

УДК 520.272.2

## МАКЕТ РАДИОТЕЛЕСКОПА МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С ШИРОКИМ ПОЛЕМ ЗРЕНИЯ

Р. Д. Дагкесаманский<sup>1</sup>, А. В. Веселовский<sup>2</sup>, И. М. Железных<sup>2</sup>,  
Б. К. Извеков<sup>1</sup>, А. В. Коваленко<sup>1</sup>, А. М. Лапик<sup>2</sup>, М. В. Мордовской<sup>2</sup>

*Описана схема и составные элементы макета широкоугольного радиотелескопа метрового диапазона, создаваемого на базе антенной решетки, состоящей из 128 вибраторов. Рабочий диапазон частот 38–74 МГц. Сообщаются основные параметры будущего макета и обсуждаются варианты его развития.*

**Ключевые слова:** радиотелескоп, метровый диапазон, поле зрения, антенная решетка, вибратор, система диаграммообразования, широкоугольный радиотелескоп.

В последние десятилетия в радиоастрономической литературе все чаще появляются сообщения об обнаружении коротких спорадических всплесков радиоизлучения. Некоторые из таких всплесков ассоциируются с уже известными астрономическими объектами. К таким всплескам относятся гигантские импульсы, наблюдаемые в некоторых пульсарах, как правило, в ходе запланированных наблюдений этих объектов (см., напр., [1, 2]). В конце 1980-х сотрудниками ФИАН и ИЯИ РАН было предложено [3, 4] использовать Луну в качестве гигантской мишени, а наземные радиотелескопы как детекторы для регистрации всплесков черенковского излучения, возникающих при взаимодействии космических лучей и нейтрино предельно высоких энергий с веществом лунного реголита. И хотя десятки попыток регистрации подобных всплесков от Луны пока не дали положительного результата (см., напр., обзор [5] и приведенные там ссылки), радиоастрономы не теряют надежду обнаружить всплески черенковского излучения от Луны с использованием сооружаемых более чувствительных радиотелескопов [6].

Однако, наряду с перечисленными выше всплесками, регистрируемыми (или ожидаемыми) от конкретных астрономических объектов, в последнее десятилетие было зарегистрировано уже несколько десятков быстрых спорадических радиовсплесков, об-

<sup>1</sup> ФИАН, Пуштинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, 142292 Россия, Пушкино, Московская обл., Радиотелескопная ул., 1А; e-mail: rdd@pra0.ru.

<sup>2</sup> ИЯИ РАН, 117312 Россия, Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а.

наруживаемых не в известных объектах, а в архивных данных различных обзоров неба. Именно таким образом в данных, полученных в ходе обзора неба с целью поиска новых пульсаров, выполненного на 64-метровом радиотелескопе обсерватории Паркс (Австралия), были обнаружены первые “быстрые радиовсплески” (FRBs – Fast Radio Bursts) [7] длительностью в несколько миллисекунд. Очевидно, что вероятность зарегистрировать случайным образом подобный спорадический всплеск, при прочих равных условиях, пропорциональна не только времени наблюдений, но и телесному углу поля зрения инструмента. А в случае, если априорная вероятность обнаружить всплеск не зависит от направления наблюдений, то и не имеет значения, ведет ли радиотелескоп непрерывный обзор фиксированной области неба или эта область неба меняется в ходе наблюдений. В частности, не имеет значения, ведется ли мониторинг таких спорадических всплесков радиоизлучения следящим или пассажным инструментом, если величина поля зрения обоих радиотелескопов одинакова. Итак, развитие научных направлений, связанных с исследованием природы подобных радиовсплесков, предъявляет очень серьезные дополнительные требования к радиоастрономической технике. Главное – это расширение поля зрения радиотелескопа, которое, по возможности, не должно сопровождаться заметным ухудшением других параметров радиотелескопа. Так, например, весьма нежелательно идти по пути уменьшения размеров инструмента, при котором расширение главного лепестка диаграммы направленности, а значит, и его поля зрения будет достигнуто за счет ухудшения его чувствительности и углового разрешения.

Так, для целей выполнения вышеупомянутого обзора неба с целью поиска новых пульсаров на 64-метровом радиотелескопе обсерватории Паркс был разработан матричный облучатель, обеспечивающий одновременный прием информации из 13, близких к оптической оси телескопа, направлений. Тем самым поле зрения этого радиотелескопа было увеличено в 13 раз и составило 0.3 квадратных градуса на волне 18 см. В 13 раз возрос и поток принимаемой радиотелескопом информации. Именно в архивных записях обзора, выполненного на этом радиотелескопе, была обнаружена большая часть известных на сегодня FRBs [7, 8].

Другим примером может служить модернизированный меридианный радиотелескоп метрового диапазона БСА ФИАН [9]. В ходе этой модернизации, выполненной с целью регулярного мониторинга состояния межпланетной плазмы (МПП), была создана, в частности, вторая система диаграммообразования этого инструмента. При этом обе диаграммообразующие системы (и прежняя, управляемая 8-лучевая, и новая, стационарная 128-лучевая) работают одновременно по двум независимым научным программам,

т.е. на основе одной антенной решетки фактически создано два радиотелескопа. Поле зрения нового радиотелескопа составляет около 65 квадратных градусов, что является рекордом для высокочувствительных радиотелескопов, каким, несомненно, является радиотелескоп БСА ФИАН, принимающий сигнал на центральной частоте 111 МГц в полосе 2.5 МГц. Именно в ходе анализа данных мониторинга МПП за последние пару лет были обнаружены десятки новых радиопульсаров, более десятка радиотранзиентов [10, 11] и уже 12 всплесков радиоизлучения, подобных FRBs [12, 13].

Совершенно очевидно, что столь значительное увеличение информативности радиотелескопов было бы невозможно без использования новейших достижений в области компьютерных и информационных технологий. Сегодня во многих случаях оцифровка сигнала с последующей компьютерной обработкой оказывается предпочтительней использования аналоговых систем регистрации. Положительный опыт создания новой диаграммы направленности БСА ФИАН указывает на перспективность создания широкоугольных телескопов метрового диапазона на базе многоэлементных антенных решеток. Для отработки основных принципов создания многолучевых диаграмм направленности таких радиотелескопов было решено создать макет широкоугольного радиотелескопа на базе антенной решетки, состоящей из 128 элементов. Каждый из этих элементов представляет собой антенну на базе двух диполей, настроенных на две ортогональные линейные поляризации. Все элементы оснащены преобразователями двух линейных поляризаций в круговую и усилителями сигнала. 128 элементов объединяются в 8 идентичных модулей по 16 элементов в каждом, расположенных, как показано на рис. 1.

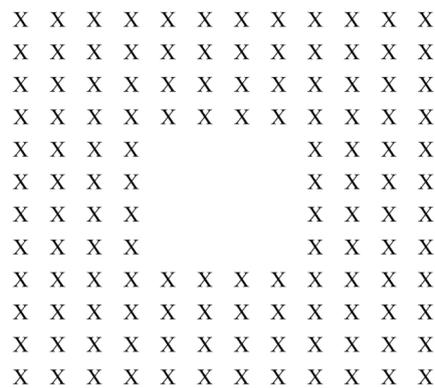


Рис. 1: Схема расположения восьми 16-элементных ( $4 \times 4$ ) модулей в горизонтальной плоскости.

В центре каждого модуля располагается устройство, представляющее собой матрицу Батлера (Batler Matrix) – аналоговую систему, формирующую многолучевую диаграмму направленности модуля. Это устройство имеет 16 входов и 16 выходов. На входы матрицы подаются сигналы от каждого из 16 элементов модуля. Каждый из выходных сигналов представляет собой результат сложения всех 16 входных сигналов, но с различными относительными временными задержками (в виде соответствующих дискретных наборов отрезков кабеля), компенсирующими различия времени прихода фронта радиоволны на различные элементы модуля. Таким образом, каждый из 16 выходных сигналов матрицы Батлера представляет собой сумму сигналов со всех элементов модуля, сфазированных для одного из 16 направлений многолучевой диаграммы направленности модуля. Полная идентичность матриц Батлера всех восьми модулей обеспечивает идентичность и 16 лучевых диаграмм направленностей всех восьми модулей, которые оказываются сориентированными в одинаковых направлениях. Схема расположения 16 лучей диаграммы направленности каждого из восьми модулей представлена на рис. 2.

Дальнейшая процедура формирования потоков данных может быть осуществлена различными способами. Например, могут быть изготовлены 16 матриц второго уровня с 8 входами и 9 выходами каждая, формирующие в общей сложности 144 потока данных, которые соответствуют 144 лучам макета как целого, расположенным по 9 лучей в каждом из 16 лучей модуля, как показано на том же рис. 2 темными прямоугольниками. После этого сигналы со всех 144 выходов шестнадцати матриц оцифровываются и полученные потоки данных (в сумме около 1.0 Гб/сек) вводятся в компьютер для дальнейшей обработки и хранения данных.

Наряду с вышеуказанным способом, был рассмотрен и второй вариант формирования 144 потоков данных, поступающих со 144 направлений сформированной диаграммы направленности. В этом варианте все 128 выходов 16-лучевых диаграмм направленности восьми модулей оцифровываются, после чего вводятся в компьютер, и дальнейшее формирование откликов системы на сигналы, поступающие со 144 направлений результирующей диаграммы направленности, производится в компьютере. При этом заметно возрастают требования к синхронизации всех оцифровщиков, интерфейсов, а также к мощности самого компьютера. Рассматривалась возможность создания современной системы сбора экспериментальных данных и управления в стандарте VME, широко применяемом в настоящее время в ядерной физике, в частности, в ускорителях. В этом случае система оборудуется модулями контроллера VME, PCI контролером A3818C, V2718 и 18 восьмиканальными АЦП V1720 с передачей оцифрованных данных на дальнейшую

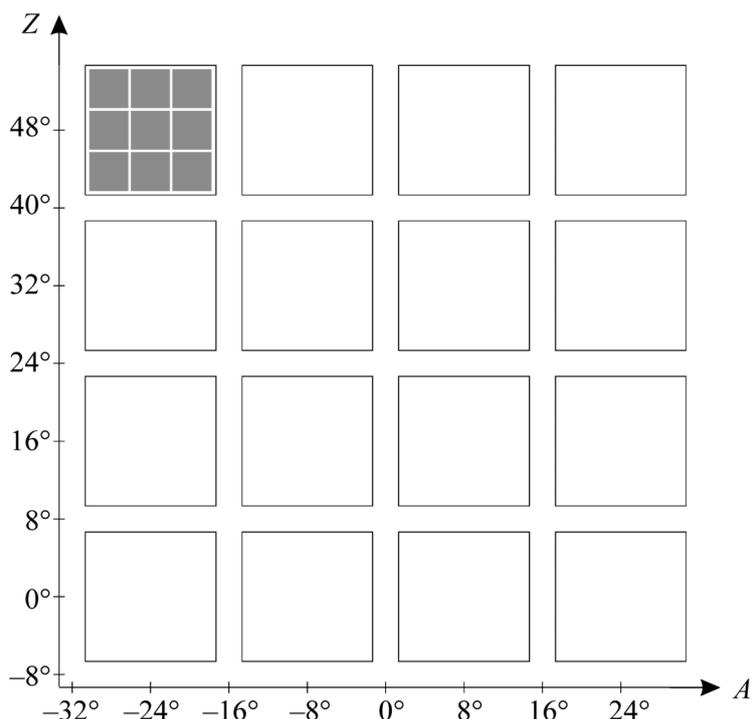


Рис. 2: Схема расположения лучей модуля в горизонтальной системе координат – азимут ( $A$ ), зенитное расстояние ( $Z$ ). Азимут отсчитывается от точки Юга и возрастает с Востока на Запад. Большими квадратами обозначены положения 16 лучей диаграммы направленности модулей, малыми заштрихованными квадратами показан пример заполнения одного из лучей модуля девятью лучами макета как целого.

обработку по оптическим линиям связи. В состав крейта должен быть включен системный контроллер, обеспечивающий управление и обмен данными между компьютером и функциональными модулями, а также визуальный контроль работоспособности системы через модуль индикатора магистрали с встроенным регистром данных с функцией записи и чтения.

Однако, учитывая конкретную ситуацию и ограниченность финансирования, было принято решение при разработке нашего макета пойти по первому пути. Более того, для начала ограничиться использованием в диаграммообразующей системе макета лишь одной аналоговой матрицы второго уровня. Для этого на выходе матриц, формирующих 16 лучей каждого из 8 модулей, были установлены дистанционно управляемые коммутаторы, позволяющие выбирать какой-либо один (но у всех один и тот же) из шестнадцати выходов в каждой матрице. Для анализа данных, поступающих с направлений, соответствующих выбранному выходу, вполне достаточно одной матрицы второго уровня (т.е.

матрицы  $8 \times 9$ ). На выходе этой матрицы будет уже обеспечена возможность оцифровки и последующей регистрации от одного до девяти сигналов.

Таким образом, используя дистанционно управляемые коммутаторы, появится возможность регистрировать сигналы, поступающие с нескольких относительно близких из 144 направлений. Эта возможность анализировать сигналы из нескольких направлений может оказаться очень востребованной в случае, когда нам необходимо будет убедиться, что заинтересовавший нас сигнал не вызван какой-то местной помехой, а регистрируется только в одном или соседних лучах.



Рис. 3: Общий вид расположения макета.

К настоящему времени все 128 спаренных активных вибраторов, оснащенные преобразователями двух ортогональных линейных поляризаций в одну круговую и выносными усилителями, установлены на месте (рис. 3). Кроме того, разработаны и изготовлены диаграммообразующие системы для всех 8 модулей, представляющие собой матрицы  $16 \times 16$  с коммутаторами на выходе. Разработана и изготовлена одна типовая матрица  $8 \times 9$  системы диаграммообразования макета в целом, после успешного испытания которой будут изготовлены остальные 15 подобных матриц. На этом будет завершена работа по изготовлению аналоговых блоков диаграммообразующей системы макета в целом. Дальнейшая работа над системой сбора и первичной обработки поступающей

информации сведётся к предварительному усилению, последующей оцифровке и вводу в компьютер 144 потоков данных, соответствующих направлениям каждого из 144 лучей диаграммы направленности макета. Как именно осуществлять оцифровку поступающих потоков данных, и какую именно обработку этих данных производить в режиме “on-line”, – эти вопросы еще предстоит обсудить и принять решение с учетом опыта работы макета первой очереди.

Учитывая предварительно выполненные измерения чувствительности отдельных модулей, ожидается, что суммарная эффективная площадь макета в целом составит не менее 1000 кв. м. на волнах  $\lambda \geq 5$  м. Ширина каждого из 144 лучей макета в пределах рабочего диапазона (38–74 МГц) будет меняться от  $9.4^\circ$  до  $4.8^\circ$ , соответственно. Все 144 луча будут достаточно плотно перекрывать телесный угол порядка 4000 квадратных градусов (или, что то же – 1.25 стерадиана) даже на самой короткой длине волны.

Работа по разработке и созданию макета выполнена при поддержке грантом РФФИ № 16-29-13074.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. Н. Казанцев, В. А. Потапов, Астрон. журнал **94**(9), 749 (2017); DOI: 10.1134/S1063772917080054.
- [2] А. Н. Казанцев, В. А. Потапов, Г. Б. Сафронов, Астрон. журнал **96**(1), 144 (2019); DOI: 10.1134/S1063772919020045.
- [3] Р. Д. Дагкесаманский, И. М. Железных, Письма в ЖЭТФ **50**(5), 233 (1989).
- [4] R. D. Dagkesamansky, I. M. Zheleznykh, in: Proc. Int. Symp. “Astrophysical aspects of the most energetic cosmic rays” (Kofu, 1990), eds. M. Nagano & F. Takahara, World Scientific, pp. 373-381 (1990).
- [5] R. D. Dagkesamanskii, V. A. Matveev, I. M. Zheleznykh, Nucl. Instr. & Meth in Phys. Research **A 626-627**, S44 (2011); DOI: 10.1016/j.nima.2010.04.025
- [6] J. D. Bray, J. Alvarez-Muniz, S. Buitink, et al., in: Proc. of Science “Advancing of Astrophysics with Square Kilometer Array”, **1**, 961 (2015). See also arXiv: 1408.6069v2 [astro-ph.IM] 19 Dec. 2014.
- [7] D. R. Lorimer, M. Bailes, M. A. McLaughlin, et al., Science **318**, 777 (2007); DOI: 10.1126/science.1147532.

- [8] D. Thornton, B. Stappers, M. Kramer, et al., *Science* **341**, 53 (2013); DOI: 10.1126/science.1236789.
- [9] В. В. Орешко, Г. А. Латышев, И. А. Алексеев и др., *Труды Ин-та прикладной астрономии РАН* **24**, 80 (2012).
- [10] С. А. Тюльбашев, В. С. Тюльбашев, М. А. Китаева и др., *Астрон. журнал* **94**, 848 (2017); DOI: 10.1134/S1063772917100109.
- [11] S. A. Tyul'bashev, V. S. Tyul'bashev, V. M. Malofeev, *Astronomy & Astrophysics* **618**, A70 (2018); DOI: 10.1051/0004-6361/201833102.
- [12] В. А. Федорова, А. Е. Родин, *Астрон. журнал* **96**(1), 41 (2019); DOI: 10.1134/S1063772919010037.
- [13] В. А. Федорова, А. Е. Родин, *Астрон. журнал* **96**(11), 883 (2019); DOI: 10.1134/S1063772919110039.

Поступила в редакцию 18 ноября 2019 г.

После доработки 20 января 2020 г.

Принята к публикации 20 января 2020 г.