

РАДИОАСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

УДК 523.164

PACS numbers: 95.55.Jz,
95.30.-k, 95.55.-n

А. А. КОНОВАЛЕНКО¹, С. Н. ЕРИН¹, И. Н. БУБНОВ¹,
П. Л. ТОКАРСКИЙ¹, В. В. ЗАХАРЕНКО¹, О. М. УЛЬЯНОВ¹,
М. А. СИДОРЧУК¹, С. В. СТЕПКИН¹, А. А. ГРИДИН¹,
Г. В. КВАСОВ¹, В. Л. КОЛЯДИН¹, В. Н. МЕЛЬНИК¹,
В. В. ДОРОВСКИЙ¹, Н. Н. КАЛИНИЧЕНКО¹, Г. В. ЛИТВИНЕНКО¹,
Ф. ЗАРКА^{2,3,4,5}, Л. ДЕНИ³, Ж. ЖИРАР⁶, Х. О. РУКЕР^{7,8},
М. ПАНЧЕНКО⁷, А. А. СТАНИСЛАВСКИЙ¹, А. Д. ХРИСТЕНКО¹,
Д. В. МУХА¹, А. М. РЕЗНИЧЕНКО¹, В. М. ЛИСАЧЕНКО¹,
В. В. БОРЦОВ¹, А. И. БРАЖЕНКО⁹, Я. Ю. ВАСИЛЬЕВА¹,
А. А. СКОРИК¹, А. И. ШЕВЦОВА¹, К. Ю. МИЛОСТНАЯ¹

¹ Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Искусств, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: akonov@ian.kharkov.ua

² Лаборатория космических исследований и астрофизического приборостроения,
Парижская обсерватория, Мёдонский филиал,
пл. Жюль Жансена 5, F-92195, Мёдон, Франция

³ Научное сообщество Нансе, Радиоастрономическая обсерватория Нансе,
Сумское шоссе, F-18 330, Нансе, Франция

⁴ Парижская обсерватория,
Обсерваторский проспект, 61, F-75014, Париж, Франция

⁵ Национальный центр научных исследований,
ул. Мишель-Анж, 3, 75794, Париж, Франция

⁶ Комиссия по атомной энергии и альтернативным источникам энергии,
астрофизике, приборостроению, моделированию, Сакле,
Орм де Меризьёр, здание 709, 91191 Жиф-сюр-Иветт, Франция

⁷ Институт космических исследований Австрийской академии наук,
Шмидльштрассе, 6, г. Грац, 8042, Австрия

⁸ Комиссия по астрономии, Австрийская академия наук,
Шмидльштрассе, 6, г. Грац, 8042, Австрия

⁹ Полтавская гравиметрическая обсерватория Института геофизики
им. С. И. Субботина НАН Украины,
ул. Мясоедова, 27/29, г. Полтава, 36014, Украина

АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАЛОРАЗМЕРНЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Предмет и цель работы: *определение и теоретическое обоснование круга астрофизических задач, которые могут быть эффективно решены с помощью малоразмерных радиотелескопов.*

Методы и методология: *На основании теоретического анализа и научных результатов, полученных на низкочастотных радиотелескопах УТР-2 и УРАН, рассчитаны необходимые параметры наблюдений и конфигураций набора малораз-*

© А. А. Коноваленко, С. Н. Ерин, И. Н. Бубнов, П. Л. Токарский, В. В. Захаренко, О. М. Ульянов, М. А. Сидорчук, С. В. Степкин, А. А. Гридин, Г. В. Квасов, В. Л. Колядин, В. Н. Мельник, В. В. Доровский, Н. Н. Калинин, Г. В. Литвиненко, Ф. Зарка, Л. Дени, Ж. Жирар, Х. О. Рукер, М. Панченко, А. А. Станиславский, А. Д. Христенко, Д. В. Муха, А. М. Резниченко, В. М. Лисаченко, В. В. Борцов, А. И. Браженко, Я. Ю. Васильева, А. А. Скорик, А. И. Шевцова, К. Ю. Милостная, 2016

мерных радиоастрономических антенн, являющихся частью строящегося в настоящее время Гигантского украинского радиотелескопа.

Результаты: Доказано, что круг задач, которые эффективно могут решать малоразмерные радиотелескопы на низких частотах, очень широк – от исследований Солнца до поиска космологических эффектов, связанных с линией нейтрального водорода в ранней Вселенной для больших красных смещений. Рассчитаны параметры наблюдений (длительность, временное и частотное разрешение), а также указаны необходимые конфигурации антенн и режимы (интерферометрический или аддитивный), которые требуются для решения каждой конкретной задачи.

Заключение: Показано, что на этапе строительства гигантского радиотелескопа и постепенного ввода в строй его новых секций может быть решен целый ряд важных астрофизических задач. По мере добавления все новых и новых секций будут отрабатываться методика наблюдений и совершенствоваться методы обработки данных.

Ключевые слова: астрофизика, декаметровое и метровое радиоизлучение, малоразмерный радиотелескоп

1. Введение

В настоящее время активно развивается мировая наземная низкочастотная радиоастрономия (декаметровый и метровый диапазоны волн, частоты $\sim 10 \div 300$ МГц). В Голландии, Франции, Германии, Великобритании, Швеции, Польше, Ирландии создается и уже используется антенная система нового поколения LOFAR (Low Frequency Array) [1] диапазона $(10)30 \div 80$ МГц и $110 \div 240$ МГц. Система должна обеспечить высокие чувствительность (десятки миллиджанских) и угловое разрешение (десятки угловых секунд), многофункциональность, большое поле зрения, возможность картографирования. Система LWA (Long Wavelength Array) [2], создаваемая в США, в настоящий момент состоит из 256 элементов для диапазона $20 \div 80$ МГц. Помимо большого собственного научного значения, эти системы являются предшественниками будущего гигантского радиотелескопа SKA (Square Kilometer Array) диапазона $50 \div 2000$ МГц.

Вместе с тем крупнейший в мире радиотелескоп декаметровых волн УТР-2 (Украинский Т-образный радиотелескоп второй модификации, работающий в диапазоне $8 \div 32$ МГц) [3, 4] и созданная на его основе система радиоинтерферометров со сверхдлинными базами УРАН (Украинский радиоинтерферометр Академии наук) [5] по-прежнему остаются незаменимыми и наиболее эффективными инструментами на самых низких частотах, доступных наземной радиоастрономии.

Радиотелескопы УТР-2 и УРАН, дающие основной объем данных на декаметровых волнах, позволили сделать ряд важных астрофизических открытий и доказали высокую астрофизическую значимость низкочастотной радиоастрономии, предоставляющую информацию, недоступную другим методам астрофизики [6–8].

В последние годы в Национальной академии наук Украины действует целевая программа “Модернизация радиотелескопа УТР-2 и перспективное развитие декаметровой радиоастрономии в Украине” [9]. Она включает в себя комплексную модернизацию имеющихся радиотелескопов УТР-2 и УРАН и их интеграцию в европейскую и мировые сети низкочастотной радиоастрономии. Одной из основных составляющих этой программы является также создание в обсерватории им. С. Я. Брауде еще одного низкочастотного радиотелескопа ГУРТ (Гигантский украинский радиотелескоп) нового поколения диапазона $8 \div 70(80)$ МГц [10]. Значимость и актуальность этой части работы очевидны и определяются следующими факторами:

- сохранением лидирующей роли Украины в этой области фундаментальной науки;
- бурным прогрессом низкочастотной радиоастрономии в мире;
- обеспечением максимальной синергии при координированном и синхронном использовании многих антенн, разнесенных на большое расстояние (> 100 км) и имеющих разную архитектуру, а также одинаковые, неперекрывающиеся или смежные диапазоны волн;
- большим мировоззренческим и образовательным значениями.

Этому в немалой степени способствуют:

- большой научно-технический потенциал и опыт работы как в создании антенн и методов наблюдения, так и в астрофизических исследованиях;
- высокий уровень и экономичность разработок Радиоастрономического института НАН Украины в области декаметровой радиоастрономии;
- существующий аппаратно-методический задел;
- наличие необходимых для размещения радиотелескопа территорий, принадлежащих НАН Украины.

Конечной целью проекта ГУРТ является создание крупного радиотелескопа, эффективная

площадь которого совместно с радиотелескопами УТР-2 и УРАН будет достигать 1 км². К настоящему времени рядом с УТР-2 уже установлено 11 субрешеток, каждая из 25 скрещенных диполей. Четыре субрешетки оснащены системами усиления, фазирования, передачи данных, управления и регистрации. В решетках применены специально разработанные высокоэффективные активные антенные элементы [11, 12]. Для апробации такого подхода в начале 2000-х гг. была успешно испытана 30-элементная решетка – первая в радиоастрономии малоразмерная антенна из активных элементов, построенная с учетом специфических радиоастрономических требований.

Создание новой системы ГУРТ предполагает последовательно-параллельный подход, т. е. поэтапное наращивание размеров системы (увеличение количества субрешеток и их оснащение) и одновременное проведение наблюдений на уже созданных субрешетках. Последнее обстоятельство делает актуальным решение задачи о возможности качественных астрофизических исследований на решетках сравнительно малого размера, в частности на 25-элементных субрешетках ГУРТ. Обоснование такой возможности актуально также для создания во Франции низкочастотного радиотелескопа NenuFAR (New Extension Nance Upgraded LOFAR) диапазона 8 ÷ 80 МГц [13, 14], идеология построения которого аналогична идеологии построения ГУРТ, а соответствующая субрешетка с аналоговым фазированием состоит из 19 скрещенных активных элементов.

Представленная работа показывает возможность разнообразных астрофизических исследований с помощью малоразмерных антенн-решеток с активными элементами в количестве до нескольких десятков (ГУРТ, NenuFAR и др.). Основанием для этого служит высокое качество создаваемых современных решеток (несмотря на их невысокие угловое разрешение и небольшую эффективную площадь): высокая чувствительность по яркостной температуре; широкая мгновенная рабочая полоса в режиме Фурье-преобразования реального времени; высокий динамический диапазон (помехоустойчивость); высокие частотное и временное разрешения; электронное управление лучом во всей небесной полусфере; поляриметрические возможности; равномерный коэффициент передачи в полосе частот.

Применение малоразмерных антенн актуально также в синхронных наземно-космических экспериментах. Чувствительность космических систем низка и определяется лишь одним антенным элементом. Наземные субрешетки состоят из нескольких десятков элементов, примерно во столько же раз выше их чувствительность. Кроме того, частотная полоса, частотное и временное разрешения в наземных системах практически не имеют ограничений в отличие от космических, где всегда имеются массогабаритные и телекоммуникационные ограничения.

Естественно, что малоразмерные антенны использовались еще на заре развития радиоастрономии. Необходимо упомянуть исследования, которые позволили обнаружить и изучить весьма интересное спорадическое радиоизлучение Юпитера [15, 16], Солнца, построить в начале 60-х гг. спектры ряда радиоисточников с помощью украинского интерферометра ИД-1 диапазона 10 ÷ 30 МГц (2 × 24 элемента) [17, 18], который стал предшественником крупнейшего радиотелескопа УТР-2. Однако современное состояние разработки и использования малоразмерных антенн принципиально изменилось благодаря прогрессу в электронной технике, электродинамике и методах компьютерного моделирования.

Во втором разделе настоящей статьи описываются требования к субрешетке, ее структура, функциональная схема и основные системы. Приводятся также результаты некоторых натуральных экспериментов, иллюстрирующих работоспособность всей системы, и ее основные параметры.

В разделе 3 формулируются и обосновываются астрофизические задачи, которые могут быть решены на одной и двух субрешетках. В основе лежит корректная оценка флуктуационной чувствительности системы как по минимально обнаружимой плотности потока излучения, так и по относительной яркостной температуре с учетом всех параметров решетки и соответствующих экспериментов. В данном анализе используется уникальная возможность применения наблюдательных астрофизических данных, полученных на радиотелескопе УТР-2 с рекордной чувствительностью, но в более узкой полосе (8 ÷ 32 МГц). Полученные результаты относятся к разным типам континуального, импульсного, спорадического, монохроматического и поляризованного космического низкочастотного радиоизлучения.

Заключительный раздел посвящен обнаружению и изучению различных видов излучения и астрофизических объектов (до 10) на субрешетках ГУРТ. Наблюдения показывают как эффективность работы субрешетки, так и возможность получения новой астрофизической информации с ее помощью.

Конечно, предлагаемый подход не исключает высокой актуальности создания гигантских низкочастотных радиотелескопов нового поколения с площадью более 10^5 м². Но вместе с тем применение малоразмерных качественных антенн является оправданным и интересным во многих астрофизически важных задачах, в том числе в координации с крупными существующими и строящимися радиотелескопами.

Привлекательными являются также высокая экономичность и сравнительная простота создания, эталонирования, калибровки и эксплуатации, управления и контроля малых антенн-решеток даже при их круглосуточной работе.

2. Субрешетка ГУРТ и ее основные параметры

2.1. Основные требования и структура

В настоящее время не вызывает сомнений тот факт, что в низкочастотном участке радиоспектра ($f < 100$ МГц) оптимальным, единственно правильным и экономически выгодным подходом к построению больших антенн является принцип фазированной антенной решетки из элементарных антенных элементов. Параболические антенны рефлекторного типа (согласно электродинамическим требованиям) эффективно работают, когда размер апертур более чем в 100 раз превышает длину волны. Это легко реализуется на высоких частотах в миллиметровом и дециметровом диапазонах волн. Однако, например, на декаметровых волнах (длина волны $10 \div 30$ м) такой принцип требует размера параболической апертуры более $1000 \div 3000$ м, что не реализуемо ни с экономической, ни с конструктивной точек зрения.

Идея создания и применения низкочастотных антенн-решеток хорошо себя зарекомендовала на протяжении всего периода существования радиоастрономии. Это подтверждается результатами наблюдений на радиотелескопах УТР-2, УРАН, NDA (Nance Decameter Array), GEETEE

(Индия), БСА ФИАН, CLR (Clark Lake Radio Telescope, США) [19–21] и другими системами. Данный принцип заложен также в концепцию построения украинского радиотелескопа нового поколения ГУРТ в целом и его элементарной секции. Такой же подход используется в создании новых зарубежных инструментов LOFAR, LWA, NenuFAR [1, 2, 13, 14].

Однако важно подчеркнуть, что при создании больших широкополосных антенн-решеток приходится сталкиваться с выполнением ряда противоречивых требований. Согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям максимально высокие значения параметров антенны-решетки (эффективная площадь, ширина диаграммы направленности, уровень боковых и дифракционных лепестков, минимальное количество диполей при заданной эффективной площади) реализуется только на одной длине волны. В частности, оптимальным расстоянием между элементами является величина $\lambda/2$. При этом реализуется максимальная эффективная площадь при минимальном количестве элементов и отсутствие дифракционных лепестков. Высота расположения диполей над землей должна составлять $\sim \lambda/4$, что обеспечивает максимальный отклик на плоскую волну от удаленного радиисточника благодаря оптимальной суперпозиции прямой и отраженной от земли волн. Очевидно, что в запланированном сверхшироком диапазоне частот радиотелескопа ГУРТ ($8 \div 80(70)$ МГц, $\lambda = 37.5 \div 3.75$ м) указанные условия невыполнимы.

Вторая проблема связана с необходимостью взаимного фазирования большого количества (≥ 1000) элементов. В системе LOFAR предполагается цифровое преобразование сигнала на выходе каждого антенного элемента с последующим синтезом диаграммы направленности. Однако даже при наличии мощных вычислительных средств возникают ограничения в приеме и регистрации сигналов в реальном времени в максимальной полосе (~ 70 МГц) с высокими частотным, временным разрешениями и динамическим диапазоном (~ 1 кГц, ~ 1 мс, ~ 90 дБ соответственно), что требуется для решения актуальных астрофизических задач.

Следует также отметить, что в любом случае необходимо достаточно большое широкополосное усиление сигнала на выходе антенны для нормальной работы аналого-цифрового преобра-

зователя (АЦП). В низкочастотном участке радиоспектра это является непростой задачей, поскольку присутствуют достаточно интенсивные помеховые сигналы. Поэтому предъявляются очень жесткие требования к линейности передаточных характеристик (динамическому диапазону) систем усиления и цифрового преобразования для предотвращения интермодуляционных искажений. В системах LOFAR и LWA эта задача упрощена, поскольку подавлен самый низкочастотный участок спектра (от 10 до $20 \div 30$ МГц). В создаваемой украинской системе ГУРТ этот диапазон присутствует, т. к. является очень ценным с астрофизической точки зрения (радиотелескопы УТР-2 и УРАН также работают в этом диапазоне).

Устранение и/или уменьшение перечисленных выше проблем требует решения сложной многофакторной оптимизационной задачи. В данных исследованиях для этого использованы специальные технические решения, учтены астрофизические требования, проведен анализ возможных параметров радиоастрономических и помеховых сигналов и критериев их различимости, возможностей современных цифровых средств, компьютерных и информационных технологий.

Оценим необходимое значение усиления сигнала на выходе антенны. Согласно расчетам и экспериментам антенная температура на выходе короткого пассивного диполя, создаваемая радиоизлучением галактического фона, слабо зависит от частоты и составляет $T_A \approx 2000$ К. На выходе активного диполя после антенного усилителя с усилением по мощности $K_p = 50$ имеем $T_{DA} = T_A K_p \approx 100000$ К, что соответствует спектральной плотности мощности $w = kT_{AD}$ ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана).

На согласованной нагрузке $R = 75$ Ом в полосе частот $\Delta F = f_{\max} - f_{\min} = 70 - 8 = 62$ МГц выделится эффективное напряжение:

$$U = \sqrt{w \Delta F R} \approx 8 \cdot 10^{-5} \text{ В.} \quad (1)$$

Опыт разработки цифровых приемников для радиотелескопа УТР-2 показал, что в декаметровом диапазоне необходим быстродействующий АЦП с количеством разрядов (бит) не менее 16. При максимальном уровне допустимого входного сигнала АЦП $U_{\max} = 1$ В цена одного разряда составляет $U_{\min} = U_{\max} / 2^{15} \approx 3 \cdot 10^{-5}$ В (один раз-

ряд знаковый). Динамический диапазон такого АЦП достаточно высок: $D = 20 \lg(2^{15}) \approx 90$ дБ. Для работы АЦП с максимальной чувствительностью и линейностью средний уровень шума должен соответствовать $10 \div 12$ разрядам АЦП:

$$U_{av} = U_{\min}(2^{10 \div 12}) \approx 0.03 \div 1.2 \text{ В.} \quad (2)$$

Но тогда при типичном уровне помеховых (квазимонохроматических) сигналов на выходе диполя $1 \div 2$ мВ, который (с учетом K_p) более чем в 100 раз превышает эффективное значение напряжения (1), напряжение на входе (2) превысит U_{\max} (1 В), что приведет к резко нелинейному режиму работы АЦП, появлению интенсивных интермодуляционных помех и к полной невозможности регистрации радиоастрономических сигналов. К сожалению, это опасное явление недостаточно учтено при построении систем LOFAR и LWA.

Как уже упоминалось, типичный уровень помех на выходе короткого диполя составляет не более 2 мВ, тогда как на выходе диполя радиотелескопа УТР-2 с размером $l = \lambda/2$ (на частоте 18 МГц) уровень помех достигает $20 \div 30$ мВ. Этим обуславливается идея применения короткого ($l \leq \lambda/2$) активного диполя, которая позволяет не только снизить уровень помех в диапазоне $8 \div 20$ МГц, но и выровнять яркостную температуру галактического фона ($T_B \propto f^{-2.6}$) на выходе антенного усилителя. Таким образом, применение активного короткого диполя и выбор U_{av} с учетом максимального уровня помех позволяет обеспечить работу приемников на линейном участке характеристики АЦП и выровнять частотную зависимость шумов во всем рабочем диапазоне.

Одним из наиболее эффективных методов повышения помехоустойчивости приемных систем является разделение общей полосы на парциальные полосы и независимое усиление и оцифровывание сигналов в каждой из них. Идея построения трехполосной структуры приемной системы субрешетки ГУРТ была предложена около 10 лет назад. Она позволяет не только повысить помехоустойчивость системы регистрации, но и использовать АЦП, частота дискретизации которых составляет $F \approx 40$ МГц.

Прежде всего, необходимо выделить полосу ниже ~ 22 МГц, где находится более 90 %

интенсивных помех. Оставшийся диапазон частот $22 \div 70$ МГц значительно менее “загружен” помеховыми сигналами, интенсивность которых не превышает десятков микровольт ($U_n'' \sim 10^{-5}$ В). Тем не менее этот диапазон также можно разбить на две полосы, т. е. общая полоса шириной 60 МГц разделяется на три примерно по 20 МГц каждая.

Согласно теореме Найквиста частота дискретизации F процесса с верхней частотой B должна соответствовать соотношению

$$F \geq 2B_f. \quad (3)$$

Если процесс с шириной полосы B_f сдвинут вверх на центральную частоту f , то обычно производится его предварительное преобразование к нулевым частотам, чтобы не повышать частоту дискретизации до значения $F \geq 2(f + B_f/2)$. Однако, как можно показать, для сохранения всей необходимой информации о процессе и обеспечения “неналожения” достаточно обеспечить дополнительное к (3) условие

$$F = \frac{4f}{2m+1},$$

где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Как видно, если частота f достаточно высока, имеется серия допустимых частот дискретизации для разных $B_f(m)$.

С точки зрения эффективности работы цифровых устройств частота F должна быть минимально возможной. Для схемы трехполосного усиления заманчиво использовать единую тактовую частоту для всех полос. Иными словами, необходимо обеспечить условие

$$\frac{4f_1}{2m_1+1} = \frac{4f_2}{2m_2+1} = \frac{4f_3}{2m_3+1}, \quad (4)$$

где f_1, f_2, f_3 – центральные частоты каждой полосы соответственно.

При этом, согласно (3), частота дискретизации равна 44 МГц. Согласно (4) легко показать, что все перечисленные требования выполняются при $f_1 = 11$ МГц ($m_1 = 0$), $f_2 = 33$ МГц ($m_2 = 1$), $f_3 = 55$ МГц ($m_3 = 2$) и $F = 44$ МГц. Крайние частоты полос составляют: 8 и 21 МГц (полоса № 1), 23 и 43 МГц (полоса № 2), 45 и 65 МГц (полоса № 3).

Уровень напряжения на входе АЦП из-за более узкой полосы уменьшится в $\sqrt{3}$ раз, что несущественно. В то же время уровень помех для полос № 2 и № 3 не будет превышать значений $10 \div 200$ мВ, что вполне допустимо. То есть для этих полос усиление порядка $30 \div 60$ дБ также допустимо и достаточно. Для низкочастотной полосы № 1 усиление не должно превышать 20 дБ. При этом уровень помех на входе АЦП будет не более 100 мВ, а соответствующий уровень входного полезного сигнала будет соответствовать 1.5 мВ (примерно 7-й разряд АЦП), что в ~ 100 раз больше минимального дискрета и также является приемлемым.

Необходимая линейность тракта передачи и преобразования сигналов должна обеспечиваться не только АЦП, но и усилителями. Оптимальным является каскадное включение усилительных элементов, где входной усилитель имеет малые шумы, а выходной – максимальную линейность. Так, для полос № 2 и № 3 необходимое усиление ($30 \div 60$ дБ) получается при последовательном включении нескольких модулей с усилением $10 \div 20$ дБ каждый. Динамический диапазон одного усилительного каскада составляет $90 \div 105$ дБ/мкВ. При этом легко обеспечить линейность тракта выше, чем линейность применяемых АЦП [22, 23]. То же относится и к полосе № 1, где усиление обеспечивается одним каскадом.

В последние годы стало возможным использовать АЦП с частотой дискретизации порядка 200 МГц, поэтому в системе регистрации [24] применена однополосная ($8 \div 80$ МГц) структура субрешетки. Оценки уровней сигналов и необходимого усиления, сделанные выше, остаются справедливыми. Кроме того, в дополнение к упомянутому выше выравниванию галактического фона с помощью короткого активного диполя, используется корректировка входных сигналов в широкой полосе с помощью частотно-зависимых аттенуаторов. Получаемая таким образом плоская выходная характеристика оптимальна для максимизации динамического диапазона, свободного от комбинационных составляющих. Однако при самой неблагоприятной помеховой обстановке динамического диапазона 16-битного АЦП может оказаться недостаточно. Тогда должна применяться комбинированная (двухполосная) схема, в которой нижняя полоса соответству-

описанной выше полосе № 1 и оцифровывается отдельно, а верхняя представляет сплошную полосу 22 ÷ 80 МГц.

Возвращаясь к проблеме выбора расстояния между элементами (для ГУРТ $d = 3.75$ м) и высоты их подвеса (для ГУРТ $h = 1.6$ м) при работе в широком диапазоне частот, отметим следующее. Решение практически любой астрофизической задачи на радиотелескопе ГУРТ допускает усреднение сигнала по частоте в диапазоне более 5 ÷ 10 МГц. С одной стороны, это важно для реализации высокой чувствительности, особенно на этапе поиска новых эффектов [25]. Однако, как было показано в ходе выполнения исследований, это становится весьма полезным и с точки зрения антенных эффектов [26]. При усреднении сигнала в широкой полосе частот можно понизить уровень боковых и дифракционных лепестков диаграммы направленности. Это относится как к структуре секции, так и к радиотелескопу в целом, определению конфигурации которого также уделяется большое внимание [27].

Оптимизация структуры цифрового фазирования большого радиотелескопа заключается в следующем. Главной задачей проекта является поэтапное обеспечение большой суммарной эффективной площади (до $10^4 \div 10^5$ м² на частоте порядка 40 МГц, $\lambda = 7.5$ м). Эффективная площадь одного диполя составляет $\lambda^2/4 \approx 14$ м². Тогда требуемое количество диполей составит $N_D = 400 \div 4000$. Из соображений технической и экономической целесообразности количество достаточно сложных элементов цифрового фазирования не должно превышать $N_d = 100$. При этом

количество диполей, охваченных аналоговым достаточно простым фазированием, определяется как $N_c = N_D/N_d = 4 \div 40$. Отсюда выбираем количество элементов в секции, равным 25 (т. е. квадратная решетка из 5×5 элементов). Такое количество элементов также обеспечивает достаточную эффективную площадь для наблюдения хотя бы одного источника (например, Кассиопея А) с превышением над уровнем фона > 1 дБ. Таким образом, структура радиотелескопа предполагает оптимальное сочетание аналоговых и цифровых методов фазирования. Кроме того, большой положительный опыт эксплуатации радиотелескопа УТР-2 (около 50 лет) показывает оптимальность равномерного (регулярного) распределения элементов с максимальным фактором заполнения.

2.2. Структура субрешетки ГУРТ

Каждый антенный элемент 25-элементной субрешетки состоит из двух симметричных скрещенных диполей (рис. 1, а) с автономными входами, способных независимо принимать электромагнитные волны двух ортогональных поляризааций. Для расширения рабочего диапазона частот они выполнены широкими в вертикальной плоскости (рис. 1, б) из тонкостенных медных трубок диаметром 12 мм с полиэтиленовым покрытием толщиной 2 мм, обычно применяемых для водоснабжения и отопительных систем. Каждое плечо диполя образовано тремя трубками, отходящими от входной клеммы А. Две из них образуют периметр треугольника со скругленными вершинами, а третья – его медиану АВС, изломанную под углом $\gamma = 45^\circ$ (рис. 1, б).

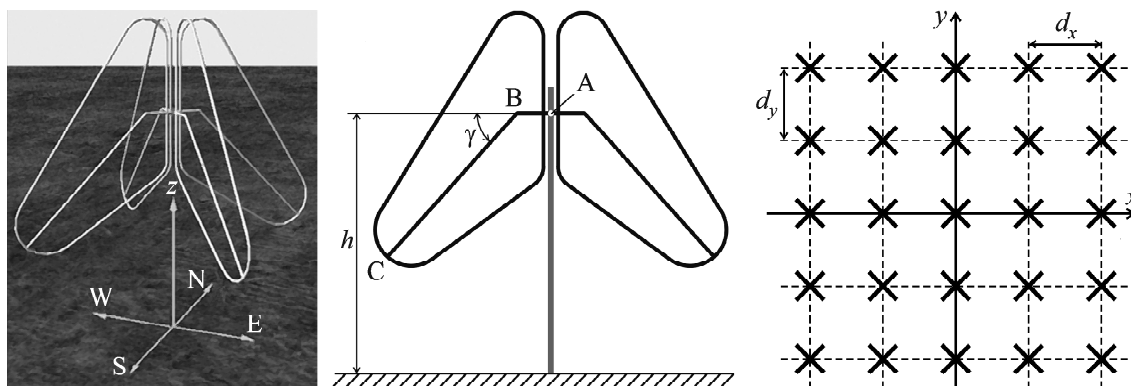


Рис. 1. Геометрия элементов и субрешетки ГУРТ: а – модель элемента субрешетки из двух скрещенных плоских диполей, б – геометрия плоского диполя ГУРТ, в – геометрия субрешетки ГУРТ

Полная длина плеча диполя вдоль медианы ABC составляет 1.4 м, а максимальная ширина – 0.8 м. Выбранная форма диполя дает возможность получить такую частотную зависимость его входного импеданса, которая позволила обеспечить приемлемое его согласование с входом антенного усилителя во всем рабочем диапазоне частот. Оба скрещенных диполя крепятся на вертикальной стойке, изготовленной из стальной трубы диаметром 60 мм с верхней диэлектрической насадкой. Внутри верхней части стойки вмонтирован двухканальный антенный усилитель со встроенной согласующей цепью, входы которого соединены напрямую с соответствующими выходами диполя. Высота точек питания диполей над землей выбрана равной $h = 1.6$ м. Это значение является компромиссом между стремлением повысить КПД диполя, максимально удаляя его от поверхности земли, и требованием отсутствия заметных провалов в его диаграмме направленности. Такой провал может наступить при подъеме фазового центра диполя на высоту около 1.8 м, близкую к четверти длины волны на частоте 80 МГц, когда прямая и отраженная от поверхности земли волны наводят на его клеммах противофазные ЭДС. Заметим, что грунт в месте расположения радиотелескопа ГУРТ имеет весьма неплохие электрофизические параметры (относительная диэлектрическая

проницаемость $\epsilon_r \approx 10$ и удельная электрическая проводимость $\sigma \approx 0.025$ См/м), поэтому мероприятия по искусственной металлизации поверхности земли для повышения КПД диполей, как это делалось при создании LOFAR и LWA, здесь не проводились. Предварительные расчеты показали, что в данном случае металлизация земли не дает заметного выигрыша в чувствительности элемента субрешетки, зато существенно удорожает конструкцию. Вместо этого предложена методика прецизионного определения параметров почвы, которые учитываются при расчете параметров субрешетки.

На рис. 1, в показано расположение антенных элементов в субрешетке ГУРТ, расстояние между которыми вдоль обеих осей x и y было выбрано равным $d_x = d_y = 3.75$ м, что составляет $\lambda/2$ на частоте 40 МГц. Немалую роль в таком выборе сыграл тот факт, что антенная решетка действующего радиотелескопа УТР-2 в направлении север-юг на средней частоте своего рабочего диапазона (20 МГц) также имеет шаг $\lambda/2$, что позволяет ожидать высокую степень подобия антенных параметров обоих радиотелескопов с целью облегчения сопоставления данных наблюдений и синхронизации их совместной работы.

На рис. 2 изображена функциональная схема 25-элементной субрешетки ГУРТ (для одной из двух линейных поляризации). Показаны все компонен-

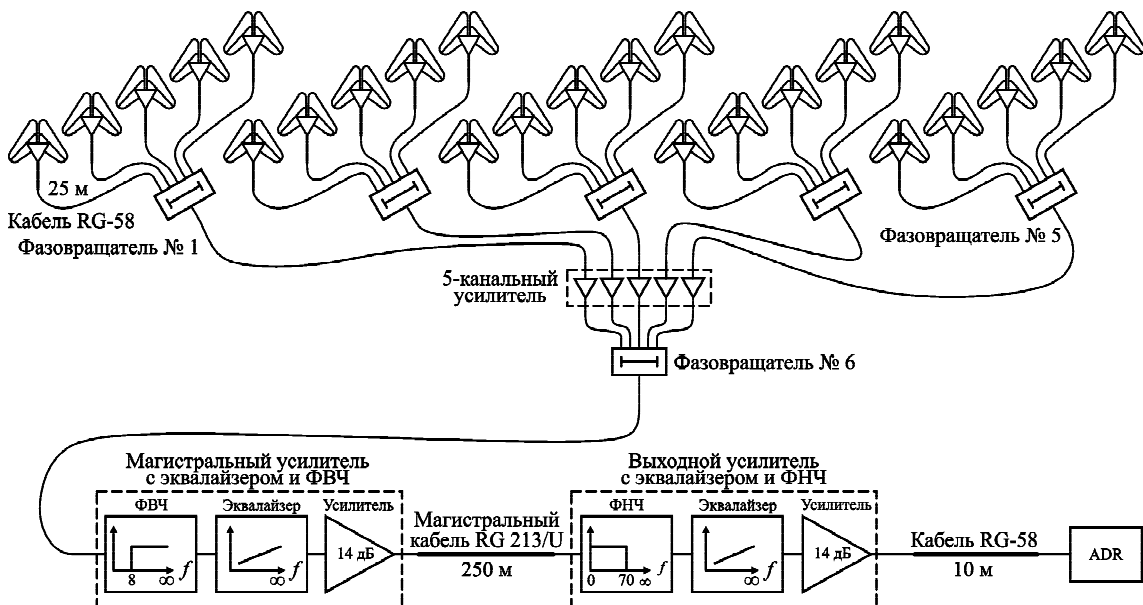


Рис. 2. Функциональная схема усилительно-распределительной и фазировочной систем секции ГУРТ (ФВЧ – фильтр высоких частот, ФНЧ – фильтр низких частот, ADR – широкополосный цифровой приемник (Advanced Digital Receiver))

ты: антенные элементы с усилителями [28]; магистральные усилители; частотно-зависимые аттенюаторы; диаграммообразующие модули [29, 30]; линии передачи; системы регистрации сигналов [24], управления, автоматизации и контроля. Каждый диаграммообразующий модуль представляет собой фазовращатель на линиях временной задержки сигнала и равноплечий сумматор, которые обеспечивают 17 направлений фазирования. Включение модулей по двухэтажной схеме (5 модулей в первом этаже и 1 во втором) позволяет получить равномерное покрытие небесной полусферы 213-ю положениями луча субрешетки. Внешний вид одной из субрешеток вместе с аппаратным шкафом показан на рис. 3. Эффективность субрешетки предложенной структуры подтверждена теоретическими расчетами, лабораторными и натурными экспериментами.

При конструировании широкополосных фазированных антенных решеток необходимо учитывать частотную зависимость параметров принимаемых сигналов и всех систем радиотелескопа:

- температуры галактического фона ($T_B \sim f^{-2.6}$);
- мощности помеховых сигналов, прежде всего от радиостанций, ($P_n \sim f^{-4}$);
- потерь в кабельных системах фазовращателей и линий передачи ($\delta \sim f^{0.5}$).

Как видно, эти три фактора приводят к резкому уменьшению уровня сигнала с повышением частоты от минимума до максимума. Особенно остро эта проблема возникает в сверхширокополосных антеннах ($f_{\max}/f_{\min} > 2 \div 10$), когда из-за очень большого перепада уровня сигнала на входе антенной системы (десятки децибел) динамический диапазон систем окончательного усиления и регистрации оказывается недостаточным. В антенной системе УТР-2 эта проблема частично решается путем применения трехполосной системы антенного усиления, а в каждой полосе усиление уменьшается с понижением частоты [23].

Как отмечалось выше (см. п. 2.1), одно из преимуществ применения активных коротких диполей заключается в том, что антенная температура галактического фона на выходе таких диполей становится практически частотно-независимой (низкие частоты подавляются). С понижением частоты подавляются также помеховые сигналы. Тем не менее значительное частотно-зависимое ослабление сигнала в сравнительно длинных кабельных системах фазовращателей и линиях передачи остается. Поэтому в создаваемых субрешетках ГУРТ для максимизации чувствительности и динамического диапазона применены как распределенное усиление вдоль



Рис. 3. Внешний вид последней модификации 25-элементной субрешетки ГУРТ с аппаратным шкафом в центре

тракта (три яруса усиления), так и включение на входах усилителей частотно-зависимых аттенюаторов, корректирующих передаточную характеристику. Благодаря этому уровень входного сигнала приемника имеет одинаковое превышение (обычно это $15 \div 20$ дБ) над внутренними шумами АЦП во всей рабочей полосе (см. раздел 4). Таким образом обеспечивается максимизация чувствительности и линейности цифрового приемника во всем диапазоне. При наличии очень высокого уровня помех (например, при слежении за источником вблизи горизонта) могут использоваться фильтры, выделяющие только полосу $25 \div 80$ МГц (см. п. 2.1).

На рис. 4 показаны АЧХ усилителей субрешетки ГУРТ с различными звеньями частотно-зависимых аттенюаторов и фильтров, а на рис. 2 – полная функциональная схема субрешетки со всеми структурными звеньями. Отклик всей субрешетки ГУРТ (сигнал, принятый диполями и прошедший весь сигнальный тракт) на галактический фон приведен в разделе 4.

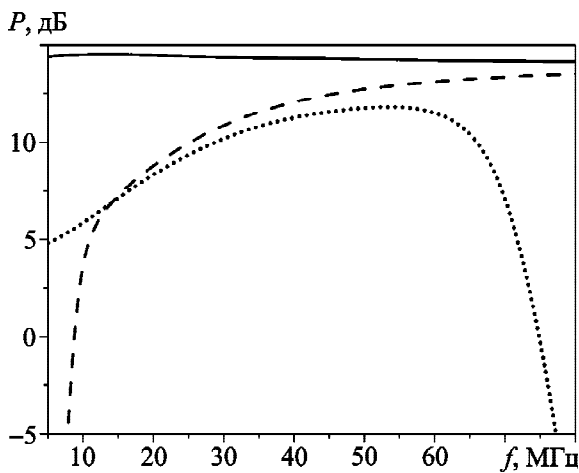


Рис. 4. АЧХ усилителей второго яруса – сплошная кривая, третьего яруса (с частотно-зависимым аттенюатором и ФВЧ) – штриховая кривая, и четвертого яруса (с частотно-зависимыми аттенюаторами и ФНЧ) – пунктирная кривая

2.3. Расчет параметров субрешетки ГУРТ

Расчет параметров субрешетки ГУРТ выполнялся методом компьютерного моделирования с привлечением матричной теории диссипативных антенных решеток [31, 32]. Для этого была разработана математическая модель субрешетки,

которая основана на представлении ее в виде каскадного соединения двух многополюсников, один из которых поставлен в соответствие решетке диполей, а второй – системе ее возбуждения, куда входят устройства усиления, фазирования и суммирования сигналов. Параметры первого многополюсника определялись путем решения системы интегральных уравнений относительно распределения токов на диполях с учетом подстилающей поверхности в виде реальной земли. Для ее решения была разработана специальная методика [33], основанная на методе моментов и позволяющая находить все требуемые матричные параметры многополюсника, эквивалентного решетке диполей, с минимальными затратами вычислительных ресурсов. Параметры второго многополюсника, соответствующего схеме возбуждения субрешетки, определялись с использованием аппарата матриц рассеяния, хорошо известного из теории СВЧ-цепей. Полученная модель [34] позволила определить все требуемые характеристики направленности и параметры субрешетки, такие как эффективная площадь, коэффициент направленного действия (КНД), коэффициент усиления, КПД, шумовая температура и др., а также их зависимости от угла сканирования и частоты во всем рабочем диапазоне радиотелескопа ГУРТ и по всему сектору его наведения.

На рис. 5 показаны нормированные диаграммы направленности $F(\theta, \varphi)$ (где θ – зенитный угол, φ – азимут) субрешетки в режиме приема плоской электромагнитной волны одной поляризации, приходящей из зенитного направления, рассчитанные на четырех частотах – 10, 20, 40 и 80 МГц – для четырех фиксированных плоскостей $\varphi = \text{const}$, две из которых проходят через оси X ($\varphi = 0^\circ$) и Y ($\varphi = 90^\circ$), и двух диагональных плоскостей – E ($\varphi = 45^\circ$) и H ($\varphi = 135^\circ$). В плоскостях решетки, проходящих через оси X и Y , (рис. 5, а) диаграммы направленности одинаковые, а в диагональных плоскостях E (рис. 5, б) и H (рис. 5, в) заметно отличаются, прежде всего формой и уровнем боковых лепестков.

На рис. 6 приведены графики частотных зависимостей ширины диаграммы направленности (рис. 5, а) на уровне половинной мощности $2\theta_{0.5}$ и максимальной эффективной площади $A_{e\text{max}}$ субрешетки. На этом рисунке видно, что ширина диаграммы направленности с увеличением

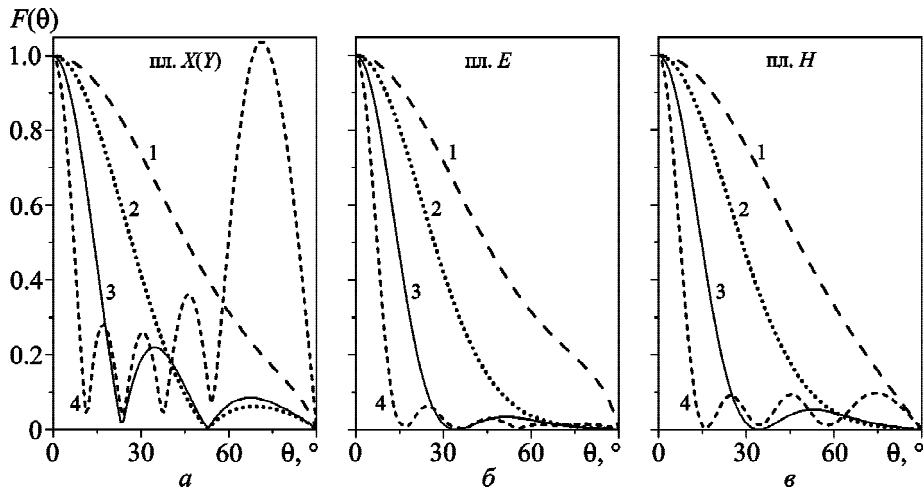


Рис. 5. Сечения нормированной диаграммы направленности секции ГУРТ одной поляризации для зенитной ориентации луча в режиме приема на разных частотах рабочего диапазона (кривые 1 – $f = 10$ МГц, кривые 2 – $f = 20$ МГц, кривые 3 – $f = 40$ МГц, кривые 4 – $f = 80$ МГц) для плоскостей $\varphi = \text{const}$: а – плоскости, проходящие через оси X ($\varphi = 0$) и Y ($\varphi = 90^\circ$); б – E -плоскость ($\varphi = 45^\circ$); в – H -плоскость ($\varphi = 135^\circ$)

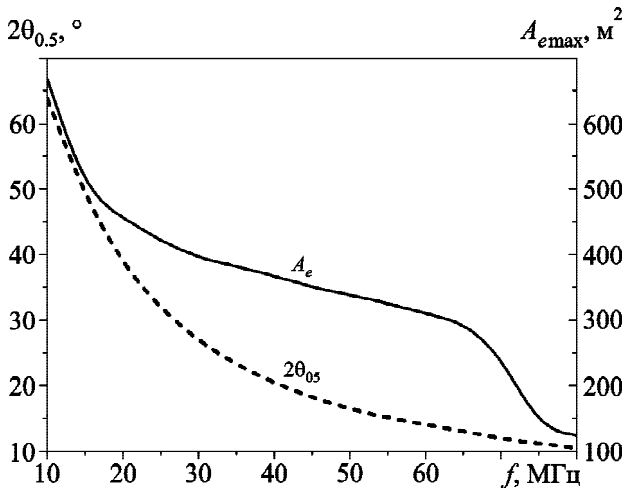


Рис. 6. Графики частотных зависимостей ширины диаграммы направленности на уровне половинной мощности $2\theta_{0,5}$ при фазировании в зенит и максимальной эффективной площади $A_{e\text{max}}$ субрешетки

частоты падает от 64° на 10 МГц до 10° на 80 МГц, а на 40 МГц составляет примерно 20.5° . Максимальная эффективная площадь решетки $A_{e\text{max}}$ также монотонно уменьшается с ростом частоты от 668 м^2 на 10 МГц до 126 м^2 на 80 МГц, а на 40 МГц $A_{e\text{max}}$ составляет 368 м^2 . Заметный на рис. 6 излом кривой $A_{e\text{max}}(f)$ вблизи частоты 67 МГц связан с появлением побочного главного максимума (дифракционного лепестка диаграммы направленности), хорошо видного на рис. 5, а.

2.4. Определение параметров подстилающей поверхности

Антенные решетки современных низкочастотных радиотелескопов расположены над поверхностью полупроводящей земли. При изменении погодных условий вариации проводимости σ и диэлектрической проницаемости ϵ_r подстилающей поверхности приводят к изменениям эффективной площади A_e , поляризационных характеристик и КПД антенны (последнее важно для детального изучения яркостной температуры галактического фона). Избежать такого рода вариаций параметров антенных решеток можно путем полной металлизации поверхности земли под ними. Частичная металлизация (так, как это сделано, например, в радиотелескопе LOFAR [1]) решает проблему частично, при этом в различной степени в зависимости от направления фазирования субрешетки. На радиотелескопе ГУРТ реализуется альтернативный подход, который состоит в определении и учете параметров земли [35]. Метод основан на измерении отношения амплитуд $D = \frac{E_{z_1}(\epsilon, \sigma, f)}{E_{z_2}(\epsilon, \sigma, f)}$ вертикальной компоненты E_z напряженности поля поверхностной волны на двух расстояниях z_1 и z_2 от излучающего вертикального диполя (рис. 7) с последующим решением обратной задачи восстановления параметров земли ϵ и σ по экспериментально установленным на разных частотах

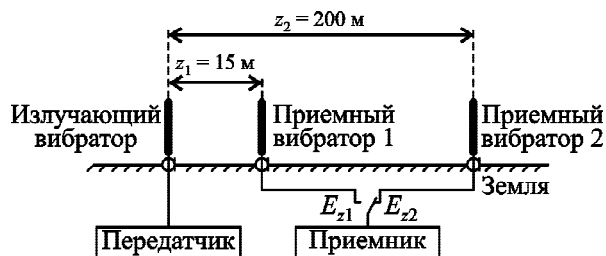


Рис. 7. Схема измерения амплитуд E_{z1} и E_{z2} вертикальной компоненты поля поверхностной волны для определения параметров земли

значениях D_{f_1} , D_{f_2} и D_{f_3} . Частоты выбираются достаточно разнесенными в декаметровом диапазоне радиоволн (например, $f_1 = 15$ МГц, $f_2 = 30$ МГц, $f_3 = 50$ МГц), чтобы обеспечить лучшую точность определения искомых параметров. В случае использования описанного выше метода полностью отпадает необходимость в металлизации поверхности земли под решеткой, что значительно удешевляет ее стоимость при создании, и, что немаловажно, измерения могут проводиться в автоматическом режиме без участия наблюдателя.

2.5. Система управления и автоматизация

Исходя из ширины ДН секции ГУРТ на верхней частоте рабочего диапазона был разработан фазовращатель с количеством $2^5 = 32$ положений луча по каждой координате. Система фазирования секции состоит из двух ярусов, первый из которых фазировает и суммирует сигналы диполей в рядах вдоль направления запад-восток, а второй ярус суммирует и фазировает сигналы рядов вдоль направления север-юг.

Для управления лучом секций радиотелескопа, а также для контроля параметров его работы была создана система управления. Управление диаграммой направленности описанной выше фазированной антенной решетки секции ГУРТ производится путем подачи пятибитного кода управления на фазовращатели двух ярусов фазирования соответственно по двум координатам. Расчет необходимых кодов производится с помощью программы управления радиотелескопом ГУРТ, которая имеет различные режимы работы.

Работа центрального блока может быть синхронизирована с помощью сигналов стандарта частоты и времени и GPS сигналов. Архитектура

системы управления радиотелескопа ГУРТ приведена на рис. 8.

2.6. Широкополосная цифровая регистрация и обработка данных

Для приема и последующей обработки сигналов каждая субрешетка ГУРТ оборудована на выходе широкополосным цифровым приемником ADR (Advanced Digital Receiver) [24]. Параметры приемника согласованы с параметрами секции радиотелескопа ГУРТ и позволяют работать во всей полосе частот с высоким частотно-временным разрешением и высоким динамическим диапазоном принимаемых сигналов (см. табл. 1). Приемник обладает высокой чувствительностью, а также низким уровнем собственных шумов и паразитных сигналов.

ADR оборудован двумя входными каналами, позволяющими параллельно принимать и обрабатывать сигналы двух линейных поляризаций субрешетки радиотелескопа, которые могут быть использованы также для цифрового фазирования отдельных секций между собой благодаря функции регулируемой относительной временной задержки сигнала между двумя каналами от 0 до 8 мкс с шагом 8 пс. Реализовано два режима работы приемника: запись “сырых” данных, поступающих с АЦП, так называемый Wave-Form (WF) режим, и режим преобразования сигнала в спектры с возможностью накопления по времени, вычисления суммы и разности, а также вычисления кросс-

Таблица 1. Параметры широкополосного цифрового приемника ADR

Параметры	Значение
Частотный диапазон, МГц	80
Количество частотных каналов	16384
Частотное разрешение, кГц	4.883
Временное разрешение, нс	183.5
Разрядность АЦП, бит	16
Динамический диапазон, дБ	90
Количество входов	2
Быстрое преобразование Фурье	+
WF режим (не ограничен по времени)	+
Вычисление кросс-спектров	+
Сумма-разностный режим	+
Нормирование сигналов	+
Временная задержка сигналов	+

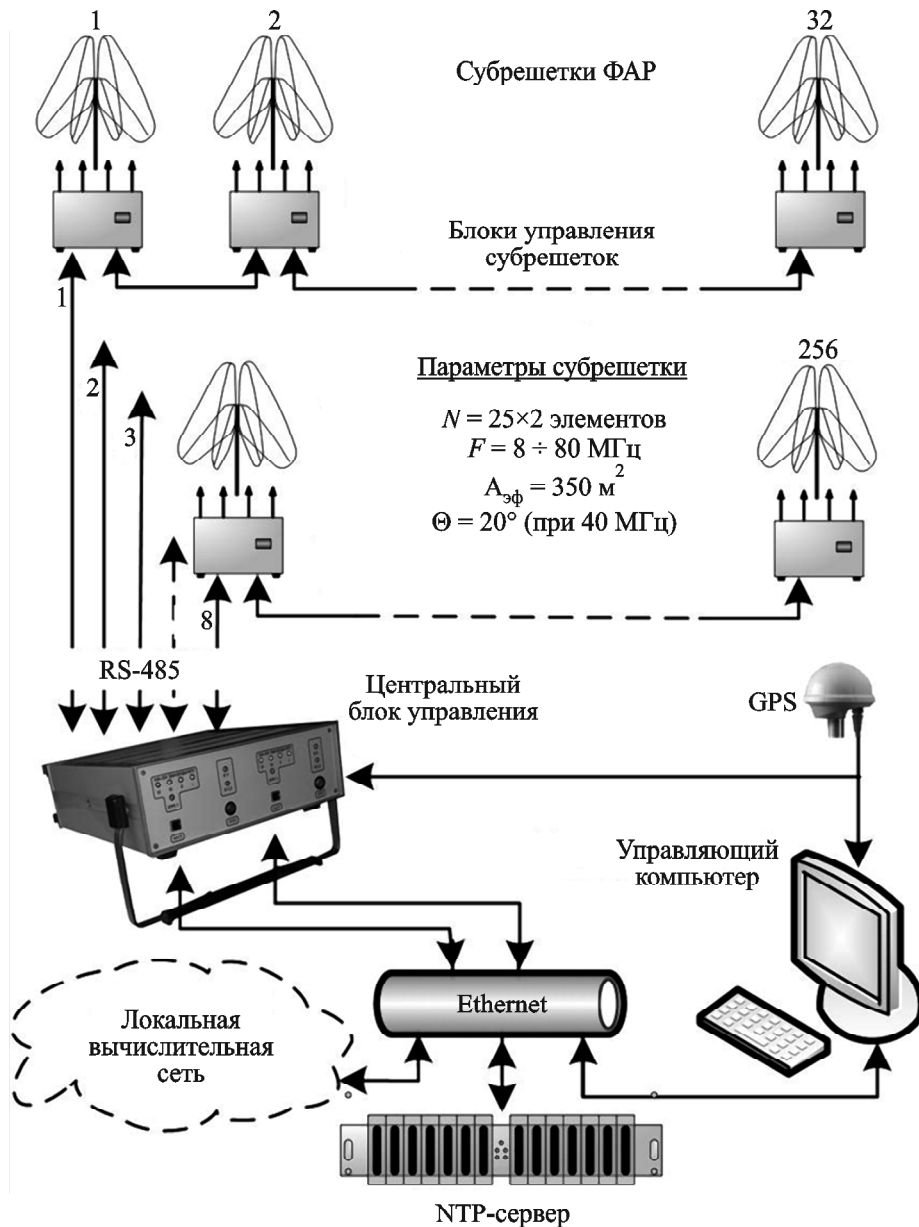


Рис. 8. Архитектура системы управления радиотелескопа ГУРТ

спектра между каналами в реальном времени. Полученные данные снабжаются метками точного времени от стандарта частоты/времени и GPS приемника что позволяет производить синхронизацию между сигналами произвольно расположенных приемников, а также синхронно управлять ими. Далее полученные данные могут сохраняться локально на жестком диске компьютера или отправляться на последующую обработку и фазирование с помощью локальной компьютерной сети.

ADR оборудован 16-битным АЦП с динамическим диапазоном по комбинационным со-

ставляющим помех третьего порядка 100 дБ к микровольту. Он обеспечивает в полосе приема 4 кГц динамический диапазон по собственному шуму около 110 дБ. Аппаратное временное разрешение составляет 6.25 нс.

2.7. Вычислительный кластер УТР-2 – ГУРТ

Цифровая обработка полученных сигналов является неотъемлемой частью процесса радиоастрономических исследований. Поэтому существенное внимание уделяется развитию совмест-

ного вычислительного кластера УТР-2 – ГУРТ. В настоящее время он состоит из двух идентичных серверов (процессор Intel Core i5, оперативная память 32 ГБ, дисковое пространство до 30 ТБ, видеокарта GTX 670). Кроме того, для решения ряда задач могут быть использованы вычислительные возможности упомянутых приемников ADR (процессор Intel Core i5, оперативная память 16 ГБ, дисковое пространство до 18 ТБ, видеокарта GTX 670), а также шести компьютеров различной производительности, установленных на радиотелескопе УТР-2, которые тоже входят в кластер.

В настоящее время разрабатывается система цифровых фазовращателей, которая будет использоваться для фазировки произвольного числа субрешеток ГУРТ. Но фазирование нескольких субрешеток уже возможно, в частности, с помощью данного вычислительного кластера. Ограниченные по времени записи сигналов нескольких субрешеток, полученные в режиме WF, могут быть фазированы в оффлайн-режиме. Дальнейшее развитие кластера (увеличение числа серверов, расширение дискового пространства, разработка программного обеспечения, позволяющего распараллеливать вычислительные процессы на все доступные вычислительные мощности как в пределах кластера, так и вне его) сможет, с одной стороны, взять на себя часть функций цифрового фазирования субрешеток ГУРТ, а с другой – существенно расширить возможности обоих радиотелескопов при решении различных радиоастрономических задач.

3. Актуальные астрофизические задачи для малоразмерных антенн

3.1. Флуктуационная чувствительность субрешетки ГУРТ

Малоразмерная аддитивная антенна-решетка с высоким фактором заполнения апертуры, эффективной площадью менее 10^3 м^2 и шириной диаграммы направленности более 10° имеет низкую чувствительность по эффекту спутывания (confusion effect) на уровне сотен янских [36]. Этот важный в радиоастрономии параметр исследований определяется, в первую очередь, распределением радиоисточников континуума во Вселенной, т. е. средним угловым расстоянием между радиоисточниками с плотностями потока излучения, со-

ответствующими предельно обнаружимым для данного радиотелескопа с шириной диаграммы направленности, меньшей указанного углового расстояния (для радиотелескопа УТР-2 эта величина составляет $5 \div 10$ Ян [3]). Однако данное ограничение чувствительности имеет место в основном для самой обширной популяции – компактных радиоисточников непрерывного радиоизлучения: радиогалактик, квазаров, остатков вспышек сверхновых звезд, эмиссионных туманностей. Подавляющее большинство других классов астрофизических объектов и видов космического радиоизлучения не имеют такого ограничения. Это относится к монохроматическому, импульсному, спорадическому радиоизлучениям межзвездной и межпланетной среды, Солнца, планет, пульсаров и т. д., что в первую очередь определяется умеренной популяцией данных объектов, соответственно, значительным угловым расстоянием между ними и дополнительными критериями различимости – кроме энергетического и пространственного, еще и частотным и временным. Поэтому в приводимом далее анализе возможно ограничиться лишь оценкой флуктуационной чувствительности радиотелескопа – субрешетки ГУРТ. Иными словами, для исследования данных объектов важным является не угловое разрешение (во многих случаях они принципиально неразрешимы), а максимально возможная эффективная площадь и/или максимально возможное интегрирование по времени и частоте.

Как известно, минимально обнаружимая плотность потока для антенны с одной поляризацией определяется как

$$\Delta S_{min} = K \frac{2kT_S}{A_e \sqrt{\Delta f \Delta t}}, \quad (5)$$

где $K = (T_A + T_N)/T_A$, T_N – шумовая температура встроенного в диполь антенного усилителя, T_A – антенная температура галактического фона на выходе пассивной части диполя; T_S – температура системы, на низких частотах она соответствует яркостной температуре галактического фона T_B ; Δf , Δt – частотная полоса и время интегрирования соответственно.

Для современных решеток из активных элементов, каковыми являются ГУРТ, NenuFAR, LOFAR, LWA и другие, очень важным параметром, определяющим реальную чувствительность системы, является превышение антенной температуры T_A

галактического фона на выходе пассивной части диполя над шумовой температурой T_N встроенного в диполь антенного усилителя, вход которого нагружен на импеданс, равный импедансу диполя. То есть в формуле (5) это превышение учитывается коэффициентом K . Экспериментальное определение данной величины является непростой задачей, поскольку диполь и усилитель представляют собой одно целое со специфическим взаимным комплексным согласованием. Тем не менее детальные теоретические расчеты и эксперименты (см. п. 2.2, а также [37]) позволяют корректно оценить этот параметр. В частности, показано, что собственный шум антенного усилителя, включенного в активный диполь, близок к реальному значению при режиме короткого замыкания на входе усилителя. Превышение фона над собственными шумами составляет $9 \div 10$ дБ ($8 \div 10$ раз), а соответствующий коэффициент $K \approx 1.1$. Это достаточно хороший показатель, подтверждающий качество активного элемента ГУРТ. Он указывает на то, что системные шумы ГУРТ в основном определяются температурой внешнего галактического фона, а не шумовой температурой входных усилителей. Отметим, что в системе LOFAR указанное среднее превышение составляет 3 дБ ($K = 2$), а в LWA – 6 дБ ($K = 125$). В радиотелескопе УТР-2 до модернизации системы антенного усиления [23] превышение составляло ~ 5 дБ ($K = 1.4$) на частоте 25 МГц. В настоящее время для УТР-2 и УРАН это значение составляет ~ 1.25 .

В случае изучения вариаций яркостной температуры галактического фона и поиска спектральных особенностей (линий) в радиоизлучении необходимо знать минимально обнаружимую относительную яркостную температуру, которая соответствует минимально обнаружимой плотности потока излучения с точностью до коэффициента $2K/A_e$:

$$\left(\frac{\Delta T}{T_S} \right)_{\min} = \frac{K}{\sqrt{\Delta f \Delta t}}$$

На рис. 9 показаны результаты расчетов чувствительности ΔS_{\min} в широком диапазоне изменения параметров Δt ($10^{-3} \div 10^5$ с) и Δf ($6 \div 60000$ кГц). Для упрощения иллюстрации выбрано одно значение $T_S = T_B = 20000$ К на центральной частоте субрешетки 40 МГц. Яркостная температура T_B меняется в диапазоне частот про-

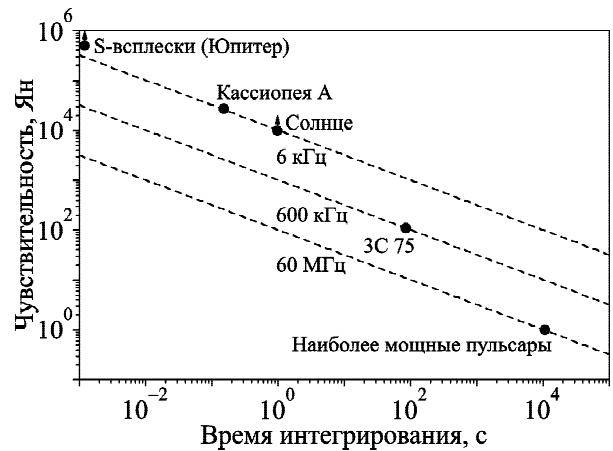


Рис. 9. Достижимая чувствительность секции ГУРТ с отношением сигнал/шум равным 10 в зависимости от времени интегрирования и полосы частот (ширина полосы в 6, 600 кГц и 60 МГц показана наклонными штриховыми линиями). Значения потоков Кассиопея А и ЗС 75 для расчета взяты на частоте 40 МГц (27000 и 110000 Ян соответственно). Для S-всплесков радиоизлучения Юпитера принята нижняя граница 10^6 Ян (см. п. 3.7), для солнечного излучения приведена одна солнечная единица потока (10^4 Ян), излучение этих источников может быть на 1–2 порядка более мощным. Список доступных для наблюдения пульсаров приведен в разделе 4

порционально $f^{-2.6}$, но чувствительность на любой частоте легко пересчитать. Кроме того, значение эффективной площади $A_e = 350$ м² также соответствует центральной частоте 40 МГц и зенитной ориентации луча (см. п. 2.3). Однако сделанные упрощения в расчетах не изменяют принципиально оценок возможностей обнаружения и исследования соответствующих астрофизических эффектов.

Эффективная площадь радиотелескопа УТР-2 равна 150000 м², т. е. в ~ 300 раз больше, чем у субрешетки ГУРТ. Но широкая рабочая полоса (60 МГц), малые собственные шумы, варьируемые частотное (от 6 кГц до 60 МГц) и временное (от 1 мс до 10 ч) разрешения, наличие двух линейных поляризаций обеспечивают возможность исследований ряда астрономических источников и явлений, а также дают очевидную синергию при совместном применении как вышеупомянутых, так и других антенн. Необходимо подчеркнуть, что электронное сканирование в широком секторе углов, высокая чувствительность в широком диапазоне частот и высокая помехоустойчивость определяют широкие возмож-

ности астрофизических исследований на субрешетках ГУРТ, что будет показано далее в разделах 3 и 4.

На номограмме рис. 9 показаны достижимые уровни чувствительности в янских для выбранных временного разрешения и диапазонов частот для нескольких радиоисточников. Наиболее мощное излучение свойственно S-всплескам Юпитера (см. п. 3.7). Из рисунка очевидно (верхний левый край) что это излучение возможно изучать с временным разрешением выше 1 мс и полосой частот уже 6 кГц. Справа на рисунке отмечены наиболее мощные пульсары (см. п. 3.9 и раздел 4), которые также доступны для исследований. Между этими источниками находится область, в которой благодаря соответствующему выбору параметров приемника доступны для исследования наиболее мощные источники (Кассиопея А, Лебедь А, солнечное радиоизлучение и т. п.).

3.2. Нетепловое радиоизлучение Галактики

Нетепловое фоновое радиоизлучение Галактики является одним из важнейших объектов радиоастрономических исследований в широком диапазоне длин волн. Как известно, именно декаметровое радиоизлучение было открыто в начале 30-х гг. прошлого века Карлом Янским, что стало рождением радиоастрономии в целом как науки.

Механизм такого радиоизлучения давно известен – это синхротронное излучение при движении релятивистских электронов в магнитном поле Галактики. Тем не менее наблюдения такого излучения как средства детальной диагностики различных компонентов Галактики еще далеки от своего завершения. Это относится к изучению электронной компоненты космических лучей, их энергетического спектра, распределения, происхождения. Важной задачей является также определение мелкомасштабного и крупномасштабного магнитного поля Галактики и его источников. Эти вопросы в значительной мере могут быть решены путем наблюдений распределения (построения карт) нетеплового радиоизлучения всей Галактики, особенно на наиболее низких частотах (декаметровый и метровый диапазоны волн), где это излучение наиболее интенсивно, а вклад тепловой компоненты пренебрежимо мал.

Как известно, яркостная температура теплового излучения на низких частотах пропорциональна f^2 , тогда как для нетеплового (синхротронного) излучения она имеет обратную степенную зависимость от частоты:

$$T_B \sim f^{-\alpha},$$

где $\alpha = 1 \div 3$ – спектральный индекс.

На рис. 10 показана карта [38], построенная при использовании одной секции радиотелескопа УТР-2 в комбинации с антенной УРАН-2. Как видно, даже при таком умеренном угловом разрешении структура Галактики хорошо просматривается – видны галактическая плоскость, области минимума фона и его возрастание при приближении к центру, шпурсы, протяженные галактические структуры и мощные источники (последние могут быть использованы как калибраторы при построении карт).

Несмотря на небольшие размеры субрешетки ГУРТ (большая эффективная площадь для изучения фона несущественна) и, соответственно, невысокое угловое разрешение, с ее помощью можно проводить качественные исследования фона. Для этого необходимо иметь большую чувствительность по яркостной температуре, равномерность отклика на фоновое радиоизлучение в широкой полосе частот, помехоустойчивость, а также знать параметры антенны с высокой точностью (см. п. 2.3). Как следует из предыдущих разделов, субрешетка ГУРТ соответствует этим требованиям, и построение качественных карт фона с ее помощью возможно и актуально. Широкополосные наблюдения позволяют определить распределение яркостных температур, спектральных индексов и сопутствующих параметров. Высокоточные карты могут служить эталоном (калибратором) при измерении энергетических параметров излучения различных объектов на разных радиотелескопах, включая низкочастотные космические, и важны для оценок метagalacticкого фона методами Т-Т диаграмм (см. (п. 3.3)).

3.3. Использование метода Т-Т диаграмм в низкочастотной радиоастрономии

Одной из важных задач галактической и внегалактической радиоастрономии, особенно на низких частотах, является поиск метagalacticкой составляющей в квазиизотропном континуальном

радиоизлучении. Трудность состоит в том, что это излучение достаточно слабое и существенно маскируется галактическим фоном, который очень интенсивен и к тому же крайне неоднороден в пространстве. Одним из методов решения указанной проблемы является так называемый метод Т-Т диаграмм [39, 40]. Он основывается на анализе двумерных графиков, в которых по осям откладываются яркостные температуры $T(f_1)$ и $T(f_2)$ для одних и тех же точек неба, измеренные на двух частотах f_1 и f_2 на одном склонении, но при изменении прямого восхождения выбранного участка неба. Вследствие степенной зависимости яркостных температур в тех областях неба, где спектральный индекс не меняется при изменении прямого восхождения и есть изменение радиояркости (градиент) на выбранном участке, точки на Т-Т диаграмме ложатся на прямую линию, которая образует с одной из осей угол θ :

$$\operatorname{tg} \theta = \Delta T(f_1) / \Delta T(f_2) = (f_2 / f_1)^{\beta_G}, \quad (6)$$

где β_G – дифференциальный спектральный индекс яркостных температур радиоизлучения Галактики.

Галактическому фону, вследствие неізотропности его излучения, на Т-Т диаграмме соответствует точка. Наличие изотропного внегалактического излучения приводит к тому, что продолжение графика будет пересекать ось Т-Т диаграммы не в начале координат, а в точке с температурой, обозначаемой $I(M_0)$. Этот сдвиг зависит от температуры и спектрального индекса внегалактического фона:

$$I(M_0) = T(M_2) \left((f_2 / f_1)^{\beta_M} - (f_2 / f_1)^{\beta_G} \right), \quad (7)$$

где β_M – дифференциальный спектральный индекс яркостных температур Метагалактики.

Из Т-Т диаграмм непосредственно определяется дифференциальный спектральный индекс фонового радиоизлучения Галактики (6). Имея по крайней мере две Т-Т диаграммы для разных частотных пар, т. е. систему из двух уравнений (7) с двумя неизвестными β_M и $T(M)$, можно определить и спектральный индекс, и температуру внегалактического фона при условии, что спектральные индексы галактического и внегалактического фоновых излучений отличаются.

Карты фона, которые могут быть построены с помощью субрешетки ГУРТ, в принципе подходят

для применения метода Т-Т диаграмм. Из п. 3.2 и карты фона (рис. 10), следует, что перепад яркостных температур на карте, зарегистрированный одной секцией УТР-2, составляет порядка 5 дБ. При несколько более широкой диаграмме направленности субрешетки ГУРТ перепад будет 3 ÷ 4 дБ в середине диапазона (см. раздел 4). Этот градиент позволяет применить метод Т-Т диаграмм для уточнения параметров как галактического излучения, так и метагалактического фона. При этом, как следует из рис. 9, для полосы регистрации 60 кГц и времени усреднения 10^3 с (17 мин) относительная точность определения яркостной температуры лучше 10^{-3} .

3.4. Мониторинг эффекта Шкловского

В 1960 г. И. С. Шкловским было предсказано вековое уменьшение плотности потока излучения молодого остатка сверхновой Кассиопея А на стадии его адиабатического расширения [41]. Это предсказание сразу же получило экспериментальное подтверждение в радиодиапазоне на частоте 81 МГц [42]. В последующих работах, выполненных на протяжении нескольких десятилетий, были получены дополнительные сведения о ходе векового уменьшения плотности потока излучения Кассиопеи А.

Вековое уменьшение потока Кассиопеи А не монотонно во времени и неравномерно в разных частотных диапазонах. В диапазоне от 500 до 2000 МГц наблюдается не монотонное вековое уменьшение плотности потока в виде периодических затухающих колебаний с периодом 6 лет [43]. На частоте 38 МГц было обнаружено четыре периода (3.1 ± 0.02 , 5.1 ± 0.3 , 9.0 ± 0.2 и 24 ± 2 года) в периодических затухающих колебаниях [44]. На этой частоте было зарегистрировано также аномальное повышение плотности потока Кассиопеи А на эпоху 1974.8 [45]. По наблюдениям векового уменьшения на разных частотах было установлено, что скорость уменьшения потока зависит от частоты [46]. Это происходит вследствие уменьшения со временем среднего спектрального индекса источника, которое называют явлением эволюции спектра радиоизлучения Кассиопеи А.

Необходимо отметить, что опубликованных данных об эволюции спектра Кассиопеи А на низких частотах (ниже 300 МГц) известно суще-

ственно меньше [43]. В этом диапазоне частот довольно часто применяются относительные методы определения плотности потока радиоизлучения Кассиопеи А, а в качестве опорного радиоисточника в данном случае используется радиогалактика Лебедь А (3С 405). Плотность ее потока неизменна и к тому же наиболее близка по величине к плотности потока исследуемого источника Кассиопея А. В метровом и декаметровом диапазонах длин волн плотность потока Лебеда А, выраженная в янских, описывается соотношением вида [47]:

$$S_{\text{Syg}} = 3.835 \cdot 10^5 \cdot f^{-0.718} \exp(-0.342(21.713/f)^{2.1}),$$

где f – частота наблюдений, МГц.

Кроме того, в работе [47], посвященной эволюции спектра радиоизлучения Кассиопеи А, было показано, что на эпоху 2005.5 спектр Кассиопеи А пересекается со спектром Лебеда А на частоте 55 МГц. При этом в силу эволюции спектра Кассиопеи А эта частота со временем будет уменьшаться. Таким образом, вполне понятно, что диапазон частот вблизи 55 МГц и ниже является очень важным для определения вариаций эволюции спектра радиоисточника Кассиопея А на низких частотах.

Использование интерферометра с малой базой позволяет не учитывать различие угловых размеров наблюдаемых источников, если они существенно меньше диаграммы направленности интерферометра, а также различия значений яркостной температуры галактического фона вблизи наблюдаемых источников. Географическое положение радиотелескопа ГУРТ (49.6° с. ш.) позволяет проводить наблюдения источников Кассиопея А и Лебедь А при почти одинаковом угле места $\sim 81^\circ$ в момент их верхних кульминаций. При такой геометрии эксперимента система управления диаграммой направленности каждой секции [12] обеспечивает одинаковые коэффициенты усиления секций для обоих направлений. Единственный фактор, не позволяющий приравнять поправочный коэффициент к единице, – это ионосферные мерцания.

Как известно, диаграмма направленности двух-антенного корреляционного интерферометра при неподвижных диаграммах направленности двух одинаковых антенн (“косинусная” диаграммы направленности) описывается соотношением:

$$P(\varphi) = E^2(\varphi) \cos((2\pi D/\lambda) \sin \varphi),$$

где φ – угол между нормалью к линии базы и направлением на источник, D – размер базы, $E(\varphi)$ – диаграммы направленности по полю антенны интерферометра. Если диаграмма направленности одной из антенн следит за радиоисточником, то выражение для диаграммы направленности интерферометра можно записать в виде

$$P'(\varphi) = E(\varphi) \cos((2\pi D/\lambda) \sin \varphi).$$

Последний режим полезен, если есть необходимость более точного определения формы диаграммы направленности по полю $E(\varphi)$ антенны интерферометра, включая и боковые лепестки.

Оценка чувствительности интерферометра из двух субрешеток ГУРТ с базой 85 м для источников с потоком излучения порядка 27000 Ян дает расчетное отношение сигнал/шум порядка 100 [48]. Таким образом, несмотря на сравнительно небольшую эффективную площадь субрешетки ГУРТ и очень умеренное время интегрирования, ряд мощных космических радиоисточников можно наблюдать с весьма высокой чувствительностью.

3.5. Спорадическое радиоизлучение Солнца в широком диапазоне частот

Преимуществом наблюдений солнечного радиоизлучения радиотелескопами в широкой полосе частот от 8 до 70 МГц является возможность исследования процессов, которые происходят на высотах от $1.4R_S$ и до $3.4R_S$ (R_S – радиус Солнца) практически одновременно и вызываются одними и теми же источниками излучения: либо пучками высокоэнергетичных электронов, как в случае всплесков III типа, всплесков IIIb типа, U- и J-всплесков, дрейфующих пар, S-всплесков, спайков, либо ударными волнами, которые ответственны за всплески II типа [49]. Что касается всплесков IV типа, которые связывают с корональными выбросами масс (КВМ), то одновременные наблюдения в широкой полосе частот позволяют расширить наше понимание взаимодействия КВМ с корональной плазмой, в которой движется выброс. Другая чрезвычайно важная сторона таких наблюдений заключается в том, что анализ свойств всплесков, таких как длительность всплесков, их скорость дрейфа, частотная шири-

на, поляризация излучения, дают возможность определять параметры корональной плазмы на высотах $1.4R_S \div 3.4R_S$. Нужно отметить, что диагностика корональной плазмы и корональных петель на этих высотах возможна только по радиоизлучению соответствующих всплесков.

Примером могут служить высокие корональные арки, достигающие высот $4R_S \div 6R_S$, температуру плазмы которых удалось определить при анализе задержки в радиоизлучении на частотах 25 и 50 МГц соответственно на первой и второй гармониках U-всплесков при наблюдении на радиотелескопе ГУРТ [50]. Эта задержка связана с разностью времени прохождения излучения соответствующих гармоник в плазме вершины корональных арок [51].

Немаловажный интерес представляет исследование частоты появляемости всплесков U и J типов [52], которые, как известно, являются излучением пучков быстрых электронов из корональных арок, а поэтому наблюдение этих типов всплесков говорило бы о распределении таких арок по высотам в солнечной короне.

Как было показано в работе [53] по изучению скоростей дрейфа мощных всплесков III типа, плотность корональной плазмы на высотах R в интервале $1.75R_S \div 3.4R_S$ подчиняется экспоненциальному закону

$$n(R) = n_0 \exp(-2AR/v_s), \quad (8)$$

где A – коэффициент пропорциональности в зависимости скорости дрейфа от частоты ($\dot{f} = Af$), а v_s – скорость быстрых электронов, генерирующих всплеск III типа. Зависимость (8) является следствием больцмановского распределения частиц по высоте $n(R) \approx \exp(\mu GM_S m_p / (RkT))$ (μ – средний молекулярный вес, G – гравитационная постоянная, M_S – масса Солнца, m_p – масса протона, T – температура), и поэтому коэффициент $A = \mu GM_S m_p v_s / (2R_0^2 kT)$ (R_0 – расстояние, на котором порождается излучение на частоте f_0) определяется температурой плазмы, а, следовательно, эта температура может быть определена из наблюдательных данных. Исследование зависимостей скорости дрейфа от частоты в полосе частот 8 ÷ 70 МГц позволит определить справедливость экспоненциальной зависимости плотности плазмы на высотах $1.4R_S \div 3.4R_S$ и, соответственно, то, как изменяется температура

плазмы на этих высотах. Обнаруженная в работе [53] линейная зависимость скорости частотного дрейфа всплесков III типа от частоты указывает на то, что такая же линейная зависимость скорости дрейфа от частоты будет наблюдаться у всплесков III типа как на второй, так и на третьей гармонике [54, 55]. Наблюдательное подтверждение этого факта может быть получено с помощью радиотелескопов, работающих в широком диапазоне частот 8 ÷ 70 МГц.

Трудно переоценить одновременное наблюдение в широком диапазоне частот трех гармоник излучения всплесков II типа [56]. Во-первых, это позволило бы определить зависимость скорости дрейфа от частоты всех трех гармоник, что дало бы возможность подтвердить или опровергнуть факт экспоненциального распределения плотности короны на высотах $1.75R_S \div 3.4R_S$, который был получен из анализа декаметровых всплесков III типа [53]. Изучение зависимости скорости дрейфа от частоты для этих всплесков в полосе 8 ÷ 70 МГц позволило бы ответить на вопрос, как меняется линейная скорость ударных волн, отвечающих за всплески II типа, с высотой. Во-вторых, это позволило бы сравнить такие свойства тонкой частотно-временной структуры всплесков II типа [57, 58], как длительность субвсплесков, их скорости дрейфа, поляризация, частотная полоса, в которой эти субвсплески наблюдаются, на трех гармониках в рамках плазменного механизма излучения. Как известно, за излучение субвсплесков отвечают пучки электронов, ускоренные на фронте ударных волн, а поэтому параметры излучения говорят о процессах ускорения, которые уже продолжительное время обсуждаются, но пока отсутствует удовлетворительная теория ускорения частиц на фронте бесстолкновительных ударных волн.

В работе [59] было показано, что длительность декаметровых спайков определяется температурой плазмы, из которой выходит их излучение. Исследование зависимости длительности спайков в диапазоне частот 8 ÷ 70 МГц позволит определить, каким образом температура корональной плазмы изменяется с высотой от $1.4R_S$ до $3.4R_S$. Вместе с этим зависимость частотной ширины этих всплесков от частоты определяется тем, как изменяется с высотой магнитное поле и плотность плазмы. Таким образом, свойства спайков позволяют непосредственно диагности-

ровать корональную плазму, т. е. определять температуру, магнитное поле и плотность плазмы.

Как было показано в работе [60], всплески IV типа в декаметровом диапазоне в своем большинстве имеют потоки $10^2 \div 10^3$ солнечных единиц потока. Такие всплески могут быть зарегистрированы не только большими антеннами, такими как УТР-2, LOFAR, NDA, радиотелескопами системы УРАН, но и меньшими антеннами ГУРТ, NenuFAR. Преимуществом этих антенн является одновременное наблюдение всплесков IV типа в широком диапазоне частот, что важно для выяснения того, что именно является источником этих всплесков. На сегодняшний день имеется два претендента – это КВМ, либо достаточно высокие корональные арки. Проведенный анализ колебаний радиоизлучения всплесков IV типа [61] показал, что эти колебания могут быть вызваны колебаниями плазмы альвеновского типа в магнитных арках. Это позволило оценить магнитное поле в арках, которое в вершине арки оказалось равным 0.9 Гс, а в основании арки – 10 Гс. К сожалению, до сих пор не были зарегистрированы тонкие структуры всплесков IV типа в виде U-всплесков или J-всплесков, которые, казалось бы, должны присутствовать, если излучение выходит из корональных арок. В случае, если источником излучения всплесков IV типа является КВМ, представляется возможным говорить о плотностях плазмы в корональных выбросах на различных расстояниях от Солнца, которые легко находятся по частоте излучения в рамках плазменного механизма излучения. Привлечение кинематических и динамических характеристик выбросов, таких как скорость распространения выбросов, их ускорение, расширение, позволит определить магнитное поле, которое удерживает выброс от свободного разлета. Определение магнитного поля возможно также по степени поляризации всплесков IV типа, которая в диапазоне частот $8 \div 32$ МГц довольно большая – доходит до 40 %. Изучение обнаруженных колебаний в радиоизлучении всплесков IV типа в широком диапазоне частот даст возможность найти температуру плазмы в КВМ. Определение всех этих параметров является уникальной возможностью для изучения воздействия КВМ на магнитосферу Земли, т. е. их геоэффективности. Вместе с тем знание параметров плазмы КВМ будет являться дополнительным толчком к пони-

манию физики самого процесса радиоизлучения всплесков IV типа, так как до сих пор ясно только то, что радиоизлучение генерируется с помощью плазменного механизма. Что именно является источником возбуждения плазменной турбулентности, которая необходима для осуществления этого механизма излучения, пока остается непонятным. С этим же механизмом излучения связано исследование в широком частотном диапазоне свойств фибер-всплесков и зебра-структуры, которые являются тонкой структурой всплесков IV типа. Первые, в силу их подобия обычным всплескам III типа, несут информацию о неоднородности плазмы в корональном выбросе, о скорости пучков электронов, ответственных за это излучение, а также о процессах, приводящих к ускорению этих электронов. Свойства зебра-структуры всплесков IV типа определяются величинами и неоднородностями плотности и магнитного поля плазмы [62].

Таким образом, комплексное изучение различных типов радиоизлучения Солнца в широком диапазоне частот дает возможность как диагностировать плазму на высотах от $1.4R_S$ до $3.4R_S$, недоступных для исследований другими методами, так и изучить особенности взаимодействия таких источников излучения, как пучки высокоэнергетичных электронов, ударные волны и КВМ.

3.6. Межпланетные и ионосферные мерцания

Одно из самых перспективных направлений исследований, которые проводятся на новой активной широкополосной решетке ГУРТ, – изучение межпланетных и ионосферных мерцаний космических радиоисточников. Мерцания – это флуктуации интенсивности сигнала космического радиоисточника, вызванные влиянием неоднородностей среды на луче его распространения [63, 64]. Анализ картины мерцаний позволяет эффективно определять как характеристики среды, так и параметры самого излучающего радиоисточника [65]. В случае наблюдений в декаметровом диапазоне радиоволн метод межпланетных мерцаний позволяет, среди прочего, определять параметры солнечного ветра за орбитой Земли, на больших элонгациях от Солнца, где более высокочастотные радиоволны слабо рассеиваются вследствие сильной разреженности межпланетной плазмы [66]. Ввиду сложности интерферометрических иссле-

дований на низких частотах, такие исследования представляют также интерес для независимой оценки угловых размеров просвечивающих радиоисточников [67].

Радиотелескоп ГУРТ предоставляет уникальную возможность проводить исследования межпланетных мерцаний в широкой полосе частот. Это важно, поскольку межпланетные мерцания по своей сути явление широкополосное. Ширина полосы высокой частотной корреляции межпланетных мерцаний (коэффициент корреляции больше 0.8) превышает 10 МГц [5]. Это означает также, что принимаемый сигнал космического радиоисточника может быть просуммирован в полосе частот в десятки мегагерц, что позволит получить широкую эффективную полосу пропускания Δf , а следовательно, достичь высокой чувствительности наблюдений. Оценим минимальный поток излучения S , который должен иметь наблюдаемый радиоисточник, чтобы обеспечить достаточный (более 20 дБ) динамический диапазон спектра мощности межпланетных мерцаний (который необходим для определения параметров солнечного ветра и оценки его углового размера с высокой точностью). Из формулы, которая приведена в работе [68],

$$S = 46 \frac{kT_N}{mA_e} \sqrt{\frac{0.3}{\Delta f}},$$

где m – индекс мерцаний, следует что при $A_e = 350 \text{ м}^2$ (две секции радиотелескопа ГУРТ в режиме перемножения), $m = 0.3$, $T_N = 8 \cdot 10^3 \text{ К}$ и $\Delta f = 70 \text{ МГц}$ плотность потока $S \approx 300 \text{ Ян}$.

По крайней мере один радиоисточник в декаметровом диапазоне радиоволн удовлетворяет этому требованию. Это радиоисточник 3С 144, который ассоциируется с остатком сверхновой 1054 года (поток излучения мерцающей компоненты порядка 1000 Ян). Использование большего числа секций антенной решетки позволяет также наблюдать мощные квазары (с потоком 100 Ян и меньше). Таким образом, непрерывная широкая полоса рабочих частот радиотелескопа ГУРТ может компенсировать небольшую эффективную площадь и позволяет решать актуальные задачи исследований межпланетных мерцаний. К таким задачам следует отнести изучение характеристик межпланетных мерцаний в широкой полосе частот, разработку новых методик опре-

деления параметров межпланетной плазмы и обнаружения крупномасштабных возмущений солнечного ветра. Хорошие перспективы имеют также исследования на радиотелескопе ГУРТ ионосферы Земли методом наблюдения мерцаний ряда радиоисточников: 3С 111, 3С 274, 3С 405, 3С 461 и др.

3.7. Декаметровое радиоизлучение Юпитера

Благодаря своим уникальным свойствам спорадическая нетепловая эмиссия Юпитера в декаметровом диапазоне длин волн занимает особое место среди планетарных излучений. Как известно, Юпитер обладает очень мощным дипольным магнитным полем с магнитным моментом $4.2(R/R_J)^3$ (измеряется в гауссах), $R_J = 71492 \text{ км}$ – радиус Юпитера. Магнитосфера получает свою энергию за счет замедления вращения планеты. Кроме того, Юпитер сам является источником энергичных частиц для межпланетного пространства [69]. Магнитосфера Юпитера подвержена сильным сжатиям, событиям весьма редким для магнитосфер других планет. Галилеев спутник Юпитера Ио глубоко погружен в магнитосферу и образует с ней сложную электродинамическую систему, которая оказывает сильное воздействие на многие физические процессы, происходящие в магнитосферной плазме планеты. Спорадическая декаметровая эмиссия как раз и является результатом взаимодействия системы Юпитер – спутник Ио. Еще на основе первых наблюдений декаметровое радиоизлучение было разделено на два типа: L и S. L-излучение представляет собой шумовую бурю с плавным изменением интенсивности от нескольких секунд и выше, в то время как S-излучение характеризуется значительно меньшими временными масштабами, от нескольких миллисекунд до десятков миллисекунд. Уникальность декаметрового излучения проявляется в необычайном разнообразии частотно-временной структуры, острой направленности излучения и неординарных поляризационных характеристиках. Следует отметить, что S-компонента декаметровой эмиссии представляет собой наиболее мощное планетарное радиоизлучение в Солнечной системе. Мощность этого излучения составляет примерно 10^{12} Вт . Средняя плотность потока на расстоянии 4 а. е. от Юпитера достигает 10^6 Ян , пиковая плотность – 10^7 Ян .

Для объяснения механизма спорадической декаметровый эмиссии в системе Юпитер – спутник Ио принята модель электронно-циклотронного мазера. Предполагается, что излучение возникает вблизи поверхности планеты на магнитных силовых линиях, пересекающих экватор на орбите Ио ($5.9R_J$), на частоте, близкой или равной локальной гиромангнитной частоте электронов, генерирующих это излучение. Прямые измерения магнитного поля Юпитера были проведены с помощью магнитометров, установленных на космических аппаратах “Пионер-10”, “Пионер-11” [70, 71], “Вояджер-1”, “Вояджер-2” [72, 73]. Было показано, что максимальная напряженность поля на северном полюсе составляет 14.4 Гс, на южном – 10.8 Гс. Таким образом, максимальная частота излучения Юпитера в декаметровом диапазоне должна быть равна соответствующей максимальной гирочастоте, связанной при циклотронном механизме генерации с напряженностью магнитного поля B известной зависимостью $f \sim 2.8B$. Для значения $B = 14.4$ Гс высокочастотная граница $f_{\max} \sim 40$ МГц. Эта величина соответствует экспериментальным результатам, полученным как с помощью наземных исследований, так и космических аппаратов (см. рис. 1 в [74]). Нижняя частотная граница декаметровый эмиссии Юпитера предполагается равной ~ 1 МГц.

Уже много лет декаметровый излучение Юпитера активно исследуется с помощью радиотелескопов УТР-2 и УРАН-2. Пример динамического спектра, полученного в ходе таких наблюдений в условиях спокойной ионосферы, приведен на рис. 11. Обнаружено множество новых тонких частотно-временных особенностей спорадического радиоизлучения Юпитера, в частности, в микроструктуре S-всплесков, фарадеевском вращении, модуляционных линиях, форме S-всплесков, зебра-структурах и т. п. [75, 76].

Поскольку верхняя рабочая частота радиотелескопов УТР-2 и УРАН-2 составляет 33 МГц, излучение на более высоких частотах изучено слабо (исключение составляет диапазон радиотелескопа NDA $8 \div 80$ МГц [77, 78]). Вместе с тем, как следует из теоретических оценок и подтверждено экспериментально, максимальная частота спорадического излучения Юпитера достигает 40 МГц и входит в диапазон работы ГУРТ. Хотя площадь этой субрешетки невелика, большая средняя плотность потока ($\sim 10^6$ Ян) делает

достаточно простым обнаружение S- и L-излучения на ней. Как видно из номограммы на рис. 9, при временном и частотном разрешениях 10 мс и 60 кГц соответственно излучение с плотностью потока более 10^4 Ян является обнаружимым. Дополнительным существенным преимуществом субрешетки ГУРТ для наблюдений Юпитера являются также ее поляриметрические возможности.

3.8. Радиоизлучение грозных разрядов в атмосфере Сатурна

Наземные наблюдения молний на Сатурне стали регулярными после первого успешного их детектирования [79, 80] на радиотелескопе УТР-2 [3] и подтверждения результатов наблюдений путем сравнения с данными спутника “Кассини” [81, 82]. Возникновение наибольшего из известных до сего времени шторма [83] в декабре 2010 г. позволило исследовать это явление с беспрецедентным временным разрешением как благодаря большому количеству разрядов и их высокой интенсивности, так и высокой эффективной площади и модернизированному приемному оборудованию радиотелескопа УТР-2. Была открыта сложная временная структура разрядов [84], выявлены вариации спектра молний [85], а также измерено время дисперсионного запаздывания, которое характеризует среду распространения от места возникновения молний до земного наблюдателя. Спектрограмма молний на Сатурне, полученная на УТР-2, в различных временных масштабах приведена на рис. 12.

Столь успешные наблюдения и ценные научные результаты приводят к выводу о том, что при решении астрономических задач в пределах Солнечной системы прогресс в создании новых чувствительных радиотелескопов и регистрирующей аппаратуры может существенно опережать планирование и осуществление космических миссий (ближайший известный проект космического аппарата, который полетит к Сатурну – это Titan Saturn System Mission с планируемым временем достижения системы Сатурна в 2029 г.). Поэтому все измерения тонкой структуры молний на Сатурне в последующие 15 лет будут производиться только наземными низкочастотными радиотелескопами.

А в ближайшее время есть веские основания ожидать появления на Сатурне еще более сильного чем в 2010–2011 гг. шторма. Это связано

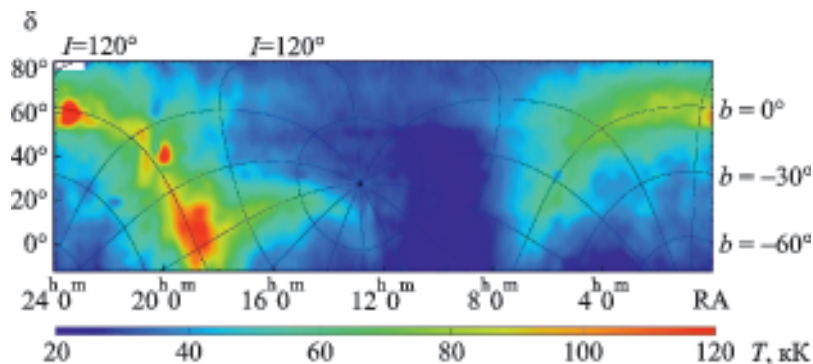


Рис. 10. Карта распределения яркостной температуры Северного неба на частоте 20 МГц. Карта получена путем наблюдения с помощью одной из секций плеча север-юг радиотелескопа УТР-2 и полного радиотелескопа УРАН-2. Ширина луча при зенитном направлении по уровню половинной мощности (RA×δ) составляет ~11°×7°. Карта представлена в экваториальных координатах, наложенных на галактические координаты с шагом в 30°

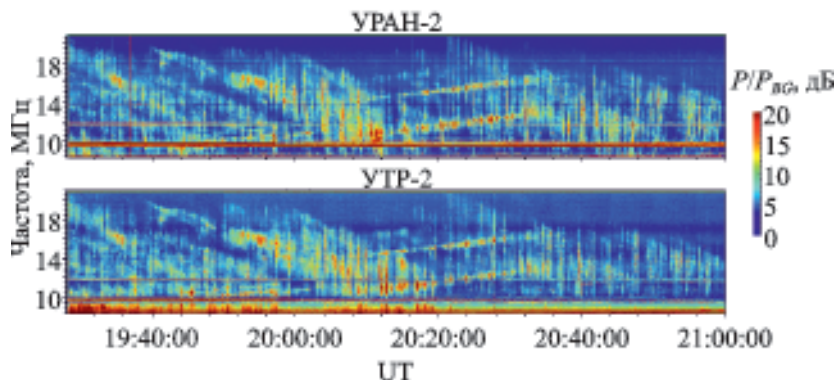


Рис. 11. Синхронные наблюдения Юпитера с помощью радиотелескопов УРАН-2 (верхняя панель) и УТР-2 (нижняя панель) 29 января 2014 г. (P_{BG} – мощность фонового излучения)

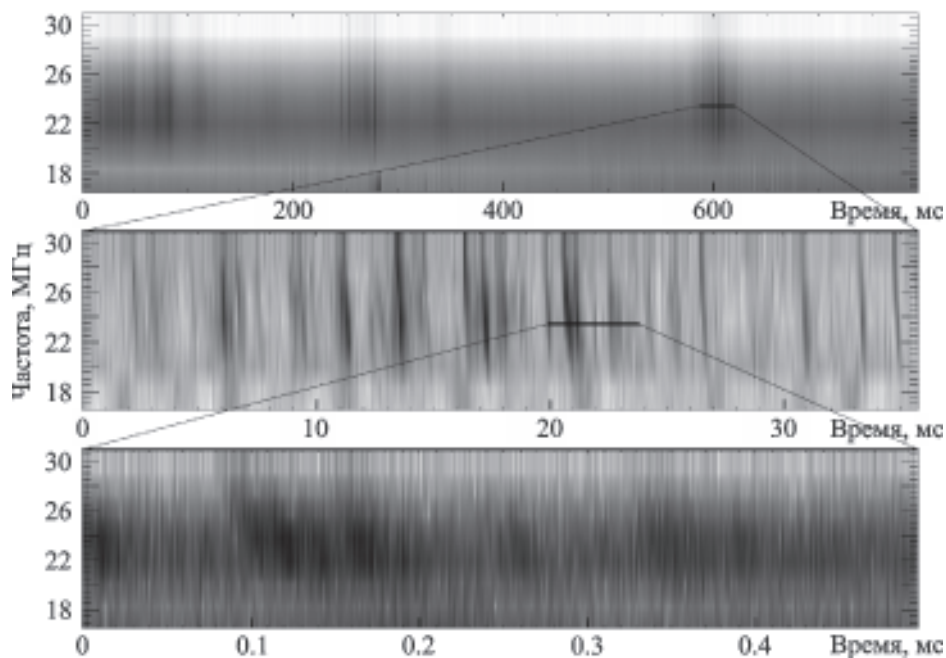


Рис. 12. Спектрограмма молний в атмосфере Сатурна в различных временных масштабах

с регулярно появляющимся Большим белым пятном (Great White Spot) в атмосфере Сатурна, которое наблюдалось в 1876, 1903, 1933, 1960 и 1990 гг., т. е. примерно в одно и то же время один раз за сатурнианский год (29.5 земного года). Продолжая приведенную выше последовательность, можно определить ожидаемое время появления гигантского шторма в 2019 г. Кроме того, по наблюдениям космического аппарата “Кассини” [83] штормы намного вероятнее во время сатурнианских равноденствий (август 2009 г., следующее – через 14.25 года). С ноября 2007 г. по август 2011 г. штормы присутствовали в атмосфере Сатурна около 70 % времени, что в 10 раз больше, чем между равноденствиями, когда “Кассини” начал свои исследования на орбите Сатурна. То есть следующий подобный максимум можно ожидать в 2021–2025 гг. Кроме того, технические особенности уникальной системы двух низкочастотных радиотелескопов УТР-2 и ГУРТ позволяют работать в режиме совместной фазированной “суперрешетки”, поскольку они синхронизируются от одного и того же стандарта времени и частоты. Поэтому при использовании WF режима (а исследования тонкой структуры молний предполагают только такой режим записи) возможно применять взаимное цифровое фазирование сигналов двух радиотелескопов для увеличения достижимой суммарной эффективной площади. С вводом все большего числа субрешеток ГУРТ и увеличением цифровых возможностей вычислительного кластера УТР-2 – ГУРТ (рост объемов дискового пространства и вычислительных мощностей, в том числе с помощью графических процессоров) такой режим будет становиться все более актуальным для исследования все более широкого круга астрофизических задач.

3.9. Радиоизлучение пульсаров в декаметровом и метровом диапазонах волн

Исследования радиоизлучения пульсаров в метровом и декаметровом диапазонах началось практически сразу после обнаружения этих объектов. Уже в самых ранних работах, ставших теперь классическими, [86] проведены оценки средних параметров спектральной плотности потока импульсного радиоизлучения пяти ближайших к земле пульсаров. Данные исследования позволили

выявить общую закономерность, которая, по-видимому, присуща всем пульсарам. Эта закономерность связана с низкочастотным “завалом” спектральной плотности потока импульсов пульсаров. Максимум в спектральной плотности потока импульсов многих пульсаров наблюдается на частотах $60 \div 100$ МГц [87, 88]. В то же время яркостная температура галактического фона, обусловленная синхротронным излучением электронов межзвездной плазмы, продолжает увеличиваться с понижением частоты. Она достигает десятков и сотен тысяч градусов в декаметровом диапазоне (см. п. 3.2). Из-за наличия земной ионосферы, высокого уровня помех природного (грозы) и искусственного (радиопередатчики) происхождения наблюдения слабых радиисточников на частотах ниже 15 МГц можно вести только в ночное время. В метровом диапазоне уровень внешних помех также остается высоким. Источником помех в этом диапазоне в основном являются передатчики диапазона УКВ и телевизионные передатчики.

В силу перечисленных особенностей оба диапазона имеют свою специфику наблюдений и обработки данных. В декаметровом диапазоне существуют значительные трудности для наблюдений. В этом диапазоне даже собственная температура шумов системы приема и регистрации сигналов определяется яркостной температурой галактического фона [89]. Поэтому ее принципиально невозможно уменьшить. Следующей особенностью обоих диапазонов является влияние всех известных эффектов распространения на регистрируемое радиоизлучение. С понижением частоты эффекты распространения наблюдаются все более контрастно. К эффектам распространения относятся: дисперсионное запаздывание радиоизлучения в зависимости от частоты при распространении сигналов в межзвездной плазме, межпланетной плазме и ионосфере; пространственное и временное рассеяние излучения на электронах среды распространения; мерцания зарегистрированного излучения при его рассеянии на неоднородностях электронной концентрации межзвездной, межпланетной и ионосферной плазмы; вращение плоскости поляризации при распространении радиоизлучения в слабо анизотропной среде – эффект Фарадея.

Следует отметить, что пионерские исследования пульсаров, которые велись в данных диапазо-

нах в 70-х гг. прошлого столетия, принципиально отличались от современных исследований тех же объектов. Во-первых, полоса частот, доступная для исследований на УТР-2 в 1970–1980 гг., составляла всего 300 кГц. Она была расширена вдвое в 1984 г. и оставалась таковой до 1999 г. Выбранная полоса могла быть сплошной или рассредоточенной в диапазоне работы УТР-2, но в обоих случаях ширина полосы лимитировала потенциальную чувствительность радиотелескопа. В метровом диапазоне наибольшее число исследований пульсаров было проведено в Пушинской радиоастрономической обсерватории на радиотелескопах ДКР-1000 и БСА ФИАН [90]. На обоих радиотелескопах также не было сплошной полосы приема и регистрации. Во-вторых, динамический диапазон регистрирующей аппаратуры прошлого века был ограничен 8-битовым словом (это соответствует 24 дБ динамического диапазона по входному сигналу).

Регистрация радиоизлучения пульсаров предусматривала супергетеродинную технику приема и запись только протектированных компонент излучения. Радиосигналы не могли регистрироваться из-за ограниченных возможностей компьютеров того времени. Разрешающая способность по времени также была ограничена и, как правило, не превышала 10 мс.

Перечисленные ограничения природного и технического характера существенно сужали круг решаемых задач и повышали требования к радиотелескопам, с помощью которых велись наблюдения пульсаров. Так, КНД антенн радиотелескопа должен был быть высоким, что позволяло обеспечить большую пространственную фильтрацию помех и одновременно увеличивало эффективную площадь радиотелескопа. Тем самым увеличивалась чувствительность и устранялась значительная часть помех еще до начала обработки. Повышение чувствительности достигалось также за счет накопления периодически повторяющихся импульсов пульсаров. Это требовало относительно длительного слежения радиотелескопа за пульсаром.

В настоящее время на радиотелескопах УТР-2 и ГУРТ используются 16-битные регистраторы. Динамический диапазон радиотелескопов по комбинационным составляющим помех третьего порядка достигает 100 дБ к микровольту, что обес-

печивает в полосе приема 4 кГц динамический диапазон по собственному шуму около 110 дБ. Аппаратное временное разрешение составляет 6.25 нс. Более того, расширение технических возможностей приводит к появлению новых задач, которые успешно решаются в обоих диапазонах [91–100].

Ниже кратко перечислены те задачи в области исследования радиоизлучения пульсаров в метровом и декаметровом диапазонах, которые могут быть решены на одной решетке радиотелескопа ГУРТ.

Одной из важнейших задач, которая может быть решена с использованием решетки ГУРТ, является задача оценки средней спектральной плотности потока импульсной (а возможно и непрерывной) компоненты радиоизлучения пульсаров во всем диапазоне рабочих частот радиотелескопа. Решение данной задачи основывается на возможности не только длительного, но и относительно широкополосного накопления регистрируемых импульсов пульсаров.

Второй задачей в области исследования пульсаров, которая может быть решена с помощью одной решетки ГУРТ, может быть задача анализа долговременных флуктуаций меры дисперсии. Эта задача относится не только к самим пульсарам, но и к среде распространения их излучения. Ее решение обусловлено тем, что время дисперсионной задержки радиоизлучения между различными частотами $\Delta\tau(\text{DM}, f_H, f_L)$ достаточно велико. Это запаздывание отсутствует вблизи пульсара. Но оно возникает при распространении радиоизлучения пульсаров в межзвездной среде и определяется простой формулой:

$$\Delta\tau(\text{DM}, f_H, f_L) = \frac{\text{DM}}{2.41} \left(\frac{1}{f_L^2} - \frac{1}{f_H^2} \right),$$

$$\text{DM} = \int_0^L n_e(l) dl,$$

где DM – мера дисперсии, $\text{пк} \cdot \text{см}^{-3}$; f_H^2, f_L^2 – верхняя и нижняя частоты, МГц (значения частот составляют сотни мегагерц); L – расстояние до пульсара; $n_e(l)$ – локальная концентрация электронов на луче зрения в среде распространения.

Можно видеть, что при распространении на сотни парсеков (для характерного значения

DM = 10 пк · см⁻³) задержка между временем прихода импульса на частотах 70 и 20 МГц составляет 95.27 с. Если при этом временное разрешение составляет Δτ_S = 1 мс, то относительная точность определения меры дисперсии даже при использовании постдетекторного метода ее компенсации составляет Δτ_S/Δτ = 1 · 10⁻³/95.27 ≈ 1 · 10⁻⁵. Такой точности достаточно для исследования не только межзвездной плазмы, но и межпланетной плазмы [84, 85]. Выбранное нами временное разрешение Δτ_S = 1 мс вполне приемлемо, т. к. оно соизмеримо с характерными значениями постоянной времени рассеяния для самых близких пульсаров в данном диапазоне частот. Заметим, что если для анализа использовать нижнюю частоту 10 МГц, то точность определения данного параметра улучшается на порядок: Δτ_S/Δτ ≈ 1 · 10⁻⁶. Этого уже достаточно даже для оценки флуктуаций электронного содержания в столбе ионосферы непосредственно на луче зрения радиотелескопа [101, 102].

Третья задача, которая может быть решена с помощью решетки ГУРТ, по своей постановке аналогична второй. Однако она связана с определением долговременных флуктуаций меры вращения плоскости поляризации. Наличие таких флуктуаций обнаружено на радиотелескопе LOFAR [103]. Данные флуктуации в настоящее время связывают с флуктуациями параметров ионосферы и магнитосферы Земли. Возможно, что увеличение точности в определении меры вращения позволит обнаружить долговременные флуктуации межпланетной и/или межзвездной составляющих в мере вращения.

Покажем, какой точности можно достичь в определении меры вращения. Мера вращения характеризует эффект Фарадея. Угол φ(λ), на который поворачивается данная плоскость, зависит от длины λ излучаемой волны. Он может быть определен из уравнения:

$$\phi(\lambda) = \text{RM} \cdot \lambda^2, \quad \text{RM} = \int_0^D n_e(l) \cdot \vec{B}(l) d\vec{l}, \quad (9)$$

где RM – мера вращения, $\vec{B}(l)$ – локальный вектор магнитной индукции вдоль луча зрения, \vec{l} – единичный вектор, направленный по касательной к лучу зрения.

Предположим, что сплошной частотный диапазон радиотелескопа ГУРТ позволит обеспечить

непрерывность восстановления разности фаз Δφ(λ_L, λ_H) в уравнении, вытекающем из (9):

$$\Delta\phi(\lambda_L, \lambda_H) = \text{RM} \cdot (\lambda_L^2 - \lambda_H^2), \quad \lambda_{L,H} = c/f_{L,H},$$

где λ_{L,H} – длины волн, соответствующие нижней f_L и верхней f_H частотам диапазона ГУРТ; c – скорость света.

Если положить, что точность определения относительной фазы составляет 5.7° (Δφ_a ≈ 0.1), тогда относительная точность в определении долговременных флуктуаций меры вращения составляет Δφ_a/Δφ(λ_L, λ_H). Для характерного значения MD = 10 рад · м² относительная точность ее оценки (оценки ее флуктуаций) между частотами 70 и 20 МГц составит ≈ 5 · 10⁻⁵. Это соизмеримо с относительной точностью измерения меры дисперсии.

Поскольку оба параметра (мера вращения и мера дисперсии) измеряются независимыми методами, их совместный анализ позволяет разделить флуктуации средних значений электронной концентрации на луче зрения и флуктуации средних значений той составляющей вектора магнитной индукции, которая параллельна лучу зрения. Безусловно, обе задачи и совместный анализ результатов, полученных при их решении, являются важными с точки зрения астрофизики.

Четвертая задача связана с оценкой поляризационных параметров средних профилей радиоизлучения пульсаров. Методики такой оценки применительно к метровому и декаметровому диапазонам разработаны в работе [104]. Имеются все основания для постановки и решения такой задачи с использованием решетки ГУРТ, т. к. решетка сконструирована из элементов, состоящих из двух ортогональных диполей. Эта задача весьма актуальна, поскольку информация о поляризационных параметрах радиоизлучения пульсаров в низкочастотном диапазоне практически отсутствует.

Таким образом, кратко рассмотрены четыре основных задачи, которые могут быть решены при наблюдении пульсаров на уединенной субрешетке ГУРТ. Безусловно, можно определить еще несколько вспомогательных задач аналогичного плана. Однако решение даже одной из перечисленных задач будет достаточно важным с точки зрения обогащения наших знаний о радиоизлучении пульсаров в метровом и декаметровом диапазонах.

3.10. Сверхширокополосные наблюдения рекомбинационных радиолиний в межзвездной среде

Рекомбинационные радиолинии высоковозбужденных межзвездных атомов углерода, открытые в декаметровом диапазоне с помощью радиотелескопа УТР-2 около 40 лет назад, дали новый метод диагностики холодной частично ионизированной космической плазмы. Стало возможным высокоточное определение основополагающих параметров среды: температуры, плотности, давления, лучевых скоростей, степени ионизации, механизмов ионизации и рекомбинации и др. [105, 106]. Обнаружение рекордно высоких состояний ридберговских атомов вплоть до главных квантовых чисел 1030 в диапазоне от 12 до 30 МГц важно не только для астрофизики, но и для физической науки в целом [107–109].

Указанный результат стимулировал большое количество теоретических и экспериментальных исследований на различных радиотелескопах, включая LOFAR [1, 2, 109]. Вместе с тем до настоящего времени радиотелескоп УТР-2 остается наиболее эффективным для проведения подобных исследований в силу множества его положительных свойств [3, 110]. В качестве регистрирующей спектральной аппаратуры радиотелескопа УТР-2 хорошо себя зарекомендовали цифровые знаковые корреляторы [111]. В настоящее время в обсерватории используется 4096-канальный анализатор. В последние годы в связи с прогрессом цифровой и компьютерной техники стало возможным создание и применение много-разрядных широкополосных цифровых приемников. На рис. 13 показан спектр мощности, полученный на УТР-2 с помощью приемника DSPZ [112] в направлении Кассиопеи А в диапазоне 20 ÷ 30 МГц. Отчетливо видна серия линий поглощения в количестве около 100. Столь большое число одновременно наблюдаемых линий в широкой полосе имеет исключительное значение как при исследованиях на УТР-2, так и на субрешетках ГУРТ, что будет показано ниже.

Как известно, частоты рекомбинационных радиолиний определяются формулой Ридберга:

$$f = R \left(1 - \frac{m}{M} \right) c Z^2 \left[\frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n + \Delta n)^2} \right], \quad (10)$$

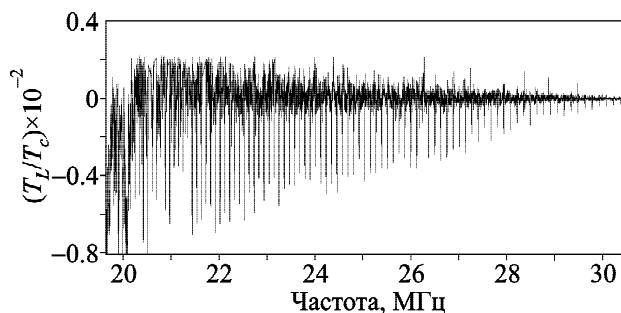


Рис. 13. Рекомбинационные радиолинии углерода, зарегистрированные в направлении Кассиопеи А. Измерения проводились с использованием плеча север-юг радиотелескопа УТР-2

где R – постоянная Ридберга, m и M – массы электрона и атома, c и Z – скорость света и заряд ядра, n и Δn – главное квантовое число и его изменения.

На низких частотах ($f < 100$ МГц) относительная интенсивность линий определяется как

$$\frac{\Delta T_L}{T_C} = -\tau_L b_n \beta_n.$$

Здесь τ_L – равновесная оптическая толщина [113],

$$\tau_L = 1.92 \cdot 10^3 \frac{N_e^2 S}{\Delta f_D T_e^{5/2}} \left(1 + 1.48 \frac{\Delta f_P + \Delta f_R}{\Delta f_D} \right),$$

где T_e , N_e , S – электронная температура, плотность и длина пути соответственно, Δf_P – столкновительная ширина,

$$\Delta f_P \approx 7 \cdot 10^{-3} \frac{N_e n^4}{T_e^{3/2}} \ln \frac{1+q}{(2z+z^2)(1.4n+qn)},$$

$z = 2.1 + 1.5q$, $q = 1.58 \cdot 10^5 / n T_e$, Δf_R – радиативное уширение,

$$\Delta f_R \approx 7.6 \cdot 10^{-17} n^{5.8},$$

Δf_D – доплеровское уширение; b_n – коэффициент неравновесности;

$$\beta_n = 1 - \left(\frac{k T_L}{h f} \right) \left(\frac{d l_n b_n}{d n} \right), \quad (11)$$

h – постоянная Планка.

Во многих случаях удобно использовать интегральную интенсивность линий:

$$I_L = \int_P (\Delta T_L / T_c) df \approx 2 \cdot 10^6 \frac{N_e^2 S b_n \beta_n}{T_e^{5/2}}. \quad (12)$$

Наблюдаемая интенсивность линий отличается от реальной, определяемой физическими условиями в межзвездном облаке, т. е. [108, 109]

$$(\Delta T_L / T_c)_{\text{obs}} = (\Delta T_L / T_c)_{\text{real}} = -\tau_L b_n \beta_n \quad (13)$$

при $T_S \gg T_B$ (T_S – яркостная температура фонового компактного радиоисточника, например Кассиопеи А, T_B – яркостная температура фона за исследуемым облаком).

В случае $T_S \ll T_B$ (мощного компактного источника нет) имеем

$$(\Delta T_L / T_c)_{\text{obs}} = (\Delta T_L / T_c)_{\text{real}} (\Omega_{cl} / \Omega_a) (T_B / (T_B + T_F)), \quad (14)$$

где Ω_{cl} , Ω_a – телесные углы исследуемого облака и антенны соответственно, T_F – яркостная температура фона перед исследуемым облаком.

При сравнительно небольшой площади субрешетки ГУРТ антенная температура, обусловленная источником Кассиопея А, будет на ~1 дБ превышать температуру фона, основным источником “подсветки” будет галактический фон. Как следует из наблюдений УТР-2, угловой размер области, создающей линии, составляет ~10°×10°. Размер диаграммы направленности ГУРТ (раздел 2) составляет ~20°×20°, что с учетом (14) приводит к $\Omega_{cl} / \Omega_a \approx 0.25$, а наблюдаемая относительная интенсивность линии, измеренная на ГУРТ, будет в 4 раза меньше той, которая измеряется на УТР-2 (13).

Интенсивность линий вблизи 30 МГц составляет $4 \cdot 10^{-3}$ [107] согласно данным УТР-2. Та же область даст интенсивность $1 \cdot 10^{-3}$ при ее исследованиях с помощью субрешетки ГУРТ. На основании приведенных выше соотношений легко показать, что относительная интенсивность линий в диапазоне 10 ÷ 70 МГц будет изменяться от $0.3 \cdot 10^{-3}$ до $0.5 \cdot 10^{-3}$ с максимумом в районе 30 МГц. Уменьшение интенсивности на низких частотах обусловлено влиянием столкновительного и радиативного (до 50 кГц), а на высоких – доплеровского (~20 кГц) уширения. С точки зрения обнаружимости более важной является интегральная интенсивность (12), она определяется только физическими пара-

метрами и коэффициентом $b_n \beta_n$ (11). В случае диэлектронной рекомбинации он достигает ~100 ($N_e \sim 0.01 \text{ см}^{-3}$, $T_e \sim 100 \text{ К}$) вблизи 100 МГц, и ~15 на 70 МГц (соответственно $(I_L)_{\text{obs}}$ изменяется от ~10 до ~1.5 с⁻¹).

Чтобы оценить обнаружимость обсуждаемого эффекта на ГУРТ необходимо учесть исключительно важную особенность явления рекомбинационных линий, свойственную именно нижним частотам. Эта особенность заключается в резком “сгущении” серии линий, т. е. существенном увеличении их количества в заданной полосе (см. рис. 13).

Легко показать, что на низких частотах расстояние между линиями определяется как

$$\Delta f \approx \frac{6RcZ^2 \Delta n}{n^4} \approx \frac{3f}{n}.$$

Так, вблизи частоты 30 МГц ($n=600$) $\Delta f \approx 150 \text{ кГц}$. Тогда в диапазоне $B=60 \text{ МГц}$ (10 ÷ 70 МГц) количество линий составит $Q = B / \Delta f \approx 400$.

Значения частот линий (а именно для углерода и водорода линий α ($\Delta n=1$), β ($\Delta n=2$), и γ ($\Delta n=3$)) легко рассчитываются по формуле (10). В табл. 2 представлены результаты расчетов частот для верхнего и нижнего краев частотного диапазона ГУРТ по 10 главных квантовых чисел.

Во всем диапазоне частот ГУРТ главные квантовые числа для линий S_{na} лежат в интервале от $n=454$ ($f=70.078463 \text{ МГц}$) до $n=869$ ($f=10.008678 \text{ МГц}$).

Столь огромное количество линий в рабочем диапазоне ГУРТ дает возможность беспрецедентного увеличения чувствительности измерений (ранее одновременно наблюдалось не более двух десятков линий). При времени накопления сигнала порядка 10^3 с (разрешение 6 кГц) относительная чувствительность достигает $0.4 \cdot 10^{-3}$, что недостаточно для наблюдения линий с интенсивностью ~ $0.3 \cdot 10^{-3}$. Однако увеличение количества одновременно наблюдаемых линий с их последующим усреднением эквивалентно увеличению времени накопления сигнала во столько же раз. То есть при наблюдении и усреднении 400 линий чувствительность улучшается в 20 раз и достигает $2 \cdot 10^{-5}$, что вполне достаточно для детектирования радиолний с низкой интенсивностью.

Таблица 2. Номера и расчетные значения частот рекомбинационных радиолиний углерода и водорода на краях рабочего диапазона ГУРТ

n	$H_{n\alpha}$ f , MHz	$C_{n\alpha}$ f , MHz	n	$C_{n\beta}$ f , MHz	n	$C_{n\gamma}$ f , MHz
454	70.043499	70.078463	571	70.312047	654	70.079806
455	69.583192	69.617926	572	69.944562	655	69.760049
456	69.126909	69.161416	573	69.579633	656	69.442234
457	68.674607	68.708888	574	69.217238	657	69.126346
458	68.226243	68.260300	575	68.857356	658	68.812372
459	67.781773	67.815608	576	68.499964	659	68.500296
460	67.341155	67.374770	577	68.145041	660	68.190104
461	66.904349	66.937745	578	67.792566	661	67.881782
462	66.471311	66.504492	579	67.442518	662	67.575317
463	66.042003	66.074970	580	67.094875	663	67.270693
...
860	10.320865	10.326017	1085	10.273689	1243	10.240543
861	10.284967	10.290101	1086	10.245361	1244	10.215897
862	10.249234	10.254350	1087	10.217137	1245	10.191329
863	10.213667	10.218766	1088	10.189017	1246	10.166841
864	10.178265	10.183345	1089	10.160999	1247	10.142431
865	10.143025	10.148089	1090	10.133084	1248	10.118098
866	10.107949	10.112994	1091	10.105271	1249	10.093844
867	10.073034	10.078062	1092	10.077560	1250	10.069667
868	10.038279	10.043290	1093	10.049951	1251	10.045567
869	10.003684	10.008678	1094	10.022442	1252	10.021545

Увеличение времени работы телескопа до 10^5 с (это также реально) дает высокую относительную чувствительность при спектральных исследованиях – до $2 \cdot 10^{-6}$.

Таким образом, описанные параметры субрешетки ГУРТ позволяют проводить поиск и исследование низкочастотных рекомбинационных линий на новом качественном уровне. Это относится не только к линиям $C_{n\alpha}$ ($n = 454 \div 869$), но и к $H_{n\alpha}$, $C_{n\beta}$ ($n = 571 \div 1094$), $C_{n\gamma}$ ($n = 654 \div 1252$) в направлении Кассиопеи А, но и ко многим другим областям Галактики.

3.11. Поиск космологических эффектов, связанных с линией нейтрального водорода в ранней Вселенной для больших красных смещений

Как известно, космология является одним из важнейших разделов астрономии, поскольку изучает фундаментальные проблемы происхождения и эволюции Вселенной. В то же время экспериментальные исследования в области космологии стал-

квиваются со значительными трудностями, особенно в поиске прямых (а не косвенных) доказательств космологических явлений. Среди таких доказательных фактов следует назвать прежде всего обнаружение Э. Хабблом красного смещения (расширения Вселенной) и открытие А. Пензиасом и Р. Вилсоном реликтового радиоплучения (Большой взрыв и горячая Вселенная). Безусловно, после Большого взрыва в нашей Вселенной существовало много специфических явлений, которые ждут своего открытия. Среди них в первую очередь следует отметить появление ряда спектральных особенностей, связанных с линией нейтрального водорода с длиной волны 21 см (частота 1420 МГц), но из-за большого красного смещения ($z > 100$) попадающих в низкочастотный диапазон $20 \div 200$ МГц. В ранние эпохи существования Вселенной неоднократно происходили процессы нагрева и ионизации первичного вещества (в основном водорода), его последующего охлаждения и рекомбинации, поэтому возможно появление линий поглощения нейтрального водорода для разных z . Как показывают теорети-

ческие работы, возможно появление как минимум трех линий поглощения HI, смещенных на частоты около 20, 50 и 150 МГц [114].

Источником “подсветки” для таких линий поглощения является реликтовое радиоизлучение, возникшее на раннем этапе эволюции Вселенной ($z \sim 1000$, яркостная температура $T_{RB} \sim 3$ К) и потому присутствующее во всех направлениях пространства. Однако, с другой стороны, это говорит о том, что абсолютное значение интенсивности линии поглощения не может быть более $\Delta T_L \sim 3$ К. Кроме того, ширина спектральных линий поглощения, так же как и точные частоты компонентов достоверно не известны (это является предметом изучения). К тому же, как известно, температура галактического фона на низких частотах доминирует ($T_{GB} \sim 30000$ К на частоте 30 МГц), что дает относительную интенсивность ожидаемых линий крайне низкой:

$$\Delta T_L / T_B \leq 3 / (3 \cdot 10^4) = 10^{-4}.$$

Реально, видимо, это отношение будет на 1–2 порядка меньше, т. е.

$$\Delta T_L / T_B = 10^{-5} \div 10^{-6}.$$

Понятно, что столь слабый эффект обнаружить крайне сложно, однако следует помнить, что поиски спектральных линий с методической точки зрения являются относительными измерениями, которые обеспечивают гораздо более высокие точности, чем абсолютные.

Оценим минимально необходимое время накопления сигнала Δt для измерений с относительной точностью $\varepsilon \sim 10^{-6}$ при ширине искомой спектральной компоненты (для частотного разрешения $\Delta f \sim 10^6$ Гц):

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta f \varepsilon^2} \approx 10^6 \text{ с} \approx 300 \text{ ч}.$$

Для получения отношения сигнал/шум равным хотя бы трем, необходимое время накопления должно составить 3000 ч. Это около 100 суток непрерывных наблюдений, что непросто организовать при использовании крупных антенн со слежением за определенной областью неба.

Необходимо отметить, что представленные в предыдущем разделе исследования рекомбинационных линий с методической точки зрения ана-

логичны описываемым. Эти измерения также являются относительными, однако высокая чувствительность ($\sim 10^{-5}$ относительно фона), несмотря на малую ширину полосы (~ 3 кГц), обеспечивается за счет одновременного наблюдения огромного количества линий (от десятков до сотен), что в такое же количество раз увеличивает эффективное время накопления.

В то же время задача поиска “реликтовых” низкочастотных космологических спектральных линий, особенно с помощью небольших широкополосных чувствительных по температуре поляризованных помехоустойчивых многосекционных антенн (как в системе ГУРТ), позволяет по-новому поставить соответствующие эксперименты, учитывая астрофизические и аппаратно-методические особенности. В частности, искомый эффект должен быть квазиизотропным (фоновым) по всем направлениям пространства (подобно континуальному реликтовому радиоизлучению), поэтому не требуется применение высоконаправленных антенн (достаточно пространственной селекции $\sim 10^\circ \div 30^\circ$). Во-вторых, не требуется слежение за отдельной областью неба (как за дискретным источником), достаточно применять неподвижную диаграмму направленности, например, направленную в зенит, т. е. возможна круглосуточная работа с непрерывным получением данных. В силу фонового (пространственно и поляризационно декоррелированного) характера данного типа радиоизлучения возможно усреднение энергетических спектров двух поляризаций (эквивалентно увеличению времени наблюдений вдвое). Усреднение спектров, полученных с помощью отдельных субрешеток (например, при использовании уже построенных субрешеток ГУРТ в случае их полного оснащения спектроанализаторами), также в соответствующее число раз увеличивает эффективное время накопления.

Таким образом, реально необходимое время непрерывных наблюдений на субрешетках ГУРТ будет в ~ 20 раз меньше и составит около пяти суток, что вполне осуществимо. С другой стороны, изотропное распределение искомого эффекта затрудняет применение методов сравнения (например, ON-OFF режим) для надежной идентификации полезного спектрального компонента. При постановке данной задачи на радиотелескопе ГУРТ (8 ÷ 80 МГц), способном осуществ-

лять поиск компонентов вблизи частот 20 и 50 МГц, а также на радиотелескопах УТР-2 и УРАН (8 ÷ 32 МГц), с помощью которых возможен поиск вблизи частоты 20 МГц, предлагается новый метод сравнения. Он основан на том, что фон Галактики изменяется по небу в больших пределах (при зенитной ориентации диаграммы направленности ГУРТ за счет суточного вращения Земли температура фона T_{GB} изменяется на ~ 4 дБ, т. е. в 2.5 раза), тогда как реликтовый фон T_{RB} и искомый эффект изотропны. Истинная интенсивность искомой линии НИ относительно реликтового фона составит $\Delta T_L/T_{RB}$, что не превышает единицы. Как показано в предыдущем разделе, при наличии “переднего” фона (это есть именно галактический фон) относительная интенсивность линии составит

$$(\Delta T_L/T_{RB})_{obs} = (\Delta T_L/T_{RB})(T_{RB}/(T_{RB} + T_{GB})).$$

Поскольку $T_{GB} \gg T_{RB}$, а $T_{GB(max)} \approx 2.5T_{GB(min)}$, имеем

$$\frac{(\Delta T_L/T_{RB})_{obs(max)}}{(\Delta T_L/T_{RB})_{obs(min)}} = 2.5$$

при практически полном подобию нормированных спектров в полосе анализа для измерений в направлениях минимума и максимума фона. При вычитании этих спектров должна однозначно выделиться искомая линия. Хотя интенсивность разностной линии будет примерно вдвое меньше, отсутствие паразитных спектральных эффектов и резервы увеличения времени накопления дают

высокий шанс надежного обнаружения реликтовой линии НИ на субрешетках ГУРТ.

4. Предварительные результаты наблюдений на 25-элементных субрешетках ГУРТ

Малоразмерные антенные решетки являются частями более крупных радиотелескопов и по сути не являются отдельными инструментами. При этом при поэтапном вводе в эксплуатацию субрешеток радиотелескопа с их помощью возможно проводить важные астрофизические исследования.

Исходя из предыдущего анализа, из всего спектра задач, которые решает декаметровая радиоастрономия с помощью крупных радиотелескопов, таких как УТР-2 и система УРАН, можно выделить достаточно широкий круг задач (рис. 14), которые могут быть решены с помощью малоразмерных радиоастрономических инструментов.

В настоящее время с помощью субрешеток ГУРТ получены следующие результаты. Мощные источники спорадического радиоизлучения, такие как Солнце, Юпитер, наблюдаются и как тестовые источники, и с целью широкополосного исследования их излучения. Проводятся регулярные калибровочные измерения суточного изменения галактического фона при направлении луча секции ГУРТ в зенит. Получены также первые важные результаты: осуществлены детектирование пульсаров, точное измерение векового изменения потока источника Кассиопея А (эффект

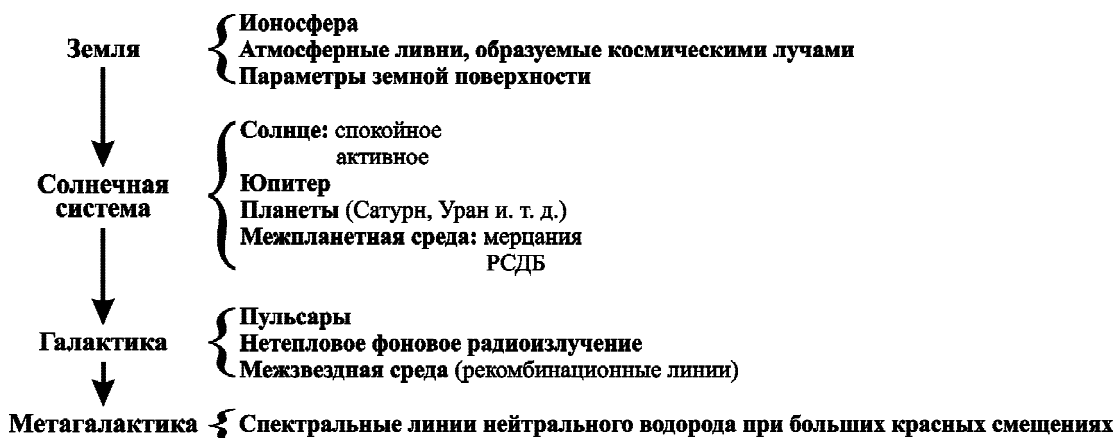


Рис. 14. Объекты исследований, доступные для изучения с помощью малоразмерных низкочастотных радиоастрономических инструментов

Шкловского), наблюдение мерцаний мощных радиоисточников на ионосферной и межпланетной плазме.

На рис. 15 показан отклик субрешетки ГУРТ в дневное и ночное время при зенитной ориентации луча. Нижние графики соответствуют уровню шумов системы при режиме короткого замыкания на входных клеммах всех антенных усилителей субрешетки. Равномерное превышение шумов АЦП существует в полосе частот от 20 до 70 МГц. Важно также отметить, что помеховая обстановка в ночное время позволяет проводить высококачественные наблюдения на частотах выше 15 МГц. Высокое частотное разрешение приемника ADR и динамический диапазон всей системы в целом позволяет вести запись и

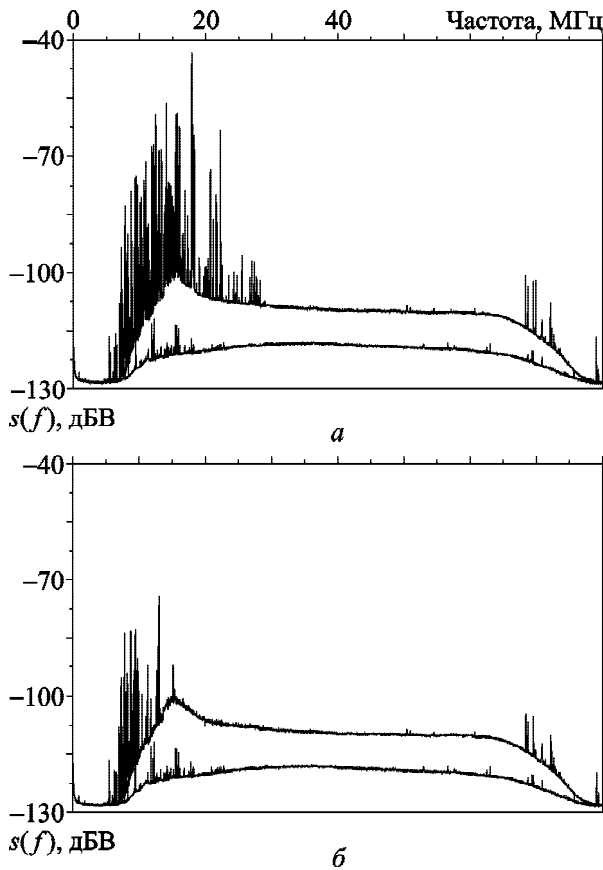


Рис. 15. Спектры сигнала субрешетки ГУРТ, направленной в зенит для дневного (а) и ночного (б) времени суток (верхние графики). Мощность указана в децибелах относительно максимального значения мощности, которое способно оцифровать АЦП. Нижний график на каждом рисунке показывает уровень внутренних шумов системы (входные клеммы антенных усилителей в режиме короткого замыкания)

в диапазоне частот от 8 до 30 МГц в частотных каналах, свободных от помех.

Радиоастрономическое тестирование субрешетки было проведено путем записи галактического фона в течение суток при зенитном положении луча решетки. На рис. 16. показана запись суточного хода для всей субрешетки и для одного диполя. Максимальный перепад составляет 2.8 дБ для субрешетки и 2.5 дБ для диполя.

Для оценки чувствительности были проведены одновременные измерения на субрешетке ГУРТ и западном плече УТР-2 суточного хода луча со склонением, соответствующим склонению источника 3С 405. Результаты представлены на рис. 17. Из рисунка видно, что фон, записанный на субрешетке ГУРТ, отличается не более чем на 0.5 дБ от фона, полученного с помощью антенны, имеющей в 24 раза больше диполей. Это показывает очень небольшой вклад собственных шумов антенных усилителей субрешетки ГУРТ.

Излучение всплесков на Солнце – самое мощное и при этом широкополосное излучение в декаметровом диапазоне длин волн, которое можно зарегистрировать наземным радиотелескопом. Наблюдение солнечной активности является хорошим тестом для малоразмерных субрешеток

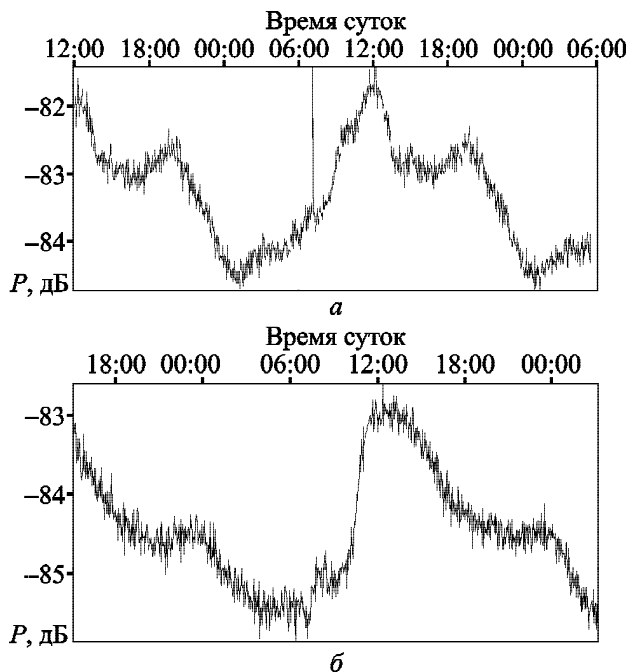


Рис. 16. Изменение антенной температуры субрешетки ГУРТ (а) и одного диполя ГУРТ (б) за сутки на частоте 65 МГц



Рис. 17. Суточная зависимость интенсивности радиоизлучения фона Галактики в направлении точки кульминации радиоисточника 3С 405, полученная с помощью западного плеча УТР-2 и субрешетки ГУРТ

радиотелескопов нового поколения, к тому же, как было указано, совместные наблюдения с радиотелескопом УТР-2, параметры которого хорошо известны, позволяет более объективно оценить возможности субрешетки. На рис. 18 приведены динамические спектры совместных наблюдений солнечных всплесков типов ШЬ-Ш и Ш. Наблюдения на УТР-2 проводились в полосе частот $8.25 \div 33$ МГц с частотным и временным разрешениями 4 кГц и 100 мс соответственно. Запись на субрешетке ГУРТ велась в диапазоне $8 \div 80$ МГц с тем же разрешением по времени и разрешением по частоте 20 кГц. На рисунке представлены динамические спектры для двух линейных поляризаций радиотелескопа ГУРТ, что добавляет информативности полученным данным.

Еще одно событие на Солнце, зарегистрированное одновременно на двух радиотелескопах, — всплеск II типа (рис. 19), который обладает практически всеми характерными чертами данного типа всплесков: длительность всплеска порядка 5 мин, медленный частотный дрейф, наличие второй гармоники (зарегистрированной на субрешетке ГУРТ благодаря широкой полосе наблюдения), расщепление полосы на обоих гармониках, елочная структура и т. п. Параметры записи динамического спектра такие же, как и при наблюдении солнечных всплесков ШЬ-Ш и Ш типа (рис. 18). (Для повышения контрастности использовано суммирование поляризаций.)

Представленные результаты наглядно иллюстрируют достоинства и важность наблюдений в широкой полосе частот и доказывают эффективность малых антенн при исследованиях солнечной активности.

Декаметровое излучение системы Юпитер—Ио имеет большое разнообразие, в частности, для него характерны тонкие частотно-временные структуры. На рис. 20 показаны динамические спектры излучения, синхронно зарегистрированные на одной субрешетке ГУРТ и радиотелескопе УТР-2. Здесь приведен пример наблюдений радиоизлучения Юпитера в полосе частот $8.25 \div 33$ МГц при частотно-временном разрешении 4 кГц и 40 мс для УТР-2 и в полосе $6 \div 60$ МГц с разрешением 10 кГц и 4 мс для ГУРТ (показана сумма сигналов двух поляризаций). Несмотря на то, что чувствительность субрешетки ГУРТ намного меньше и соответственно отношение сигнал/шум ниже, чем у УТР-2, характерные тонкие структуры на спектрах выглядят практически одинаково.

Описанные в предыдущем разделе исследования мерцаний точечных источников на ионосферной плазме уже сейчас реализуются на секциях ГУРТ. На рис. 21 приведен пример мерцаний радиоисточника 3С 461. Наличие радиоисточников с плотностями потоков излучения, достаточными для достижения требуемой чувствительности, позволяет получать на радиотелескопах со сравнительно небольшими размерами характеристики ионосферных мерцаний, в которых не подавлен вклад мелкомасштабных ионосферных неоднородностей, в отличие от измерений на антенных решетках больших размеров. Такие исследования позволят решить следующие задачи: определить характеристики ионосферных мерцаний в декаметровом диапазоне радиоволн, разработать эффективные методы разделения межпланетных и ионосферных мерцаний, установить реакцию ионосферы Земли на активные процессы на Солнце.

Возможности современной цифровой обработки сигналов позволяют пересмотреть принципы решения задач в области наблюдений пульсаров. Требования высокого КНД антенн могут быть ослаблены, а минимизация воздействия помех из области улучшения селективных характеристик антенн переносится в область обработки сигналов. Чувствительность наблюдений можно повышать не только за счет увеличения времени накопления сигнала, но и за счет накопления в полосе анализа.

Ярким примером реализации алгоритмов обработки является детектирование 10 пульсаров

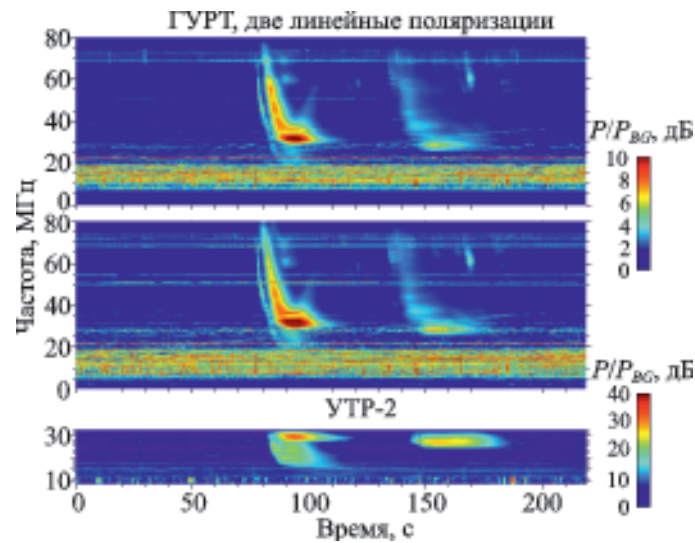


Рис. 18. Солнечные всплески Шв-III и III типа, полученные в ходе наблюдений на радиотелескопах ГУРТ (две верхние панели) и УТР-2 (нижняя панель) 24 июля 2014 г. На панелях показана запись динамического спектра длиной в 3.5 мин. Начало записи соответствует 11:32:00 UT

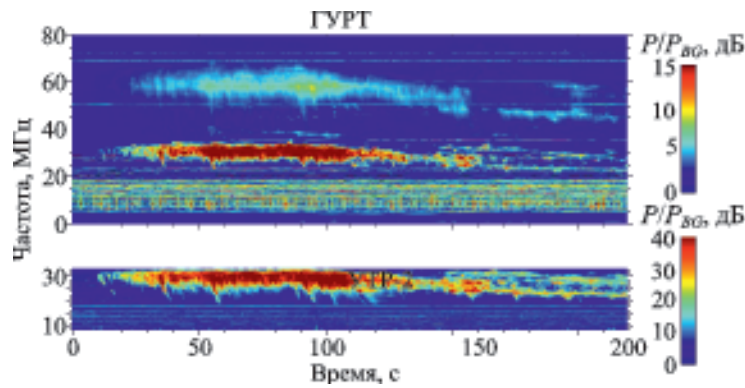


Рис. 19. Солнечный всплеск II типа, полученный в ходе наблюдений на радиотелескопах ГУРТ (верхняя панель) и УТР-2 (нижняя панель) 25 июля 2014 г. На панелях показана запись динамического спектра длиной в 3.5 мин. Начало записи соответствует 07:11:15 UT

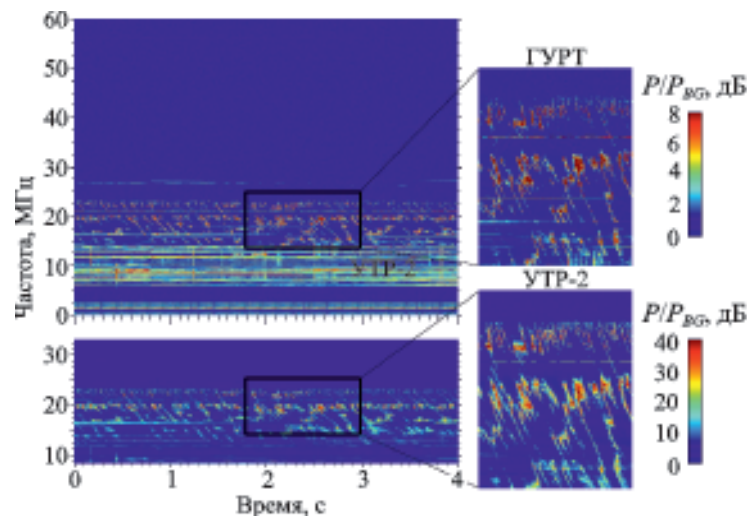


Рис. 20. Динамические спектры декаметрового радиоизлучения Юпитера (источник Io-V), полученные с помощью субрешетки ГУРТ (верхние панели) и радиотелескопа УТР-2 (нижние панели). Показана запись от 22 февраля 2015 г. длительностью 4 с начиная с 20:00:21 UT. Панели справа показывают увеличенные фрагменты длительностью 1.2 с в полосе 14+25 МГц

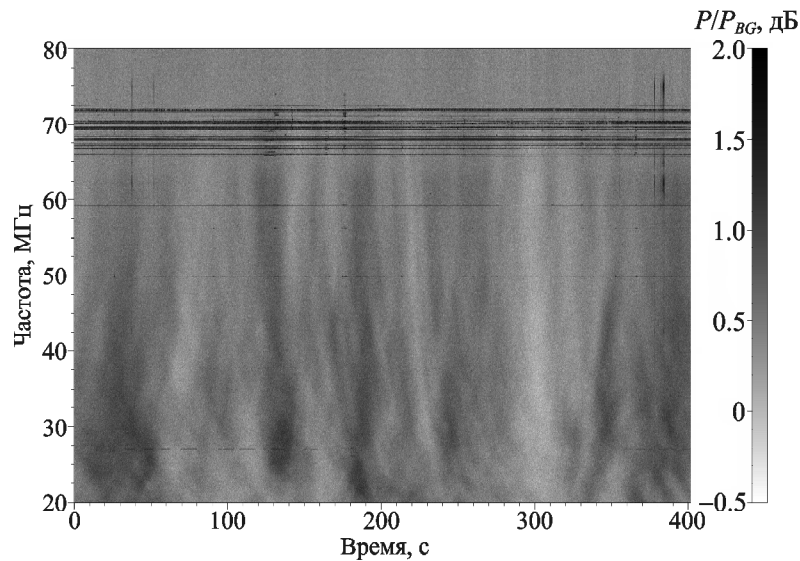


Рис. 21. Наблюдения мерцаний радиоисточника 3С 461 на радиотелескопе ГУРТ (две секции) 1 ноября 2015 г.

со временем интегрирования порядка всего $1 \div 2$ ч, несмотря на небольшую эффективную площадь субрешетки ГУРТ. Примеры записей усредненных по времени импульсов пяти пульсаров В0834+06, В0329+54, В0809+74, В0950+08 и В1133+16 приведены на рис. 22. На рисунке видно, что сигнал может быть зарегистрирован на частотах выше 35 МГц даже в узкой полосе шириной порядка 80 кГц.

В течение нескольких лет на интерферометре, образованном двумя субрешетками ГУРТ, проводились исследования векового изменения потока излучения радиоисточника Кассиопея А в сравнении с потоком радиоисточника Лебедь А [48].

На рис. 23 приведена взаимная спектральная плотность – преобразование Фурье взаимной корреляционной функции сигналов двух решеток. Действительная часть взаимной спектральной плотности пропорциональна косинусной составляющей коррелированной мощности сигналов секций, а мнимая часть – синусной составляющей коррелированной мощности секций.

На рис. 24 приведены данные измерений относительной плотности потоков источников Кассиопея А и Лебедь А за период более 50 лет [44, 48], отмечены значения отношения потоков исследуемых источников, полученные в разные годы и на разных инструментах. Результат, полученный по измерениям на секциях радиотелескопа ГУРТ, хорошо согласуется с кривой хода векового умень-

шения плотности потока Кассиопея А, которое составляет около 0.84 % в год.

5. Заключение

Современное состояние радиоастрономии характеризуется максимальным использованием самых последних достижений в электронной, антенной, компьютерной, телекоммуникационной технике и технологии. Одной из областей науки, где эти достижения внедряются очень активно, является низкочастотная радиоастрономия, что в полной мере иллюстрируется представленной работой.

Главным выводом настоящей работы является заключение о том, что активные фазированные антенны-решетки малых размеров (субрешетки ГУРТ с количеством элементов до нескольких десятков) способны качественно исследовать множество разнообразных астрофизических объектов и явлений. Основы таких возможностей не случайны – они вытекают из новых подходов в создании радиотелескопов, их оснащения и применения. Среди этих подходов необходимо отметить следующие:

- внедрение идеи активных антенных элементов, которая обеспечивает малые габариты и стоимость системы, но дает широкий диапазон частот ($8 \div 80$ МГц), высокую чувствительность (превышение температуры фона над шумами порядка 10 дБ), большие помехоустойчивость и динамический диапазон (более 90 дБ);

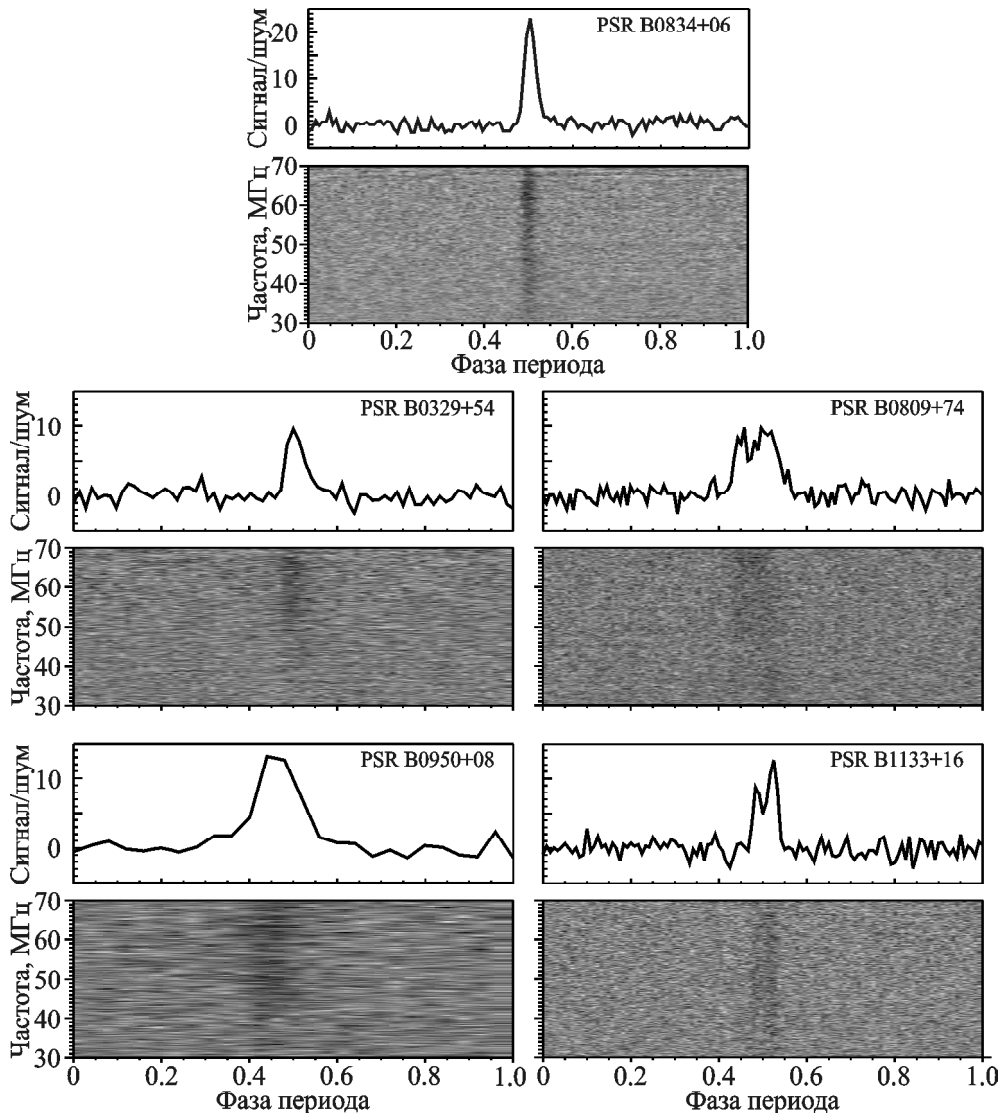


Рис. 22. Обнаружение пульсаров с помощью субрешетки ГУРТ: средние профили импульсов пяти пульсаров при времени интегрирования около 1.5 ч и временном разрешении 10 мс в полосе 30 ± 70 МГц (верхние панели); дедиспергированные частотные зависимости профилей импульсов пульсаров в 512 частотных каналах по 78.125 кГц (нижние панели)

- обеспечение возможности измерения поляризационных параметров (скрещенные диполи);
- электронное фазирование антенной решетки по всей небесной полусфере, причем независимо для каждой поляризации;
- создание оптимальной структуры телекоммуникационной системы радиотелескопа (чередование усилительных элементов, линий передачи, частотно-зависимых аттенуаторных звеньев и т. п.);
- применение современных цифровых спектральных процессоров нового поколения, обеспечивающих необходимые полосу регистрации (до 80 МГц при тактовой частоте 160 МГц), частотное и вре-

менное разрешение (6 кГц и 1 мс соответственно), динамический диапазон (более 90 дБ), развитые алгоритмы обработки данных в реальном времени, включая цифровую задержку сигналов для взаимного фазирования субрешеток.

В результате было показано, что столь малые решетки позволяют эффективно изучать континуальное, импульсное, спорадическое, монохроматическое поляризованное низкочастотное радиоизлучения Солнца, межпланетной среды, Юпитера, Сатурна, галактического и метagalacticкого фона, остатка сверхновой Кассиопея А в сопоставлении с радиогалактикой Ле-

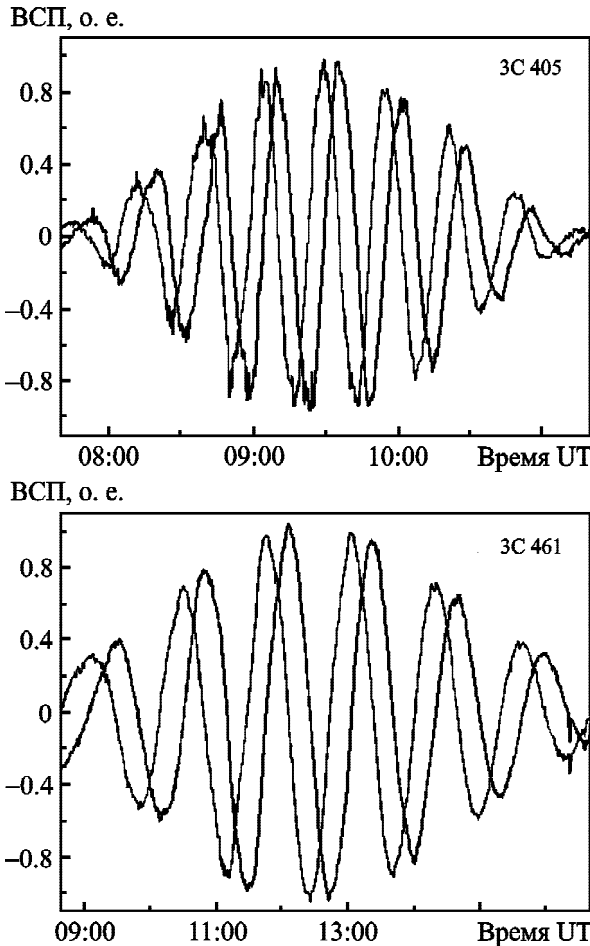


Рис. 23. Временные изменения действительной и мнимой составляющих взаимной спектральной плотности (ВСП) в направлении на источники 3С 405 (верхняя панель) и 3С 461 (нижняя панель) на частоте 40 МГц

бедь А, межзвездных спектральных линий и космологических линий нейтрального водорода.

В настоящее время в Радиоастрономической обсерватории имени С. Я. Брауде установлено одиннадцать 25-элементных субрешеток ГУРТ, пять из которых оснащены необходимым оборудованием и регулярно используются в наблюдениях. Создание и применение таких решеток не исключает необходимость создания гигантских антенн. Напротив, малые решетки являются естественными этапами построения гигантских инструментов, а также эффективны для синхронных координированных экспериментов с существующими и будущими наземными крупными радиотелескопами (NDA, NenuFAR, LOFAR, LWA, MWA, SKA) и космическими миссиями (WIND, STEREO, Cassini, Juno, Solar Orbiter, Farside Explorer). Важно подчеркнуть, что малые

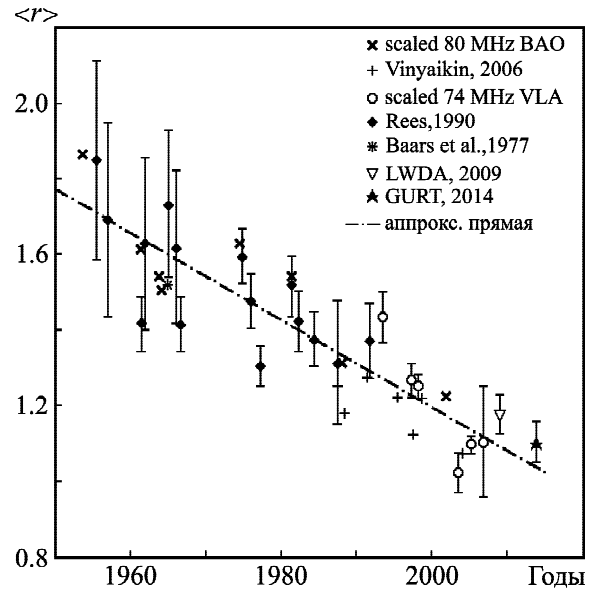


Рис. 24. Результаты измерений отношения плотностей потоков $\langle r \rangle$ источников Кассиопея А и Лебедь А на частоте 38 МГц

антенны дешевы и просты в эксплуатации, ремонте, калибровке даже в случае практически непрерывных мониторинговых наблюдений.

Без сомнения, многоантенная синергия в низкочастотной радиоастрономии при использовании множества удаленных и близких антенн различных размеров и конфигураций поднимет эффективность исследований в этом актуальном направлении современной астрономии и позволит сделать новые астрофизические открытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Van Haarlem M. P., Wise M. W., Gunst A. W., Heald G., McKean J. P., Hessels J. W. T., de Bruyn A. G., Nijboer R., Swinbank J., Fallows R., Brentjens M., Nelles A., Beck R., Falcke H., Fender R., Hörandel J., Koopmans L. V. E., Mann G., Miley G., Röttgering H., Stappers B. W., Wijers R. A. M. J., Zaroubi S., van den Akker M., Alexov A., Anderson J., Anderson K., van Ardenne A., Arts M., Asgekar A., Avruch I. M., Batejat F., Bähren L., Bell M. E., Bell M. R., van Bemmell I., Bennema P., Bentum M. J., Bernardi G., Best P., Birzan L., Bonafede A., Boonstra A.-J., Braun R., Bregman J., Breitling F., van de Brink R. H., Broderick J., Broekema P. C., Brouw W. N., Brüggem M., Butcher H. R., van Cappellen W., Ciardi B., Coenen T., Conway J., Coolen A., Corstanje A., Damstra S., Davies O., Deller A. T., Dettmar R.-J., van Diepen G., Dijkstra K., Donker P., Doorduyn A., Dromer J., Drost M., van Duin A., Eislöffel J., van Enst J., Ferrari C., Frieswijk W., Gankema H., Garrett M. A., de Gasperin F., Gerbers M., de Geus E., Grießmeier J.-M., Grit T., Gruppen P., Hamaker J. P., Hassall T., Hoefl M., Holties H. A., Horneffer A., van der

- Horst A., van Houwelingen A., Huijgen A., Iacobelli M., Intema H., Jackson N., Jelic V., de Jong A., Juette E., Kant D., Karastergiou A., Koers A., Kollen H., Kondratiev V. I., Kooistra E., Koopman Y., Koster A., Kuniyoshi M., Kramer M., Kuper G., Lambropoulos P., Law C., van Leeuwen J., Lemaitre J., Loose M., Maat P., Macario G., Markoff S., Masters J., McFadden R. A., McKay-Bukowski D., Meijering H., Meulman H., Mevius M., Middelberg E., Millenaar R., Miller-Jones J. C. A., Mohan R. N., Mol J. D., Morawietz J., Morganti R., Mulcahy D. D., Mulder E., Munk H., Nieuwenhuis L., van Nieuwpoort R., Noordam J. E., Norden M., Noutsos A., Offringa A. R., Olofsson H., Omar A., Orrù E., Overeem R., Paas H., Pandey-Pommier M., Pandey V. N., Pizzo R., Polatidis A., Rafferty D., Rawlings S., Reich W., de Reijer J.-P., Reitsma J., Renting G. A., Riemersv P., Rol E., Romein J. W., Roosjen J., Ruiter M., Scaife A., van der Schaaf K., Scheers B., Schellart P., Schoenmakers A., Schoonderbeek G., Serylak M., Shulevski A., Sluman J., Smirnov O., Sobey C., Spreeuw H., Steinmetz M., Sterks C. G. M., Stiepel H.-J., Stuurwold K., Tagger M., Tang Y., Tasse C., Thomas I., Thoudam S., Toribio M. C., van der Tol B., Usov O., van Veelen M., van der Veen A.-J., ter Veen S., Verbiest J. P. W., Vermeulen R., Vermaas N., Vocks C., Vogt C., de Vos M., van der Wal E., van Weeren R., Weggemans H., Weltevrede P., White S., Wijnholds S. J., Wilhelmsson T., Wucknitz O., Yatawatta S., Zarka P., Zensus A., and van Zwieten J. LOFAR: the low-frequency array // *Astron. Astrophys.* – 2013. – Vol. 556. – id. A2. DOI:10.1051/0004-6361/201220873
2. Taylor G. B., Ellingson S. W., Kassim N. E., Craig J., Dowell J., Wolfe C. N., Hartman J., Bernardi G., Clarke T., Cohen A., Dalal N. P., Erickson W. C., Hicks B., Greenhill L. J., Jacoby B., Lane W., Lazio J., Mitchell D., Navarro R., Ord S. M., Pihlstrom Y., Polisensky E., Ray P. S., Rickard L. J., Schinzel F. K., Schmitt H., Sigman E., Soriano M., Stewart K. P., Stovall K., Tremblay S., Wang D., Weiler K. W., White S., and Wood D. L. First Light for the First Station of the Long Wavelength Array // *J. Astron. Instrum.* – 2012. – Vol. 1. – P. 1–56. DOI: 10.1142/S2251171712500043
 3. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // *Антенны. – М.: Связь, 1978. – Вып. 26. – С. 3–14.*
 4. Braude S. Ya., Megn A. V., Ryabov B. P., Sharykin N. K., and Zhouck I. N. Decametric survey of discrete sources in the Northern sky. I. The UTR-2 Radio Telescope. Experimental techniques and data processing // *Astrophys. Space Sci.* – 1978. – Vol. 54, Is. 1 – P. 3–36. DOI: 10.1007/BF00637902
 5. Мень А. В., Брауде С. Я., Рашковский С. Л., Шарыкин Н. К., Шепелев В. А., Инютин Г. А., Христенко А. Д., Булацен В. Г., Браженко А. И., Кошевой В. В., Романчев Ю. В., Цесевич В. П., Галанин В. В. Система декаметровых радиоинтерферометров УРАН (ч. 1). Основные принципы. Обзор // *Радиофизика и радиоастрономия. – 1997. – Т. 2, № 4. – С. 385–401.*
 6. Bruck Yu. M. and Ustimenko B. Yu. Decametric Pulse Radio-emission from PSR 0809, PSR 1133, and PSR 1919 // *Nature.* – 1973. – Vol. 242. – P. 58–59. DOI: 10.1038/physci242058a0
 7. Konovalenko A. A. and Sodin L. G. The 26.13 MHz absorption line in the direction of Cassiopeia A // *Nature.* – 1981. – Vol. 294, No. 12. – P. 135–136. DOI: 10.1038/294135a0
 8. Zakharenko V., Mylostna C., Konovalenko A., Zarka P., Fischer G., Griefmeier J.-M., Litvinenko G., Rucker H., Sidorchuk M., Ryabov B., Vavriv D., Ryabov V., Ceconi B., Coffre A., Denis L., Fabricef C., Pallierb L., Schneiderg J., Kozhyn R., Vinogradov V., Mukha D., Weberh R., Shevchenko V., and Nikolaenko V. Ground-based and spacecraft observations of lightning activity on Saturn // *Planet. Space Sci.* – 2012. – Vol. 61, Is. 1. – P. 53–59. DOI: 10.1016/j.pss.2011.07.021
 9. Коноваленко О. О. Про підсумки виконання цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України “Модернізація радіотелескопа УТР-2 і перспективний розвиток декаметрової радіоастрономії в Україні” (за матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 29 січня 2014 р.) // *Вісник НАН України.* – 2014. – № 3. – С. 20–30.
 10. Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Kalinichenko N. N., Gridin A. A., Bubnov I. V., Lecacheux A., Rosolen C., and Rucker H. O. Thirty-elements active antenna array as a prototype of a huge low-frequency radio telescope // *Exp. Astron.* – 2003. – Vol. 16, Is. 3. – P. 149–164. DOI: 10.1007/s10686-003-0030-8
 11. Falkovich I. S., Konovalenko A. A., Gridin A. A., Sodin L. G., Bubnov I. N., Kalinichenko N. N., Rashkovskii S. L., Mukha D. V., and Tokarsky P. L. Wide-band high linearity active dipole for low frequency radio astronomy // *Exp. Astron.* – 2011 – Vol. 32, Is. 2. – P. 127–145. DOI: 10.1007/s10686-011-9256-z
 12. Stanislavsky A. A., Bubnov I. N., Konovalenko A. A., Gridin A. A., Shevchenko V. V., Stanislavsky L. A., Mukha D. V., and Koval A. A. First radio astronomy examination of the low-frequency broadband active antenna subarray // *Adv. Astron.* – 2014. – Vol. 2014. – id. 517058. DOI: 10.1155/2014/517058
 13. Zarka P., Girard J. N., Tagger M., Denis L., Aghanim N., Alsac L., Arnaud M., Barth S., Boone F., Bosse S., Capayrou D., Capdessus C., Ceconi B., Charrier D., Coffre A., Cognard I., Combes F., Corbel S., Cornilleau-Wehrlin N., Cottet P., Dole H., Dumez-Viou C., Falkovych I., Ferrari C., Floquet F., Garnier S., Georges G., Gond B., Grespier N., Griefmeier J.-M., Joly S., Konovalenko A., Lamy L., Lehnert M., Pommier M., Rucker H., Sandré P., Semelin B., Taffoureau C., Tasse C., Thétas E., Theureau G., Tokarsky P., Van Driel W., Vimon J.-B., and Weber R.: LSS/ NenuFAR: The LOFAR Super Station project in Nançay // *S. Boissier, P. de Laverny, N. Nardetto, R. Samadi, D. Valls-Gabaud, and H. Wozniak, eds. SF2A 2012: Proc. of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics.* – 2012. – P. 687–694.
 14. Zarka P., Tagger M., Denis L., Girard J. N., Konovalenko A., Atemkeng M., Arnaud M., Azarian S., Barsuglia M., Bonafede A., Boone F., Bosma A., Boyer R., Branchesi M., Briand C., Ceconi B., Célestin S., Charrier D., Chassande-Mottin E., Coffre A., Cognard I., Combes F., Corbel S., Courte C., Dabbech A., Daiboo S., Dallier R., Dumez-Viou C., El Corso M. N., Falgarone E., Falkovych I., Ferrari A., Ferrari C., Ferrière K., Fevotte C., Fialkov A., Fullekrug M., Gérard E., Griefmeier J.-M., Guiderdoni B., Guillemot L., Hessels J., Koopmans L., Kondratiev V., Lamy L., Lanz T., Larzabal P., Lehnert M., Levrier F., Loh A., Macario G., Maintoux J.-J., Martin L., Mary D., Masson S., Miville-Deschenes M.-A., Oberoi D., Panchenko M., Pan-

- dey-Pommier M., Petiteau A., Pinçon J.-L., Revenu B., Rible F., Richard C., Rucker H. O., Salomé P., Semelin B., Serylak M., Sidorchuk M., Smirnov O., Stappers B., Taf-foureaux C., Tasse C., Theureau G., Tokarsky P., Torchinsky S., Ulyanov O., van Driel W., Vasylieva I., Vaubailon J., Vazza F., Vergani S., Was M., Weber R., and Zakharenko V. NenuFAR: Instrument description and science case // International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT): Proc. conf. – Kharkiv, Ukraine. – 2015. – P. 1–6. DOI: 10.1109/ICATT.2015.7136773
15. Burke B. F. and Franklin K. L. Observations of a variable radio source associated with the planet Jupiter // *J. Geophys. Res.* – 1955. – Vol. 60, Is. 2. – P. 213–217. DOI: 10.1029/JZ060i002p00213
16. Riihima J. J. S-bursts in Jupiter's decametric radio spectra // *Astrophys. Space Sci.* – 1977. – Vol. 51, Is. 2. – P. 363–383. DOI: 10.1007/BF00644159
17. Базелян Л. Л., Брук Ю. М., Жук И. Н., Мень А. В., Содин Л. Г., Шарыкин Н. К. Широкополосный радиointерферометр с электрическим управлением диаграммой направленности // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 1964. – Т. 7, № 2. – С. 215–224.
18. Брук Ю. М., Гончаров Н. Ю., Жук И. Н., Инютин Г. А., Мень А. В., Содин Л. Г., Шарыкин Н. К. Экспериментальные исследования многоэлементных антенн-решеток радиотелескопа УТР-1 // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 1968. – Т. 11, № 1. – С. 28–43.
19. Udaya Shankar N. and Ravi Shankar T. S. A digital correlation receiver for the GEETEE radio telescope // *J. Astrophys. Astron.* – 1990. – Vol. 11, Is. 3. – P. 297–310. DOI: 10.1007/BF02709280
20. Kutuzov S. M., Ilyasov Yu. P., and Glushaev A. A. Antenna systems of the VLPA FIAN radio telescope // *Radiophys. Quantum Electron.* – 1976. – Vol. 19, No. 11. – P. 1115–1120. DOI: 10.1007/BF01037293
21. Erickson W. C., Mahoney M. J., and Erb K. The Clark Lake Teepee-Tee telescope // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 1982. – Vol. 50. – P. 403–419. DOI: 10.1086/190831
22. Абрагин Э. П., Брук Ю. М., Захаренко В. В., Коноваленко А. А. Структура и параметры новой системы антенного усиления радиотелескопа УТР-2 // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 1997. – Т. 2, № 1. – С. 95–102.
23. Abragin E. P., Bruck Yu. M., Zakharenko V. V., and Konovalenko A. A. The New Preamplification System for the UTR-2 Radio Telescope // *Exp. Astron.* – 2001. – Vol. 11, Is. 2. – P. 85–112. DOI: 10.1023/A:1011109128284
24. Васильев А. Ю., Кузин А. И., Кравцов А. А., Булах Е. В., Виноградов В. В., Ваврич Д. М. Многофункциональный цифровой приемник-спектрограф // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2014. – Т. 19, № 3. – С. 276–289.
25. Коноваленко А. А. Перспективы низкочастотной радиоастрономии // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2005. – Т. 10, Спец. вып. – С. S86–S114.
26. Коноваленко А. А., Токарский П. Л., Ерин С. Н. Эффективная поверхность и характеристики направленности антенной решетки в режиме приема сверхширокополосных сигналов // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2013. – Т. 18, № 3. – С. 257–264.
27. Содин Л. Г. Некоторые проблемы теории фазированных антенных решеток, актуальные для радиоастрономии // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2005. – Т. 10, Спец. вып. – С. S128–S142.
28. Tokarsky P. L., Konovalenko A. A., Falkovich I. S., and Yerin S. N. SNR in Active receiving Antenna Used as an Element of Phased Antenna Array for GURT Radio Telescope // *Proc. of the 45th European Microwave Conference (EuMC 2015), 7-10 September 2015.* – Paris, France. – 2015. – P. 1594–1597. DOI: 10.1109/EuRAD.2015.7346365
29. Ерин С. Н., Токарский П. Л., Гридин А. А., Бубнов И. Н., Коноваленко А. А., Фалькович И. С., Резник А. П. Диагностический модуль для секции антенной решетки радиотелескопа ГУРТ декаметрового и метрового диапазонов волн // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2014. – Т. 19, № 3. – С. 240–248.
30. Yerin S. N., Gridin A. A., and Tokarsky P. L. Phase shifter for antenna array of decameter range radio telescope // *Proc. of the 19th Int. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON 2012, 21-23 May 2012.* – Warsaw, Poland. – 2012. – P. 715–717. DOI: 10.1109/MIKON.2012.6233621
31. Токарский П. Л. Матричная модель диссипативной антенной решетки // *Радиотехника. Всеукр. междунауч.-техн. сб.* – 2006. – Вып. 146. – С. 156–170.
32. Tokarsky P. L. Matrix Theory of Dissipative Antenna Arrays // *Proc. of the VIth Intern. Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'07), 17–21 September 2007.* – Sevastopol, Ukraine. – 2007. – P. 87–92. DOI: 10.1109/ICATT.2007.4425122
33. Tokarsky P. L. and Yerin S. N. A Multiport Approach to Modeling of Phased Antenna Array for Radio Astronomy // *Proc. of the 43th European Microwave Conference (EuMC 2013), 6-11 October 2013.* – Nuremberg, Germany. – 2013. – P. 1651–1654.
34. Коноваленко А. А., Токарский П. Л., Ерин С. Н. Моделирование секции активной фазированной антенной решетки радиотелескопа ГУРТ // *Прикладная радиоэлектроника.* – 2015. – № 1. – С. 46–52.
35. Фалькович И. С., Содин Л. Г., Калиниченко Н. Н. Измерение параметров подстилающей поверхности для уточнения характеристик приземных антенн // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2000. – Т. 5, № 2. – С. 195–205.
36. Краус Д. Радиоастрономия / Пер. с англ. под ред. В. В. Железнякова. – М.: Сов радио, 1973. – 456 с.
37. Коноваленко А. А., Фалькович И. С., Калиниченко Н. Н., Гридин А. А., Бубнов И. Н., Лекашио А., Розолен К., Рукер Х. О. Антенная решетка из активных элементов для радиоастрономии // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2004. – Т. 9, № 3. – С. 248–260.
38. Sidorchuk M. A., Ulyanov O. M., Shepelev V. A., Mukha D. V., Brazhenko A. I., Vashchishin R. V., and Frantuzenko A. V. Large-scale structure of the Northern sky at decametric waves // *Scientific Workshop – Astrophysics with E-LOFAR.* – Hamburg, Germany. – 2008. Available from: http://www.hs.uni-hamburg.de/DE/Ins/Lofar/lofar_workshop/poster_abstracts.html#poster27
39. Turtle A. J., Pugh G. F., Kenderline S., and Pauliny-Toth I. I. K. The spectrum of the galactic radio emission: I. Observations of Low Resolving Power // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1962. – Vol. 124, Is. 4. – P. 297–312. DOI: 10.1093/mnras/124.4.279
40. Василенко Н. М., Сидорчук М. А. Яркая температура и спектральный индекс внегалактического фона в декаметровом диапазоне длин волн // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2015. – Т. 20, № 3. – С. 205–215.

41. Шкловский И. С. О возможном вековом изменении потока и интенсивности радиоизлучения от некоторых дискретных источников // *Астрономический журнал*. – 1960. – Т. 37, № 2. – С. 256–264.
42. Högbom J. A. and Shakeshaft J. R. Secular variations of the flux density of the radio source Cassiopeia A // *Nature*. – 1961. – Vol. 189, No. 4764. – P. 561–562. DOI: 10.1038/189561a0
43. Иванов В. П., Станкевич К. С. Периодические изменения радиоизлучения и эволюция спектра остатка сверхновой Кассиопея А // *Астрономический журнал*. – 1989. – Т. 66, № 1. – С. 30–39.
44. Helmboldt J. F. and Kassim N. E. The evolution of Cas A at low radio frequencies // *Astron. J.* – 2009. – Vol. 138, No. 3. – P. 838–844. DOI: 10.1088/0004-6256/138/3/838
45. Erickson W. C. and Perley R. A. An anomaly in the flux of Cassiopeia A at 38 MHz // *Astrophys. J.* – 1975. – Vol. 200. – P. L83–L87. DOI: 10.1086/181903
46. Troitskii V. S., Stankevich K. S., Tseitlin N. M., Krotikov V. D., Bondar’ L. N., Strezhneva K. M., Rakhlin V. L., Ivanov V. P., Pelyushenko S. A., Zubov M. M., Samoilo R. A., Titov G. K., Porfir’ev V. A., and Chekalev S. P. Calibration of the Flux Density of Cassiopeia A and Cygnus A in the Range 300–9375 MHz // *Sov. Astron.* – 1972. – Vol. 15. – P. 915–917.
47. Vinyaikin E. N. Evolution of the Radio Spectrum of Cassiopeia A from Long-Term Observations. Observations at 290 and 927 MHz // *Astron. Rep.* – 2007. – Vol. 51, No. 2. – P. 87–96. DOI: 10.1134/S1063772907020023
48. Бубнов И. Н., Коноваленко А. А., Станиславский А. А., Бовкун В. П., Жук И. Н., Муха Д. В. Эволюция спектра радиоизлучения остатка вспышки сверхновой Кассиопея А на частотах 35–65 МГц // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2014. – Т. 19, №2. – С. 111–119.
49. Melnik V. N., Konovalenko A. A., Abranin E. P., Dorovskyy V. V., Stanislavsky A. A., Rucker H. O., and Lecacheux A. Solar sporadic radio emission in the decametre waveband // *Astron. Astrophys. Trans.* – 2005. – Vol. 24, No. 5. – P. 391–401. DOI: 10.1080/10556790600568854
50. Доровский В. В., Мельник В. Н., Коноваленко А. А., Бубнов И. Н., Гридин А. А., Шевчук Н. В., Фалькович И. С., Коваль А. А., Руткевич Б. П., Резник А. П., Рукер Х. О., Панченко М., Белов А. С., Христенко А. Д., Квасов Г. В., Ерин С. Н. Наблюдение солнечного U всплеска в полосе частот 10–70 МГц с использованием радиотелескопа ГУРТ // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2013. – Т. 18, № 2, С. 101–106.
51. Dorovskyy V. V., Melnik V. N., Konovalenko A. A., Bubnov I. N., Gridin A. A., Shevchuk N. V., Rucker H. O., Poedts S., and Panchenko M. Decameter U-burst Harmonic Pair from a High Loop // *Sol. Phys.* – 2015. – Vol. 290, Is. 1. – P. 181–192. DOI: 10.1007/s11207-014-0615-6
52. Доровский В. В., Мельник В. Н., Коноваленко А. А., Рукер Х. О., Абранин Э. П., Лекашо А. Солнечные U- и J-всплески на декаметровых волнах // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2010. – Т. 15, № 1. – С. 5–14.
53. Melnik V. N., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Voiko A. I., Dorovskyy V. V., Abranin E. P., and Lecacheux A. Observations of Powerful Type III Bursts in the Frequency Range 10–30 MHz // *Sol. Phys.* – 2011. – Vol. 269, Is. 2. – P. 335–350. DOI: 10.1007/s11207-010-9703-4
54. Браженко А. И., Пылаев О. С., Мельник В. Н., Коноваленко А. А., Французенко А. В., Доровский В. В., Ващишин П. В., Рукер Х. О. Наблюдение трех гармонических компонентов солнечных всплесков III типа в декаметровом диапазоне длин волн // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2013. – Т. 18, № 4. – С. 283–290.
55. Браженко А. И., Мельник В. Н., Французенко А. В., Доровский В. В., Рукер Х. О., Панченко М. О гармонической связи компонентов в парах IIIb-III всплесков в декаметровом диапазоне длин волн // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2015. – Т. 20, № 2. – С. 99–108.
56. Dorovskyy V. V., Mel’nik V. N., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Abranin E. P., Stanislavsky A. A., and Lecacheux A. Decameter Type II radio burst with three harmonics // *European Planetary Science Congress, 2007: Proc. of conf. – Potsdam, Germany. – 2007. – P. 688.*
57. Mel’nik V. N., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Stanislavsky A. A., Abranin E. P., Lecacheux A., Mann G., Warmuth A., Zaitsev V. V., Boudjada M. Y., Dorovskii V. V., Zaharenko V. V., Lisachenko V. N., and Rosolen C. Observations of Solar Type II bursts at frequencies 10–30 MHz // *Sol. Phys.* – 2004. – Vol. 222, Is. 1. – P. 151–166. DOI: 10.1023/B:SOLA.0000036854.66380.a4
58. Dorovskyy V. V., Melnik V. N., Konovalenko A. A., Brazhenko A. I., Panchenko M., Poedts S., and Mykhaylov V. A. Fine and Superfine Structure of the Decameter-Hectometer Type II Burst on 7 June 2011 // *Sol. Phys.* – 2015. – Vol. 290, Is. 7. – P. 2031–2042. DOI: 10.1007/s11207-015-0725-9
59. Melnik V. N., Shevchuk N. V., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Dorovskyy V. V., Poedts S., and Lecacheux A. Solar Decameter Spikes // *Sol. Phys.* – 2014. – Vol. 289, Is. 5. – P. 1701–1714. DOI: 10.1007/s11207-013-0434-1
60. Melnik V. N., Rucker H. O., and Konovalenko A. A. Chapter 8. Solar Type IV Bursts at Frequencies 10–30 MHz. In: *Pingzhi Wang, ed. Solar Physics Research Trends. – New York: Nova Science Publ., 2008. – P. 287–325.*
61. Zaqarashvili T. V., Melnik V. N., Brazhenko A. I., Panchenko M., Konovalenko A. A., Franzuzenko A. V., Dorovskyy V. V., and Rucker H. O. Radio seismology of the outer solar corona // *Astron. Astrophys.* – 2013. – Vol. 555, id. A55. DOI: 10.1051/0004-6361/201321548
62. Zlotnik E. Y., Zaitsev V. V., Melnik V. N., Konovalenko A. A., and Dorovskyy V. V. ‘Fingerprint’ Fine Structure in the Solar Decametric Radio Spectrum // *Sol. Phys.* – 2015. – Vol. 290, Is. 7. – P. 2013–2030. DOI: 10.1007/s11207-015-0724-x
63. Wild J. P. and Roberts J. A. Regions of the ionosphere responsible for radio star scintillations // *Nature*. – 1956. – Vol. 178, No. 4529. – P. 377–378. DOI: 10.1038/178377a0
64. Hewish A., Scott P. F., and Wills D. Interplanetary Scintillation of Small Diameter Radio Sources // *Nature*. – 1964. – Vol. 203, No. 4951. – P. 1214–1217. DOI: 10.1038/2031214a0
65. Hewish A., Dennison P. A., and Pilkington J. D. H. Measurements of the size and motion of the irregularities in the interplanetary medium // *Nature*. – 1966. – Vol. 209, No. 5029. – P. 1188–1189. DOI: 10.1038/2091188a0
66. Фалькович И. С., Калиниченко Н. Н., Гридин А. А., Бубнов И. Н. О возможности широкополосных наблюдений межпланетных мерцаний на декаметровых волнах // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2004. – Т. 9, № 2. – С. 121–129.
67. Kalinichenko N. N. A search for compact decametric radio sources in supernova remnants using the interplanetary

- scintillation technique // *Astrophys. Space Sci.* – 2009. – Vol. 319, No. 2. – P. 131–138. DOI: 10.1007/s10509-008-9960-y
68. Фалькович И. С., Коноваленко А. А., Калинин Н. Н., Оляк М. Р., Гридин А. А., Бубнов И. Н., Лекашо А., Рукер Х. О. Вариации параметров струйной структуры солнечного ветра на расстояниях более 1 а. е. в 2003 – 2004 гг. // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2006. – Т. 11, № 1. – С. 31–41.
69. Dessler A. J. Jupiter's magnetic field and magnetosphere. In: *Dessler A. J., ed. Physics of the Jovian magnetosphere.* – Cambridge: Cambridge University Press, 1983. – P. 1–50.
70. Smith E. J., Davis L. Jr., Jone D. E., Coleman P. J., Colburn D. S., Dyal P., Sonnet C. P., and Frandsen A. M. A. The planetary magnetic field and magnetosphere of Jupiter: Pioneer 10 // *J. Geophys. Res. Space Phys.* – 1974. – Vol. 79. – P. 3501–3513. DOI: 10.1029/JA079i025p03501
71. Acufia M. H. and Ness N. F. The main magnetic field of Jupiter // *J. Geophys. Res. Space Phys.* – 1976. – Vol. 81. – P. 2917–2922. DOI: 10.1029/JA081i016p02917
72. Ness N. F., Acufia M. H., Lepping R. P., Burlaga L. F., Behannon K. W., and Neubauer F. M. Magnetic field studies at Jupiter by Voyager 1: Preliminary results // *Science.* – 1979. – Vol. 204, Is. 4396. – P. 982–987. DOI: 10.1126/science.204.4396.982
73. Ness N. F., Acufia M. H., Lepping R. P., Burlaga L. F., Behannon K. W., and Neubauer F. M. Magnetic field studies at Jupiter by Voyager 2: Preliminary results // *Science.* – 1979. – Vol. 206, Is. 4421. – P. 966–972. DOI: 10.1126/science.206.4421.966
74. Zarka P. Auroral radio emissions at the outer planets: Observations and theories // *J. Geophys. Res. Atmos.* – 1998. – Vol. 103, No 3339. – P. 20159–20194. DOI: 10.1029/98JE01323
75. Litvinenko G. V., Shaposhnikov V. E., Konovalenko A. A., Zakharenko V. V., Panchenko M., Dorovsky V. V., Brazhenko A. I., Rucker H. O., Vinogradov V. V., and Melnik V. N. Quasi-similar decameter emission features appearing in the solar and jovian dynamic spectra // *Icarus.* – 2016. – Vol. 272. – P. 80–87. DOI: 10.1016/j.icarus.2016.02.039
76. Ryabov V. B., Zarka P., Hess S., Konovalenko A., Litvinenko G., Zakharenko V., Shevchenko V. A., and Cecconi B. Fast and slow frequency-drifting millisecond bursts in Jovian decametric radio emissions // *Astron. Astrophys.* – 2014. – Vol. 568. – id. A53. DOI: 10.1051/0004-6361/201423927
77. Boisshot A., Rosolen C., Aubier M. G., Daigne G., Genova F., Leblanc Y., Lecacheux A., de La Noë J., and Møller-Pedersen B. A new high-grain, broadband, steerable array to study Jovian decametric emission // *Icarus* – 1980. – Vol. 43, Is 3. – P. 399–407. DOI: 10.1016/0019-1035(80)90185-2
78. Lecacheux A. The Nançay Decameter Array: A Useful Step Towards Giant, New Generation Radio Telescopes for Long Wavelength Radio Astronomy. In: *Stone R. G., Weiler K. W., Goldstein M. L., and Bougeret J.-L. eds. Radio Astronomy at Long Wavelengths.* – Washington, DC, USA: American Geophysical Union, 2000. – P. 321–328. DOI: 10.1029/GM119p0321
79. Konovalenko A. A., Lecacheux A., Rucker H. O., Fischer G., Abranin E. P., Kalinichenko, N. N., Falkovich I. S., and Sidorchuk K. M. Ground-based decameter wavelength observations of Saturn electrostatic discharges // *European Planetary Science Congress, EPSC2006-A-00229, 18–22 September 2006.* – Berlin, Germany. – 2006. – P. 229.
80. Konovalenko A. A., Kalinichenko N. N., Rucker H. O., Lecacheux A., Fischer G., Zarka P., Zakharenko V. V., Mylostna K. Y., Griebmeier J.-M., Abranin E. P., Falkovich I. S., Sidorchuk K. M., Kurth W. S., Kaiser M. L., and Gurnett D. A. Earliest recorded ground-based decameter wavelength observations of Saturn's lightning during the giant E-storm detected by Cassini spacecraft in early 2006 // *Icarus.* – 2013. – Vol. 224, No. 1. – P. 14–23. DOI: 10.1016/j.icarus.2012.07.024
81. Zakharenko V. V., Mylostna K. Y., Fischer G., Konovalenko A. A., Zarka P., Griebmeier J.-M., Ryabov B. P., Vavriv D. M., Ryabov V. B., Rucker H., Ravier P., Sidorchuk M. A., Cecconi B., Coffre A., Denis L., Fabrice C., Kozhyn R. V., Mukha D. V., Pallier L., Schneider J., Shevchenko V. A., Vinogradov V. V., Weber R., and Nikolaenko V. S. Identification of Saturn Lightnings Recorded by the UTR-2 Radio Telescope and Cassini Spacecraft // *Radio Physics and Radio Astronomy.* – 2011. – Vol. 2, Is. 2. – P. 93–98. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v2.i2.10
82. Zakharenko V., Mylostna K., Konovalenko A., Kolyadin V., Zarka P., Griebmeier J.-M., Litvinenko G., Sidorchuk M., Rucker H., Fischer G., Cecconi B., Coffre A., Denis L., Shevchenko V., and Nikolaenko V. Search and study of electrostatic discharges in the Solar System with the radio telescope UTR-2 // *European Planetary Science Congress 2012, 23–28 September.* – Madrid, Spain. – 2012. – id. EPSC2012-186. Available from: <http://meetings.copernicus.org/epsc2012>
83. Fischer G., Kurth W. S., Gurnett D. A., Zarka P., Dyudina U. A., Ingersoll A. P., Ewald S. P., Porco C. C., Wesley A., Go C., and Delcroix M. A giant thunderstorm on Saturn // *Nature.* – 2011. – Vol. 475, No. 7354. – P. 75–77. DOI: 10.1038/nature10205
84. Милостная К. Ю., Захаренко В. В., Коноваленко А. А., Фишер Г., Зарка Ф., Сидорчук М. А. Тонкая временная структура молний на Сатурне // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2014. – Т. 19, № 1. – С. 10–19.
85. Милостная К. Ю., Захаренко В. В. Поиск и исследование грозовой активности на Сатурне и других планетах Солнечной системы // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2013. – Т. 18, № 1. – С. 12–25.
86. Bruk Y. M., Davies J. G., Kuz'min A. D., Lyne A. G., Malofeev V. M., Rowson B., Ustimenko B. Y., and Shitov Y. P. Radio-emission spectra of five pulsars in the 17-1420 MHz range // *Sov. Astron.* – 1978. – Vol. 22. – P. 588–593.
87. Malov I. F., Malofeev V. F., and Sen'e D. S. Observed total radio luminosities of 232 pulsars // *Astron. Rep.* – 1994. – Vol. 38. – P. 677–682.
88. Malofeev V. M., Gil J., 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.
89. 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., Dorovskyy 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., Vólvach 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., 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.* [online] – 2016. – Online First Articles. – P. 1–38. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x. Available from: <http://link.springer.com/journal/10686>
90. Кузьмин А. Д. Пульсары. – М.: Наука, 1989. – 159 с.
 91. Malofeev V. M., Malov O. I., and Shchegoleva N. B. Discovery of a burst in one pulse component in the pulsar PSR B0643+80 // *Astron. Rep.* – 1998. – Vol. 42, Is. 2. – P. 241–245.
 92. Popov M. V., Kuz'min A. D., Ul'yanov O. M., Deshpande A. A., Ershov A. A., Zakharenko V. V., Kondrat'ev V. I., Kostyuk S. V., Losovski B. Y., and Soglasnov V. A. Instantaneous Radio Spectra of Giant Pulses from the Crab Pulsar from Decimeter to Decameter Wavelengths // *Astron. Rep.* – 2006. – Vol. 50, Is. 7. – P. 562–568.
 93. Ульянов О. М., Захаренко В. В., Коноваленко А. А., Лекашо А., Розолен К., Рукер Х. О. Обнаружение индивидуальных импульсов пульсаров B0809+74; B0834+06; B0943+10; B0950+08; B1133+16 в декаметровом диапазоне волн // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2006. – Т. 11, № 2. – С. 113–133.
 94. Ульянов О. М., Дешпанде А., Захаренко В. В., Асгеркар А., Шанкар У. Двухчастотные наблюдения шести пульсаров с использованием УТР-2 и GEETEE радиотелескопов // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2007. – Т. 12, № 1. – С. 5–19.
 95. Kuzmin A. D. Giant pulses of pulsar radio emission // *Astrophys. Space Sci.* – 2007. – Vol. 308, Is. 1. – P. 563–567. DOI: 10.1007/s10509-007-9347-5
 96. Ul'yanov 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
 97. Ul'yanov 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
 98. Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Mukha D. V., and Seredkina A. A. Investigation of the Earth ionosphere using the radio emission of pulsars // *Baltic Astronomy.* – 2013. – Vol. 22. – P. 53–65.
 99. Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Konovalenko A. A., Ulyanov O. M., Serylak M., Zarka P., Griefmeier J.-M., Cognard L., 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
 100. 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
 101. Afraimovich E. L. Cepstral analysis of broad-band radio emission – New possibilities in radio astronomy // *Astron. Astrophys.* – 1981. – Vol. 97, No. 1. – P. 366–372.
 102. Afraimovich E. L., Smol'kov G. Y., and Yasyukevich Y. Y. Adaptive radio astronomy // *Doklady Physics.* – 2008. – Vol. 53, Is. 4. – P. 211–215. DOI: 10.1134/S1028335808040095
 103. Noutsos A., Johnston S., Kramer M., and Karastergiou A. New pulsar rotation measures and the Galactic magnetic field // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2008. – Vol. 386, Is. 4. – P. 1881–1896. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2008.13188.x
 104. Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., and Skoryk A. O. Polarization Sounding of the Pulsar Magnetosphere // *Bulletin CrAO.* – 2013. – Vol. 109. – P. 159–168.
 105. Konovalenko A. A. and Sodin L. G. Neutral ^{14}N in the interstellar medium // *Nature.* – 1980. – Vol. 283. – P. 360–361. DOI: 10.1038/283360a0
 106. Konovalenko A. A. and Sodin L. G. The 26.13 MHz absorption line in the direction of Cassiopeia A // *Nature.* – 1981. – Vol. 294. – P. 135–136. DOI: 10.1038/294135a0
 107. Stepkin S. V., Konovalenko A. A., Kantharia N. G., and Udaya Shankar N. Radio recombination lines from the largest bound atoms in space // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2007. – Vol. 374, Is. 3. – P. 852–856. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2006.11190.x
 108. Walmsley C. M. and Watson W. D. The influence of dielectronic-like recombination at low temperatures on the interpretation of interstellar, radio recombination lines of carbon // *Astrophys. J.* – 1982. – Vol. 260. – P. 317–325. DOI: 10.1086/160256
 109. Gordon M. A. and Sorochenko R. L. Radio Recombination Lines: Their Physics and Astronomical Application. – Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2002.
 110. Braude S. Y. Chapter 7. Decametric radio astronomy. In: Kardashev N. S, ed. *Astrophysics on the Threshold of 21st Century.* – Philadelphia: Gordon and Breach Science Publ., 1992. – P. 81–102.
 111. Коноваленко А. А. Цифровой знаковый коррелометр // *Приборы и техника эксперимента.* – 1981. – № 6. – С. 128–137.
 112. Kozhyn R. V., Vynogradov V. V., and Vavriv D. M. Low-Noise, High Dynamic Range Digital Receiver/Spectrometer for Radio Astronomy Applications // *Int. Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves (MSMW), 25-30 June 2007 – Kharkiv, Ukraine.* – 2007. – P. 736–738. DOI: 10.1109/MSMW.2007.4294797
 113. Konovalenko A. A. and Stepkin S. V. Radio Recombination Lines. In: Gurvits L. I., Frey S., and Rawlings S., eds. *Radio Astronomy from Karl Jansky to Microjansky.* – Budapest: EAS Publications Series, 2005. – Vol. 15. – P. 271–295. DOI: 10.1051/eas:2005158
 114. Furlanetto S. R., Oh S. P., and Briggs F. H. Cosmology at low frequencies: The 21-cm transition and the high-redshift Universe // *Phys. Rep.* – 2006. – Vol. 433, Is. 4-6. – P. 181–301. DOI: 10.1016/j.physrep.2006.08.002

REFERENCES

1. VAN HAARLEM, M. P., WISE, M. W., GUNST, A. W., HEALD, G., McKEAN, J. P., HESSELS, J. W. T., DE BRUYN, A. G., NIJBOER, R., SWINBANK, J., FAL-

- LOWS, R., BRENTJENS, M., NELLES, A., BECK, R., FALCKE, H., FENDER, R., HÖRANDEL, J., KOOPMANS, L. V. E., MANN, G., MILEY, G., RÖTTGERING, H., STAPPERS, B. W., WIJERS, R. A. M. J., ZAROUBI, S., VAN DEN AKKER, M., ALEXOV, A., ANDERSON, J., ANDERSON, K., VAN ARDENNE, A., ARTS, M., ASGEKAR, A., AVRUCH, I. M., BATEJAT, F., BÄHREN, L., BELL, M. E., BELL, M. R., VAN BEMMEL, I., BENNEMA, P., BENTUM, M. J., BERNARDI, G., BEST, P., BÎRZAN, L., BONAFEDE, A., BOONSTRA, A.-J., BRAUN, R., BREGMAN, J., BREITLING, F., VAN DE BRINK, R. H., BRODERICK, J., BROEKEMA, P. C., BROUW, W. N., BRÜGGEN, M., BUTCHER, H. R., VAN CAPPELLEN, W., CIARDI, B., COENEN, T., CONWAY, J., COOLEN, A., CORSTANJE, A., DAMSTRA, S., DAVIES, O., DELLER, A. T., DETTMAR, R.-J., VAN DIEPEN, G., DIJKSTRA, K., DONKER, P., DOORDUIN, A., DROMER, J., DROST, M., VAN DUIN, A., EISLÖFFEL, J., VAN ENST, J., FERRARI, C., FRIESWIJK, W., GANKEMA, H., GARRETT, M. A., DE GASPERIN, F., GERBERS, M., DE GEUS, E., GRIEBMEIER, J.-M., GRIT, T., GRUPPEN, P., HAMAKER, J. P., HASSALL, T., HOEFT, M., HOLTIES, H. A., HORNEFFER, A., VAN DER HORST, A., VAN HOUWELINGEN, A., HUIJGEN, A., IACOBELLI, M., INTEMA, H., JACKSON, N., JELIC, V., DE JONG, A., JUETTE, E., KANT, D., KARASTERGIOU, A., KOERS, A., KOLLEN, H., KONDRATIEV, V. I., KOOISTRA, E., KOOPMAN, Y., KOSTER, A., KUNIYOSHI, M., KRAMER, M., KUPER, G., LAMBROPOULOS, P., LAW, C., VAN LEEUWEN, J., LEMAITRE, J., LOOSE, M., MAAT, P., MACARIO, G., MARKOFF, S., MASTERS, J., MCFADDEN, R. A., MCKAY-BUKOWSKI, D., MEIJERING, H., MEULMAN, H., MEVIUS, M., MIDDELBURG, E., MILLENAAR, R., MILLER-JONES, J. C. A., MOHAN, R. N., MOL, J. D., MORAWIETZ, J., MORGANT, I. R., MULCAHY, D. D., MULDER, E., MUNK, H., NIEUWENHUIS, L., VAN NIEUWPOORT, R., NOORDAM, J. E., NORDEN, M., NOUTSOS, A., OFFRINGA, A. R., OLOFSSON, H., OMAR, A., ORRÚ, E., OVE-REEM, R., PAAS, H., PANDEY-POMMIER, M., PANDEY, V. N., PIZZO, R., POLATIDIS, A., RAFFERTY, D., RAWLINGS, S., REICH, W., DE REIJER, J.-P., REITSMAN, J., RENTING, G. A., RIEMERSV, P., ROL, E., ROMEIN, J. W., ROOSJEN, J., RUITER, M., SCAIFE, A., VAN DER SCHAAF, K., SCHEERS, B., SCHELLARTV, P., SCHOENMAKERS, A., SCHOONDERBEEK, G., SERYLAK, M., SHULEVSKI, A., SLUMAN, J., SMIRNOV, O., SOBEY, C., SPREEUW, H., STEINMETZ, M., STERKS, C. G. M., STIEPEL, H.-J., STUURWOLD, K., TAGGER, M., TANG, Y., TASSE, C., THOMAS, I., THODAM, S., TORIBIO, M. C., VAN DER TOL, B., USOV, O., VAN VELEN, M., VAN DER VEEN, A.-J., TER VEEN, S., VERBIEST, J. P. W., VERMEULEN, R., VERMAAS, N., VOCKS, C., VOGT, C., DE VOS, M., VAN DER WAL, E., VAN WEEREN, R., WEGGEMANS, H., WELTEVREDE, P., WHITE, S., WIJNHOLDS, S. J., WILHELMSSON, T., WUCKNITZ, O., YATAWATTA, S., ZARKA, P., ZENSUS, A. and VAN ZWIETEN, J., 2013. LOFAR: the low-frequency array. *Astron. Astrophys.* vol. 556, id. A2. DOI:10.1051/0004-6361/201220873
2. TAYLOR, G. B., ELLINGSON, S. W., KASSIM, N. E., CRAIG, J., DOWELL, J., WOLFE, C. N., HARTMAN, J., BERNARDI, G., CLARKE, T., COHEN, A., DALAL, N. P., ERICKSON, W. C., HICKS, B., GREENHILL, L. J., JACOBY, B., LANE, W., LAZIO, J., MITCHELL, D., NAVARRO, R., ORD, S. M., PIHLSTROM, Y., POLISENSKY, E., RAY, P. S., RICKARD, L. J., SCHINZEL, F. K., SCHMITT, H., SIGMAN, E., SORIANO, M., STEWART, K. P., STOVALL, K., TREMBLAY, S., WANG, D., WEILER, K. W., WHITE, S. and WOOD, D. L., 2012. First Light for the First Station of the Long Wavelength Array. *J. Astron. Instrum.* vol. 1, pp. 1–56. DOI: 10.1142/S2251171712500043
3. BRAUDE, S. Y., MEGN, A. V. and SODIN, L. G., 1978. Decameter wave band radio telescope UTR-2. In: *Anteny*. Moscow, USSR: Svyaz'. no. 26, pp. 3–15 (in Russian).
4. BRAUDE, S. Y., MEGN, A. V., RYABOV, B. P., SHARYKIN, N. K. and ZHOUC, I. N., 1978. Decametric survey of discrete sources in the Northern sky I. The UTR-2 Radio Telescope. Experimental techniques and data processing. *Astrophys. Space Sci.* vol. 54, is. 1, pp. 3–36. DOI: 10.1007/BF00637902
5. MEGN, A. V., BRAUDE, S. Y., RASHKOVSKIY, S. L., SHARYKIN, N. K., SHEPELEV, V. A., INUTIN, G. A., KRISTENKO, A. D., BULATSEN, V. G., BRAZHENKO, A. I., KOSHOVIY, V. V., ROMANCHEV, Y. V., THESEVICH, V. P. and GALANIN, V. V., 1997. URAN System of the Decametric Interferometers (I). *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 2, no. 4, pp. 385–402 (in Russian).
6. BRUCK, Yu. M. and USTIMENKO, B. Yu., 1973. Decametric Pulse Radioemission from PSR 0809, PSR 1133, and PSR 1919. *Nature*. vol. 242, pp. 58–59. DOI: 10.1038/physci242058a0
7. KONOVALENKO, A. A. and SODIN, L. G., 1981. The 26.13 MHz absorption line in the direction of Cassiopeia A. *Nature*. vol. 294, no. 12, pp. 135–136. DOI: 10.1038/294135a0
8. ZAKHARENKO, V., MYLOSTNA, K., KONOVALENKO, A., ZARKA, P., FISCHER, G., GRIEBMEIER, J.-M., LITVINENKO, G., RUCKER, H., SIDORCHUK, M., RYABOV, B., VAVRIV, D., RYABOV, V., CECCONI, B., COFFE, A., DENIS, L., FABRICE, C., PALLIER, L., SCHNEIDER, J., KOZHYN, R., VINOGRADOV, V., MUKHA, D., WEBER, R., SHEVCHENKO, V. and NIKOLAENKO, V., 2012. Ground-based and spacecraft observations of lightning activity on Saturn. *Planet. Space Sci.* vol. 61, no. 1, pp. 53–59. DOI: 10.1016/j.pss.2011.07.021.
9. KONOVALENKO O. O., 2014. About the implementation of target complex program of scientific researches of NAS of Ukraine “Modernization of the radio telescope UTR-2 and future development of decameter radio astronomy in Ukraine” (Materials of scientific report at meeting of Presidium of NAS of Ukraine on January 29, 2014.). *Bulletin of NAS of Ukraine*. no. 3, pp. 20–30 (in Ukrainian).
10. KONOVALENKO, A. A., FALKOVICH, I. S., KALINICHENKO, N. N., GRIDIN, A. A., BUBNOV, I. N., LECACHEUX, A., ROSOLEN, C. and RUCKER, H. O., 2003. Thirty-Element Active Antenna Array as a Prototype of a Huge Low-Frequency Radio Telescope. *Exp. Astron.* vol. 16, is. 3, pp. 149–164. DOI: 10.1007/s10686-003-0030-8
11. FALKOVICH, I. S., KONOVALENKO, A. A., GRIDIN, A. A., SODIN, L. G., BUBNOV, I. N., KALINI-

- CHENKO, N. N., RASHKOVSKII, S. L., MUKHA, D. V. and TOKARSKY, P. L., 2011. Wide-band high linearity active dipole for low frequency radio astronomy. *Exp. Astron.* vol. 32, is. 2, pp. 127–145. DOI: 10.1007/s10686-011-9256-z
12. STANISLAVSKY, A. A., BUBNOV, I. N., KONOVALENKO, A. A., GRIDIN, A. A., SHEVCHENKO, V. V., STANISLAVSKY, L. A., MUKHA, D. V. and KOVAL, A. A., 2014. First radio astronomy examination of the low-frequency broadband active antenna subarray. *Adv. Astron.* vol. 2014, id. 517058. DOI: 10.1155/2014/517058
 13. ZARKA, P., GIRARD, J. N., TAGGER, M., DENIS, L., AGHANIM, N., ALSAC, L., ARNAUD, M., BARTH, S., BOONE, F., BOSSE, S., CAPAYROU, D., CAPDESSUS, C., CECCONI, B., CHARRIER, D., COFFRE, A., COGNARD, I., COMBES, F., CORBEL, S., CORNILLEAU-WEHRLIN, N., COTTET, P., DOLE, H., DUMEZ-VIOU, C., FALKOVYCH, I., FERRARI, C., FLOQUET, F., GARNIER, S., GEORGES, G., GOND, B., GRESPIER, N., GRIEBMEIER J.-M., JOLY S., KONOVALENKO A., LAMY L., LEHNERT M., POMMIER M., RUCKER H., SANDRÉ P., SEMELIN, B., TAFFOUREAU, C., TASSE, C., THÉTAS, E., THEUREAU, G., TOKARSKY, P., VAN DRIEL, W., VIMON, J.-B. and WEBER, R., 2012. LSS/NenuFAR: The LOFAR Super Station project in Nançay. In: S. BOISSIER, P. de LAVERNY, N. NARDETTO, R. SAMADI, D. VALLS-GABAUD and H. WOZNIAK, eds. *SF2A 2012: Proceedings of the annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*. Nice, France, pp. 687–694.
 14. ZARKA, P., TAGGER, M., DENIS, L., GIRARD, J. N., KONOVALENKO, A., ATEMKENG, M., ARNAUD, M., AZARIAN, S., BARSUGLIA, M., BONAFEDE, A., BOONE, F., BOSMA, A., BOYER, R., BRANCHESI, M., BRIAND, C., CECCONI, B., CÉLESTIN, S., CHARRIER, D., CHASSANDE-MOTTIN, E., COFFRE, A., COGNARD, I., COMBES, F., CORBEL, S., COURTE, C., DABBECH, A., DAIBOO, S., DALLIER, R., DUMEZ-VIOU, C., CORSO, M. N. E., FALGARONE, E., FALKOVYCH, I., FERRARI, A., FERRARI, C., FERRIÈRE, K., FEVOTTE, C., FIALKOV, A., FULLEKRUG, M., GÉRARD, E., GRIEBMEIER, J.-M., GUIDERDONI, B., GUILLEMOT, L., HESSELS, J., KOOPMANS, L., KONDRATIEV, V., LAMY, L., LANZ, T., LARZABAL, P., LEHNERT, M., LEVRIER, F., LOH, A., MACARIO, G., MAINTOUX, J. J., MARTIN, L., MARY, D., MASSON, S., MIVILLE-DESCHENES, M. A., OBEROI, D., PANCHENKO, M., PANDEY-POMMIER, M., PETITEAU, A., PINÇON, J. L., REVENU, B., RIBLE, F., RICHARD, C., RUCKER, H. O., SALOMÉ, P., SEMELIN, B., SERYLAK, M., SMIRNOV, O., STAPPERS, B., TAFFOUREAU, C., TASSE, C., THEUREAU, G., TOKARSKY, P., TORCHINSKY, S., ULYANOV, O., VAN DRIEL, W., VASILIEVA, I., VAUBAILLON, J., VAZZA, F., VERGANI, S., WAS, M., WEBER, R. and ZAKHARENKO, V., 2015. NenuFAR: Instrument description and science case. In: *International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT): Proc. conf.* Kharkiv, Ukraine, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICATT.2015.7136773
 15. BURKE, B. F. and FRANKLIN, K. L., 1955. Observations of a variable radio source associated with the planet Jupiter. *J. Geophys. Res.* vol. 60, is. 2, pp. 213–217. DOI: 10.1029/JZ060i002p00213
 16. RIIHIMAA, J. J., 1977. S-bursts in Jupiter's decametric radio spectra. *Astrophys. Space Sci.* vol. 51, is. 2, pp. 363–383. DOI: 10.1007/BF00644159
 17. BAZELYAN, L. L., BRUCK, Yu. M., ZHOUCK, I. N., MEGN, A. V., SODIN, L. G. and SHARYKIN N. K., 1964. Broadband radio interferometer with an electrical control of the radiation pattern. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radiofiz.* vol. 7, no. 2, pp. 215–224 (in Russian).
 18. BRUCK, Yu. M., GONCHAROV N. Yu., ZHOUCK I. N., INYUTIN G. A., MEGN A. V., SODIN, L. G. and SHARYKIN N. K., 1968. Experimental studies of multi-element antennas – grids of the radio telescope UTR-1. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radiofiz.* vol. 11, no. 1, pp. 28–43 (in Russian).
 19. UDAYA SHANKAR, N. and RAVI SHANKAR, T. S., 1990. A digital correlation receiver for the GEETEE radio telescope. *J. Astrophys. Astron.* vol. 11, is. 3, pp. 297–310. DOI: 10.1007/BF02709280
 20. KUTUZOV, S. M., ILYASOV, Yu. P. and GLUSHAEV, A. A., 1976. Antenna systems of the VLPA FIAN radio telescope. *Radiophys. Quantum Electron.* vol. 19, no. 11, pp. 1115–1120. DOI: 10.1007/BF01037293
 21. ERICKSON, W. C., MAHONEY, M. J. and ERB, K., 1982. The Clark Lake Teepee-Tee telescope. *Astrophys. J. Supp. Ser.* vol. 50, pp. 403–419. DOI: 10.1086/190831
 22. ABRANIN, E. P., BRUCK, Yu. M., ZAKHARENKO, V. V. and KONOVALENKO, A. A., 1997. Structure and Parameters of New System of Antenna Amplification of Radio Telescope UTR-2. *Radio Physics and Radio Astronomy.* vol. 2, no 1, pp. 95–102 (in Russian).
 23. ABRANIN, E. P., BRUCK, Yu. M., ZAKHARENKO, V. V. and KONOVALENKO, A. A., 2001. The New Preamplification System for the UTR-2 Radio Telescope. *Exp. Astron.* vol. 11, is. 2, pp 85–112. DOI: 10.1023/A:1011109128284
 24. VASILYEV, O. Y., KUZIN, A. I., KRAVTSOV, A. A., BULAKH, E. V., VINOGRADOV, V. V. and VAVRIV, D. M., 2014. Multifunctional Digital Receiver-Spectrometer. *Radio Physics and Radio Astronomy.* vol. 19, no. 3, pp. 276–289 (in Russian).
 25. KONOVALENKO, A. A., 2005. Low-Frequency Radio Astronomy Prospects. *Radio Physics and Radio Astronomy.* vol. 10, special issue, pp. S86–S114 (in Russian).
 26. KONOVALENKO, A. A., TOKARSKY, P. L. and YERIN, S. N., 2013. Effective Area and Directional Patterns of Antenna Array Operating in Ultra Wideband Signals Receiving Mode. *Radio Physics and Radio Astronomy.* vol. 18, no. 3, pp. 257–264 (in Russian).
 27. SODIN, L. G., 2005. Some Problems of the Phased Array Theory Relevant in Radio Astronomy. *Radio Physics and Radio Astronomy.* vol. 10, special issue, pp. S128–S142 (in Russian).
 28. TOKARSKY, P. L., KONOVALENKO, A. A., FALKOVICH, I. S. and YERIN, S. N., 2015. SNR in Active receiving Antenna Used as an Element of Phased Antenna Array for GURT Radio Telescope. In: *Proceedings of the 45th European Microwave Conference (EuMC 2015)*. Paris, France, 7–10 September 2015, pp. 1594–1597. DOI: 10.1109/EuRAD.2015.7346365
 29. YERIN, S. N., TOKARSKY, P. L., GRIDIN, A. A., BUBNOV, I. N., KONOVALENKO, A. A., FALKOVYCH, I. S. and REZNIK, A. P., 2014. Beamforming Unit for Sub-

- Array of Decameter and Meter Wave Radio Telescope GURT. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 19, no. 3, pp. 240–248 (in Russian).
30. YERIN, S. N., GRIDIN, A. A. and TOKARSKY, P. L., 2012. Phase shifter for antenna array of decameter range radio telescope, In: *Proceedings of the 19-th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON 2012*. Warsaw, Poland, 21–23 May 2012, pp. 715–717. DOI: 10.1109/MIKON.2012.6233621
 31. TOKARSKY, P. L., 2006. Matrix model of dissipative antenna array. *Radiotekhnika. Ukrainian interdepartmental science technical digest*. vol. 146, pp. 156–170 (in Russian).
 32. TOKARSKY, P. L., 2007. Matrix Theory of Dissipative Antenna Arrays. In: *Proceedings of the 6-th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'07)*. Sevastopol, Ukraine, 17–21 September 2007, pp. 87–92. DOI: 10.1109/ICATT.2007.4425122
 33. TOKARSKY, P. L. and YERIN, S. N., 2013. A Multiport Approach to Modeling of Phased Antenna Array for Radio Astronomy. In: *Proceedings of the 43th European Microwave Conference (EuMC 2013)*. Nuremberg, Germany, 6–11 October 2013, pp. 1651–1654.
 34. KONOVALENKO, O. O., TOKARSKY, P. L. and YERIN, S. N., 2015. Modelling of a subarray of a GURT radio telescope active antenna array. *Prikladnaya radioelektronika*. vol. 14, no. 1, pp. 46–52 (in Russian).
 35. FALKOVICH, I. S., SODIN, L. G. and KALINICHENKO, N. N., 2000. Measurement of Substrate Parameters for Specification of Characteristics of Antennas Located Near the Earth's Surface. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 5, no. 2, pp. 195–206 (in Russian).
 36. KRAUS, J. D., 1966. *Radio Astronomy*. New York: McGraw-Hill.
 37. KONOVALENKO, A. A., FALKOVICH, I. S., KALINICHENKO, N. N., GRIDIN, A. A., BUBNOV, I. N., LECACHEUX, A., ROSOLEN, C. and RUCKER, H. O., 2004. Active Antenna Array for Radio Astronomy. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 9, no 3. pp. 248–260 (in Russian).
 38. 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. *Scientific Workshop – Astrophysics with E-LOFAR*. Hamburg, Germany, 16 – 19 September 2008. Available from: http://www.hs.uni-hamburg.de/DE/Ins/Lofar/Iofar_workshop/poster_abstracts.html#poster27
 39. TURTLE, A. J., PUGH, G. F., KENDERDINE, S. and PAULINY-TOTH, I. I. K., 1962. The spectrum of the galactic radio emission. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 124, is. 4, pp. 297–312. DOI: 10.1093/mnras/124.4.297
 40. VASILENKO, N. M. and SIDORCHUK, M. A., 2015. Brightness Temperature and Spectral Index of Extragalactic Background at Decameter Wavelengths. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 20, no 3. pp. 205–215 (in Russian).
 41. SHKLOVSKY, I. S., 1960. About probable secular change flux and intensive radio emission from several discrete sources. *Astron. Zh.* vol. 37, no 2. pp. 256–264 (in Russian).
 42. HÖGBOM, J. A. and SHAKESHAFT, J. R., 1961. Secular variations of the flux density of the radio source Cassiopeia A. *Nature*. vol. 189, no. 4764, pp. 561–562. DOI: 10.1038/189561a0
 43. IVANOV, V. P. and STANKEVICH, K. S., 1989. Periodic Variations of the Radio Emission and Evolution of the Spectrum of the Supernova Remnant Cassiopeia A. *Astron. Zh.* vol. 66, no. 1, pp. 30–39.
 44. HELMBOLDT, J. F. and KASSIM, N. E., 2009. The evolution of Cas A at low radio frequencies. *Astron. J.* vol. 138, no. 3, pp. 838–844. DOI: 10.1088/0004-6256/138/3/838
 45. ERICKSON, W. C. and PERLEY, R. A., 1975. An anomaly in the flux of Cassiopeia A at 38 MHz. *Astron. J.* vol. 200, pp. L83–L87. DOI: 10.1086/181903
 46. TROITSKII, V. S., STANKEVICH, K. S., TSEITLIN, N. M., KROTIKOV, V. D., BONDAR', L. N., STREZHNEVA, K. M., RAKHLIN, V. L., IVANOV, V. P., PELYUSHENKO, S. A., ZUBOV, M. M., SAMOILOV, R. A., TITOV, G. K., PORFIR'EV, V. A. and CHEKALEV, S. P., 1972. Calibration of the Flux Density of Cassiopeia A and Cygnus A in the Range 300–9375 MHz. *Sov. Astron.* vol. 15, no. 6, pp. 915–917.
 47. VINYAIKIN, E. N., 2007. Evolution of the Radio Spectrum of Cassiopeia A from Long-Term Observations. Observations at 290 and 927 MHz. *Astron. Rep.* vol. 51, no. 2. pp. 87–96. DOI: 10.1134/S1063772907020023
 48. BUBNOV, I. N., KONOVALENKO, A. A., STANISLAVSKY, A. A., BOVKOON, V. P., ZHOUK, I. N. and MUKHA, D. V., 2014. Radio Spectrum Evolution of the Supernova Remnant Cassiopeia A at Frequencies 35–65 MHz. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 19, no. 2, pp. 111–119 (in Russian).
 49. MELNIK, V. N., KONOVALENKO, A. A., ABRANIN, E. P., DOROVSKYY, V. V., STANISLAVSKY, A. A., RUCKER, H. O. and LECACHEUX, A., 2005. Solar sporadic radio emission in the decametre waveband. *Astron. Astrophys. Trans.* vol. 24, no. 5, pp. 391–401. DOI: 10.1080/10556790600568854
 50. DOROVSKYY, V. V., MELNIK, V. N., KONOVALENKO, A. A., BUBNOV, I. N., GRIDIN, A. A., SHEVCHUK, N. V., FALKOVICH, I. S., KOVAL, A. A., RUTKEYCH, B. P., REZNIK, A. P., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., BELOV, A. S., KHRYSTENKO, A. D., KVASOV, G. V. and YERIN, S. N., 2013. Observations of the Type U Burst in within 10–70 MHz with the GURT Radio Telescope. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 18, no 2, pp. 101–106 (in Russian).
 51. DOROVSKYY, V. V., MELNIK, V. N., KONOVALENKO, A. A., BUBNOV, I. N., GRIDIN, A. A., SHEVCHUK, N. V., RUCKER, H. O., POEDTS, S. and PANCHENKO, M., 2015. Decameter U-burst Harmonic Pair from a High Loop. *Sol. Phys.* vol. 290, no 1, pp. 181–192. DOI: 10.1007/s11207-014-0615-6
 52. DOROVSKYY, V. V., MELNIK, V. N., KONOVALENKO, A. A., RUCKER, H. O., ABRANIN, E. P. and LECACHEUX, A., 2010. Solar U- and J-Bursts at the Decameter Waves. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 15, no 1, pp. 5–14 (in Russian).
 53. MELNIK, V. N., KONOVALENKO, A. A., RUCKER, H. O., BOIKO, A. I., DOROVSKYY, V. V., ABRANIN, E. P. and LECACHEUX, A., 2011. Observations of Powerful Type III Bursts in the Frequency Range 10–30 MHz. *Sol. Phys.* vol. 269, no. 2, pp. 335–350. DOI: 10.1007/s11207-010-9703-4
 54. BRAZHENKO, A. I., PYLAEV, O. S., MELNIK, V. N., KONOVALENKO, A. A., FRANTSUZENKO, A. V., DO-

- ROVSKYY, V. V., VASHCHISHIN, R. V. and RUCKER, H. O., 2013. Observations of the Three Harmonic Components of Solar Type III Bursts at Decameter Wavelengths. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 18, no. 4, pp. 283–290 (in Russian).
55. BRAZHENKO, A. I., MELNIK, V. N., FRANTSUZENKO, A. V., DOROVSKYY, V. V., RUCKER, H. O. and PANCHENKO, M., 2015. On the Harmonic Coupling of Components in Pairs of IIb-III Bursts at Decameter Wavelengths. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 20, no. 2, pp. 99–108 (in Russian).
56. DOROVSKYY, V. V., MEL'NIK, V. N., KONOVALENKO, A. A., RUCKER, H. O., ABRANIN, E. P., STANISLAVSKY, A. A. and LECACHEUX, A., 2007. Decameter Type II radio burst with three harmonics. In: *Proceedings of European Planetary Science Congress 2007*. Potsdam, Germany, 20–24 August, 2007, p. 688.
57. MEL'NIK, V. N., KONOVALENKO, A. A., RUCKER, H. O., STANISLAVSKY, A. A., ABRANIN, E. P., LECACHEUX, A., MANN, G., WARMUTH, A., ZAITSEV, V. V., BOUDJADA, M. Y., DOROVSKII, V. V., ZAHARENKO, V. V., LISACHENKO, V. N. and ROSOLEN, C., 2004. Observations of Solar Type II bursts at frequencies 10–30 MHz. *Sol. Phys.* vol. 222, no. 1, pp. 151–166. DOI: 10.1023/B:SOLA.0000036854.66380.a4
58. DOROVSKYY, V. V., MELNIK, V. N., KONOVALENKO, A. A., BRAZHENKO, A. I., PANCHENKO, M., POEDTS, S. and MYKHAYLOV, V. A., 2015. Fine and Superfine Structure of the Decameter-Hectometer Type II Burst on 7 June 2011. *Sol. Phys.* vol. 290, no. 7, pp. 2031–2042. DOI: 10.1007/s11207-015-0725-9
59. MELNIK, V. N., SHEVCHUK, N. V., KONOVALENKO, A. A., RUCKER, H. O., DOROVSKYY, V. V., POEDTS, S. and LECACHEUX, A., 2014. Solar Decameter Spikes. *Sol. Phys.* vol. 289, no. 5, pp. 1701–1714. DOI: 10.1007/s11207-013-0434-1
60. MELNIK, V. N., RUCKER, H. O. and KONOVALENKO, A. A., 2008. Solar Type IV Bursts at Frequencies 10–30 MHz. In: PINGZHI WANG, ed. *Solar Physics Research Trends*. New York: Nova Science Pub., pp. 287–325.
61. ZAQRASHVILI, T. V., MELNIK, V. N., BRAZHENKO, A. I., PANCHENKO, M., KONOVALENKO, A. A., FRANZUZENKO, A. V., DOROVSKYY, V. V. and RUCKER, H. O., 2013. Radio seismology of the outer solar corona. *Astron. Astrophys.* vol. 555, id. A55. DOI: 10.1051/0004-6361/201321548
62. ZLOTNIK, E. Y., ZAITSEV, V. V., MELNIK, V. N., KONOVALENKO, A. A. and DOROVSKYY, V. V., 2015. “Fingerprint” Fine Structure in the Solar Decametric Radio Spectrum. *Sol. Phys.* vol. 290, no. 7, pp. 2013–2030. DOI: 10.1007/s11207-015-0724-x
63. WILD, J. P. and ROBERTS, J. A., 1956. Regions of the ionosphere responsible for radio star scintillations. *Nature*. vol. 178, no. 4529, pp. 377–378. DOI:10.1038/178377a0
64. HEWISH, A., SCOTT, P. F. and WILLS, D., 1964. Interplanetary Scintillation of Small Diameter Radio Sources. *Nature*. vol. 203, no. 4951, pp. 1214–1217. DOI:10.1038/2031214a0
65. HEWISH, A., DENNISON, P. A. and PILKINGTON, J. D. H., 1966. Measurements of the size and motion of the irregularities in the interplanetary medium. *Nature*. vol. 209, no. 5029, pp. 1188–1189. DOI:10.1038/2091188a0
66. FALKOVICH, I. S., KALINICHENKO, N. N., GRIDIN, A. A. and BUBNOV, I. N., 2004. On the Possibility of Broadband IPS Observations at Decameter Waves. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 9, no. 2, pp. 121–129 (in Russian).
67. KALINICHENKO, N. N., 2009. A search for compact decametric radio sources in supernova remnants using the interplanetary scintillation technique. *Astrophys. Space Sci.* vol. 319, no. 2, pp. 131–138. DOI: 10.1007/s10509-008-9960-y
68. FALKOVICH, I. S., KONOVALENKO, A. A., KALINICHENKO, N. N., OLYAK, M. R., GRIDIN, A. A., BUBNOV, I. N., LECACHEUX, A. and RUCKER, H. O., 2006. Variations of Parameters of Solar Wind Stream Structure Outside 1 AU in 2003–2004. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 11, no. 1, pp. 31–41 (in Russian).
69. DESSLER, A. J., 1983. Jupiter’s magnetic field and magnetosphere. In: A. J. DESSLER, ed. *Physics of the Jovian magnetosphere*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 1–50.
70. SMITH, E. J., DAVIS, L. JR., JONES, D. E., COLEMAN, P. J., COLBURN, D. S., DYAL, P., SONNET, C. P. and FRANSDEN, A. M. A., 1974. The planetary magnetic field and magnetosphere of Jupiter: Pioneer 10. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 79, pp. 3501–3513. DOI: 10.1029/JA079i025p03501
71. ACUFIA, M. H. and NESS, N. F., 1976. The main magnetic field of Jupiter. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 81, pp. 2917–2922. DOI: 10.1029/JA081i016p02917
72. NESS, N. F., ACUFIA, M. H., LEPPING, R. P., BURLAGA, L. F., BEHANNON, K. W. and NEUBAUER, F. M., 1979. Magnetic field studies at Jupiter by Voyager 1: Preliminary results. *Science*. vol. 204, no. 4396, pp. 982–987. DOI: 10.1126/science.204.4396.982
73. NESS, N. F., ACUFIA, M. H., LEPPING, R. P., BURLAGA, L. F., BEHANNON, K. W. and NEUBAUER, F. M., 1979. Magnetic field studies at Jupiter by Voyager 2: Preliminary results. *Science*. vol. 206, no. 4421, pp. 966–972. DOI: 10.1126/science.206.4421.966
74. ZARKA, P., 1998. Auroral radio emissions at the outer planets: Observations and theories. *J. Geophys. Res. Atmos.* vol. 103, no. 3339, pp. 20159–20194. DOI: 10.1029/98JE01323
75. LITVINENKO, G. V., SHAPOSHNIKOV, V. E., KONOVALENKO, A. A., ZAKHARENKO, V. V., PANCHENKO, M., DOROVSKY, V. V., BRAZHENKO, A. I., RUCKER, H. O., VINOGRADOV, V. V. and MELNIK, V. N., 2016. Quasi-similar decameter emission features appearing in the solar and jovian dynamic spectra. *Icarus*. vol. 272, pp. 80–87. DOI: 10.1016/j.icarus.2016.02.039
76. RYABOV, V. B., ZARKA, P., HESS, S., KONOVALENKO, A., LITVINENKO, G., ZAKHARENKO, V., SHEVCHENKO, V. A. and CECCONI, B., 2014. Fast and slow frequency-drifting millisecond bursts in Jovian decametric radio emissions. *Astron. Astrophys.* vol. 568, id. A53. DOI: 10.1051/0004-6361/201423927
77. BOISCHOT, A., ROSOLEN, C., AUBIER, M. G., DAIGNE, G., GENOVA, F., LEBLANC, Y., LECACHEUX, A., DE LA NOË, J. and MØLLER-PEDERSEN, B., 1980. A new high-grain, broadband, steerable ar-

- ray to study Jovian decametric emission. *Icarus*. vol. 43, no. 3, pp. 399–407. DOI: 10.1016/0019-1035(80)90185-2
78. LECACHEUX, A., 2000. The Nançay Decameter Array: A Useful Step Towards Giant, New Generation Radio Telescopes for Long Wavelength Radio Astronomy, in Radio Astronomy at Long Wavelengths. In: R. G. STONE, K. W. WEL- LER, M. L. GOLDSTEIN and J.-L. BOUGERET, eds. *Radio Astronomy at Long Wavelengths*. Washington, DC, USA: American Geophysical Union, pp. 321–328. DOI: 10.1029/GM119p0321
79. KONOVALENKO, A., LECACHEUX, A., RUCKER, H., FISCHER, G., ABRANIN, E. P., KALINICHENKO, N. N., FALKOVICH, I. S. and SIDORCHUK, K. M., 2006. Ground-based decameter wavelength observations of Sa- turn electrostatic discharges. In: *European Planetary Sci- ence Congress, EPSC2006-A-00229*. Berlin, Germany, 18–22 September 2006, p. 229.
80. KONOVALENKO, A. A., KALINICHENKO, N. N., RU- CKER, H. O., LECACHEUX, A., FISCHER, G., ZAR- KA, P., ZAKHARENKO, V. V., MYLOSTNA, K. Y., GRIEBMEIER J.-M., ABRANIN, E. P., FALKOVICH, I. S., SIDORCHUK, K. M., KURTH, W. S., KAISER, M. L. and GURNETT, D. A., 2013. Earliest recorded ground- based decameter wavelength observations of Saturn’s light- ning during the giant E-storm detected by Cassini space- craft in early 2006. *Icarus*. vol. 224, no. 1, pp. 14–23. DOI: 10.1016/j.icarus.2012.07.024
81. ZAKHARENKO, V. V., MYLOSTNA, K. Y., FI- SCHER, G., KONOVALENKO, A. A., ZARKA, P., GRIEBMEIER, J.-M., RYABOV, B. P., VAVRIV, D. M., RYABOV, V. B., RUCKER, H., RAVIER, P., SIDOR- CHUK, M. A., CECCONI, B., COFFRE, A., DENIS, L., FABRICE, C., KOZHYN, R. V., MUKHA, D. V., PAL- LIER, L., SCHNEIDER, J., SHEVCHENKO, V. A., VI- NOGRADOV, V. V., WEBER, R. and NIKOLAENKO, V. S., 2011. Identification of Saturn Lightnings Recorded by the UTR-2 Radio Telescope and Cassini Spacecraft. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 2, no. 2, pp. 93–98. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v2.i2.10
82. ZAKHARENKO, V., MYLOSTNA, K., KONOVALEN- KO, A., KOLYADIN, V., ZARKA, P., GRIEBMEIER, J.-M., LITVINENKO, G., SIDORCHUK, M., RUCKER, H., FI- SCHER, G., CECCONI, B., COFFRE, A., DENIS, L., SHEVCHENKO, V. and NIKOLAENKO, V., 2012. Search and study of electrostatic discharges in the Solar System with the radio telescope UTR-2. In: *European Planetary Science Congress*. Madrid, Spain, 23-28 September 2012, id. EPSC2012-186. Available from: <http://meetings.copernicus.org/epsc2012>
83. FISCHER, G., KURTH, W. S., GURNETT, D. A., ZAR- KA, P., DYUDINA, U. A., INGERSOLL, A. P., EWALD, S. P., PORCO, C. C., WESLEY, A., GO, C. and DELCROIX, M., 2011. A giant thunderstorm on Saturn. *Nature*. vol. 475, no. 7354, pp. 75–77. DOI: 10.1038/nature10205
84. MYLOSTNA, K. Y., ZAKHARENKO, V. V., KONO- VALENKO, A. A., FISHER, G., ZARKA, P. and SIDOR- CHUK, M. A., 2014. Fine Time Structure of Lightnings on Saturn. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 19, no. 1, pp. 10–19 (in Russian).
85. MYLOSTNA, K. Y. and ZAKHARENKO, V. V., 2013. Search and Study of Storm Activity on Saturn and Other Planets of the Solar System. *Radio Physics and Radio As- tronomy*. vol. 18, no. 1, pp. 12–25 (in Russian).
86. BRUK, Y. M., DAVIES, J. G., KUZ’MIN, A. D., LY- NE, A. G., MALOFEEV, V. M., ROWSON, B., USTI- MENKO, B. Y. and SHITOV, Y. P., 1978. Radio-emission spectra of five pulsars in the 17-1420 MHz range. *Sov. Astron.* vol. 22, pp. 588–593.
87. MALOV, I. F., MALOFEEV, V. F. and SEN’E, D. S., 1994. Observed total radio luminosities of 232 pulsars. *Astron. Rep.* vol. 38, pp. 677–682.
88. MALOFEEV, V. M., GIL, J., JESSNER, A., MALOV, I. F., SEIRADAKIS, J. H., SIEBER, W. and WIELEBINS- KI, R., 1994. Spectra of 45 pulsars. *Astron. Astrophys.* vol. 285, pp. 201–208.
89. KONOVALENKO, A., SODIN, L., ZAKHARENKO, V., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEP- KIN, S., TOKARSKY, P., MELNIK, V., KALINICHEN- KO, N., STANISLAVSKY, A., KOLIADIN, V., SHEPE- LEV, V., DOROVSKYY, 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., LITVINEN- KO, G., KHRISTENKO, A., SHEVCHENKO, V. V., SHEVCHENKO, V. A., BELOV, A., RUDAVIN, E., VA- SYLIEVA, I., MIROSHNICHENKO, A., VASILEN- KO, N., OLYAK, M., MYLOSTNA, K., SKORYK, A., SHEVTSOVA, A., PLAKHOV, M., KRAVTSOV, I., VOL- VACH, Y., LYTVINENKO, O., SHEVCHUK, N., ZHOUK, I., BOVKUN, V., ANTONOV, A., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BU- LAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., BRAZHEN- KO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHO- VYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHIN, O., RU- CKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LE- CACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A., GRIEB- MEIER, J.-M., TAGGER, M., GIRARD, J., CHAR- RIER, D., BRIAND, C. and MANN, G., 2016. The mo- dern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* [online]. Online First Articles, pp. 1–38. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x. Available from: <http://link.springer.com/journal/10686>
90. KUZ’MIN, A. D., 1989. *Pulsars*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
91. MALOFEEV, V. M., MALOV, O. I. and SHCHEGOLE- VA, N. B., 1998. Discovery of a burst in one pulse com- ponent in the pulsar PSR B0643+80. *Astron. Rep.* vol. 42, no. 2, pp. 241–245.
92. POPOV, M. V., KUZ’MIN, A. D., UL’YANOV, O. M., DESHPANDE, A. A., ERSHOV, A. A., ZAKHAREN- KO, V. V., KONDRAT’EV, V. I., KOSTYUK, S. V., LO- SOVSKI, B. Y. and SOGLASNOV, V. A., 2006. Instanta- neous Radio Spectra of Giant Pulses from the Crab Pulsar from Decimeter to Decameter Wavelengths. *Astron. Rep.* vol. 50, no. 7, pp. 562–568.
93. ULYANOV, O. M., ZAHARENKO, V. V., KONOVALEN- KO, A. A., LECACHEUX, A., ROSOLEN, C. and RU- CKER, H. O., 2006. Detection of Individual Pulses from Pulsars B0809+74, B0834+06, B0943+10, B0950+08 and B1133+16 in the Decameter Wavelengths. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 11, no. 2, pp. 113–133 (in Russian).

94. 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 Physics and Radio Astronomy*. vol. 12. no. 1, pp. 5–19 (in Russian).
95. KUZMIN, A. D., 2007. Giant pulses of pulsar radio emission. *Astrophys. Space Sci.* vol. 308, no. 1, pp. 563–567. DOI: 10.1007/s10509-007-9347-5
96. 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, no. 11, pp. 917–924. DOI: 10.1134/S1063772908110061
97. UL'YANOV, O. M. and ZAKHARENKO, V. V., 2012. Energy of anomalously intense pulsar pulses at decameter wavelengths. *Astron. Rep.* vol. 56, no. 6, pp. 417–429. DOI: 10.1134/S1063772912060054
98. 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 Astronomy*. vol. 22, pp. 53–65.
99. 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, no. 4, pp. 3624–3641. DOI: 10.1093/mnras/stt470
100. 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, no. 1, pp. 150–157. DOI: 10.1093/mnras/stv2172
101. AFRAIMOVICH, E. L., 1981. Cepstral analysis of broadband radio emission – New possibilities in radio astronomy. *Astron. Astrophys.* vol. 97, no. 1, pp. 366–372.
102. AFRAIMOVICH, E. L., SMOL'KOV, G. Y. and YASYUKEVICH, Y. Y., 2008. Adaptive radio astronomy. *Doklady Physics*. vol. 53, no. 4, pp. 211–215. DOI: 10.1134/S1028335808040095
103. NOUTSOS, A., JOHNSTON, S., KRAMER, M. and KARASTERGIOU, A., 2008. New pulsar rotation measures and the Galactic magnetic field. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 386, no. 4, pp. 1881–1896. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2008.13188.x
104. ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I. and SKORYK, A. O., 2013. Polarization Sounding of the Pulsar Magnetosphere. *Bulletin CrAO*. vol. 109, pp. 159–168.
105. KONOVALENKO, A. A. and SODIN, L. G., 1980. Neutral ^{14}N in the interstellar medium. *Nature*. vol. 283, pp. 360–361. DOI: 10.1038/283360a0
106. KONOVALENKO, A. A. and SODIN, L. G., 1981. The 26.13 MHz absorption line in the direction of Cassiopeia A. *Nature*. vol. 294, pp. 135–136. DOI: 10.1038/294135a0
107. STEPKIN, S. V., KONOVALENKO, A. A., KANTHARIA, N. G. and UDAYA SHANKAR, N., 2007. Radio recombination lines from the largest bound atoms in space. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 374, no. 3, pp. 852–856. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2006.11190.x
108. WALMSLEY, C. M. and WATSON, W. D., 1982. The influence of dielectronic-like recombination at low temperatures on the interpretation of interstellar, radio recombination lines of carbon. *Astrophys. J.* vol. 260, pp. 317–325. DOI: 10.1086/160256
109. GORDON, M. A. and SOROCHEENKO, R. L., 2002. *Radio Recombination Lines: Their Physics and Astronomical Application*. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ.
110. BRAUDE, S. Y., 1992. Chapter 7. Decametric radio astronomy. In: N. S. KARDASHEV, ed. *Astrophysics out the Threshold of 21st Century*. Philadelphia: Gordon and Breach Science Publ., pp. 81–102.
111. KONOVALENKO, A. A., 1981. Digital 1-Bit Correlometer. *Pribory i Tekhnika Eksperimenta*. no. 6, pp. 128–137 (in Russian).
112. KOZHYN, R. V., VYNOGRADOV, V. V. and VAVRIV, D. M., 2007. Low-Noise, High Dynamic Range Digital Receiver/Spectrometer for Radio Astronomy Applications. In: *Int. Kharkov Symposium Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves (MSMW)*. Kharkiv, Ukraine, 25-30 June 2007, pp. 736–738. DOI: 10.1109/MSMW.2007.4294797
113. KONOVALENKO, A. A. and STEPKIN, S. V., 2005. Radio Recombination Lines. In: L. I. GURVITS, S. FREY and S. RAWLINGS, eds. *Radio Astronomy from Karl Jansky to Microjansky*. Budapest: EAS Publications Series. vol. 15, pp. 271–295. DOI: 10.1051/eas:2005158
114. FURLANETTO, S. R., OH, S. P. and BRIGGS, F. H., 2006. Cosmology at low frequencies: The 21-cm transition and the high-redshift Universe. *Phys. Rep.* vol. 433, no. 4-6, pp. 181–301. DOI: 10.1016/j.physrep.2006.08.002

A. A. Konovalenko¹, S. M. Yerin¹, I. M. Bubnov¹, P. L. Tokarsky¹, V. V. Zakharenko¹, O. M. Ulyanov¹, M. A. Sidorchuk¹, S. V. Stepkin¹, A. O. Gridin¹, G. V. Kvasov¹, V. L. Koliadin¹, V. M. Melnik¹, V. V. Dorovskyy¹, M. M. Kalinichenko¹, G. V. Litvinenko¹, P. Zarka^{2,3,4,5}, L. Denis³, J. Girard⁶, H. O. Rucker^{7,8}, M. Panchenko⁷, A. A. Stanislavsky¹, O. D. Khristenko¹, D. V. Mukha¹, O. M. Reznichenko¹, V. M. Lisachenko¹, V. V. Bortsov¹, A. I. Brazhenko⁹, I. Y. Vasylieva¹, A. O. Skoryk¹, A. I. Shevtsova¹, and K. Y. Mylostna¹

¹ Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

² LESIA (Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique), Observatoire de Paris, site de Meudon - 5, place Jules Janssen, F-92195, Meudon, France

³ USN Unite Scientifique de Nançay, Station de Radioastronomie de Nançay, Route de Souesmes, F-18 330 Nançay, France

⁴ Observatoire de Paris, 61, avenue de l'Observatoire, F-75014 Paris, France

⁵ CNRS (Centre national de la recherche scientifique), 3 rue Michel-Ange, 75794 Paris, France

⁶ CEA/AIM, Saclay, France (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives / Astrophysics, Instrumentation, Modeling), Orme des Merisiers, Bât 709, 91191 Gif-sur-Yvette, France

⁷Institut für Weltraumforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Schmiedlstraße 6, Graz, 8042, Österreich

⁸Kommission für Astronomie, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Schmiedlstraße 6, Graz, 8042, Österreich

⁹Poltava Gravimetric Observatory, S. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 27/29, Miasoiedov St., Poltava, 36014, Ukraine

ASTROPHYSICAL STUDIES WITH SMALL LOW-FREQUENCY RADIO TELESCOPES OF NEW GENERATION

Purpose: define and theoretically substantiate the range of astrophysical problems that may be efficiently solved using small antenna arrays.

Design/methodology/approach: Observation parameters and configurations of a set of small antenna arrays included in the future Giant Ukrainian radio telescope, have been derived based on the theoretical analysis and scientific results obtained by UTR-2 and URAN radio telescopes.

Results: We have proved that a wide scope of problems can be efficiently solved by small low-frequency antenna arrays, ranging from Solar studies to the search for cosmological effects associated with neutral hydrogen spectral line in the early Universe at high red shifts. For each study program, we have calculated the desired observation parameters (integration time, time and frequency resolutions), indicated the required antenna configurations and operating modes (interferometric or additive).

Conclusions: We have shown that at the construction stage of the Giant Ukrainian radio telescope and gradual commissioning of its new sections, we can solve a number of important astrophysical problems. As the new sections are being added, the observation techniques and data processing methods will constantly be improving.

Key words: astrophysics, decameter and meter radio waves, small-sized radio telescope

О. О. Коноваленко¹, С. М. Єрін¹, І. М. Бубнов¹,
П. Л. Токарський¹, В. В. Захаренко¹, О. М. Ульянов¹,
М. А. Сидорчук¹, С. В. Стьопкін¹, А. О. Грідін¹,
Г. В. Квасов¹, В. Л. Колядін¹, В. М. Мельник¹,
В. В. Доровський¹, М. М. Калініченко¹, Г. В. Литвиненко¹,
Ф. Зарка^{2,3,4,5}, Л. Дені³, Ж. Жірап⁶, Г. О. Рукер^{7,8},
М. Панченко⁷, О. О. Станіславський¹, О. Д. Христенко¹,
Д. В. Муха¹, О. М. Резніченко¹, В. М. Лісаченко¹,
В. В. Борцов¹, А. І. Браженко⁹, Я. Ю. Васильєва¹,
А. О. Скорик¹, А. І. Шевцова¹, К. Ю. Милостна¹

¹Радіоастрономічний інститут НАН України, вул. Мистецтв, 4, Харків, 61002, Україна

²Лабораторія космічних досліджень та астрофізичного приладобудування, Паризька обсерваторія, Медонський філіал, пл. Жюльє Жансена 5, F-92195, Медон, Франція

³Наукове співтовариство Нансе, Радіоастрономічна обсерваторія Нансе, Суємське шосе, F-18 330, Нансе, Франція

⁴Паризька обсерваторія, Обсерваторський проспект, 61, F-75014, Париж, Франція

⁵Національний центр наукових досліджень, вул. Мішель-Анж 3, 75794, Париж, Франція

⁶Комісія з атомної енергії та альтернативних джерел енергії, астрофізики, приладобудування, моделювання, Сакле, Орм де Мерізьєр, будівля 709, 91191 Жіф-сюр-Івет, Франція

⁷Інститут космічних досліджень Австрійської академії наук, вул. Шмідльштрассе, 6, м. Грац, 8042, Австрія

⁸Комісія з астрономії, Австрійська академія наук, Шмідльштрассе, 6, м. Грац, 8042, Австрія

⁹Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, вул. Мясосдова, 27/29, м. Полтава, 36014, Україна

АСТРОФІЗИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МАЛОРОЗМІРНИХ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ РАДІОТЕЛЕСКОПІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

Предмет і мета роботи: визначення та теоретичне обґрунтування кола астрофізичних завдань, які можуть бути ефективно розв'язані за допомогою малорозмірних радіотелескопів.

Методи і методологія: На підставі теоретичного аналізу та наукових результатів, отриманих на низькочастотних радіотелескопах УТР-2 та УРАН, розраховано необхідні параметри спостережень і конфігурації набору малорозмірних радіоастрономічних антен, що є частиною наразі споруджуваного Гігантського українського радіотелескопа.

Результати: Доведено, що коло завдань, які ефективно можуть розв'язувати малорозмірні радіотелескопи на низьких частотах, є дуже широким – від досліджень Сонця до пошуку космологічних ефектів, пов'язаних з лінією нейтрального водню в ранньому Всесвіті для великих червоних зміщень. Розраховано параметри спостережень (тривалість, часова та частотна роздільна здатність), а також вказано необхідні конфігурації антен і режими (інтерферометричний або адитивний), які потрібні для розв'язання кожної конкретної задачі.

Висновок: Показано, що на етапі будівництва гігантського радіотелескопа і поступового введення в дію його нових секцій може бути розв'язаною ціла низка важливих астрофізичних завдань. У міру додавання все нових і нових секцій будуть відпрацьовуватися методика спостережень і вдосконалюватися методи обробки даних.

Ключові слова: астрофізика, декаметрове і метрове радіо-випромінювання, малорозмірний радіотелескоп

Стаття постуила в редакцію 14.04.2016