1969 г. Июнь *Том 98, вып. 2*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

621.396.95

КЕМБРИДЖСКИЙ ОДНОМИЛЬНЫЙ РАДИОТЕЛЕСКОП *)

М. Райл

Метод апертурного синтеза является наилучшим способом достижения высокой разрешающей способности и чувствительности радиотелескопов, что особенно важно при изучении внегалактических радиоисточников, природа которых связана с самыми фундаментальными физическими проблемами.

Астрономия всегда была важной областью человеческого знания. За последние 20 лет она существенно пополнила наши сведения о природе, так как удалось изучить физические явления, которые невозможно воспроизвести в земных условиях. Использование радиоволн в астрономии дало возможность выявить ряд важных особенностей, связанных с плазменными неустойчивостями, ударными волнами, захватом частиц высокой энергии магнитными полями; открытие радиогалактик и квазаров поставило ряд еще более сложных проблем, например указало на источники энергии, по-видимому, более эффективные, чем известные ядерные реакции.

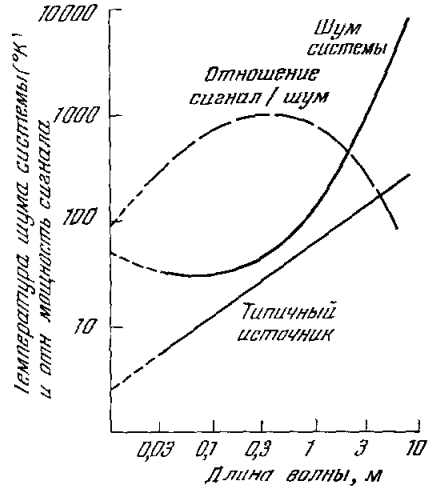


Рис. 1. Относительная чувствительность для данной площади определяется шумом системы и интенсивностью типичного источника.

Отношение сигнала к шуму максимально для рабочей длины волны около 50 см.

Однако проводить радиоастрономические наблюдения очень трудно, так как при этом обычно необходимы значительно более высокие угловое разрешение и чувствительность, чем применяемые в радиолокации и системах связи. Только для отождествления радиоисточников с оптическими объектами нужно определить их угловые координаты с точностью до нескольких секунд. Даже наиболее интенсивные источники чаще всего имеют протяженность меньше 5′, и для исследования их структуры нужно разрешение не хуже 1′.

---

*) Sir Martin Ryle, The Cambridge 1 Mile Radiotelescope, Electronics and Power, No. 6, 208 (1967). Перевод Т. М. Мулярчик.

Некоторые источники имеют еще меньшие размеры (меньше 1″). Изучать их строение удается лишь в редких случаях покрытия их Луной. Однако, хотя построение изофот обычно невозможно, какие-то сведения о структуре источника можно получить, используя две антенны, расположенные далеко друг от друга и образующие интерферометр; такие наблюдения проводились с помощью антенн Джодрелл-Бэнк и Королевской радиоастрономической лаборатории.

При наблюдении очень удаленных источников для выделения их на фоне более близких и более интенсивных объектов также требуется высокое разрешение (наблюдение удаленных источников очень существенно для решения некоторых космологических проблем).

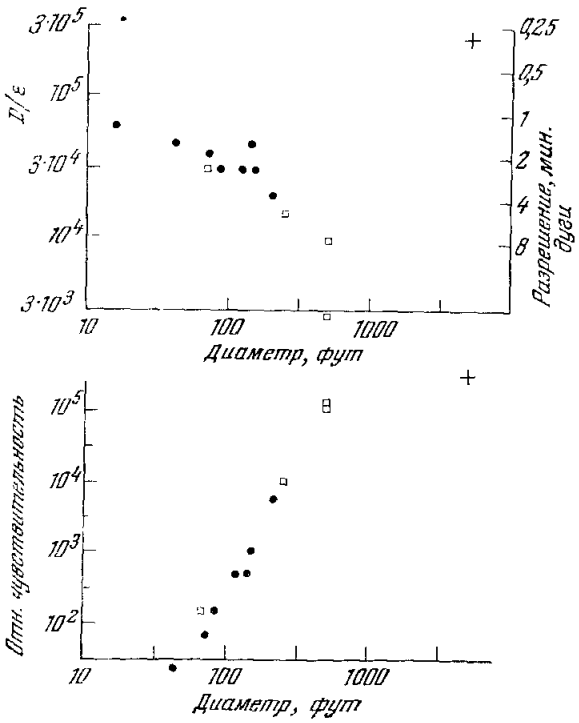


Рис. 2. На верхнем графике нанесено отношение диаметра к среднеквадратичной ошибке ε в зависимости от диаметра для ряда недавно построенных параболоидов. Минимальная эффективная рабочая длина волны составляет примерно 20ε, так что на шкале справа можно нанести максимальное разрешение. На нижнем графике приведена относительная величина отношения сигнала к шуму, полученная для предельной длины волны каждого инструмента.

За единицу принято отношение сигнала к шуму 16-футового параболоида, имеющего разрешение 1′,3. Светлые значки относятся к неподвижным рефлекторам. Соответствующие величины для кембриджского одномильного телескопа обозначены крестиками.

Проблема разрешения — это не единственная трудность в радиоастрономии; обычно принимаемые сигналы исключительно слабы, иногда они слабее, чем сигналы, которые дошли бы до нас от помещенного на Луне передатчика мощностью 1 *мвт*. Поэтому необходимы антенны с большой площадью и приемники с большими временами интегрирования.

Совершенно очевидно, что большой параболоид обеспечит высокое разрешение и большую площадь. Максимальное разрешение получается при использовании самой короткой длины волны, которую еще можно применять при данной точности изготовления поверхности; однако для этой длины волны чувствительность может оказаться сравнительно небольшой (рис. 1).

ТОЧНЫЕ ПАРАБОЛОИДЫ

Получить разрешение в 1′ очень трудно даже при не очень высокой чувствительности. Такого разрешения еще не удалось достичь ни на одном параболоиде, так как поддерживать высокую точность работы большой конструкции, подверженной влиянию силы тяжести и ветра, очень трудно. На рис. 2 приведены среднеквадратичные ошибки поверхности (ε) и диаметры (D) ряда наиболее точных параболоидов, построенных за последние несколько лет. Поскольку ε определяет минимальную рабочую длину волны, величина D/ε определяет максимальную разрешающую

силу, которую можно получить на каждом из этих приборов. Вследствие того, что ε растет быстрее, чем D, разрешающая сила уменьшается с увеличением размеров прибора, но одновременно с этим быстро растет чувствительность.

Из вышесказанного ясно, что только очень маленький телескоп с диаметром 16 футов *) имеет разрешение, близкое к 1′, но слишком малая площадь делает его бесполезным для многих исследований, особенно для важнейших исследований радиогалактик и квазаров. Современные параболоиды позволяют получить разрешение только в 2—3′. Это самое главное ограничение, хотя использование новых материалов и разных форм конструкций, возможно, несколько улучшит положение.

МНОГООПОРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Чтобы преодолеть эти ограничения, было построено много приборов, в которых поверхность рефлектора была связана с землей в большом числе точек, хотя это и ограничивало в какой-то степени возможности сканирования. В некоторых случаях поверхность рефлектора помещалась в специально вырытой яме, так что поддерживать ее можно было с помощью простых приспособлений. Самый большой из таких инструментов — это рефлектор в Аресибо (Пуэрто-Рико), который имеет диаметр 1000 футов. Смещая облучатель, сконструированный так, чтобы уменьшить сферическую аберрацию, диаграмму направленности этого рефлектора можно отклонять на $\pm 20°$ от зенита. При этом эффективно используется только 50—60% диаметра рефлектора.

Характеристики этого и других неподвижных радиотелескопов приведены на рис. 2. Несмотря на некоторые преимущества, которыми обладает этот тип конструкций, их разрешающая сила до сих пор не превосходила разрешающую силу подвижных инструментов. Для преодоления этих технических трудностей были предложены другие методы конструирования больших радиотелескопов. Начиная с 1955 г. в Кембридже развивается метод, основанный на следующем принципе: если распределение яркости по небу остается постоянным (как это имеет место для большинства случаев наблюдения объектов вне солнечной системы), то не нужно включать весь прибор одновременно — можно последовательно использовать разные участки большой антенны.

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ФАЗЫ

В самом деле, антенну можно рассматривать как сумму некоторых малых элементов (рис. 3). Волны, приходящие с разных направлений, вызовут в каждом из этих элементов токи, относительные фазы которых будут зависеть от направления падения данной волны. Одну определенную волну (например, ту, которая приходит по нормали) можно выбрать, отбирая со всех элементов сигналы, имеющие равные фазы. Волны, приходящие с других направлений, в таком случае вызовут токи, которые, интерферируя, дадут только очень маленький отсчет.

Выделение желаемой компоненты из полных токов i_1, i_2, . . . в каждом из элементов происходит путем суммирования и детектирования всех токов:

$$(i_1 + i_2 + i_3 + \ldots)^2 = \sum i_n^2 + \sum i_n i_m \cos(\varphi_n - \varphi_m).$$

*) 1 фут = 30,48 *см*. (*Прим. ред.*)

Первый член в правой части равенства один и тот же для каждого элемента и представляет просто среднюю интенсивность фона; благодаря второму члену осуществляется высокое разрешение.

Предположим теперь, что мы используем два небольших элемента антенны и связываем их с приемником, который измеряет коррелированную компоненту сигналов. Записывая каждое из относительных положений и комбинируя результаты, мы получим такую же разрешающую силу, какую имел бы полный эквивалентный инструмент. Может показаться, что это очень медленный процесс, потому что надо использовать $2D^2/d^2$ элементарных антенн. Однако в одной серии наблюдений можно повторять процесс суммирования с прогрессивным сдвигом фазы по апертуре, как в случае антенны, состоящей из фазированных диполей.

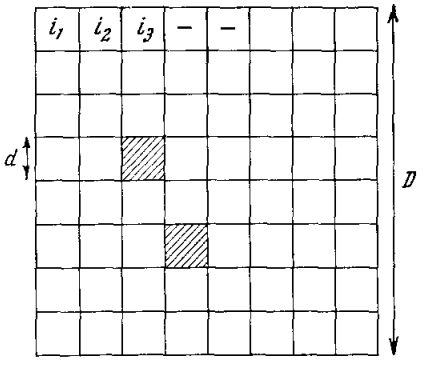


Рис. 3. Волны, падающие на элементы соответствующей антенны, вызывают токи, относительные фазы которых зависят от направления падения волны.

Связывая элементы с одинаковой фазой, можно выделить определенное направление волны. Измеряя по очереди корреляцию между сигналами, принятыми каждой парой элементов, и комбинируя результаты на вычислительной машине, можно получить такое же разрешение, как и у всей антенны целиком. Меняя разность фаз при операции синтеза, можно осуществлять сканирование, не проводя дальнейших наблюдений.

РЕЗУЛЬТИРУЮЩАЯ КАРТИНА

Таким путем без дальнейших наблюдений мы можем перемещать синтезированную диаграмму по участку неба и получать его изображение, как на фотографии. Величина этого участка ограничена только индивидуальной диаграммой элементарной антенны, и мы можем наблюдать $2D^2/d^2$ независимых направлений луча. Эта величина близка к числу произведенных наблюдений. Таким образом, мы приходим к довольно неожиданному результату: чтобы с заданной постоянной времени усилителя построить карту данного участка неба, нужно приблизительно такое же время, как и с помощью полного эквивалентного прибора.

Отношение сигнала к шуму в окончательной картине также гораздо лучше, чем можно было бы ожидать, хотя и не так хорошо, как при работе полной антенны. Отношение сигнала к шуму для полной антенны пропорционально D^2, а отношение сигнала к шуму для каждого индивидуального сочетания маленьких антенн пропорционально $2d^2$. Поскольку окончательная карта получается из комбинации $2D^2/d^2$ наблюдений, при которых сигналы будут складываться когерентно, а флуктуации шума будут складываться как среднеквадратичные отклонения, окончательное отношение сигнала к шуму в синтезированной карте будет пропорционально $2d^2\sqrt{2D^2/d^2} \approx 3dD$ — величине, которая может быть очень большой.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

В инструменте этого типа вместо трудностей, связанных с созданием большого параболоида, возникают свои: 1) обеспечение стабильных опор, относительные положения которых точно известны; 2) обеспечение постоянного сдвига фаз в электрических соединениях; 3) регистрация и суммирование результатов наблюдений.

Антенны малых размеров сделать нетрудно, особенно если они предназначены для наблюдений на сравнительно длинных волнах (примерно 50 *см*), где отношение сигнала к шуму максимально.

В ряде сконструированных в 1956—1960 гг. инструментов был получен одномерный синтез путем заполнения одного ряда в эквивалентной антенне. Новый кембриджский телескоп дает полный двумерный синтез, хотя элементы перемещаются только вдоль одной (восточно-западной) оси; для изменения на небосводе проекции восточно-западной оси используется вращение Земли (рис. 4). Двенадцатичасовые наблюдения эквивалентны повороту этой оси на 180°, и для любого произвольного промежутка между элементами суммирование записей приводит к эллиптическому кольцу эквивалентного инструмента.

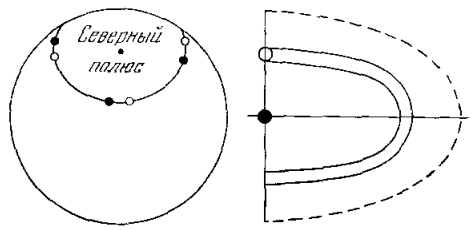


Рис. 4. Вращение Земли на 12 часов меняет направление восточно-западной оси на 180°, благодаря чему каждому промежутку между антеннами соответствует эллиптическое кольцо эквивалентной антенны (меняя промежуток между элементарными антеннами, можно получить все кольца).

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ АПЕРТУРА

Изменяя расстояние между элементами в восточно-западном направлении, можно получить комбинацию последовательных колец. Для наблюдений вблизи северного полюса мира эквивалентная апертура — круговая, с диаметром, равным максимальному расстоянию

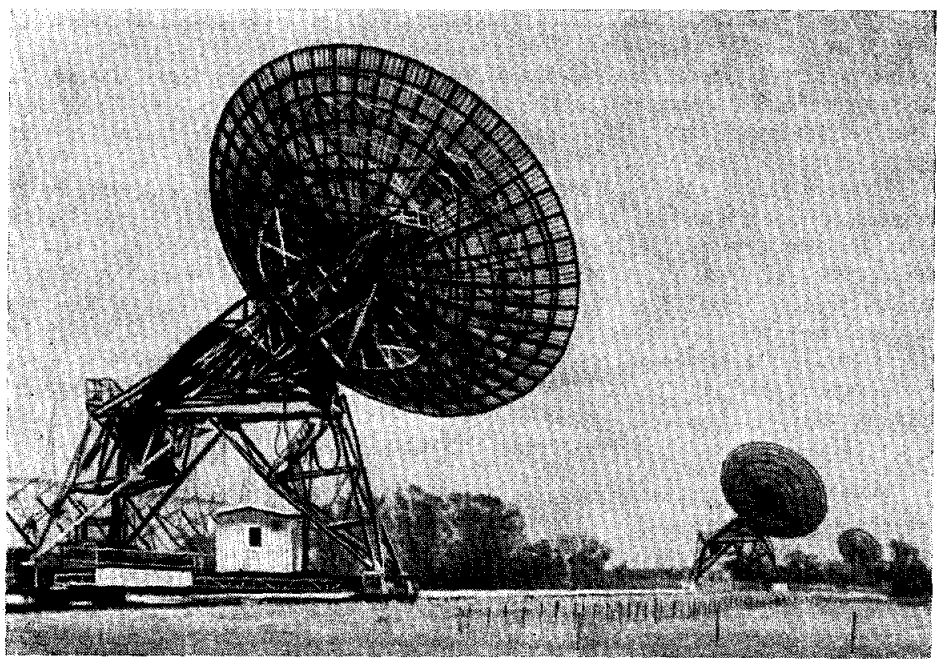


Рис. 5. Вся система в действии (на первом плане — подвижная антенна).

между элементами. Для наблюдений при других склонениях разрешение по склонению уменьшается пропорционально $\sin\delta$. С этим ограничением можно мириться, так как при этом получается большая экономия при двумерной развертке.

На практике оказалось более удобным использовать три параболоида с диаметром 60 футов (рис. 5), два из которых закреплены на расстоянии 1/2 мили *) друг от друга в восточно-западном направлении, а третий смонтирован на рельсах, имеющих длину еще 1/2 мили. Комбинируя сигналы подвижного элемента с сигналами от каждого фиксированного элемента, можно получить все расстояния в пределах 1 мили. Рельсы непрерывно сварены и скреплены болтами через каждые 2 фута с точностью 1/8 дюйма **). Во время работы каретка покоится на башмаках, помещенных на северном рельсе, так что азимут и северо-южное направление каретки определены. Перемещение каретки производится с помощью гидравлической системы; она же приводит в действие рычаг, поднимающий каретку на тележку; кроме того, эта система приводит в действие зажимы для противовесов. Параболоиды имеют экваториальную монтировку, так что они могут следить за выбранной точкой небосвода в течение 12 *ч*; вращение вокруг полярной оси осуществляется с помощью синхронного мотора, работающего на частоте 50 *гц*, получаемой от кварцевых часов.

СИНТЕЗ СИГНАЛА

В настоящее время инструмент работает с концентрически расположенными волноводными облучателями одновременно на волнах 74 и 21 *см*. В фокусе устанавливаются параметрические усилители, и частота сигналов преобразуется в промежуточную — 45 *Мгц*, которая передается по коаксиальным кабелям к корреляционным приемникам в центральной антенне. Сигналы будут складываться с правильной фазой, если из каждого фокуса сигнал местного гетеродина пройдет по пути, электрическая длина которого за 12-часовой период остается постоянной в пределах нескольких миллиметров. Это достигается использованием подземного коаксиального кабеля с воздушным промежутком и температурной компенсацией короткого наружного кабеля, связывающего движущийся элемент с выходами подземного кабеля.

Если с такой системой проводить наблюдения вне меридиана, то для разных антенн получается значительная разность хода; измеренная фаза в этом случае будет зависеть от точного значения частоты, и, поскольку используется конечная полоса (4 *Мгц*), необходимо компенсировать разные длины пути кабелями, протяженность которых меняется так, что всегда близка к длине пути в воздухе. Эта компенсация достигается набором кабелей, длина которых образует бинарную последовательность и которые включаются и выключаются диодными переключателями.

БЫСТРЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

При больших расстояниях между антеннами скорость, с которой меняется длина пути, приводит к быстрому изменению фазы, и, если бы пришлось регистрировать эту интерференционную картину полностью, необходимо было бы снимать отсчеты каждые 0,5 *сек*. Однако картина квазисинусоидальна и изменение амплитуды или фазы может происходить лишь со скоростью, определяемой телесным углом, принимаемым 60-футовой антенной. Поэтому, введя фазовращатель, который почти гасит изменения, возникающие вследствие вращения Земли, можно использовать гораздо меньшую скорость записи. Скорость фазовращателя, так же как и компенсатора разности хода, систематически изменяется в течение 12-часового интервала, а также в зависимости от расстояния между

*) 1 миля = 1,6093 *км*. (*Прим. ред.*)
**) 1 дюйм = 2,54 *см*. (*Прим. ред.*)

антеннами и положения исследуемого участка неба. Обе величины определяются с помощью контрольной ленты, которая заранее изготовляется

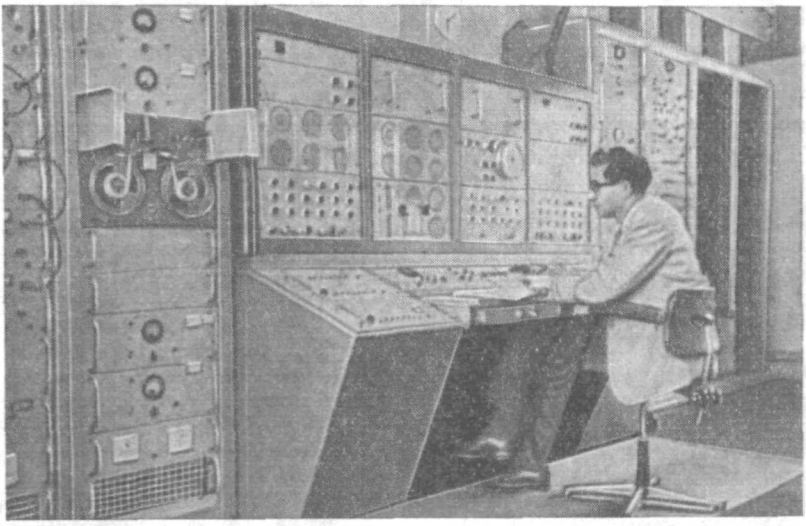


Рис. 6. Контрольный пульт, включающий позиционные индикаторы, контроль движения всех трех антенн, индикаторы компенсаторов разности хода и фазовращателей и контроль точности пробивания ленты (в левой части пульта можно видеть контрольную ленту, которая обычно управляет телескопом).

вычислительной машиной. Эта лента позволяет также осуществить множество других операций, например определение моментов записи и включение сидерических ведущих двигателей (рис. 6).

ДАЛЬНЕЙШИЕ ОПЕРАЦИИ

Для того чтобы можно было производить немедленный контроль работы системы, сигналы регистрируются в аналоговой форме. Кроме того, они переводятся в двоичный код и пробиваются на ленте, которая непосредственно вводится в машину «Титан». Окончательный результат имеет вид контурной карты (рис. 7). Могут быть выполнены и дальнейшие операции, например сканирование карты с целью определения положения и интенсивности каждого источника, превышающего установленный предел. Таким способом список источников можно получить целиком автоматически.

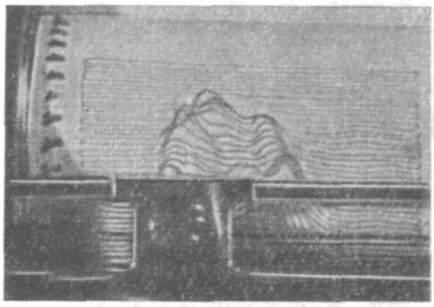


Рис. 7. Прибор для вычерчивания графиков, прилагаемый к вычислительной машине «Титан», наносит контуры проходящего в поле зрения источника.

До сих пор на этом радиотелескопе производились следующие три вида наблюдений. Первый — это определение точных значений положения неразрешенных источников, которые затем пытаются отождествить с оптическими объектами. При таких наблюдениях используется одно (обычно наибольшее) расстояние

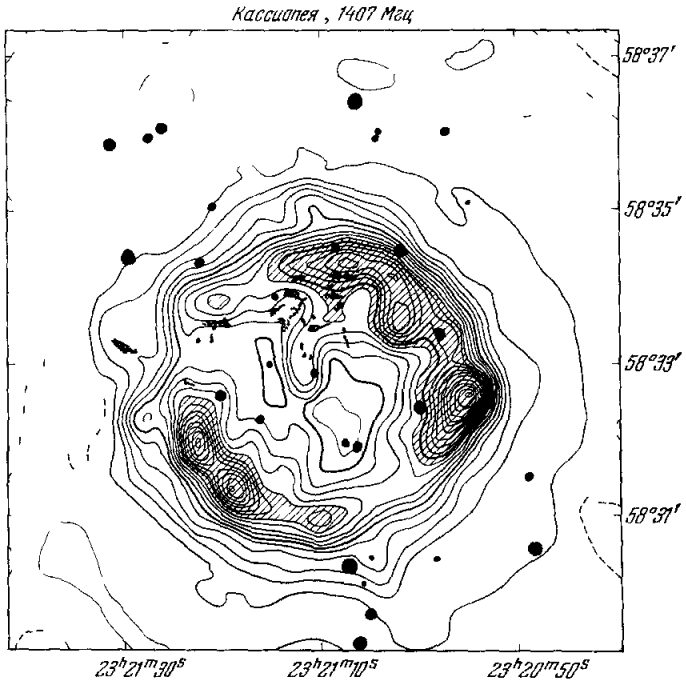
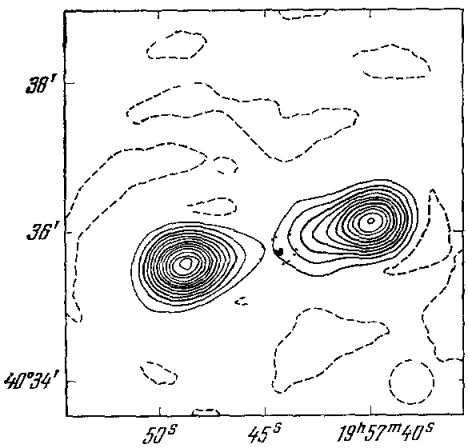
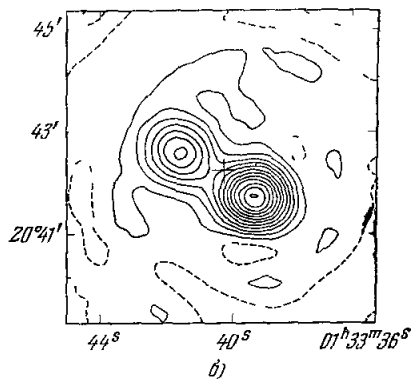


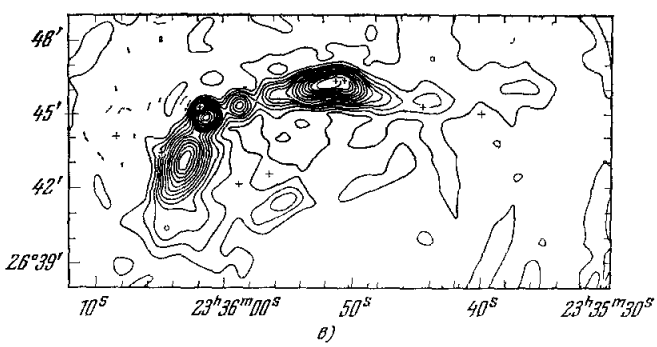
Рис 8 Радиоисточник в созвездии Кассиопеи, обусловленный взрывом сверхновой, произошедшим около 250 лет назад.



а)



б)



в)

Рис 9 *а*) Источник в созвездии Лебедя, находящийся на расстоянии 500 млн световых лет *б*) Другой двойной источник (3С 47), находящийся на расстоянии 3 млрд. световых лет, который выглядит так же, как множество радиогалактик, но связан с квазаром — очень компактным и очень ярким оптическим источником Возможно, квазары представляют раннюю стадию развития радиогалактик. *в*) Более сложный источник 3С 465 наводит на мысль, что в данном случае произошло больше одного взрыва

между зеркалами, чтобы получить уверенное значение положения с точностью около 1″.

Во втором роде наблюдений строятся контурные карты радиояркости отдельных источников. В большинстве случаев источники имеют угловое протяжение всего несколько минут и оказываются гораздо более интенсивными, чем окружающие объекты. В таком случае не нужно использовать все положения движущейся антенны; вместо этого можно выбрать несколько положений вдоль всего рельса и создать антенну в виде кольцевой решетки. Такой инструмент имеет центральный лепесток, обладающий тем же разрешением, что и полная антенна, но окруженный системой кольцевых боковых лепестков. Если, однако, их расстояние от центрального лепестка больше, чем максимальная протяженность источника, они не повлияют на измерения.

Таким путем было построено много карт, причем использовались только две, четыре или восемь двенадцатичасовых записей (число записей зависит от угловых размеров исследуемого источника).

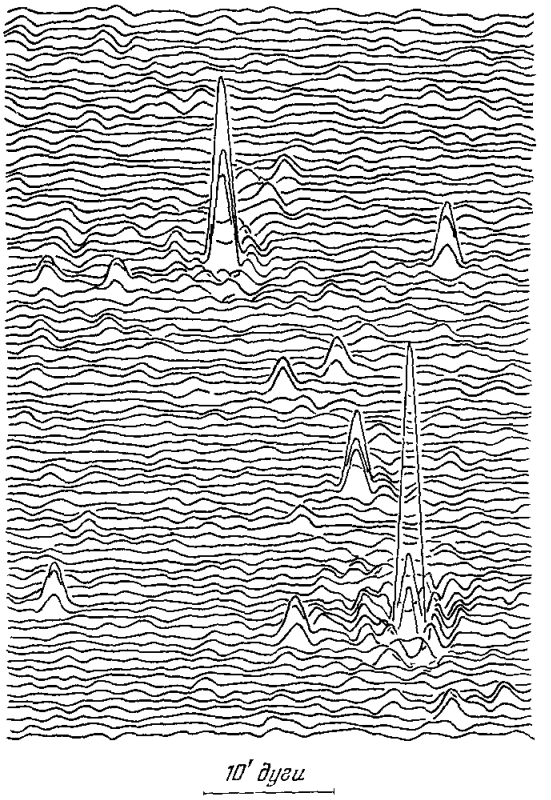


Рис. 10. Небольшая часть карты, полученной на волне 74 *см*.

Самый сильный источник имеет интенсивность, которая эквивалентна излучению передатчика мощностью 5 *мет*, помещенного на Луне.

На рис. 8 приведена карта расположенного в нашей Галактике остатка сверхновой, взрыв которой произошел примерно в 1700 г. Этот источник имеет форму кольца. Такое распределение соответствует излучению тонкой сферической оболочки. Эта оболочка, по-видимому, связана со сверхзвуковой ударной волной, образующейся при взаимодействии выброшенного из звезды расширяющегося облака с межзвездной средой. Внутри этой тонкой оболочки в течение нескольких сот лет удерживаются высокоэнергичные электроны, которые вызывают радиоизлучение. Много внегалактических источников, некоторые из которых находятся на очень больших расстояниях, наблюдались таким способом (рис. 9).

Третий тип наблюдений связан с обнаружением более слабых источников, чем те, которые можно было наблюдать до сих пор. Для построения полной карты области неба, занимающей все поле зрения инструмента (с диаметром $3^1/_2{}^\circ$ на волне 74 *см* и 1° на волне 21 *см*), использовались все 64 положения движущейся антенны. На рис. 10 приведена часть карты для 74 *см*. Благодаря высокой чувствительности и большому разрешению, были обнаружены источники в 100 раз более слабые, чем те, которые регистрировались в прежних обзорах неба.

КОСМОЛОГИЯ

Исследование таких очень слабых источников имеет большое значение в космологии: сигналы от удаленных источников идут до нас столь долго, что, изучая их, мы можем получить информацию о том, какова была Вселенная много миллиардов лет назад. Сравнивая наблюдения близких радиоисточников с наблюдениями все более далеких, мы можем заглядывать все дальше в глубь истории Вселенной, вплоть до той поры, когда она была в десять раз моложе. Уже первые подобные наблюдения привели к убедительному доказательству того, что Вселенная меняется со временем: они установили, что 8 миллиардов лет назад радиогалактики были более мощными, чем теперь. Наблюдения, проведенные в последнее время, наводят на мысль, что мы даже начинаем наблюдать тот период, когда радиогалактики еще не образовались.

Я описал прибор, предназначенный для работы в определенной области радиоастрономии — исследовании радиоисточников, особенно внегалактических, природа которых, по-видимому, связана с самыми фундаментальными физическими проблемами. В радиоастрономии есть другие задачи, для решения которых большие параболические антенны остаются незаменимыми, например изучение быстропеременных или слабых источников. Однако для наблюдений, в которых нужно иметь большую разрешающую способность или большую чувствительность, описанный метод апертурного синтеза, по-видимому, является наилучшим.

Муллардская радиоастрономическая обсерватория,
Кембридж, Великобритания