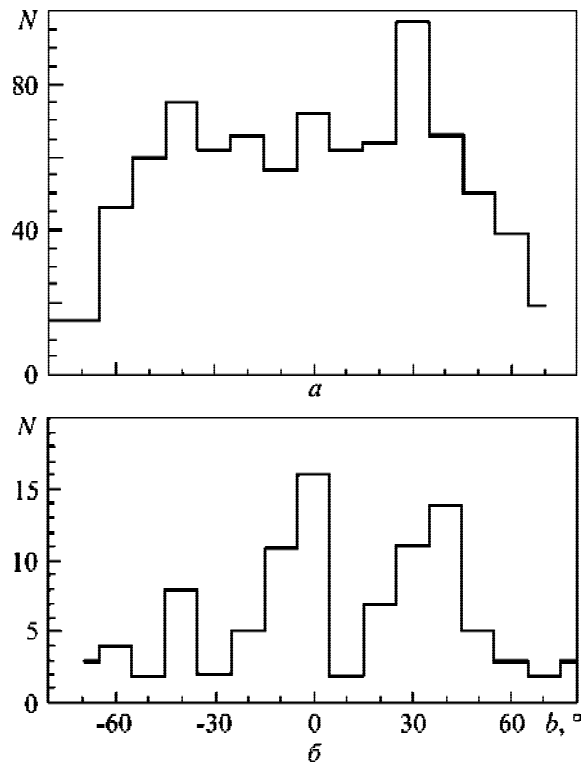


Рис. 12. Гистограммы распределений по галактической широте найденных в Обзоре сигналов-кандидатов (а) и известных пульсаров с $DM < 30$ пк/см^3 и периодом > 0.2 с (б) [13]

ких частот (100 и 25 МГц), количество доступных для наблюдения пульсаров растет примерно в той же пропорции. Для более высоких частот Кордесом [14] получена зависимость $f^{-0.25}$, т. е. при понижении частоты с 1400 МГц (где открыто большинство пульсаров) до 100 МГц средний профиль также расширяется почти в 2 раза. Кроме того, с понижением частоты эффекты распространения приводят к дополнительному расширению конуса излучения. Зависимость его расширения от частоты может быть как прямопропорциональной, так и иметь степень больше единицы. Угловое рассеяние однозначно связано с временным, которое имеет зависимость примерно f^{-4} . Однако интенсивность излучения при больших углах также падает. Поэтому определение эффективного дополнительного расширения конуса излучения за счет рассеяния пока представляется затруднительным.

Вторым фактором, который также сильно влияет на увеличение количества ожидаемых сигналов, является детектирование импульсов от вращающихся транзиентов (RRAT – rotating radio

transient). По оценкам, их количество в 2–3 раза превышает количество пульсаров [15]. Их конус излучения, по-видимому, также испытывает расширение к низким частотам. Только этих двух факторов (расширение конуса излучения и учет RRATs) достаточно, чтобы объяснить количество транзиентных сигналов, продетектированных в нашем Обзоре с соотношением сигнал/шум более 8 (~ 400 событий).

Третьим фактором может являться близкое расстояние до наблюдателя. Имеются противоречивые данные о спорадическом излучении одиночных радиотихих рентгеновских нейтронных звезд (XDINS) [16]. Их количество также считается значительным (практически таким же, как и число “нормальных” радиопульсаров). Вполне возможно, что радиоизлучения близких XDINS, также как и других близких нейтронных звезд, достаточно для их обнаружения в низкочастотном радиодиапазоне.

В-четвертых, существует некоторое количество пульсаров, которые имеют крутой (порядка -3) спектральный индекс и, соответственно, уменьшение плотности потока на высоких частотах (например PSR B0943+10). Такие источники также могут быть необнаружимы на высоких частотах, но при этом могут вносить свой вклад в увеличение количества транзиентных сигналов в декаметровом диапазоне.

В-пятых, необходимо включить в число претендентов на детектирование миллисекундные пульсары с гигантскими импульсами. Из-за рассеяния в МЗС короткие гигантские импульсы расширяются и достигают характерных длительностей, которых достаточно для обнаружения в нашем Обзоре, а отсутствие их повторения с частотой “обычных” импульсов (десятки и сотни герц) позволяет легко выделить импульсную компоненту на фоне галактического шума.

Шестым фактором, вносящим вклад в увеличение числа детектируемых транзиентов, может являться комбинация некоторых предыдущих, а именно: аномально-интенсивные либо гигантские импульсы близких слабых пульсаров.

Кроме того, стоит отметить, что в число зарегистрированных кандидатов могут входить также сигналы от источников неизвестной природы как земного (помехи), так и космического происхождения.

В дальнейшем мы собираемся проверить, не являются ли очень близкие по мере дисперсии сигналы проявлением одних и тех же источников излучения. Для этого необходимо разработать алгоритмы сопоставления параметров импульсов, которые будут подтверждать или опровергать предположение о том, что сигналы с близкой мерой дисперсии, обнаруженные в разные дни, порождаются источниками повторяющегося излучения (пульсарами или RRAT). Именно поэтому поиск повторяющегося излучения в данных декаметрового обзора пульсаров и транзиентов является следующим этапом наших исследований и одним из самых перспективных направлений изучения транзиентных сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаренко В. В. Спорадическое излучение радиоастрономических источников и его исследование в декаметровом диапазоне. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2011. Т. 16, № 2. С. 121–134.
2. Zakharenko V. V., Kravtsov I. P., Vasylieva I. Y., Mykhailova S. S., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Skoryk A. O., Zarka P., and Konovalenko O. O. Decameter pulsars and transients survey of the northern sky. Status, first results, multiparametric pipeline for candidate selection. *Odessa Astronomical publications*. 2015. Vol. 28, Is. 2. P. 252–255. DOI: 10.18524/1810-4215.2015.28.71047
3. Захаренко В. В., Кравцов И. П., Васильева Я. Ю. Декаметровый обзор северного неба с целью поиска пульсаров и источников транзиентного излучения. Параметры индивидуальных импульсов. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. Т. 22, № 1. С. 31–44. DOI: 10.15407/rpra22.01.031
4. Vasylieva I. Y., Zakharenko V. V., Zarka P., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., and Seredkina A. A. Data processing pipeline for decameter pulsar/transient survey. *Odessa Astronomical publications*. 2013. Vol. 26, Is. 2. P. 159–161.
5. Vasylieva I. Y., Zakharenko V. V., Konovalenko A. A., Zarka P., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., and Skoryk A. O. Decameter Pulsar/Transient Survey of Northern Sky. First results. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2014. Т. 19, № 3. С. 197–205. DOI: 10.15407/rpra19.03.197
6. Vasylieva I. Y. (2015). Pulsars and transients survey, and exoplanet search at low-frequencies with the UTR-2 radio telescope: methods and first results. *Phd Thesis ed. Observatoire de Paris*. URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01246634>
7. Kravtsov I. P., Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Mykhailova S. S., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., and Skoryk A. O. Parameters of the transient signals detected in the decameter survey of the Northern sky. *Odessa Astronomical publications*. 2016. Vol. 29. P. 179–183. DOI: 10.18524/1810-4215.2016.29.85210
8. Petroff E., Keane E. F., Barr E. D., Reynolds J. E., Sarkisian J., Edwards P. G., Stevens J., Brem C., Jameson A., Burke-Spolaor S., Johnston S., Bhat N. D. R., Chandra P.,

- Kudale S., and Bhandari S. Identifying the source of perytons at the Parkes radio telescope. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2015. Vol. 451, Is. 4. P. 3933–3940. DOI: 10.1093/mnras/stv1242
9. Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Konovalenko A. A., Ulyanov O. M., Serylak M., Zarka P., Griessmeier 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
 10. Cordes J. M. and McLaughlin M. A. Searches for fast radio transients. *Astrophys. J.* 2003. Vol. 596, Is. 2. P. 1142–1154. DOI: 10.1086/378231
 11. Maan Yogesh. Discovery of Low DM Fast Radio Transients: Geminga Pulsar Caught in the Act. *Astrophys. J.* 2015. Vol. 815, Is. 2. id. 126. DOI: 10.1088/0004-637X/815/2/126
 12. Keane E. F., Bhattacharyya B., Kramer M., Stappers B. W., Bates S. D., Burgay M., Chatterjee S., Champion D. J., Eatough R. P., Hessels J. W. T., Janssen G., Lee K. J., van Leeuwen J., Margueron J., Oertel M., Possenti A., Ransom S., Theureau G., and Torne P. A Cosmic Census of Radio Pulsars with the SKA. *Proceedings of the Conference “Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14)”* (June 9-13, 2014. Giardini Naxos). Giardini Naxos, Italy, 2014. id. PoS (AASKA14)040.
 13. Manchester R. N., Hobbs G. B., Teoh A., and Hobbs M. The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue. *Astron. J.* 2005. Vol. 129, Is. 4. P. 1993–2006. DOI: 10.1086/428488
 14. Cordes J. M. Observational limits on the location of pulsar emission regions. *Astrophys. J. Part 1.* 1978. Vol. 222. P. 1006–1011. DOI: 10.1086/156218
 15. Keane E. F. and Kramer M. On the birthrates of Galactic neutron stars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2008. Vol. 391, Is. 4. P. 2009–2016. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2008.14045.x
 16. Malofeev V. M., Malov O. I., and Teplykh D. A. Radio emission from AXP and XDINS. *Astrophys. Space Sci.* 2007. Vol. 308, Is. 1–4. P. 211–216. DOI 10.1007/s10509-007-9341-y
 4. VASYLIEVA, I. Y., ZAKHARENKO, V. V., ZARKA, P., ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I. and SEREDKINA, A. A., 2013. Data processing pipeline for decameter pulsar/transient survey. *Odessa Astronomical publications.* vol. 26, is. 2, pp. 159–161.
 5. VASYLIEVA, I. Y., ZAKHARENKO, V. V., KONOVALENKO, A. A., ZARKA, P., ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I. and SKORYK, A. O., 2014. Decameter Pulsar/Transient Survey of Northern Sky. First Results. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 19, no. 3, pp. 197–205. DOI: 10.15407/rpra19.03.197
 6. VASYLIEVA, I. Y., 2015. *Pulsars and transients survey, and exoplanet search at low-frequencies with the UTR-2 radio telescope: methods and first results* [online]. Phd Thesis ed. Observatoire de Paris [viewed 19 April 2018]. Available from: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01246634>.
 7. KRAVTSOV, I. P., ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., MYKHAILOVA, S. S., ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I. and SKORYK, A. O., 2016. Parameters of the transient signals detected in the decameter survey of the northern sky. *Odessa Astronomical publications.* vol. 29, pp. 179–183. DOI: 10.18524/1810-4215.2016.29.85210
 8. PETROFF, E., KEANE, E. F., BARR, E. D., REYNOLDS, J. E., SARKISSIAN, J., EDWARDS, P. G., STEVENS, J., BREM, C., JAMESON, A., BURKE-SPOLAOR, S., JOHNSTON, S., BHAT, N. D. R., CHANDRA, P., KUDALE, S. and BHANDARI, S., 2015. Identifying the source of perytons at the Parkes radio telescope. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 451, is. 4, pp. 3933–3940. DOI: 10.1093/mnras/stv1242
 9. ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., KONOVALENKO, A. A., ULYANOV, O. M., SERYLAK, M., ZARKA, P., GRIESSMEIER, 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
 10. CORDES, J. M. and MCLAUGHLIN, M. A., 2003. Searches for fast radio transients. *Astrophys. J.* vol. 596, is. 2. P. 1142–1154. DOI: 10.1086/378231
 11. MAAN YOGESH, 2015. Discovery of Low DM Fast Radio Transients: Geminga Pulsar Caught in the Act. *Astrophys. J.* vol. 815, is. 2, id. 126. DOI: 10.1088/0004-637X/815/2/126
 12. KEANE, E., BHATTACHARYYA, B., KRAMER, M., STAPPERS, B., W., BATES S. D., BURGAY, M., CHATTERJEE, S., CHAMPION, D. J., EATOUGH, R. P., HESSELS, J. W. T., JANSSEN, G., LEE, K. J., VAN LEEUWEN, J., MARGUERON, J., OERTEL, M., POSSENTI, A., RANSOM, S., THEUREAU, G. and TORNE, P., 2014. A Cosmic Census of Radio Pulsars with the SKA. In: *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14): Proc. Conf.* Giardini Naxos, Italy, 9-13 June 2014, id. PoS(AASKA14)040.
 13. MANCHESTER, R. N., HOBBS, G. B., TEOH, A. and HOBBS, M., 2005. The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue. *Astron. J.* vol. 129, is. 4, pp. 1993–2006. DOI: 10.1086/428488
 14. CORDES, J. M., 1978. Observational limits on the location of pulsar emission regions. *Astrophys. J. Part 1.* vol. 222, pp. 1006–1011. DOI: 10.1086/156218

REFERENCES

15. KEANE, E. F. and KRAMER, M., 2008. On the birth-rates of Galactic neutron stars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 391, is. 4, pp. 2009–2016. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2008.14045.x
16. MALOFEEV, V. M., MALOV, O. I. and TEPLYKH, D. A., 2007. Radio emission from AXP and XDINS. *Astrophys. Space Sci.* vol. 308, is. 1–4, pp. 211–216. DOI 10.1007/s10509-007-9341-y

*V. V. Zakharenko, I. P. Kravtsov, I. Y. Vasylieva,
A. A. Konovalenko, O. M. Ulyanov, and V. L. Kolyadin*

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

SEARCH FOR LOW-INTENSITY INTERFERENCE AND DISTRIBUTIONS OF TRANSIENT SIGNALS' CHARACTERISTICS IN THE DATA OF DECAMETER SURVEY OF NORTHERN SKY

Purpose: The most challenging problem of transient signal research is to prove their cosmic origin. There is no radio telescope at decameter wavelengths, which has an effective area (i.e. instantaneous sensitivity) at least close to the UTR-2 radio telescope parameters. This fact excludes the possibility of confirming the cosmic origin of detected low-intensity signals at some other independent radio telescope of this frequency range. Therefore, it is impossible to overestimate the importance of carrying out all possible kinds of tests to check the probable interference origin of candidate signals. In this work we analyze the distributions of detected transient signals parameters and search for possible low-intensity interference in the decameter pulsars and transient sources survey of the northern sky observational data.

Design/methodology/approach: Search for interference caused by ionospheric plasma-related scintillations, with a time-frequency response symmetrical to signals with dispersion delay induced by interstellar medium.

Findings: Distributions of signal-to-noise ratios and dispersion measures appear to be very different for transient signals detected in the survey and the hypothetical interference with the same absolute value of shift in arrival time between a lower and a higher frequency, but its opposite sign. This supports the hypothesis of the transient signals detected in the survey being generated by cosmic radio sources.

Conclusions: Broadening of radio emission cone of various types of neutron stars along with high angular and temporal scattering at decameter wavelengths could explain the large number of individual signals at unique dispersion measures, and, hence, a large number of transient emission sources.

Key words: survey, single pulse, radio frequency interference, dispersion measure, scintillations, decameter wavelengths

*В. В. Захаренко, І. П. Кравцов, Я. Ю. Васильєва,
О. О. Коноваленко, О. М. Ульянов, В. Л. Колядін*

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

ПОШУК НИЗЬКОІНТЕНСИВНИХ ЗАВАД І РОЗПОДІЛІВ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗІЄНТНИХ СИГНАЛІВ У ДАНИХ ДЕКАМЕТРОВОГО ОГЛЯДУ ПІВНІЧНОГО НЕБА

Предмет і мета роботи: Найскладнішою задачею у дослідженні транзистентних сигналів є доведення їх космічного походження. В декаметровому діапазоні не існує жодного радіотелескопу, який за ефективною площею (а отже, і за миттєвою чутливістю) хоча б наближався до параметрів УТР-2. Це виключає можливість підтвердження космічного походження низькоінтенсивних сигналів на будь-якому іншому незалежному радіотелескопі даного діапазону. Тому важливість виконання різноманітних тестів для перевірки можливого завадового походження сигналів-кандидатів неможливо переоцінити. В роботі аналізуються розподіли характеристик виявлених транзистентних сигналів і пошук можливих низькоінтенсивних завад у даних декаметрового огляду пульсарів і джерел транзистентного випромінювання північного неба.

Методи і методологія: Обробка даних огляду з метою пошуку симетричних за часом запізнювання завад через мерехтіння на неоднорідностях іоносферної плазми, що мають частотно-часові залежності, схожі на дисперсійне запізнювання в міжзоряному середовищі.

Результати: Порівняння розподілів таких характеристик, як сигнал/шум і міра дисперсії, показує суттєву відмінність продетектованих у виконуваному огляді сигналів від гіпотетичних завад, які мали б таке ж значення зміщення нижніх частот робочого діапазону відносно верхніх, але замість запізнювання характеризувались би випередженнями. Ці відмінності підтверджують гіпотезу про те, що виявлені у виконуваному огляді транзистентні сигнали породжуються джерелами космічного радіовипромінювання.

Висновок: Розширення конуса радіовипромінювання різних типів нейтронних зір, велике кутове і часове розсіювання в декаметровому діапазоні може пояснити детектування великої кількості одиночних сигналів із унікальними значеннями мір дисперсії, тобто ряду джерел транзистентного випромінювання.

Ключові слова: огляд, одиночний імпульс, завада, міра дисперсії, мерехтіння, декаметровий діапазон

Стаття постуила в редакцію 19.04.2018