

НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

621.396.95

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИНСТРУМЕНТЫ *)

Дж. П. Уайлд

Инструменты, используемые для обнаружения и измерения источников космического радиоизлучения, весьма разнообразны как по размерам, так и по форме. Эти инструменты можно классифицировать в зависимости от их назначения и вида.

Первый в мире радиотелескоп был построен в 1937 г., через несколько лет после открытия Янским радиоизлучения Млечного Пути. Этот радиотелескоп был сконструирован Гротом Ребером¹ во дворе собственного дома в Ветстоне, штат Иллинойс. Он состоял из 10-метрового параболического отражателя, который собирал радиоизлучение, приходящее от небольшой области неба, на диполь, расположенный в его фокусе. Затем сигнал усиливался высокочастотным приемником и регистрировался самописцем. Телескоп Ребера (рис. 1) явился прототипом современных гигантских инструментов. После первых открытий дальнейшие исследования в радиоастрономии стали возможны лишь благодаря увеличению разрешения и чувствительности инструментов. Развитие шло по двум линиям, а именно — конструированию параболических отражателей все больших размеров и точности, и в направлении классических интерферометров, впервые примененных в 1946 г. Д. Л. Пози² и независимо М. Райлом³.

В настоящей статье рассмотрены различные классы радиотелескопов и указаны их особенности. Параметры приводятся в качестве примера, а не в качестве точных характеристик отдельных инструментов.

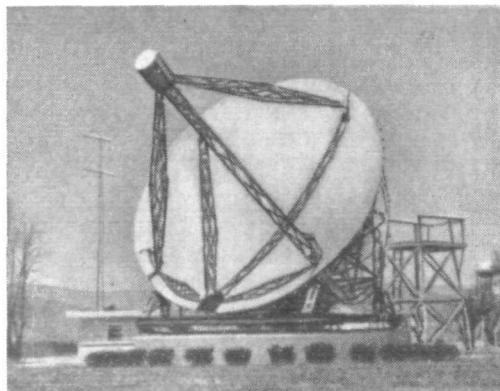


Рис. 1. Первый радиотелескоп Ребера. Диаметр параболического рефлектора равен 9,5 м. В настоящее время сохраняется в Национальной радиоастрономической обсерватории, Грин-Бэнк, Западная Вирджиния.

*) J. P. Wild, Instrumentation for Radio Astronomy, Physics Today 19, 7, 28 (1966). Сокращенный перевод Н. А. Лотовой и Л. И. Матвеенко.

Одновременно с развитием антенной техники и систем для получения высокого разрешения шло создание приемников с малыми шумами. Их развитие сыграло существенную роль в эволюции радиотелескопов, но эта сторона дела выходит за рамки данной статьи.

ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНН

Характеристики антенн радиотелескопа могут быть определены тремя основными параметрами, каждый из которых зависит от длины волны.

Угловое разрешение определяет минимальный размер деталей радиоизображения, полученного с помощью радиотелескопа. Определим его как угол между двумя направлениями, разрешаемыми инструментом. Этот угол θ определяется критерием Рэлея

$$\theta = \frac{\lambda}{D} [\text{рад}] = \frac{3438\lambda}{D} [\text{угл. мин}],$$

где λ — длина волны и D — размер апертуры. Угол θ примерно равен ширине диаграммы направленности антенны по половине мощности.

Эффективность. Радиотелескоп с идеальным распределением поля в апертуре (например, параболическое зеркало, равномерно освещенное облучателем) принимает излучение из конуса, ширина которого примерно равна θ . В этом случае говорят, что антenna имеет эффективность, равную единице. В других типах антенн разрешение достигается путем использования апертуры аналогичного размера, но много меньшей площади.

Например, может быть использовано тонкое кольцо. Такую апертуру называют незаполненной или разреженной. Незаполненная апертура принимает дополнительно излучение из нежелаемых направлений, которые могут быть исключены в окончательном результате, однако случайные флуктуации, обусловленные посторонним излучением, не могут быть исключены и поэтому отношение сигнал—шум радиоизображения будет хуже, чем в случае заполненной апертуры, в E раз. Коэффициент E называется эффективностью радиотелескопа. Как будет показано ниже, эффективность зависит от заполнения апертуры и от числа точек изображения, наблюдаемых одновременно.

Относительная эффективная площадь. В обычной антенне мощность принятого излучения от точечного источника определяется ее эффективной площадью. В случае равномерного распределения поля в апертуре эффективная площадь равна ее геометрической площади.

В общем случае эффективная площадь определяется площадью заполненной апертуры, необходимой для получения заданного разрешения, умноженной на коэффициент E . Эту площадь мы будем называть относительной эффективной площадью. Таким образом, эффективность и относительная эффективная площадь являются двумя независимыми критериями чувствительности радиотелескопа.

Для исследования протяженных источников (больших размеров, чем разрешение инструмента) необходима максимальная эффективность, для источников малых угловых размеров — максимальная эффективная площадь. Количество отношения сигнал — шум радиоизображения слабого протяженного источника определяется выражением $E \frac{T_S}{T_N} (t \Delta f)^{1/2}$, где T_S — яркостная температура источника, усредненная по диаграмме направленности, T_N — температура шумов приемника, t — время наблюдения и Δf — ширина полосы приемника. Отношение сигнал — шум для

источника малых угловых размеров равно $A \frac{S}{kT_N} (t \Delta f)^{1/2}$, где A — относительная эффективная площадь, S — плотность потока источника (одной поляризации) и k — постоянная Больцмана.

ПАРАБОЛИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ

Современные радиотелескопы аналогичны радиотелескопу Ребера. Для обеспечения подвижности параболическое зеркало устанавливается на экваториальном или азимутально-угломестном поворотном устройстве. В ряде случаев с целью снижения стоимости антенны зеркало делается

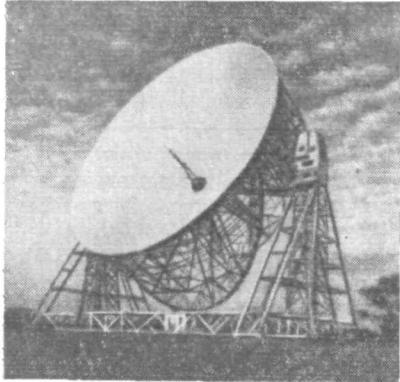


Рис. 2. Радиотелескоп в Джодрэлл-Бэнк.
Диаметр параболического зеркала 75 м.

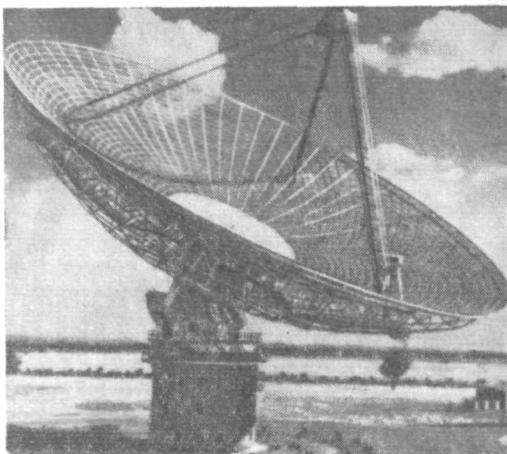


Рис. 3. Парковский 64-метровый радиотелескоп (Австралия).
Минимальная рабочая длина волны равна 6 см.

подвижным только по углу места. Рабочая длина волны радиотелескопа может быть легко изменена заменой облучателя и высокочастотной части приемника. На достаточно длинных волнах апертура работает наиболее эффективно ($E = 1$). При этом необходимо вводить коэффициент (обычно $0,5 \div 0,6$), величина которого определяется облучением зеркала. С уменьшением длины волны эффективность поверхности остается постоянной до тех пор, пока неточности изготовления поверхности не становятся сравнимыми с длиной волны, после чего эффективность быстро падает. Длину волны, на которой эффективность уменьшается в два раза, мы обозначим λ_0 . Оптимальная с точки зрения стоимости антenna на более длинных волнах ограничена абсолютным размером, а на более коротких — точностью ее поверхности. Первыми антеннами этих двух типов являются 75-метровая антenna в Джодрэлл-Бэнк (1956 г.) и 15-метровая в Вашингтоне (1953 г.) соответственно. Сооружение (1961 г.) в Парксе 64-метрового радиотелескопа показало возможность создания большого зеркала на волны до 6 см включительно. В табл. I приводятся основные характеристики наиболее крупных параболических радиотелескопов, работающих в настоящее время. Общий вид радиотелескопов показан на рис. 2, 3 и 4. Как видно из табл. I, разрешение параболических антенн в настоящее время достигает 1 мин дуги на волнах около 1 см. Более высокое разрешение (за исключением наиболее коротких волн) может быть получено

иными методами (см. ниже). Крупные параболические антенны наиболее приемлемы для радиоастрономических исследований по следующим причинам: 1) они являются антеннами полной апертуры, и, следовательно, качество изображения получается однородным и оптимальным как для источников малых, так и больших угловых размеров, для источников простых и сложных; 2) они идеальны для регистрации очень слабых источников, которые «заполняют» их диаграмму, и особенно для обнаружения

источников, излучающих или поглощающих спектральные линии; 3) такие антенны сохраняют свои параметры независимо от направления, так что разрешение и качество изображения не зависят от положения площадки на небе; 4) они могут быть использованы в широком диапазоне радиоволн; 5) они могут иметь минимальный уровень шумов; 6) круговая симметрия антенн делает их идеальными для измерений поляризации.

Эффективность параболической антенны может быть увеличена с помощью применения нескольких облучателей (соответствующим образом скорректированных относительно aberrации). Таким обра-

Рис. 4. Этот 90-метровый параболический радиотелескоп в Грин-Бэнк является самым большим. Он используется для изучения радиоисточников на дециметровых волнах. Вращается только по углу места.

разом, может быть получено изображение многих точек неба одновременно. Автору не известно применение такого метода в радиоастрономии, кроме плана применения тройного облучателя для сферического зеркала в Аресибо *).

АНТЕННЫ ПОЛНОЙ АПЕРТУРЫ ДРУГИХ ТИПОВ

Механические проблемы, присущие огромным подвижным параболоидам, больших нескольких десятков метров в диаметре, привели к развитию узко-специализированных инструментов с полной апертурой. Например, радиотелескоп в Аресибо (Пуэрто-Рико) состоит из вертикально направленного сферического зеркала диаметром 300 м, построенного в естественном чащебразном углублении в земле (рис. 5, табл. II). Сферическая поверхность позволяет выставлять диаграмму направленности (в пределах 20° от зенита) простым изменением положения облучателя.

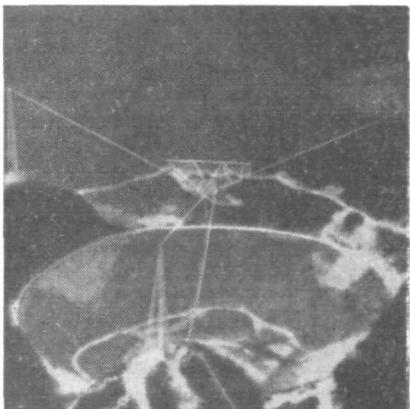


Рис. 5. 304-метровое сферическое зеркало в Аресибо (Пуэрто-Рико).

* На радиотелескопе Физического института АН СССР РТ-22 установлен совмещенный облучатель, позволяющий вести одновременные наблюдения на нескольких волнах ²⁰. (Прим. перев.)

Для устранения сферической аберрации используется специальный облучатель. Инструмент рассчитан на относительно длинные волны; минимальная длина волны, на которой используется полная апертура, равна 70 см.

Таблица I

Радиотелескопы с заполненной апертурой

Обсерватория	Тип	Геометрическая площадь, м ² *)	«Минимальная» длина волны λ_0 , см **)	Разрешение на волнах λ_0 в угловых минутах	Обзор неба
Грин-Бэнк (США)	Параболоид ⁴ с диаметром 300 футов (91 м)	6560	17	6,4	Прохождение через меридиан
Джодрэлл-Бэнк (Англия) . . .	Параболоид ⁵ с диаметром 250 футов (76 м)	4550	40	18	Полный
Паркс (Австралия)	Параболоид ⁶ с диаметром 210 футов (64 м)	3220	5	2,7	0—60° относительно зенита
Грин-Бэнк (США)	Параболоид ⁷ с диаметром 140 футов (43 м)	1425	1,5	1,2	Полный
Физический ин-т им. П. Н. Лебедева (СССР) . .	Параболоид ⁸ с диаметром 72 фута (22 м)	380	0,8	1,25	Полный
Аресибо (Пуэрто-Рико)	1000-футовое (304 м) неподвижное сферическое зеркало ⁹	73000	(42) ***)	(4,7) ***)	0—20° относительно зенита
Нанси (Франция)	Вертикальное сферическое зеркало ¹⁰ 300×35 м Паклонный плоский рефлектор 200×40 м	7000 (200×35)	10	1,6×9,8	±7,5° от меридиана

*) Соответствует эффективной площади в предположении однородной освещенности. В действительности освещенность уменьшается к краям зеркала и эффективная поверхность его равна примерно $1/2$ приведенной величины. Для некоторых сферических зеркал, например таких, как в Аресибо, этот коэффициент будет несколько меньше.

**) Длина волны, на которой неточность поверхности отражателя уменьшает эффективность до $1/2$ ее значения на длинных волнах. На более коротких волнах эффективность падает еще больше.

***) Минимальная длина волны, на которой использовалась вся апертура, была равна 70 см; для нее было получено разрешение в 8 угловых минут

Другой тип инструмента (предложен Крауссом¹¹) состоит из неподвижного вертикально расположенного сферического зеркала, на которое направлено излучение источника с помощью плоского зеркала, установлен-

ного под определенным углом (на одном меридиане с первым). Большой инструмент такого типа работает в Нанси (Франция) (рис. 6, табл. I). Выставление диаграммы по углу места осуществляется наклоном плоского

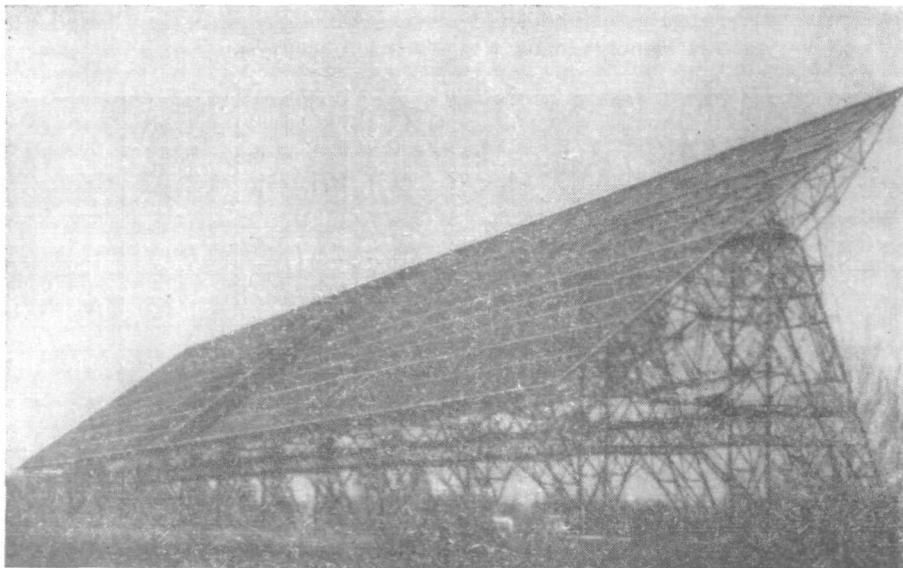


Рис. 6. Наклонное плоское зеркало в Нанси (Франция).

зеркала, а в ограниченных пределах по азимуту соответствующим смещением облучателя. Максимальная эффективная площадь антенны соответствует параболической антенне диаметром 100 м. Точность поверхности позволяет использовать инструмент на волне 10 см.

АНТЕННЫ С НЕЗАПОЛНЕННОЙ АПЕРТУРОЙ — ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ СИНТЕЗ

Предел разрешения радиотелескопов с заполненной апертурой определяется инженерными или экономическими соображениями. Необходимость значительно большего разрешения, особенно на длинных волнах, привела к созданию инструментов, площадь апертуры которых много меньше, чем полная апертура, необходимая для получения такого же разрешения. Такие инструменты разделяются на два типа в зависимости от способа воспроизведения изображения: последовательного воспроизведения одной точки за другой (последовательный синтез) или путем последовательного получения фурье-компонент изображения (апертурный синтез).

Примером инструмента первого типа является Крест Миллса¹², который состоит из двух линий антенн *A* и *B* (рис. 7), расположенных в виде креста. Так как каждая из них имеет узкую веерообразную диаграмму, то после перемножения их сигналов выходной сигнал будет соответствовать излучению, принятому их общей частью, что соответствует узкой диаграмме карандашного типа. Диаграмма направленности Креста Миллса такая же, как у антенн с заполненной апертурой квадратной формы со сторонами, равными половине каждого плеча. Когда используется простой коррелятор, эффективная площадь ее равна $1/\sqrt{2}$ площади плеч. Длина

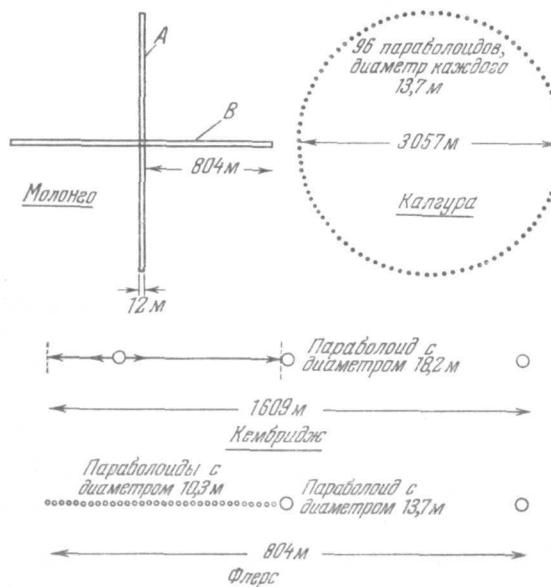


Рис. 7. Форма и ориентация четырех инструментов с разреженной апертурой.

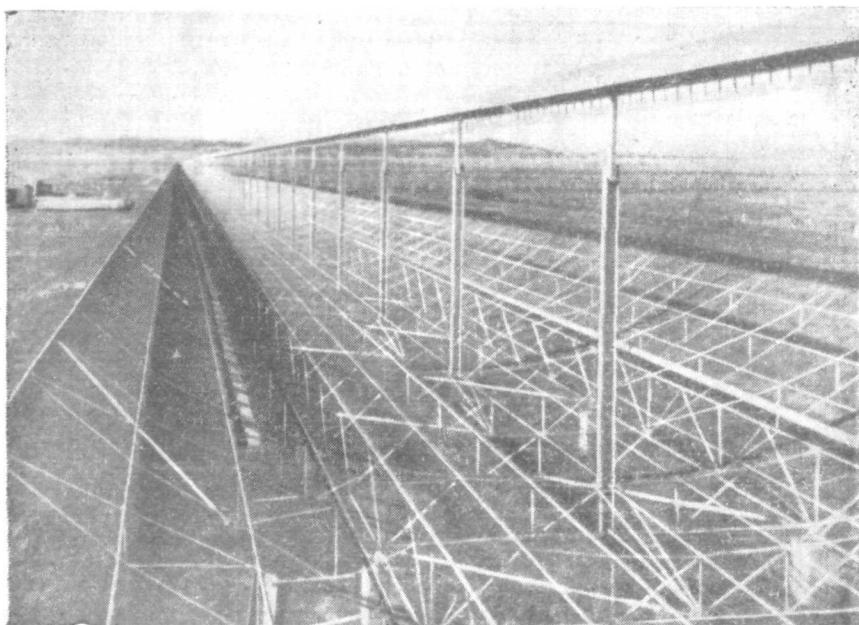


Рис. 8. Крест Миллса в Молонго (Австралия).
Каждое плечо имеет ширину ~ 12 м, длина плеча равна 1,6 км.

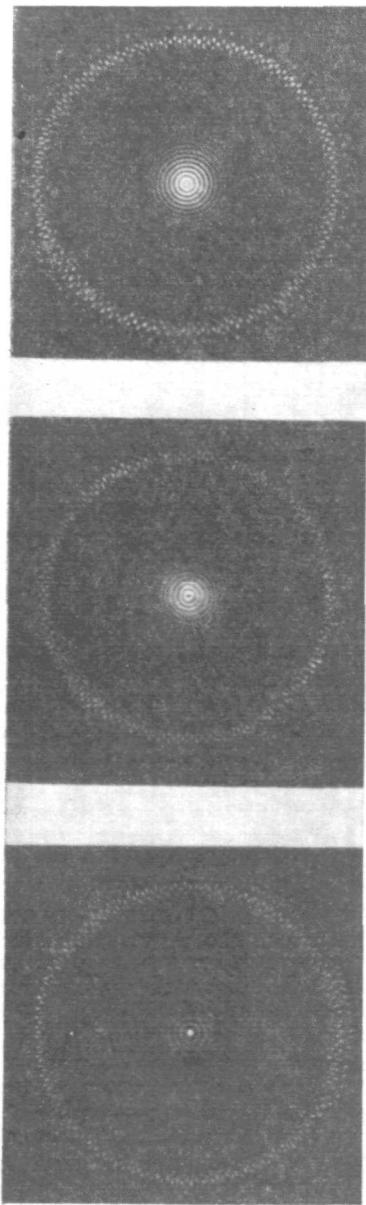


Рис. 9. Инструмент типа последовательного синтеза с карандашной диаграммой направленности (Калгуря, Австралия).

Верхняя фотография иллюстрирует диаграмму, полученную при помощи синфазного соединения всех антенн. Средний рисунок иллюстрирует диаграмму в случае определенного фазового сдвига между антеннами (в центре темное пятно). Нижний рисунок иллюстрирует результат разности двух диаграмм (диаметр круга 2°). Фотографии получены Д. Дж. Мак-Лином и Р. Н. Смертом при помощи аналогового оптического метода.

плеч может быть сделана очень большой, и, следовательно, инструмент будет иметь высокое разрешение, но эффективная площадь при этом невелика. Это относится ко всем инструментам с незаполненной апертурой.

Параметры большой крестообразной антенны Миллса¹³ приведены в табл. II. Длина плеч этого инструмента равна 1,6 км (рис. 8), и диаграмма направленности его на волне 73,5 см составляет $3'$. Легко показать, что половина одного плеча креста может быть удалена без снижения разрешения.

Другой вид неполной апертуры в виде кольца в сочетании со специальной методикой приема сигнала¹⁴ позволяет получить диаграмму, соответствующую антенне с заполненной апертурой того же диаметра (рис. 9). Диаграмма имеет круговую симметрию. Такой инструмент (рис. 7, табл. II) сооружается в Калгуре (Австралия) и предназначен для наблюдений Солнца. Он состоит из 96 подвижных параболоидов (диаметром 15 м), расположенных по кругу диаметром 3 км. Инструмент будет работать на волне 3,75 м и иметь разрешение $4',3$.

В системах последовательного синтеза, таких, как описаны выше, управление диаграммой направленности осуществляется изменением фазы от каждой антенны. В таких системах возможен одновременный прием сигнала из n направлений¹⁵, что уменьшает в n раз время наблюдений и увеличивает эффективность в \sqrt{n} .

В кольце (в Калгуре) возможен одновременный прием из 48 точек в направлении север — юг. Сканированием этих точек в направлении восток — запад можно за одну секунду получить изображение Солнца, состоящее из 48×60 точек.

С помощью увеличения числа каналов можно приблизиться к эффективности, соответствующей сплошной апертуре, однако это сделать сложно из-за технических трудностей. Оптимальное решение может быть получено с помощью оптической аналоговой системы, в которой радиосигналы от каждой из антенн модулируют когерентный луч света таким образом, что оптическое изображение соответствует радиоизображению^{16, 17}.

НЕЗАПОЛНЕННАЯ АПЕРТУРА — АПЕРТУРНЫЙ СИНТЕЗ

Хотя системы последовательного синтеза имеют относительно небольшую стоимость, все же стоимость ограничивает значительное увеличение их размеров. Метод апертурного синтеза позволяет получить изображение путем последовательной регистрации сигнала и его фазы от различных

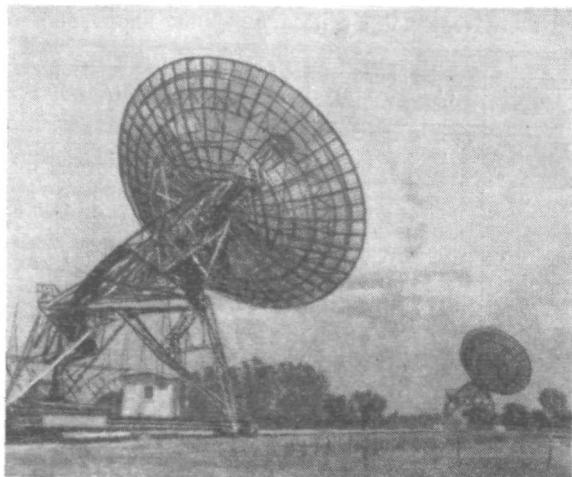


Рис. 10. Интерферометр с апертурным синтезом в Кембридже (Англия).
Состоит из трех 18-метровых параболоидов. Один из них перемещается по рельсам.

частей апертуры. В предельном случае это может быть сделано с помощью двух небольших антенн, одна из которых занимает поочередно каждую

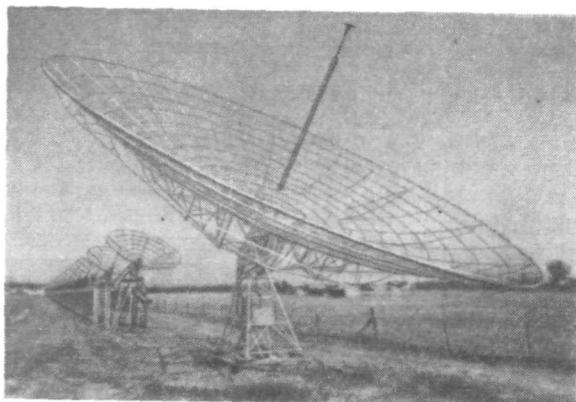


Рис. 11. Составной строящийся интерферометр (Флерс, Австралия), который будет работать по способу апертурного синтеза на волне 21 см.

часть желаемой апертуры. Измеряемые сигналы и их фазы подаются на вычислительную машину, которая вычисляет соответствующее распределение радиояркости. Таким образом, становится возможным практически

неограниченное разрешение при относительно простой аппаратуре, но время, необходимое для получения изображения, может оказаться слишком большим. Инструмент такого типа работает в настоящее время в Кембридже у Райла¹⁸. Две неподвижные антенны и одна подвижная, каждая из которых представляет собой параболоид диаметром 20 м, расположены вдоль базы длиной 1600 м (табл. II, рис. 7 и 10).

Таблица II

Радиотелескопы с незаполненной апертурой

Обсерватория	Молонго (Австралия)	Калтура (Австралия)	Кембридж (Англия)	Флерс (Австралия)
Тип антенны	Крест *) ¹³	Кольцо *) ¹⁴	Простой ин-терферометр ¹⁸	Составной ин-терферометр*) ¹⁹
Тип синтеза	Последоват.	Последоват.	Апертурный	Апертурный
Минимальная длина волн, см	73,5	375	21	21
Максимальное разрешение (в угловых минутах)	3,1	4,3	0,5	1,0
Число приемников или корреляторов . . .	11	48	2	64
Эффективность . . .	8×10^{-2}	7×10^{-3}	$1,7 \times 10^{-2}$	6×10^{-2}
Сравнительная эффективная площадь, м ²	$4,8 \times 10^4$	$4,5 \times 10^4$	3×10^4	3×10^4
Скорость наблюдения	11 точек за 5 сек (наблюдение при прохождении через меридиан)	Поле в 3°, содержащее 3×10^3 точек, за 1 сек	Поле в 1°, содержащее 3×10^4 точек, за 50 двенадцатичасовых дней (~ 500 точек в день)	Поле с диаметром в 1°, содержащее 5×10^4 точек, за два восьмичасовых сеанса наблюдений

*) Находится в стадии строительства.

Вращение Земли используется для поворота базы на 180° за 12 часов наблюдений. Требуется 50 положений антенны в течение 50 дней для получения изображения какой-либо области неба диаметром $\sim 1^\circ$. Разрешение инструмента эквивалентно заполненной апертуре эллиптической формы, большая ось которой равна 1,6 км. Эллиптичность зависит от склонения источника. Максимальное разрешение на волне 21 см равно 29''.

Эффективность систем апертурного синтеза может быть существенно повышена введением большого количества корреляторов и применением большого числа антенн¹⁹ (рис. 11, табл. II), но при этом значительно увеличивается загрузка счетной машины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разрешение современных радиотелескопов лежит в пределах 1' \div 10'. Антенны с заполненной апертурой преобладают на волнах короче 20 см, в то время как на метровых волнах неполные апертуры не имеют себе равных.

Полиоповоротные параболоиды являются наиболее удобным типом радиотелескопов, охватывающих широкую область астрономических программ.

Эффективность современных радиоастрономических инструментов может быть существенно повышена путем введения сложных приемных систем, разработка которых, вероятно, является главной технической проблемой.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. G. Rebege, Proc. IRE 30, 367 (1942).
2. L. L. McCready, J. L. Pawsey and R. Payne-Scott, Proc. Roy. Soc. A190, 357 (1947).
3. M. Ryde and D. D. Vonberg, Proc. Roy. Soc. A193, 98 (1948).
4. J. M. Findlay, Sky and Telescope 25 (2), 68 (1963).
5. A. C. D. Lovell, Nature 203, 41 (1964).
6. E. G. Bowen and H. C. Minnett, Proc. IRE Australia 24, 98 (1963).
7. M. M. Small, Sky and Telescope 30, 267 (1965).
8. П. Д. Калячев, А. Е. Саломонович, Радиотехника и электроника 6, 422 и 429 (1961).
9. W. E. Gordon, Science 146, 26 (1964).
10. E. J. Blum, A. Boishot, J. Lequeux, Proc. IRE Australia 24, 208 (1963).
11. J. D. Krauss, Scientific American 192, 36 (1955); J. D. Krauss, R. T. Nash, H. C. Ko, IRE Trans. on Antennas and Propagation AP9, 4 (1961).
12. B. Y. Mills, A. G. Little, Australian J. Phys. 6, 272 (1953).
13. B. Y. Mills, R. E. Aitchison, A. G. Little, W. B. MacAdam, Proc. IRE Australia 24, 156 (1963).
14. J. P. Wild, Proc. Roy. Soc. A286, 499 (1965).
15. E. J. Blum, Ann d'Astrophys. 24, 359 (1961).
16. D. J. McLean, J. P. Wild, Australian J. Phys. 14, 489 (1961).
17. L. B. Lambert, M. Arm, A. Aimette, in Optical and Electro-optical Information Processing (Ed. J. T. Tippett et al.), M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1965, chapter 38.
18. M. Ryde, B. Elsmore, A. C. Newille, Nature 207, 1024 (1965).
19. W. N. Christiansen, K. J. Wellington, Nature 209, 1173 (1966).
- 20*. И. В. Вавилова, П. Д. Калячев, А. М. Каракун, А. Д. Кузьмин, Б. Н. Лосовский, А. Е. Саломонович, Вопросы радиоэлектроники (серия общетехн.) 1, 13 (1964).