

Большой пулковский радиотелескоп

С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Н. А. Есепкина, О. Н. Шиврис

Описываются принцип, конструкция и результаты исследования нового зеркального радиотелескопа для сантиметрового диапазона волн с большой площадью рефлектора и высокой разрешающей силой, а также некоторые полученные с его помощью астрономические результаты.

Рефлектор радиотелескопа состоит из ряда плоских отражающих элементов, образующих многогранную поверхность, соприкасающуюся с поверхностью эллиптического конуса.

Рефлектор преобразует падающую плоскую волну в цилиндрическую с вертикальной осью. Цилиндрическая волна преобразуется в сферическую вторичным зеркалом — параболическим цилиндром. Высокая относительная точность расчлененной отражающей поверхности достигается точным расположением отдельных его элементов. Путем перемещения отражающих элементов и облучателя ось радиотелескопа может быть установлена в любом направлении. В статье рассмотрены геометрия отражающей поверхности, особенности диаграммы направленности радиотелескопа и кинематики механизмов установки отражающих элементов; приведены также измеренные характеристики радиотелескопа и результаты некоторых астрономических наблюдений.

§ 1. НОВЫЙ ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ С БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДЬЮ И РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ

Развитие радиоастрономии и радиолокационной астрономии в настоящее время лимитируется техническими возможностями радиотелескопов. Для решения новых задач необходимы широкодиапазонные радиотелескопы с весьма большими площадями и высокой разрешающей силой, способные следить за источником и пригодные для работы как на прием, так и на передачу (для радиолокационных наблюдений). Большая площадь антенны обеспечивает высокую чувствительность, необходимую для приема радиоизлучения слабых источников. Высокая разрешающая способность позволяет точно определить координаты источника, его размер и распределение яркости. Слежение антенны за источником дает возможность увеличить чувствительность приемника за счет увеличения времени накопления сигнала, а в случае радиолокационных наблюдений позволяет получать информацию непрерывно. Чем шире диапазонность радиотелескопа, тем больше задач может быть решено. Однако наиболее благоприятным для радиоастрономических и радиолокационных наблюдений является диапазон коротких дециметровых и длинных сантиметровых волн, где наличие высокочувствительных приемников (например, с молекулярными усилителями), низкий уровень фона радиоизлучения Галактики и малое поглощение в тропосфере создают особенно благоприятные условия для наблюдения слабых источников [1]. Возможность радиолокационного использования антенны большой площади позволяет ставить задачи радиолокации Луны и планет [2]. Всем указанным требованиям может удовлетворить только радиотелескоп типа рефлектора [3]. Увеличение площади рефлектора ограничивается максимальной точностью поверхности, которая может быть достигнута. Наличие ошибок поверхности (т. е. отклонения формы рефлектора от требуемой) ведет к рассеянию волн, вследствие чего пони-

жается коэффициент использования площади рефлектора и расширяется его диаграмма направленности. Потери в эффективной площади рефлектора быстро растут в зависимости от отношения величины случайной ошибки поверхности ε к длине волны λ . Так, при $\frac{\varepsilon}{\lambda} = 0.1$ потери не должны превышать 1 дб, а при $\frac{\varepsilon}{\lambda} = 0.2$ они достигают уже 4 дб, что недопустимо [4]. Относительная точность отражающей поверхности симметричного параболического рефлектора, т. е. отношение ε к диаметру, у лучших из построенных радиотелескопов этого типа приближается к величине $1-2 \cdot 10^{-4}$. Такая высокая точность достигнута в 15-метровом радиотелескопе морской исследовательской лаборатории в Вашингтоне. Большой радиотелескоп в Джодрелл-Бэнк диаметром 76 м имеет относительную точность порядка 10^{-3} . Только в одном из существующих рефлекторов — 22-метровом радиотелескопе ФИАН — достигнута относительная точность, лучшая, чем $1 \cdot 10^{-4}$ (по-видимому, около $5 \cdot 10^{-5}$). Относительная точность ограничивается не только точностью изготовления, но и деформациями, обусловленными весом, ветром, неоднородным нагревом, и поэтому едва ли может быть значительно улучшена по сравнению с $1 \cdot 10^{-4}$. При относительной точности поверхности отражателя $\frac{\varepsilon}{D} = 10^{-4}$ и при номинальной длине волны $\lambda_{\min} = 10\varepsilon$, на которой антенна еще имеет допустимый коэффициент использования, предельная разрешающая способность (ширина диаграммы по точкам $1/2$ мощности) $\frac{\lambda}{D} = 10^{-3} \simeq 3.5$; а предельная площадь отражателя $S_{\max} = \frac{\pi}{4} \lambda^2 \cdot 10^6$. Наибольший из проектируемых в настоящее время (в США) радиотелескопов с рефлектором в форме параболоида вращения будет иметь диаметр 120—180 м и минимальную длину волны порядка 15 см [5]. Площадь этого радиотелескопа порядка 20 000 м², вероятно, уже близка к предельной для радиотелескопов этого типа, так как с высотой сильно растут технические трудности возведения и стоимость сооружений. Таким образом, большие рефлекторы в форме параболоида вращения могут обеспечить разрешающую способность порядка 3.5.

Дальнейший существенный прогресс в направлении увеличения площади антенн и их разрешающей способности возможен только при условии применения новых принципов. Один из возможных новых принципов, позволяющих строить радиотелескопы типа рефлектора с относительной точностью гораздо лучшей, чем $1 \cdot 10^{-4}$, применен при сооружении Большого пулковского радиотелескопа [6]. Этот принцип состоит в том, что отражатель расчленяется на большое число отдельных, механически не связанных между собой отражающих элементов, которые устанавливаются так, что они вместе воспроизводят нужную форму отражающей поверхности. Тогда с увеличением размеров отражателя за счет увеличения числа отражающих элементов возрастают требования к относительной точности не каждого отдельного элемента, а лишь их взаимного расположения. Эта задача решается геодезическими методами, которые, как известно, позволяют достичь относительной точности порядка $1 \cdot 10^{-6}$ [7], т. е. гораздо более высокой, чем может быть достигнута в рефлекторе, представляющем собой единую механическую конструкцию. Поскольку отдельные отражающие элементы должны устанавливаться на земле, значительно увеличивать размеры рефлектора путем увеличения числа отражающих элементов можно только в горизонтальном направлении. Соответственно и диаграмма направленности радиотелескопа будет иметь малый угол раствора только в горизонтальном направлении („ножевая диаграмма“). Однако, как показано в [1], при наблюдениях одних и тех же объектов под разными азимутами ножевая диаграмма в большинстве случаев дает возможность по обеим координатам (прямому восхождению и склонению) достичь разрешающей силы, соответствующей малому углу раствора ноже-

вой диаграммы. Поэтому вполне можно мириться с тем, что радиотелескоп обладает узкой диаграммой направленности только в горизонтальном направлении при условии, что он позволяет вести наблюдения в любом азимуте.

Фокусировка падающей на такой радиотелескоп плоской волны осуществляется в два этапа. Сначала отражающая поверхность радиотелескопа преобразует падающую плоскую волну в цилиндрическую, распространяющуюся горизонтально и сходящуюся в вертикальной фокальной линии. Эта цилиндрическая волна при помощи вторичного зеркала превращается в сферическую волну, сходящуюся в фазовом центре облучателя. Так как вторичное зеркало помещается в сходящейся цилиндрической волне вблизи фокальной линии, то его горизонтальный размер может быть сделан очень малым по сравнению с горизонтальным размером первой отражающей поверхности.

§ 2. ГЕОМЕТРИЯ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Отражающая поверхность радиотелескопа служит для преобразования плоской волны в цилиндрическую (или наоборот). Эту задачу выполнит поверхность S (рис. 1), в точках которой луч a_nb_n , пересекающий ось цилиндрической волны AA и нормальный к этой оси, отражается в виде луча b_nc_n , нормального к плоскости Q (фронт плоской волны), которая наклонена к линии AA на заданный угол h . При этом сумма длин $a_nb_n + b_nc_n$ должна быть одинаковой для всех лучей (условие равенства фаз). Прежде всего очевидно, что падающие лучи a_nb_n , находящиеся в одной плоскости abb_na_n с осью цилиндрической волны AA , отразятся от поверхности S в точках, лежащих на прямой линии bb_n . (Если бы эта линия была не прямой, то параллельные между собой и лежащие в одной плоскости лучи a_nb_n после отражения не могли бы быть параллельными). Следовательно, поверхность S будет содержать прямые, которые, находясь в плоскостях, проходящих через ось AA (abb_na_n), в общем случае будут пересекаться с этой осью.

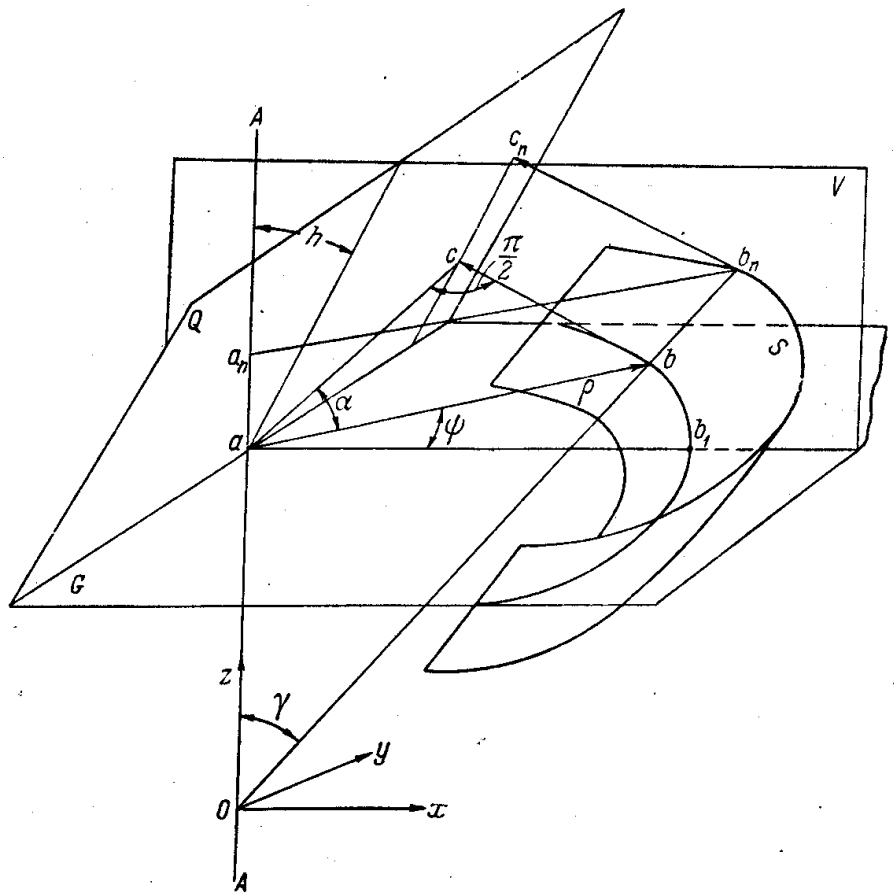


Рис. 1. Преобразование отражающей поверхностью радиотелескопа плоской волны в цилиндрическую.

Определим теперь линию пересечения поверхности S с плоскостью G , нормальной к AA , исходя из того, что падающие лучи (ab), лежащие в плоскости G и отраженные (bc) от поверхности S в точках, составляющих искомую линию, должны удовлетворять условию:

$$ab + bc = P;$$

здесь $P = \text{const.}$

Лучи (ab), лежащие в плоскости G , будем определять на этой плоскости углом ψ , заключенным между лучом и плоскостью V , проходящей через AA нормально к плоскости Q и G . Рассматривая трехгранный угол, образованный плоскостями Q , G и плоскостью abc (плоскость, в которой лежат падающий и отраженный лучи), находим зависимость между плоским углом α , лежащим в плоскости abc , углом ψ и двугранным углом h (в рассматриваемый трехгранный угол входят дополнения двух последних углов до $\frac{\pi}{2}$):

$$\sin \alpha = \cos h \cos \psi.$$

Далее из плоского прямоугольного треугольника abc находим $(bc) = (ab) \sin \alpha$. Подставляя сюда ранее найденное выражение для $\sin \alpha$, будем иметь: $(bc) = (ab) \cos h \cos \psi$.

Так как $(ab) + (bc) = P$, то, подставляя сюда вместо (bc) последнее выражение, получим $(ab)[1 + \cos h \cos \psi] = P$ или $(ab) = \frac{P}{1 + \cos h \cos \psi}$.

Обозначив (ab) через ρ , получим окончательное выражение интересующей нас линии в полярной системе координат с полюсом в точке пересечения прямой AA с плоскостью G и полярным углом ψ

$$\rho = \frac{P}{1 + \cos h \cos \psi}. \quad (1)$$

Это уравнение конического сечения в полярной системе координат с полюсом в фокусе этого сечения, эксцентриситет которого ε равен $\cos h$. Так как $0 \leq \cos h = \varepsilon \leq 1$ для интересующих нас углов $0 \leq h \leq \frac{\pi}{2}$, то это уравнение эллипса и в крайних случаях при $h=0$ и $h=\frac{\pi}{2}$ параболы и окружности. P в этой формуле — фокальный параметр эллипса. Мы получили линию пересечения поверхности S с плоскостью G , проходящей через точку пересечения плоскости Q с прямой AA . Такую же форму сечение поверхности S будет иметь в любой другой нормальной к AA плоскости, изменится лишь фокальный параметр P . Действительно, сместив плоскость G вдоль по AA , а плоскость Q параллельно самой себе, так чтобы она проходила через новую точку пересечения AA с плоскостью G , мы получим такое же расположение плоскостей, как и при начальном положении плоскости G . Изменится лишь сумма длин падающего и отраженного лучей $ab + bc$, т. е. изменится фокальный параметр P нового сечения.

Поскольку искомая поверхность S имеет прямолинейные образующие, которые в общем случае пересекаются с прямой AA , а сечения поверхности S плоскостями (G), нормальными к AA , представляют собой эллипсы, один из фокусов которых находится на AA , следует, что поверхность S коническая с вершиной на AA .

Уравнение этой поверхности в правой прямоугольной системе координат с началом в вершине конуса, с осью z , совпадающей с AA , и с осью x , лежащей в плоскости V , запишется так: $x^2 \sin^2 h + y^2 - z^2 \sin^2 h + xz 2 \sin h \cos h = 0$. Повернув систему координат вокруг оси y против часовой стрелки на угол $\frac{\pi}{4} - \frac{h}{2}$, получим каноническое уравнение поверхности S

$$x^2 + \frac{y^2}{\sin h} - z^2 = 0,$$

т. е. уравнение эллиптического конуса, сечение которого плоскостью, нормальной к его оси, представляет собой эллипс с эксцентриситетом, равным $\sqrt{1 - \sin h}$. Таким образом, для преобразования цилиндрической волны в плоскую, фронт которой наклонен к оси

цилиндрической волны на угол h , нужна определенная выше коническая поверхность, ось которой наклонена относительно оси цилиндрической волны (проходящей через вершину конуса) в сторону распространения плоской волны на угол $\frac{\pi}{4} - \frac{h}{2}$, причем большая ось эллиптического сечения конуса должна находиться в одной вертикальной плоскости с осью цилиндрической волны. Отражающая поверхность представляет собой некоторую часть (как бы длинную узкую ленту) рассмотренной выше конической поверхности S , расположенную вдоль линии пересечения этой поверхности с плоскостью G (рис. 1), которая совпадает с горизонтальной плоскостью (следовательно, ось цилиндрической волны вертикальна, а угол h является углом между горизонтом и нормалью к фронту плоской волны или высотой источника излучения над горизонтом). С изменением h должна изменяться форма отражающей поверхности, так как изменяются сечение поверхности S горизонтальной плоскостью (эксцентриситет эллипса) и углы наклона прямолинейных образующих поверхности S к плоскости горизонта (или ориентация нормалей к поверхности S , например в точках, лежащих на линии пересечения этой поверхности с горизонтальной плоскостью). Поэтому такую антенну можно назвать антенной с отражателем переменного профиля. Чтобы можно было производить указанные изменения конфигурации отражающей поверхности, или, другими словами, направлять ось диаграммы антенны на источники с разной высотой h , отражающая поверхность составляется из отдельных одинаковых плоских прямоугольных элементов, примыкающих почти вплотную друг к другу. Каждый плоский элемент независимо от других устанавливается в нужное положение путем поступательного перемещения его в горизонтальной плоскости и двух поворотов вокруг горизонтальной и вертикальной осей (первая лежит в плоскости элемента, и обе проходят через середину элемента). В исходном положении все плоские элементы вертикальны и касаются окружности радиуса R , лежащей в горизонтальной плоскости. (Поступательное перемещение элементов антенны производится в направлении на центр этой окружности). Размеры отдельных плоских элементов отражающей поверхности должны удовлетворять некоторым требованиям, рассмотренным ниже.

Определим теперь положение каждого отражающего элемента („щита“) относительно указанного выше исходного положения в зависимости от высоты h источника, на который должен быть направлен радиотелескоп, и направления из центра O исходной окружности на середину отражающего элемента C (азимута щита φ , рис. 2). Это положение определится величиной радиального смещения щита от исходной окружности до центра отражающего элемента $l = R - r$ и величинами углов поворота вокруг горизонтальной оси α и вертикальной оси β . Углы α и β будем называть углом наклона элемента и углом поворота элемента по азимуту.

При дальнейшем рассмотрении для упрощения формул положим $R = 1$, а все линейные величины (P , v , l , ρ) будем выражать в долях R .

Для того чтобы определить l (или r) и β , достаточно рассмотреть сечение отражающей поверхности горизонтальной плоскостью, проходящей через середины отражающих элементов. (Это сечение изображено на рис. 2). Вершину сечения (эллипса) v будем считать расположенной на исходной окружности. Из треугольника OCF , в котором $CF = \rho = \frac{P}{1 + \cos h \cos \psi}$; $CFO = \pi - \psi$; $OF = f = 1 - \frac{P}{1 + \cos h}$ (получается, если из $R = 1$ вычесть значение ρ при $\psi = 0$) найдем выражение для $OC = r$ через h и φ

$$r = \frac{[(1 - P) - \cos^2 h] \cos \varphi + \sqrt{P^2 - [(1 - P)^2 - \cos^2 h] \sin^2 \varphi}}{1 - \cos^2 h \cos^2 \varphi} \quad (2)$$

Для упрощения конструкции и облегчения эксплуатации важно, чтобы смещения отдельных элементов от исходного положения были минимальными при установке радиотелескопа на источник заданной высоты h ; с другой стороны, нужно обеспечить работу заданного количества отражающих элементов, чтобы получить заданную площадь отражающей поверхности. Для этого нужно рациональным образом выбирать параметр эллипса P в зависимости от h , именно так, чтобы при заданном угле, под которым видна используемая дуга эллипса из центра исходной окружности 2Φ (этим определяется количество работающих элементов), величины l были минимальными для всех заданных h .

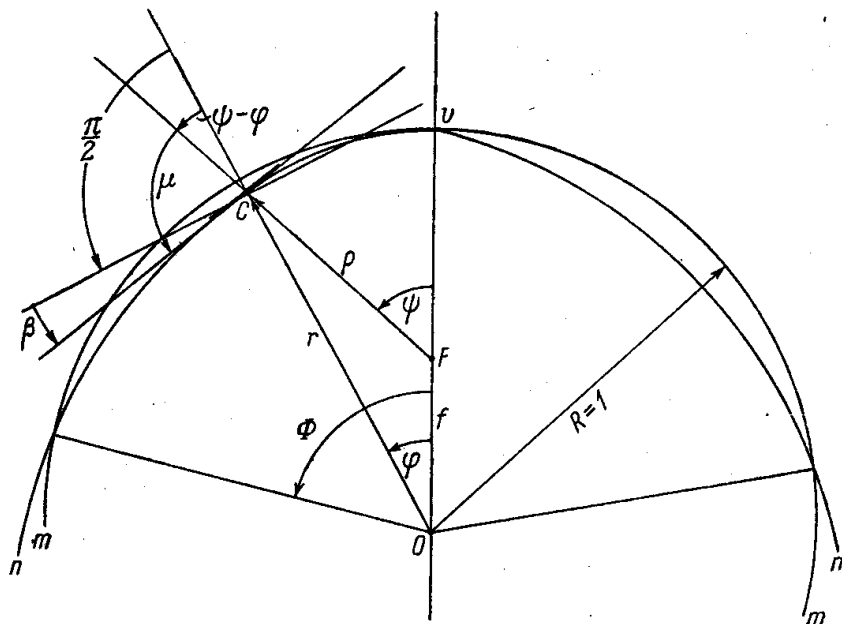


Рис. 2. Горизонтальное сечение отражающей поверхности радиотелескопа.

O — центр исходной окружности; F — фокус эллипса; C — середина отражающего элемента; φ и ψ — азимуты середины отражающего элемента из центра исходной окружности и фокуса эллипса относительно прямой проходящей через O и F [эта прямая является следом плоскости V (рис. 1) на горизонтальной плоскости, на ней находится вершина эллипса]. mnp — дуга исходной окружности; mnp — дуга эллипса; $FC = \rho$; $OC = r$; $OF = f$.

относительно вершины точки пересечения. Для этого случая из (2) определим минимальное расстояние дуги эллипса от центра окружности

$$r_{\min} = \frac{\sqrt{\cos^2 h - (1 - P)^2}}{\cos h} \quad (3)$$

Если точка пересечения эллипса с окружностью будет находиться в конце рабочего угла $\varphi = \Phi$, т. е. вся рабочая часть антенны будет внутри исходной окружности, то, определяя P из уравнения $r(\varphi, h, P) = 1$ при $\varphi = \Phi$ и подставляя это значение в выражение (3), получим величину минимального расстояния рассматриваемой кривой от центра в угле 2Φ (а это и определит величину максимального смещения кривой от исходной окружности $l_{\max}$, так как $l_{\max} = 1 - r_{\min}$). P из написанного выше уравнения будет равно

$$P = 1 - \frac{\cos^2 h (1 - \cos \Phi)}{2} \quad (4)$$

Если нужно обеспечить рабочий угол 2Φ для всех h от 0 до 90° , то $l_{\max}$ следует определять для $h = 0$, так как в этом случае эллипс обращается в параболу, т. е. кривую, больше отличающуюся от окружности, чем эллипс, и значение $l_{\max}$, определен-

Прежде всего очевидно, что если радиус кривизны у эллипса при вершине v будет равен радиусу исходной окружности R или будет больше него, то ввиду того что кривизна эллипса уменьшается по мере удаления от v (т. е. с увеличением φ), эллипс будет расположен вне окружности и с увеличением φ дуга эллипса будет быстрее удаляться от окружности, чем в случае, если радиус кривизны эллипса при вершине будет несколько меньше радиуса окружности. В этом последнем случае дуга эллипса будет пересекать окружность, частично проходя внутри нее, т. е. с окружностью она будет иметь три общих точки: вершину v , где она касается окружности, и две симметрично расположенных относи-

ное для него, будет заведомо достаточно для всех остальных возможных случаев (эллипсов). Формулы (3) и (4) для этого случая будут иметь вид:

$$r_{\min} = \sqrt{2P - P^2}; \quad P = \frac{1 + \cos \Phi}{2}.$$

Можно показать, что в случае, когда рабочий участок кривой расположен внутри исходной окружности (т. е. в случае, рассмотренном выше), смещение кривой от исходной окружности будет наименьшим. Так, рассматривая производную от r по P — $\frac{dr}{dP}$, можно установить, что она положительна и увеличивается с увеличением φ , т. е. при увеличении P приращение расстояния от центра окружности до кривой будет увеличиваться с увеличением φ . С увеличением P кривая вблизи концов рабочего угла 2Φ будет располагаться вне исходной окружности, в этом случае наибольшее радиальное смещение кривой будет равно сумме максимального смещения внутрь исходной окружности и смещения из окружности в конце рабочего угла. Из сказанного выше относительно поведения $\frac{dr}{dP}$ ясно, что эта сумма будет больше, чем максимальное смещение $l_{\max}$ в случае, если кривая в пределах рабочего угла располагается внутри окружности, так как уменьшению максимального смещения внутри окружности будет соответствовать большее смещение кривой от окружности в конце рабочего сектора.

Таким образом, для того чтобы получить минимальное смещение кривой от исходной окружности при заданном рабочем угле 2Φ , параметр P нужно изменять в зависимости от h по формуле (4), если же нужно получить максимальный рабочий угол при заданном максимальном смещении $l_{\max}$, то зависимость между P и h выражается формулой (3), которая, если ее записать относительно P , будет иметь вид:

$$P = 1 - \sqrt{1 - r_{\min}^2} \cos h. \quad (5)$$

Определим теперь угол поворота отражающего элемента по азимуту β , т. е. угол при точке C между касательной к кривой $пул$ в точке C и направлением, нормальным к r (рис. 2). Как видно из рис. 2, угол β равен

$$\beta = \mu + (\psi - \varphi) - \frac{\pi}{2},$$

где μ — угол между радиусом-вектором ρ и касательной к кривой (дуга эллипса); этот угол определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} \mu = \frac{\rho}{\frac{d\rho}{d\psi}} = \frac{1 + \cos h \cos \psi}{\cos h \sin \psi}.$$

Подставляя выражение для μ в выражение для β и произведя преобразования, получим

$$\beta = \psi - \varphi - \operatorname{arctg} \left(\frac{\cos h \sin \psi}{1 + \cos h \cos \psi} \right). \quad (6)$$

Входящий в (6) угол ψ (азимут середины щита из фокуса F) определим из треугольника OCF

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi - \frac{f}{r}},$$

где f — расстояние от центра O до фокуса F

$$f = 1 - \frac{P}{1 + \cos h}.$$

Для определения угла наклона отражающего элемента к вертикали α определим вначале угол наклона прямолинейной образующей конической поверхности к вертикали γ (т. е. к оси цилиндрической волны AA на рис. 1)

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\sin h}{1 + \cos h \cos \psi}.$$

Это выражение для γ получается из рассмотрения прямоугольного треугольника Oab (рис. 1), одним из катетов которого является $\rho(\psi)$; второй катет Oa определится из этого треугольника при $\psi = 0$; в этом случае прямолинейная образующая конической поверхности наклонена к AA на угол $\frac{h}{2}$. Зная угол γ и найденный выше угол μ ,

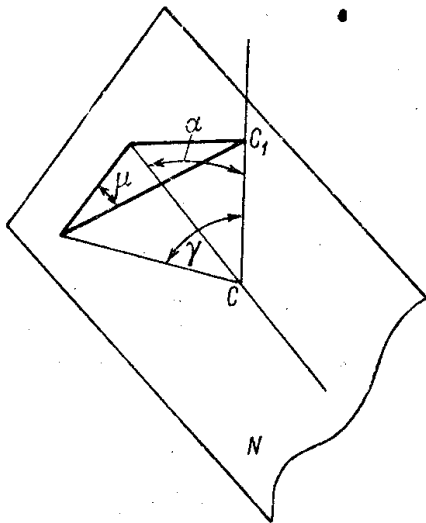


Рис. 3. Определение угла наклона отражающего элемента к вертикали.

определим угол наклона отражающего элемента к вертикали α из рассмотрения трехгранной пирамиды, изображенной на рис. 3. Эта пирамида одной своей гранью лежит на плоскости отражающего элемента N . Одним из ребер ее является вертикаль CC_1 , проходящая через середину C отражающего элемента, все три боковые грани представляют собой прямоугольные треугольники. Грань, содержащая угол γ , лежит в вертикальной плоскости, проходящей через ось цилиндрической волны (AA на рис. 1); грань, содержащая угол μ , горизонтальна; грань, содержащая угол α , нормальна к плоскости отражающего элемента N .

Из рассмотрения этой трехгранной пирамиды получим зависимость между γ , α и μ , а заменяя μ выражением, найденным выше, и упрощая, окончательно получим

$$\sin \alpha = \frac{\sin h}{\sqrt{2(1 + \cos h \cos \psi)}}. \quad (7)$$

Для установки радиотелескопа на наблюдение источника с высотой h [находящегося в главном сечении зеркала V (рис. 1)] необходимо вычислить по формулам (2), (6) и (7) значения радиальных смещений — r , а также углов поворотов α и β для каждого отражающего элемента (определенного азимутом φ). Расстояние от фокуса F , где должен быть установлен облучатель, до вершины v кривой в сечении (эллипса), как это следует из формулы (1), равно

$$Fv = \rho(0) = \frac{P}{1 + \cos h}.$$

При изменении азимута наблюдаемого источника следует поворачивать плоскость главного сечения V (рис. 1). Это можно выполнить без вращения всего радиотелескопа в целом (при больших размерах сооружения это невыполнимо) путем таких изменений r , α и β у всех отражающих элементов, которые определяются одинаковым изменением их азимутов φ . При этом отражающие элементы остаются на месте и только облучатель должен перемещаться по круговой траектории. Если отражающие элементы сплошь заполняют замкнутую окружность, то радиотелескоп обладает круговым обзором. Для слежения за перемещающимся источником нужно непрерывно изменять координаты всех отражающих элементов рабочего сектора рефлектора, а также положение облучателя в соответствии с изменением высоты и азимута источника. Сопровождение источника радиоизлучения диаграммой направленности радиотелескопа может быть выполнено только при наличии системы программного управления, включающей вычи-

слительную машину (или программное устройство), выдающую координаты отражающих элементов в соответствии со склонением и часовым углом светила, а также приводы управления и механизмы обратного контроля. Расчлененность рефлектора позволяет разбивать его на отдельные части, которые можно устанавливать для наблюдения в различных направлениях. При этом можно, пользуясь несколькими облучателями, создавать различные комбинации расположений диаграмм направленности отдельных частей рефлектора. На радиотелескопе с замкнутым рефлектором можно одновременно и независимо наблюдать с максимальной разрешающей силой 3—4 объекта (при соответствующем количестве облучателей), так как при угле облучения $2\psi_{\max} = 100-120^\circ$ (рис. 2) рабочий сектор рефлектора $2\Phi = 80-90^\circ$.

Приведенное выше геометрическое рассмотрение позволяет установить связь между положением отдельных отражающих элементов и направлением оси диаграммы направленности радиотелескопа. Конечно, о размерах и форме диаграммы направленности такое геометрическое рассмотрение не может дать никаких указаний. Эти вопросы будут рассмотрены в следующем параграфе.

§ 3. ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ РАДИОТЕЛЕСКОПА С ОТРАЖАТЕЛЕМ ПЕРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ

Диаграммы направленности радиотелескопа у зеркальных антенн определяются размерами и формой синфазного раскрыва и условиями облучения (т. е. полем в раскрыве). При наблюдении на горизонте раскрыв рефлектора имеет форму прямоугольника с высотой, равной вертикальному размеру отражающего элемента H_0 , и основанием, которое определяется радиусом

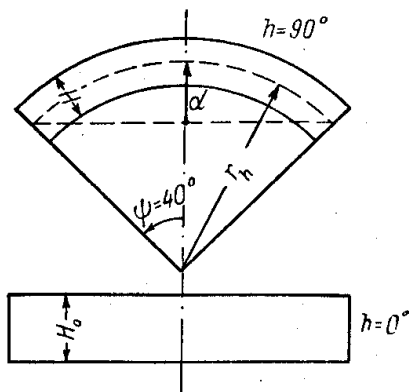


Рис. 4. Изменение формы раскрыва с высотой.

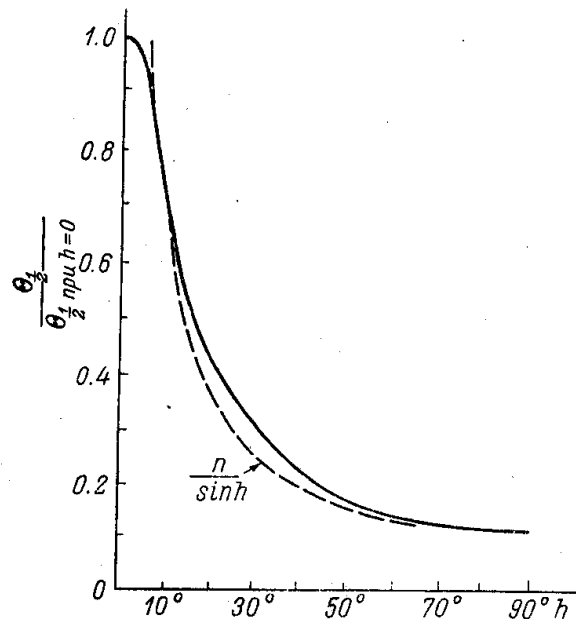


Рис. 5. Изменение ширины вертикальной диаграммы с высотой $n = \frac{\theta_1}{2} \text{ при } h=90^\circ \cdot \frac{\theta_1}{2} \text{ при } h=0^\circ$.

окружности R и углом облучения $2\psi_{\max}$. Предельная высота отражающего элемента ограничивается точностью плоской поверхности, которая в настоящее время может быть достигнута. Отклонения отражающего элемента от заданной плоскости обусловлены теми же причинами и имеют тот же достижимый в настоящее время предел (10^{-4}), что и ошибки параболоида вращения. Поэтому предельная высота отражающего элемента равна предельному диаметру параболоида вращения. Предельный горизонталь-

ный размер определяется не относительной точностью одного отражающего элемента, а случайными ошибками в начальном расположении отражающих элементов. Поскольку установка отражающих элементов производится геодезическими методами, эта ошибка может быть уменьшена до 10^{-6} , что позволяет в десятки раз увеличить горизонтальный размер рефлектора по сравнению с высотой элемента. Поэтому радиотелескоп с отражателем переменного профиля предельных размеров будет обладать разрешающей силой в горизонтальном направлении в десятки раз большей, чем у параболоида вращения с предельно большим диаметром.

В отличие от обычных зеркальных антенн диаграмма направленности радиотелескопа с отражателем переменного профиля не остается постоянной, а изменяется с высотой h , вследствие того что при этом изменяется форма раскрыва рефлектора и условия облучения. При наблюдении на горизонте раскрыв имеет прямоугольную форму, а расстояние от облуча-

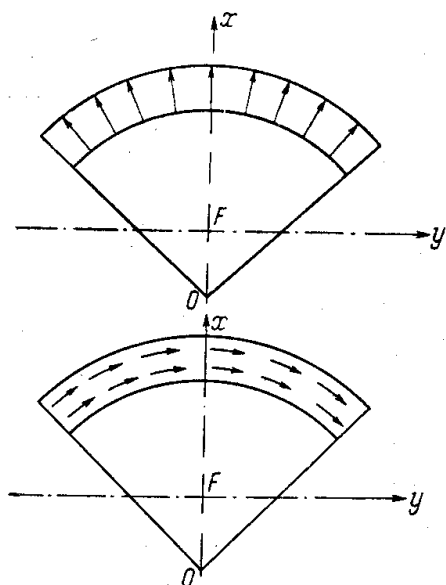


Рис. 6. Поле на раскрыве при горизонтальной и вертикальной поляризации облучателя.

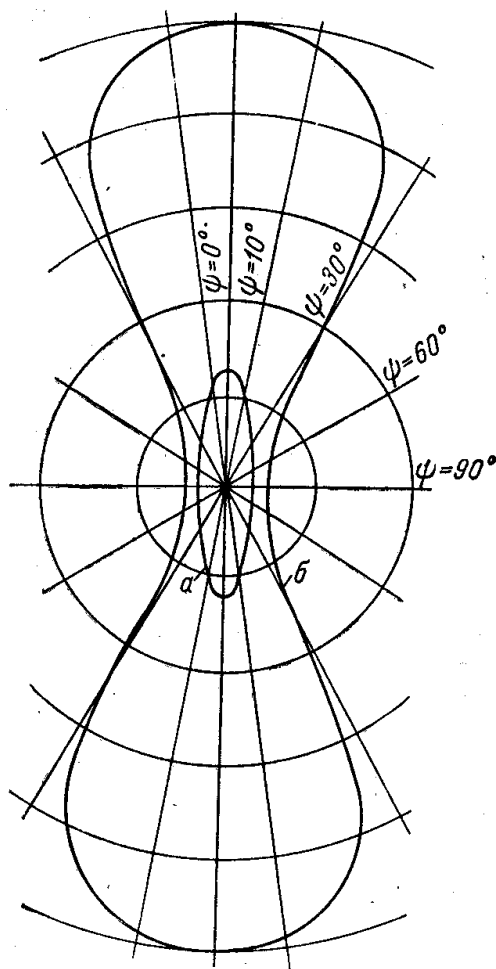


Рис. 7. Сечения диаграммы направленности.

а — по уровню 0.5; б — по уровню 0.05.

теля до вершины рефлектора близко к $\frac{1}{2} R$ — радиуса исходной окружности (рис. 2). По мере увеличения высоты h форма раскрыва искривляется, а расстояние до облучателя увеличивается до R . Расчет показывает^[8], что в общем случае раскрыв имеет форму кольца со средним радиусом $r_h = \frac{R}{\sin h}$ и шириной $H =$

$H_0 \cos \frac{h}{2}$ (рис. 4). Угловой растрор горизонтальной диаграммы направленности определяется длиной хорды, стягивающей дугу в раскрыве, а вертикальной — величиной ее стрелки и шириной кольца, т. е. глубиной раскрыва. При увеличении высоты h (и постоянном угле облучения $2\psi_{\max}$) длина облучаемого участка рефлектора растёт вследствие увеличения расстояния до облучателя, что вызывает некоторое сужение растрора горизонтальной диаграммы. При этом за счет уменьшения радиуса кривизны r_h растёт длина стрелки d дуги в раскрыве, равная проекции глубины рефлектора на фронт волны. Растрор вертикальной диаграммы направленности при малых углах h ,

когда ширина дуги в раскрыве $H \gg d$, в основном определяется величиной H_0 , но при дальнейшем увеличении высоты h раствор вертикальной диаграммы начинает быстро падать, так как теперь он в основном будет определяться длиной стрелки. Для этого участка изменений углов h зависимость ширины вертикальной диаграммы (по $1/2$ мощности) от h может быть приближенно выражена формулой

$$\theta_{\frac{1}{2}} = \frac{\frac{\theta_1}{2}}{\sin h} \quad \text{при } h = 90^\circ$$

График изменения ширины вертикальной диаграммы от h представлен на рис. 5.

Поле на раскрыве направлено вдоль радиуса окружности раскрыва при вертикальной поляризации поля облучателя и по касательной к окружности при горизонтальной поляризации (рис. 6). Такое распределение поля не похоже на обычное в раскрыве параболоида вращения. При замкнутом круглом раскрыве и таком распределении поля излучения вдоль оси параболоида не будет, но так как в антенне используется только небольшая часть круглого раскрыва ($\leq 80^\circ$), то имеет место излучение в основной поляризации в направлении оси параболоида (в главном лепестке) и в паразитной поляризации в боковых лепестках, расположенных на краях главного. Диаграммы направленности как в основной, так и в паразитной поляризации должны быть тождественны для обеих поляризаций поля облучателя^[8]. Вид сечений диаграммы направленности по уровням 0.5 и 0.05 по мощности при $h = 90^\circ$ изображен на рис. 7.

§ 4. КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА С ОТРАЖАТЕЛЕМ ПЕРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ

Коэффициент усиления зеркальной антенны определяется площадью рефлектора и коэффициентом использования его поверхности. Площадь отражателя переменного профиля может превышать предельную площадь параболоида вращения (для данной длины волны) в десятки раз, так как вертикальный размер отражателя переменного профиля может быть сделан равным диаметру параболоида, а горизонтальный размер превышает вертикальный в десятки раз. Коэффициент использования поверхности отражателя переменного профиля зависит не только, как обычно, от условий облучения и случайных ошибок поверхности рефлектора, но и от величины регулярной периодической ошибки поверхности, обусловленной тем, что она выполнена из отдельных плоских элементов. Условия эффективного облучения рефлектора определяют его оптимальные размеры. Наиболее удобный угол раствора горизонтальной диаграммы облучателя $2\psi_{\max} = 100-120^\circ$. Выбор радиуса окружности радиотелескопа производится в соответствии с теорией перископических антенн^[9], поскольку в вертикальной плоскости антенну можно считать зеркальной перископической системой. Отражающие элементы находятся в квазидальней зоне линейного облучателя на расстоянии $\rho < \frac{2H_{\text{обл.}}^2}{\lambda}$, где $H_{\text{обл.}}$ — высота облучателя. Основным параметром перископической антенной системы является отношение $\eta_E = \frac{E_1}{E_2}$, где E_1 — поле в дальней зоне перископической антенны, а E_2 — поле в дальней зоне в отсутствие переизлучателя.

На рис. 8 представлены графики зависимости η_E от параметра $p = \frac{\pi H_0^2 \cos^2 \frac{h}{2}}{2\lambda \rho}$ при различных отношениях размеров облучателя и отражающего элемента $e = \frac{H_{\text{обл.}}}{H_0 \cos \frac{h}{2}}$.

Графики показывают зависимость усиления от двух факторов:

- 1) несинфазности отражающей поверхности (при $h=0$) за счет того, что на ней могут поместиться несколько зон Френеля;
- 2) переоблучения отражающих элементов.

Из графиков видно, что η_E близка к 1 при $e = \frac{H_{обл.}}{H_0 \cos \frac{h}{2}} \approx 0.8$ и $p = \frac{\pi H_0^2 \cos^2 \frac{h}{2}}{2\lambda\rho} > 3$.

Как было показано выше, при изменении высоты точки наблюдения h изменяется расстояние до облучателя ρ и вертикальная проекция высоты элемента $H = H_0 \cos \frac{h}{2}$.

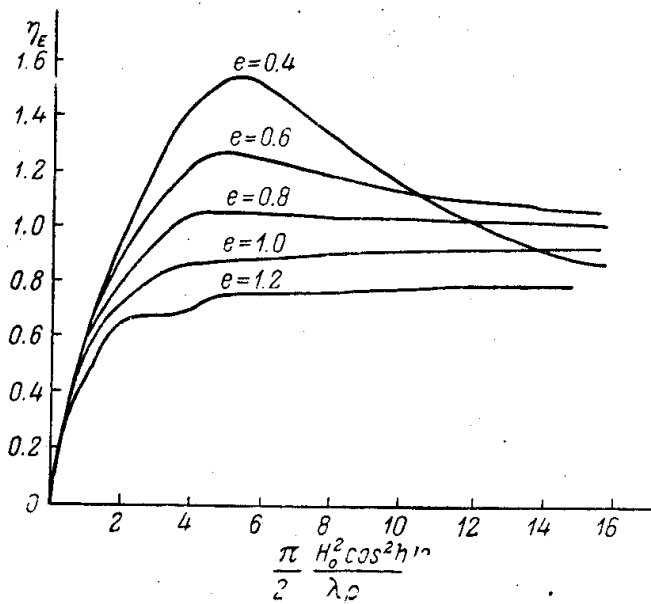


Рис. 8. Зависимость выигрыша в напряженности поля у перископической антенны от параметров

$$p = \frac{\pi H_0^2 \cos^2 \frac{h}{2}}{2\lambda\rho} \quad \text{и} \quad e = \frac{H_{обл.}}{H_0 \cos \frac{h}{2}}.$$

Поэтому размеры облучателя и радиус окружности (а следовательно, и ρ) надо выбрать таким образом, чтобы в пределах заданного диапазона волн коэффициент использования поверхности был максимальным при указанных изменениях параметров системы. Оптимальные размеры радиотелескопа целесообразно выбрать из условия $H_0 = \sqrt{2R\lambda_{\max}} \cdot \frac{1}{\cos \frac{h}{2}}$,

где $\lambda_{\max}$ — самая длинная волна диапазона, а $h=60^\circ$, так как при этом можно работать без проигрыша на наиболее часто встречающихся в радиоастрономии углах и с проигрышем порядка 10% на углах, близких к $h=90^\circ$. При выбранном соотношении между радиусом окружности R и высотой отражающего элемента H_0 на нем укладывается по высоте несколько больше, чем одна зона Френеля (т. е. он не находится в дальней зоне облучателя). В то время как рассмотрение условий облучения позволяет выбрать

общие размеры радиотелескопа, учет периодической ошибки рефлектора позволяет правильно выбрать горизонтальный размер отдельного отражающего элемента.

Наличие периодической ошибки ведет к появлению интерференционных лепестков и к увеличению потерь в усилении антенны. Ширина отражающего элемента a определяет угловое расстояние до интерференционных лепестков и величину максимальной фазовой ошибки на раскрые $\Delta = \frac{\pi a^2}{4\lambda\rho_0}$ [10]. Диаграмма направленности радиотелескопа по мощности $\left(\frac{P}{P_{\max}}\right)$ для различных Δ (и 80 отражающих элементов в рабочем секторе) изображена на рис. 9, а зависимость коэффициента усиления от величины ошибки Δ — на рис. 10 [10]. Из графика видно, что усиление антенны упадет всего на $\approx 5\%$ по сравнению со сплошной поверхностью, если ширину отражающего элемента взять равной протяженности первой зоны Френеля $\left(\Delta = \frac{\pi}{4}; a = \sqrt{\lambda\rho_0}\right)$. При этом на долю первого бокового лепестка, удаленного от основного примерно на ширину диаграммы одного элемента, приходится всего 0.04% мощности. При увеличении ширины элемента потери быстро возрастают.

Случайные ошибки поверхности отражателя переменного профиля возникают не только за счет ошибок изготовления плоской поверхности отражающих элементов,

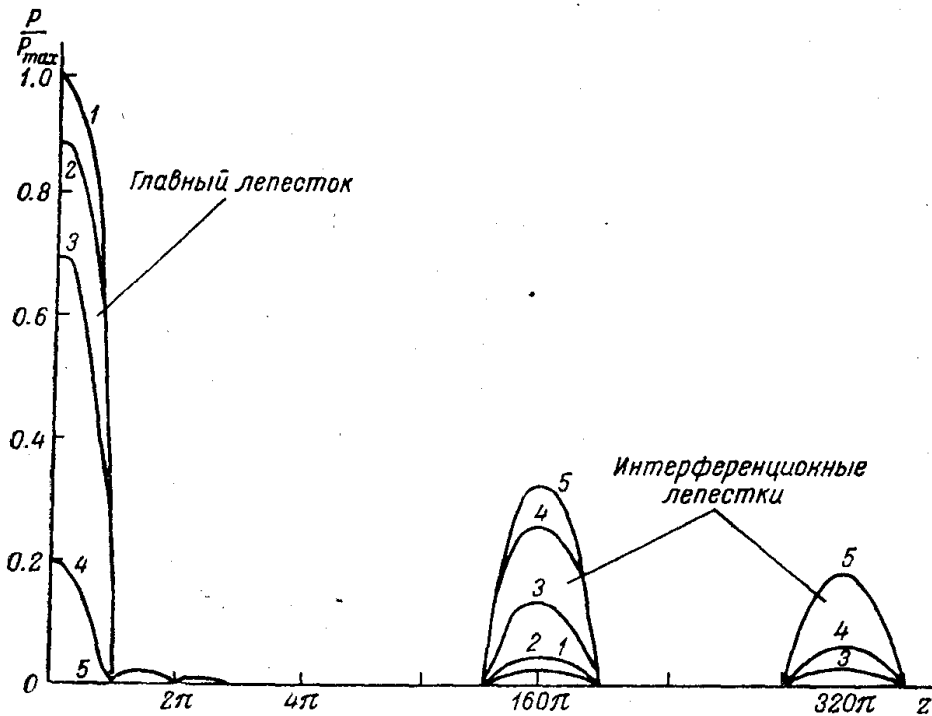


Рис. 9. Горизонтальная диаграмма направленности при различных фазовых ошибках.

На краю $0.3 E_{\max}$; $\tau = 160\pi$; 1 — $\Delta = 0$; 2 — $\Delta = \frac{\pi}{4}$; 3 — $\Delta = \frac{\pi}{2}$; 4 — $\Delta = \pi$; 5 — $\Delta = 1.54\pi$.

которые можно охарактеризовать допуском ε_0 (он имеет тот же порядок величины, что и у параболоида вращения с диаметром, равным H_0), но и за счет неточной установки центров отражающих элементов и углов их поворотов вокруг горизонтальной и

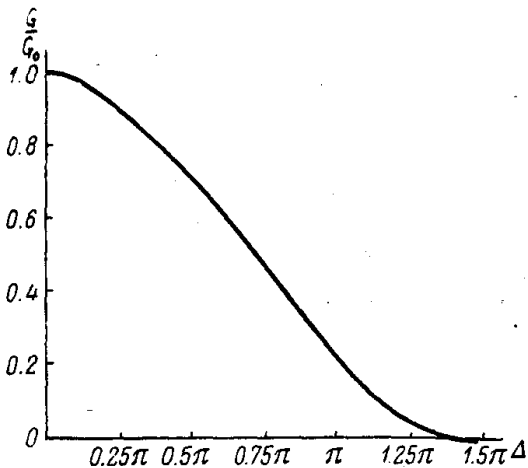


Рис. 10. Зависимость коэффициента усиления от фазовой ошибки Δ .

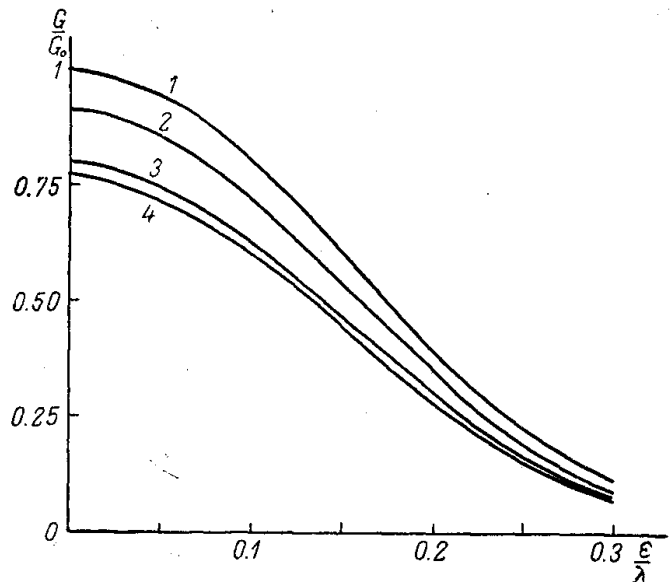


Рис. 11. Зависимость потерь в усилении антенны от величины случайных ошибок.

1 — $\varepsilon_0 = 0$, $\alpha_{\max} = 0$, $\beta_{\max} = 0$; 2 — $\varepsilon_0 = 0.05\lambda$, $\alpha_{\max} = 0.1 \frac{\lambda}{H_0}$, $\beta_{\max} = 0.1 \frac{\lambda}{a}$; 3 — $\varepsilon_0 = 0.05\lambda$, $\alpha_{\max} = 0.2 \frac{\lambda}{H_0}$, $\beta_{\max} = 0.2 \frac{\lambda}{a}$; 4 — $\varepsilon_0 = 0.1\lambda$, $\alpha_{\max} = 0.1 \frac{\lambda}{H_0}$, $\beta_{\max} = 0.1 \frac{\lambda}{a}$.

вертикальной осей, которые характеризуются величинами соответствующих допусков ε , $\alpha_{\max}$, $\beta_{\max}$ (вопрос об обеспечении минимальных допусков рассмотрен в § 5). Неточное положение центров отражающих элементов вызывает случайные изменения фазы поля на раскрыве,

а неточные повороты — случайные изменения амплитуды поля, так как отражающие элементы обладают направленностью, ввиду того что их размеры много больше длины волны. За счет неточности поворотов уменьшается усиление, так как появляется рассеянное поле, направленность которого определяется размерами отражающих элементов. Результаты расчета потерь, обусловленных случайными ошибками отражателя переменного профиля^[10], представлены на рис. 11, из которого видно, что при $\varepsilon_0 = 0.05 \lambda$; $\varepsilon = 0.1 \lambda$; $\alpha_{\max} = 0.1 \frac{\lambda}{H_0}$ и $\beta_{\max} = 0.1 \frac{\lambda}{a}$ потери составляют 27% (вместо 20% для сплошной поверхности при $\varepsilon_0 = 0.1 \lambda$). При этом основные потери приходятся

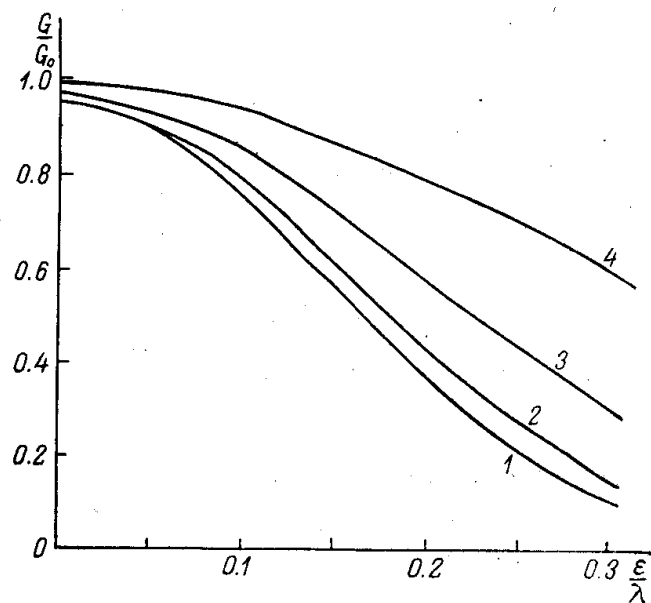


Рис. 12. Зависимость потерь в усилении антенны, обусловленных ошибками в радиальном перемещении отражающих элементов, от высоты.

$\varepsilon_0 = 0.05 \lambda$; 1 — $h = 0$; 2 — $h = 30^\circ$; 3 — $h = 60^\circ$; 4 — $h = 90^\circ$.

лоида вращения. Это объясняется тем, что у больших параболоидов невозможно обеспечить хорошую точность поверхности. Следует заметить, что уменьшение раствора вертикальной диаграммы направленности при высотах, близких к $h = 90^\circ$, у радиотелескопа с отражателем переменного профиля не сопровождается увеличением коэффициента усиления, так как при этом растет общий уровень и угловая протяженность „хвоста“ основного лепестка, а также боковых лепестков в основной и паразитной поляризации.

§ 5. КОНСТРУКЦИЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА

Отражающая поверхность радиотелескопа состоит из 90 одинаковых по конструкции плоских отражающих элементов (щитов), показанных на рис. 13. Каждый щит выполнен в виде прямоугольной литой чугунной рамы размером 3×1.5 м, на раме при помощи винтов крепится тонкий алюминиевый лист, служащий отражающей поверхностью. Каждый щит установлен на специальном механизме, обеспечивающем возможность его поступательного перемещения и поворотов вокруг двух осей. Механизмы закреплены на железобетонной эстакаде, установленной на бетонных фундаментах. Эстакада возвышается на 3 м над уровнем земли и расположена вдоль дуги окружности радиусом 100 м. Длина эстакады около 140 м (центральный угол около 80°). Щиты

на неточную установку центров отражающих элементов, так как при $\varepsilon = \varepsilon_0 = 0$ и $\alpha_{\max} = 0.1 \frac{\lambda}{H_0}$ и $\beta_{\max} = 0.1 \frac{\lambda}{a}$ потери составляют всего 4%. Потери, обусловленные неточностью установки центров отражающих элементов, уменьшаются, как это видно из рис. 12, с увеличением высоты h . Общие потери усиления отражателя переменного профиля, обусловленные периодическими и случайными ошибками при $\Delta = \frac{\pi}{4}$; $\varepsilon_0 = 0.05 \lambda$; $\varepsilon = 0.1 \lambda$; $\alpha_{\max} = 0.1 \frac{\lambda}{H_0}$ и $\beta_{\max} = 0.1 \frac{\lambda}{a}$, близки к 30% при $h = 0$ и к 7% при $h = 90^\circ$. Коэффициент использования площади у радиотелескопа с отражателем переменного профиля (порядка 0.5) может быть выше, чем у очень большого рефлектора в виде параболоида вращения, несмотря на то, что у первого имеются 5 источников потерь (за счет ошибок, характеризующихся допусками ε_0 , ε , $\alpha_{\max}$, $\beta_{\max}$, и периодической ошибки) вместо одного источника потерь (ε_0) у параболоида вращения.

расположены симметрично относительно истинного меридиана, проходящего через центр дуги. На горизонтальной площадке, на которой установлена эстакада антенны, вдоль меридиана расположена бетонная дорожка длиной около 50 м, по которой перемещается облучатель. Дорожка начинается недалеко от центра антенны.

Облучатель представляет собой параболический цилиндр, ось которого горизонтальна; он выполнен в виде жесткой металлической конструкции, установленной на платформе, которая перемещается на четырех колесах по бетонной дорожке, что по-

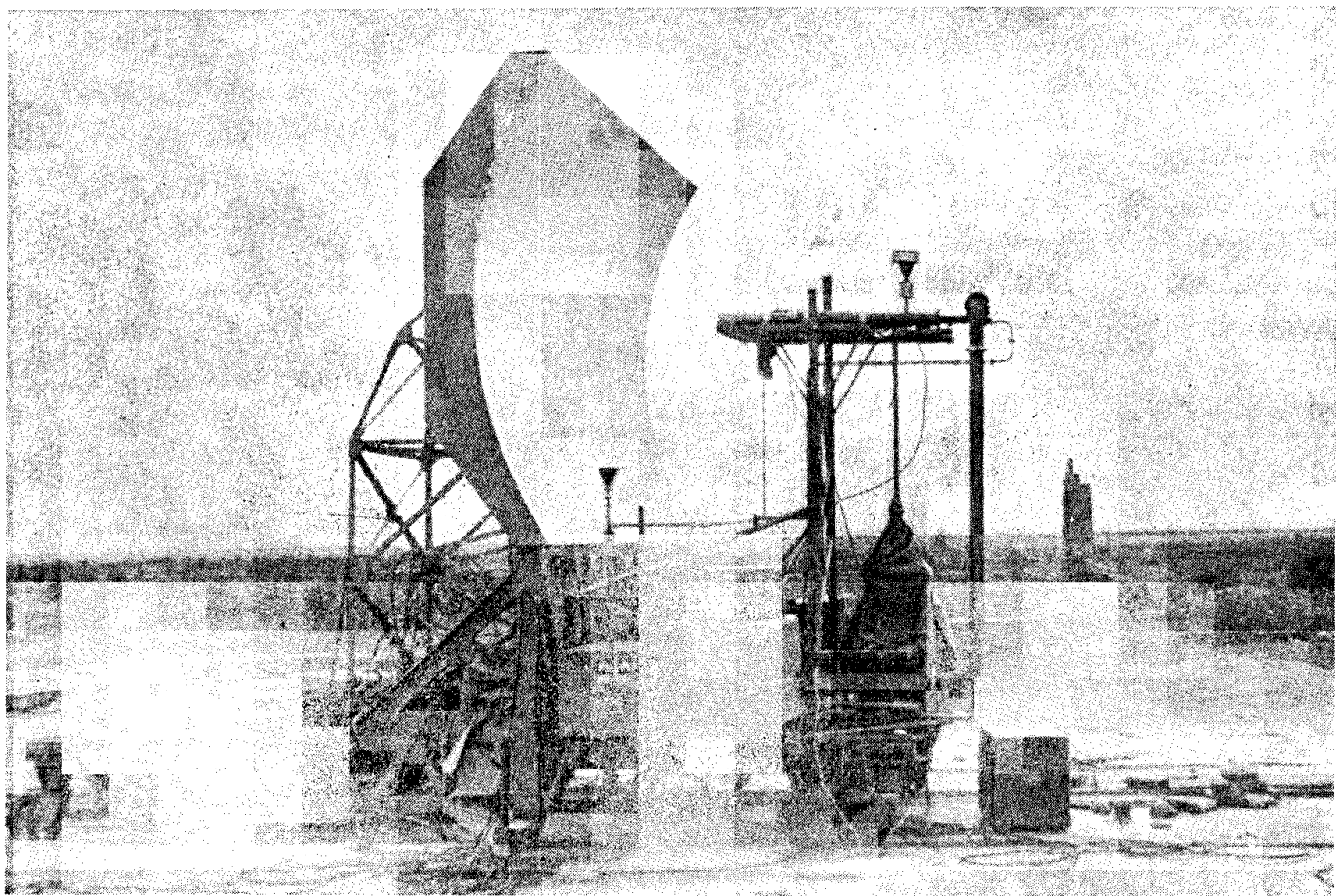


Рис. 14. Облучатель радиотелескопа.

зволяет устанавливать параболический цилиндр в фокусе отражателя переменного профиля (рис. 14). На фокальной линии параболического цилиндра установлен ряд облучателей для волн длиной от 3 до 30 см. Облучатели параболического цилиндра могут перемещаться при помощи поперечного суппорта вдоль фокальной линии, и каждый из них может быть установлен в главном фокусе радиотелескопа. Все остальные облучатели в этом случае оказываются вынесенными из фокуса перпендикулярно фокальной оси и дают небольшую абберацию. Искажение формы диаграммы направленности, потери усиления, а также смещение максимума диаграммы, возникающие при выносе облучателя из фокуса, учитываются на основании предварительно сделанных расчетов. Все облучатели параболического цилиндра, кроме дипольного облучателя для волны 30 см, выполнены в виде открытых концов цилиндрических волноводов, что позволяет использовать их для поляризационных наблюдений. Горизонтальная ось облучателя находится на уровне середины щитов. Установка облучателя производится вручную.

Необходимые перемещения каждого щита осуществляются с помощью механизма, схематически изображенного на рис. 15 (конструкция щитов и механизмов разработана

П. Д. Калачевым). В корпусе суппорте 1, закрепленном на эстакаде, перемещается пустотелая призматическая выдвижная балка 2. Ее перемещение осуществляется при помощи ходового винта 3, оканчивающегося штурвалом 4. В конце балки, на боковых ее гранях, укреплены две полуоси 5, на которых подвешен щит 6 следующим образом. С литой рамой щита посередине ее жестко скреплены два корпуса поворотного устройства 7. В каждом из них установлен ходовой винт 8, который вращается в радиально-упорных подшипниках, закрепленных в корпусе. Ходовой винт 8 ввинчивается в стакан 9, в котором при помощи сферических шарикоподшипников закреплены концы

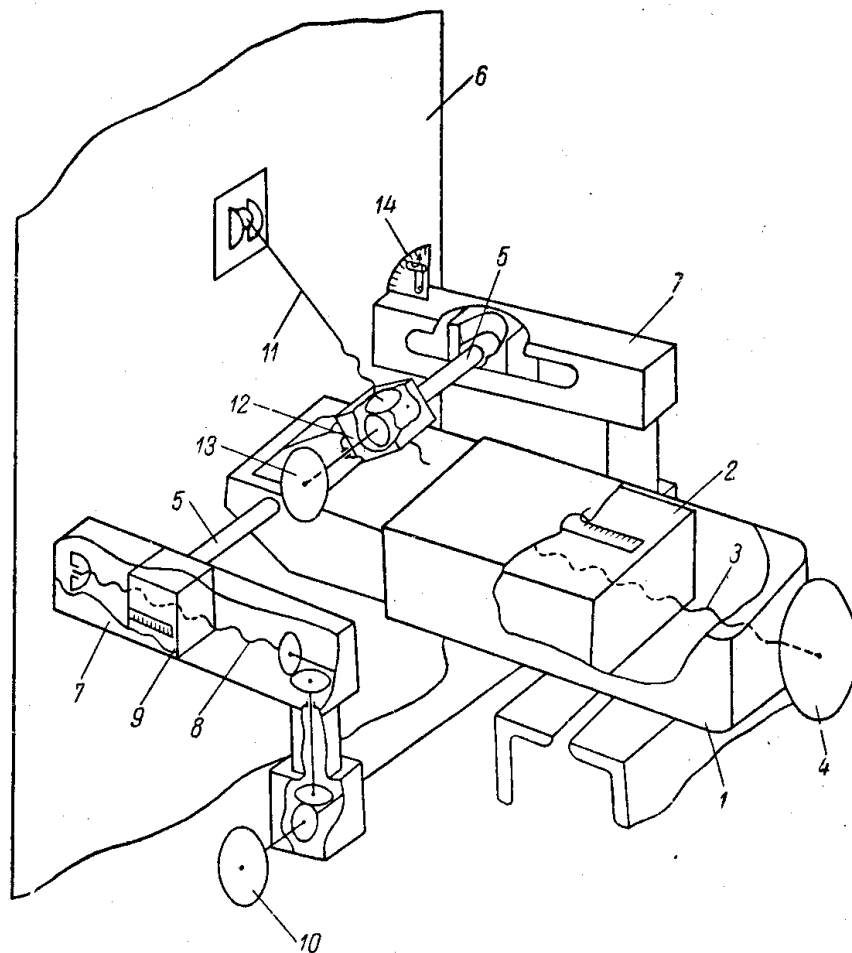


Рис. 15. Кинематическая схема механизма установки отражающего элемента.

полуосей 5. Вращение ходовых винтов 8 заставляет перемещаться корпуса 7, а с ними и щит 6 относительно полуосей 5. Так как вращение ходовых винтов обоих корпусов производится в противоположные стороны и одновременно, для чего ходовые винты связаны между собой системой конических шестерен и валиков, показанных на чертеже, то происходит поворот щита. При увеличении расстояния между стаканами 9 (вследствие поворота щита) один из стаканов несколько смещается вдоль полуоси. Так как поворот щита незначителен ($2-3^\circ$), это смещение невелико. Угол поворота отсчитывается по линейной шкале, скрепленной со стаканом 9. Механизм поворота приводится в действие штурвалом 10. Изменение наклона щита осуществляется при помощи винта 11, соединенного со щитом через сферический шарнир (сферический шарикоподшипник). Гайка винта 11 расположена в корпусе 12 и соединена с одной из пары конических шестерен; другая шестерня закреплена на валике, вращаемом штурвалом 13. Корпус 12 соединен с выдвижной балкой 2 посредством кронштейна, в котором корпус 12 может поворачиваться вокруг горизонтальной оси.

Для измерения угла наклона щита на нем установлен угломер с уровнем 14.

Как видно из кинематической схемы, горизонтальная ось, вокруг которой происходит наклон щита, несколько удалена от его плоскости, поэтому с увеличением наклона щита плоскость его смещается к центру антенны, что следует учитывать при установке щитов в рабочее положение. Величина смещения Δl равна: $\Delta l = -\delta(\sec \alpha - 1)$. Здесь δ — расстояние от горизонтальной оси до отражающей плоскости щита. Поворот щита по азимуту происходит не вокруг вертикальной оси, как рассматривалось выше, а в общем случае, вокруг наклонной оси, которую ввиду незначительного поворота по азимуту (не более 3°) можно считать лежащей в плоскости щита и проходящей через его середину. Угол поворота вокруг этой оси β_1 определяется выражением

$$\sin \beta_1 = \sin \beta \cos \alpha_1, \quad (8)$$

где β — угол поворота отражающего элемента в горизонтальной плоскости, определяемый формулой (6), α_1 — угол наклона оси к вертикали.

Так как угол β не более 3° , разница между α_1 и углом наклона плоского элемента к вертикали α , определяемым выражением (7), не превышает $2'$ дуги, в формуле (8) вместо α_1 можно взять α . Установка угла β_1 по линейным шкалам, показанным на кинематической схеме (разность отсчетов в миллиметрах $\beta_{\text{мм}}$ по шкалам, установленным в левом и правом корпусах поворотного механизма), вычисляется по формуле

$$\beta_{\text{мм}} = L \sin \beta_1,$$

где L — расстояние между концами полуосей (в мм), точнее между центрами сферических шарикоподшипников, закрепленных на концах полуосей. В Большом пулковском радиотелескопе отдельные щиты устанавливаются в нужные положения вручную. Если начальные положения щитов („нули шкал“) установлены заранее, то установку радиотелескопа в нужное положение можно осуществить за 1 час.

Для того чтобы при установке антенны по шкалам и угломерам, имеющимся на каждом щите, получить отражающую поверхность нужной точности (см. § 4), должны быть выполнены следующие условия:

а) оси, вокруг которых производится наклон щитов, должны быть горизонтальными и находиться в одной горизонтальной плоскости, при радиальном перемещении щитов это условие должно сохраняться;

б) когда щит не повернут по азимуту ($\beta_1 = 0$), плоскость отражающей поверхности должна быть параллельна оси наклона и удалена от нее одинаково для всех щитов;

в) необходимо установить угломеры и определить нулевые отсчеты по шкалам и угломерам таким образом, чтобы при установке щитов на нулевые отсчеты они были одинаково удалены от центра антенны, а нормали к ним, проведенные через их середины, были горизонтальны и пересекались в центре антенны.

Кроме перечисленных условий, предполагается, что отражающая поверхность щитов с достаточной степенью точности плоская и у механизмов отсутствуют люфты.

Для того чтобы определить точность, с которой нужно выполнить перечисленные условия, определим величину погрешностей в установке антенны, которые возникают при невыполнении этих условий.

В случае если ось негоризонтальна, то с наклоном щита появляется погрешность в угле поворота по азимуту $\Delta_1 \beta$

$$\sin \Delta_1 \beta = \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \xi.$$

Здесь α — угол наклона щита к вертикали ($\alpha \leq 45^\circ$); ξ — угол наклона оси к горизонту (погрешность в установке оси).

Если ξ мал, то выражение для $\Delta_1\beta$ можно записать так:

$$\Delta_1\beta = \xi \operatorname{tg} \alpha.$$

Если ось наклона щита горизонтальна, но не находится в горизонтальной плоскости, в которой расположены оси всех остальных щитов, а выше или ниже ее на величину δ_1 , то с наклоном щита возникает погрешность в радиальном перемещении щита $\Delta_1 l = \delta_1 \operatorname{tg} \alpha$.

Если плоскость щита при $\beta_1 = 0$ не параллельна горизонтальной оси наклона, то с наклоном щита возникает погрешность $\Delta_2\beta$ в угле поворота по азимуту, которая с учетом того, что угол между плоскостью щита и осью (ν) мал, определится выражением

$$\Delta_2\beta = \nu \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right).$$

Из рассмотрения погрешностей в установке щитов, возникающих от неточностей в положении осей, следует, что эти погрешности возрастают с увеличением наклона щитов и при установке антенны на высоты, близкие к зениту (угол наклона щитов при этом близок к 45°), становятся такого же порядка, как и неточности в положении осей. Погрешности же от неправильного определения нулевых отсчетов на шкалах не зависят от угла наклона щитов и целиком входят в установку антенны.

§ 6. ИСПЫТАНИЕ РАДИОТЕЛЕСКОПА

Испытание радиотелескопа заключалось в определении его диаграмм направленности, коэффициента усиления и коэффициента использования поверхности на различных волнах.

Радиотелескоп исследовался на волнах 3, 5, 10 и 30 см. Остронаправленные антенны с диаграммами порядка единиц угловых минут исследовать в волновой зоне не представляется возможным, так как диаграммы таких антенн формируются на расстоянии 200—1000 км. Снимать диаграммы таких антенн по космическим источникам затруднительно, так как необходимо иметь источники с угловыми размерами, меньшими, чем ширина диаграммы антенны. Поэтому был применен специальный метод снятия диаграмм направленности в ближней зоне. По этому методу разфазировка за счет недостаточности расстояния, на котором производятся измерения диаграммы, компенсируется разфазировкой, специально созданной путем выноса облучателя из фокуса на некоторое расстояние [11, 12].

Таким методом были измерены горизонтальные диаграммы радиотелескопа на волнах 3, 5, 10 и 30 см. Диаграммы измерялись на горизонте. В этом случае фокусное расстояние $\rho_0 = 46$ м, а раскрыв может изменяться от нескольких до 100 м. Можно показать, что для волны $\lambda = 3$ см при раскрыве $2b = 100$ м; $\frac{b^2}{4\rho_0^2} \approx 0.3$ (раскрыв порядка $3000-4000 \lambda$, $\frac{\lambda}{\rho_0} \approx 5 \cdot 10^{-4}$) облучатель можно выносить на расстояние $c \leq 0.005 \rho_0$, а для $\lambda = 10$ см (раскрыв 1000λ , $\frac{\lambda}{\rho_0} = 2 \cdot 10^{-3}$) на $c \leq 0.015 \rho_0$. При $c \leq 0.005 \rho_0$ минимальное расстояние, на котором можно снимать диаграммы, составляет 10 км. А так как по условиям рельефа местности снимать диаграммы было возможно на расстоянии, не превышающем $D = 4.2$ км, то на волне 3 см приходилось использовать только часть щитов и работать с неполным раскрывом (при $\rho_0 = 45$ м и $D = 4.2$ км для $2b = 60$ м,

$\lambda=3$ см и $c=51$ см). Для волны $\lambda=10$ см можно было работать при полном раскрыве ($2b=100$ м, $c=65$ см).

Для измерения диаграмм антенна работала на прием, а генератор помещался на расстоянии $D=4.2$ км. Диаграмма измерялась двумя методами: 1) диаграмма антенны была неподвижной, а генератор на автомашине перемещался перпендикулярно оси диаграммы; 2) диаграмма поворачивалась с помощью перемещения облучателя перпендикулярно фокальной оси, а генератор располагался неподвижно на оси антенны. Оба метода дали полное совпадение в пределах главного и первых боковых лепестков. На рис. 16 приведена горизонтальная диаграмма для $\lambda=3$ см, $2b=50$ м; на рис. 17

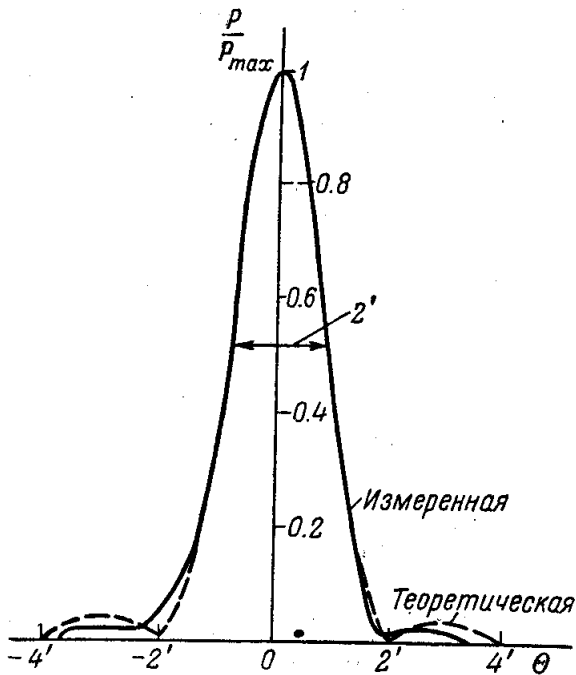


Рис. 16. Горизонтальная диаграмма радиотелескопа для $\lambda=3$ см при раскрыве 50 м.

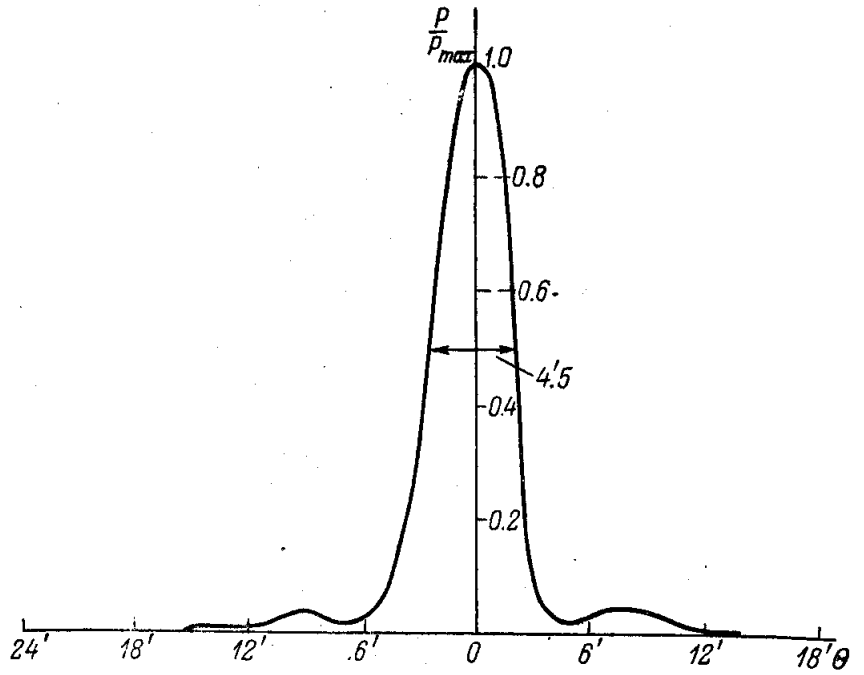


Рис. 17. Горизонтальная диаграмма радиотелескопа для $\lambda=10$ см при раскрыве 100 м.

приведена диаграмма для $\lambda=10$ см и $2b=100$ м. Для сравнения на волне 3 см приведена теоретически рассчитанная диаграмма. Из сравнения кривых видно, что теоретические и измеренные диаграммы хорошо совпадают.

Так как для неполного раскрыва ($2b=50$ м) измеренные диаграммы на волне 3.2 см хорошо совпадают с теоретическими, то можно ожидать, что это будет справедливо и для полного раскрыва. На волне 3 см для $2b=100$ м раствор диаграммы должен составлять $\sim 1'2$, а для $2b=130$ м — $1'$, что согласуется с результатами наблюдения радиоизлучения Солнца. Минимальные угловые размеры областей повышенного радиоизлучения имеют величину, близкую к $1' [13]$. Измеренная аналогичным образом горизонтальная диаграмма радиотелескопа на волне 30 см имеет раствор $11'5$, что совпадает с шириной, измеренной по дискретному источнику Лебедь-А. Раствор вертикальной диаграммы для небольших углов места был приближенно измерен по наблюдениям радиоизлучения Солнца. Для этого наблюдения проводились в течение нескольких дней на неподвижной антенне, и Солнце проходило через диаграмму каждый день на разной высоте. Из сравнения кривых прохождения Солнца был определен угол раствора вертикальной диаграммы антенны, причем учитывались изменения потока радиоизлучения Солнца, происходившие в дни измерений. На рис. 18 приведены кривые прохождения Солнца и построенная по ним вертикальная диаграмма антенны для $\lambda=10$ см при $h=12^\circ$. Как видно из графиков, ширина вертикальной диаграммы для $h=12^\circ$ равна $1^\circ 40'$, что примерно совпадает с расчетной величиной угла раствора

вертикальной диаграммы при $h=12^\circ$. На волне 3 см угол раствора диаграммы, определенной таким же способом, составляет для $h=8^\circ$ около $50'$.

Изложенный в [11, 12] метод позволяет не только снимать диаграммы направленности, но и измерять коэффициент усиления остро направленных антенн в ближней зоне, так как в таких антеннах влияние зеркала на облучатель мало. Усиление антенной системы определялось сравнением мощностей сигналов от генератора, поступающих при использовании всей антенны и только от облучателя (без отражающей поверхности). Усиление одного облучателя определялось сравнением сигналов, поступающих от генератора при приеме на облучатель и на эталонный рупор с известным коэффициентом усиления. Так как вертикальные диаграммы антенны и облучателя примерно равны и их центры расположены на одинаковой высоте над землей, то усиление антенны можно определить для $h=0$ (влияние земли для антенны и облучателя одинаковое). Коэффициент усиления находился по формуле

$G = NG_1$ (или $G_{дб} = N_{дб} + G_{1дб}$), где G — коэффициент усиления всей антенны; G_1 — коэффициент усиления облучателя, N — показывает во сколько раз (по мощности) сигнал, получаемый от всей антенны, больше, чем сигнал, получаемый от облучателя. Было определено усиление антенны на волнах 3 ($2b=80$ м) и 10 см ($2b=100$ м); облучателем в обоих случаях служил параболический цилиндр с высотой 2.5 м. На волне $\lambda=3.2$ см получено $N=27$ дб; $G_1=28.5$ дб; $G=55.5$ дб $= 3.55 \cdot 10^5$; $G_{теор.} = \frac{4\pi S_0}{\lambda^2} = 1.85 \times 10^6 = 62.7$ дб; $S_0 = 2bH_0 = 150$ м².

Коэффициент использования K поверхности антенны на волне $\lambda=3$ см равен $K = \frac{G}{G_{теор.}} \approx 0.2$; на волне $\lambda=10$ см получено: $G_1=20$ дб; $N=32.5$ дб; $G=52.5$ дб; $G_{теор.}=55.8$ дб; $K = \frac{G}{G_{теор.}} = 0.45$.

Полученные коэффициенты усиления и коэффициенты использования поверхности у антенны переменного профиля достаточно высокие, особенно на $\lambda=10$ см. Как известно, радиолокационные антенны значительно меньших размеров имеют коэффициенты использования $K \approx 0.3-0.4$.

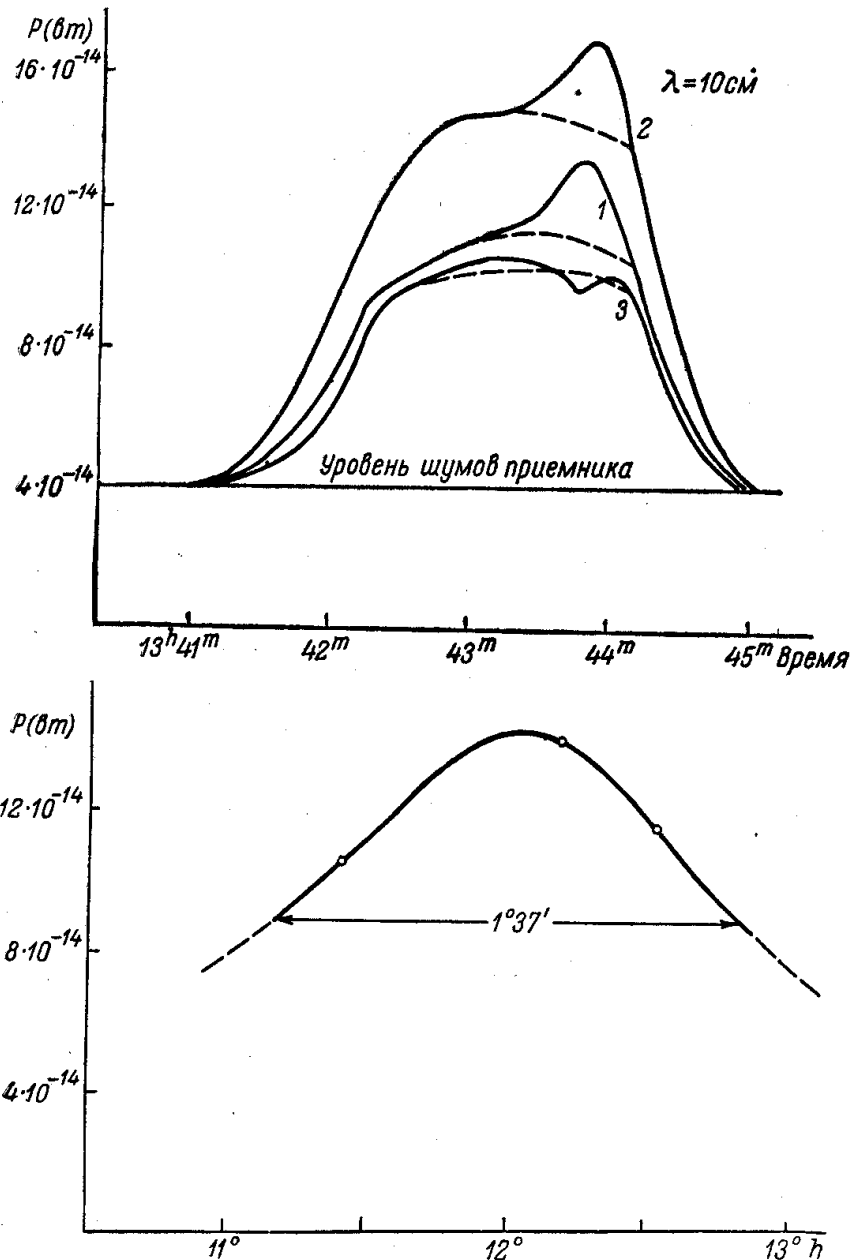


Рис. 18. Вертикальная диаграмма антенны для $\lambda=10$ см при $h=12^\circ$.

1 — 13 XI 1958; 2 — 14 XI 1953; 3 — 17 XI 1953.

§ 7. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

После окончания монтажа Большого радиотелескопа ГАО в конце 1956 г. начался период его систематического изучения, наладки и усовершенствования, а также оснащения его приемниками высокой чувствительности на волнах от 3 до 30 см.

Попутно на радиотелескопе велись радиоастрономические наблюдения Солнца, Луны и дискретных источников радиоизлучения.

Исследование радиоизлучения Солнца на волнах 3 и 10 см привело к следующим новым научным результатам.

1. Путем совмещения последовательного ряда кривых прохождения Солнца через диаграмму антенны выделен уровень излучения „спокойного“ Солнца^[13].

2. Исследовалась медленно меняющаяся составляющая радиоизлучения Солнца, обусловленная расположенными в нижней короне радиоизлучающими областями, связанными с видимыми активными образованиями на Солнце^[13, 14]. При этом благодаря высокой разрешающей способности радиотелескопа на волне длиной 3 см были измерены:

- а) верхние пределы угловых диаметров локальных областей радиоизлучения (порядок величины 1—3');;
- б) поток радиоизлучения от них (от 5 до $50 \cdot 10^{-22}$ Вт/м² Гц);
- в) яркостные температуры (от 0.1 до $0.8 \cdot 10^6$ °К);
- г) высоты эффективных центров излучающих областей над фотосферой ($0.07 \pm \pm 0.02 R_{\odot}$).

Сделана попытка определить зависимость величины потока радиоизлучения от площади и класса солнечных пятен^[13]. Исследована зависимость времени существования локальных радиоизлучающих областей от времени существования сопутствующих видимых образований на Солнце^[15]. При этом установлено, что на волне 3 см эти времена совпадают, а на волне 10 см радиоизлучение продолжается некоторое время после распада группы пятен. Наблюдение суточных изменений потока радиоизлучения от локальных областей, находящихся на краях солнечного диска, позволило оценить степень неоднородности солнечной короны в районе солнечных пятен^[16].

Наблюдения восходов радиоизлучающих областей из-за края солнечного диска позволяет предсказывать появление активных областей, а также приблизительно оценить широту, на которой появится группа пятен и ее площадь^[16].

Проведенный в конце 1958 г. и в июне—июле 1959 г. цикл наблюдений распределения яркостной температуры Солнца на волнах 3 и 5, 10 и 30 см, а также степени и знака поляризации (круговой) излучения активных областей на волнах длиной 3, 5 и 10 см рассчитан на определение напряженности магнитного поля, электронной плотности и кинетической температуры радиоизлучающих областей. Результаты наблюдений радиоизлучения активных областей в поляризованном по кругу излучении позволяют в ряде случаев обнаруживать структуру магнитного поля внутри областей, которые не разрешаются диаграммой антенны на отдельные области. Это становится возможным благодаря тому, что излучение в различных местах области имеет противоположный знак поляризации^[17].

3. На Большом пулковском радиотелескопе дважды удалось наблюдать на волне 3 см быстро меняющуюся компоненту радиоизлучения Солнца в виде мощных всплесков. При этом были определены координаты области, ответственной за всплеск, ее угловые размеры, яркостная температура, степень поляризации излучения и временной ход^[18]. Наблюдавшаяся яркостная температура порядка 10^9 — 10^{10} °К до сих пор в литературе не отмечалась.

4. В настоящее время на Большом пулковском радиотелескопе на волне 3 см начато измерение радиоизлучения Луны, которое имеет целью определение распределения яркостной температуры, что должно позволить оценить глубину излучающего слоя и его физические характеристики.

На Большом пулковском радиотелескопе проводились также наблюдения радиоизлучения галактических источников на волнах длиной 3, 10 и 30 см, которые привели к новым результатам.

Наблюдения Крабовидной туманности позволили определить угловые размеры, координаты центра тяжести радиоизлучения, а также выявить асимметрию источника^[19].

Наблюдения туманности Омега показали, что существенная часть яркого эмиссионного ядра скрыта от нас поглощением света.

В источнике Стрелец-А обнаружена тонкая структура^[20–22], компоненты которой имеют различный механизм излучения. Эти наблюдения позволили построить модель источника, согласно которой, яркое плотное газовое ядро Галактики размером 8 пс погружено в источник с нетепловым механизмом излучения, имеющий сильную концентрацию к газовому ядру. Как газовое ядро, так и его „нетепловая“ оболочка видны сквозь группу газовых туманностей, находящихся во внутреннем рукаве Галактики на расстоянии 3 кпс и частично скрытых от нас поглощающей материей. Наблюдения радиоисточника 2С1607 выявили интересную особенность спектра радиоизлучения этого источника^[22] и позволили высказать предположение, что этот источник является остатком сверхновой II типа, вспыхнувшей несколько десятков тысяч лет назад.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ю. Н. Парийский, С. Э. Хайкин, Изв. ГАО, **XXI**, 164, 27, 1960.
- [2] Л. Пози, Р. Н. Брейсуэлл. Радиоастрономия. Изд. иностр. лит., М., 1958.
- [3] С. Э. Хайкин, Тр. 5-го совещания по вопросам космогонии, Изд. АН СССР, М., 1956.
- [4] J. Robieu, Ann. Radioelectr., **11**, 43, 1956.
- [5] Brit. Commun. and Electronics, **5**, 8, 617, 1958.
- [6] С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Приборы и техника эксперимента, **2**, 19, 1959.
- [7] Ф. Н. Красовский. Руководство по высшей геодезии. Изд. межевого инст., М., 102, 1926.
- [8] Исследование возможности создания радиотелескопа с переменным профилем отражателя с площадью выходного отверстия 10 000–20 000 м² для сантиметровых волн. Отчет о научно-исследовательской работе. Ленинградский политехнический институт, 1959.
- [9] Г. Э. Айзенберг. Антенны ультракоротких волн. Гос. изд. по вопросам связи и радио, М., 1957.
- [10] Б. В. Брауде, Н. А. Есепкина, Н. Л. Кайдановский, С. Э. Хайкин, Радиотехника и электроника, **4**, 1960.
- [11] Н. А. Есепкина, ДАН СССР, **113**, 1, 1957.
- [12] Н. А. Есепкина, Информ. бюлл. Лен. политехн. инст., **5**, 9, 1958.
- [13] В. Н. Ихсанова, Изв. ГАО, **XXI**, 162, 29, 1958.
- [14] В. Н. Ихсанова, Солнечные данные, **6**, 120, 1957.
- [15] В. Н. Ихсанова, Солнечные данные, **10**, 65, 1958.
- [16] В. Н. Ихсанова, Солнечные данные, **11**, 62, 1958.
- [17] Д. В. Корольков, Н. С. Соболева, Г. Б. Гельфрейх, Изв. ГАО, **XXI**, 164, 81, 1960.
- [18] Н. Л. Кайдановский и др., Солнечные данные, **3**, 72, 1958.
- [19] Г. П. Апушкинский и Ю. Н. Парийский, Астрон. журн., **XXXI**, 4, 739, 1959.
- [20] В. Г. Малумян, ДАН СССР, **129**, 5, 1003, 1959.
- [21] Ю. Н. Парийский, ДАН СССР, **129**, 6, 1261, 1959.
- [22] Ю. Н. Парийский, Изв. ГАО, **XXI**, 164, 45, 1960.

The large Pulkovo radio telescope

S. E. Khaikin, N. L. Kaidanovsky, N. A. Esepkina, O. N. Shviris

SUMMARY

The principle, design and results of the investigation of a new reflector microwave radio telescope with large aperture and high resolving power are given, as well as astronomical results obtained with this instrument.

The telescope consists of a range of flat reflecting elements, which form a polyhedral surface tangential to an elliptic cone surface. The reflector transforms the plane wave into a cylindrical wave with a vertical axis, the latter being transformed into a spherical wave by the secondary parabolic cylinder reflector. A high relative accuracy of the multielement reflecting surface is obtained by an accurate adjustment of its separate elements. The axis of the radio telescope can be directed to any part of the sky by shifting the reflecting elements and the feed.

The geometry of the reflecting surface, characteristics of the directional diagram and the kinematics of the adjusting mechanisms of the reflecting elements are considered. The measured characteristics of the radio telescope and some results of the astronomical observations are given.

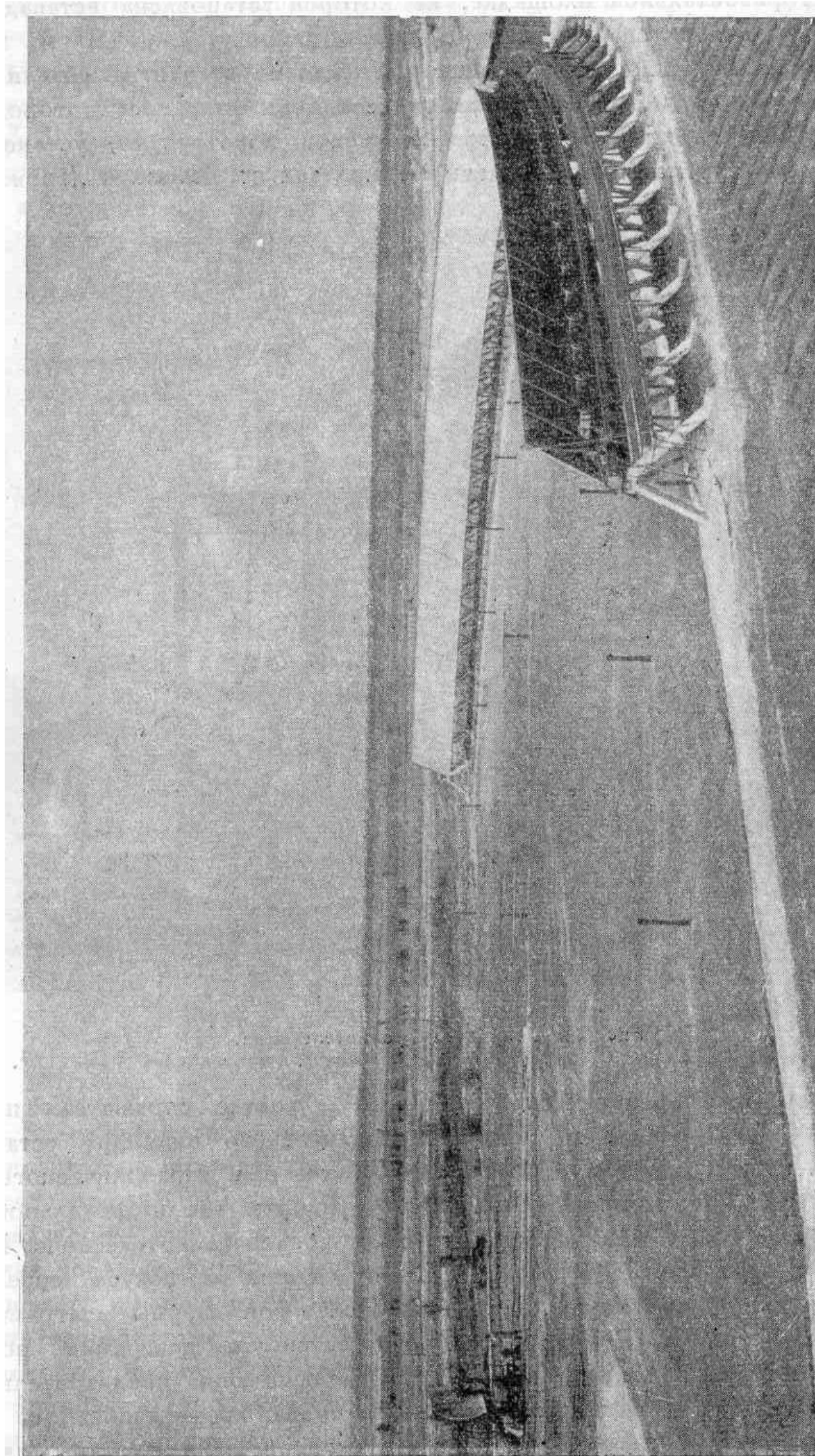


Рис. 13. Общий вид радиотелескопа.