

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени  
научно-исследовательский радиопизический институт (НИРФИ)

---

П р е п р и н т № 208

Р А Д И О Т Е Л Е С К О П

К.С. Станкевич

Горький 1986

Станкевич К. С.

РАДИОТЕЛЕСКОП. - Горький : НИРФИ, Препринт № 208, 1986. -  
36 с.

УДК 522.2:523.164

Радиотелескоп - устройство, предназначенное для приёма собственных излучений от объектов в окружающем пространстве. Радиотелескопы применяют в радиоастрономии, пассивной радиолокации, радиометеорологии, астрономии, термометрии и во многих прикладных исследованиях.

Радиотелескоп представляет собой антенную систему, к которой подключены один или несколько приёмников слабых сигналов.

Радиоизлучение космических источников и собственное излучение различных тел и сред представляет собой случайный процесс. Приёмное устройство для измерения мощности шумового радиоизлучения называют радиометром.

## В в е д е н и е

Интенсивность радиоизлучения и её частотное распределение, образующее спектр, являются важнейшими характеристиками космического объекта. Радиосветимость и форма спектра дают важнейшую информацию о физических процессах внутри источника. Спектры радиоисточников распределены во всём радиодиапазоне от дециметров до миллиметров. Глубокие обзоры неба показали, что на небесной сфере насчитывается около 100 тысяч дискретных источников. По мощности радиоизлучения они отличаются в  $10^5$  раз и охватывают динамический диапазон от  $10^{-3}$  до  $10^2$  единиц потока (1 е.п. =  $10^{-26}$  Вт/м<sup>2</sup> Гц). Многие из них переменны, и характерные изменения в спектральном распределении происходят за времена от нескольких минут до нескольких лет.

Измерение интенсивности радиоизлучения и распределения её по спектру, поляризации, переменности и структуры источника осуществляется с помощью радиотелескопа. Для этого радиотелескоп должен иметь необходимое угловое разрешение, определяемое антенной системой, и требуемую чувствительность, зависящую от флуктуационного порога применяемого радиометра.

Всё многообразие радиотелескопов можно разделить на зеркальные радиотелескопы со сплошной апертурой и на незаполненные, состоящие из многих элементов. Среди радиотелескопов со сплошной апертурой особое место занимают радиотелескопы с параболическими полноповоротными антеннами. Достоинством таких антенн является диапазонность и возможность выставления антенн в заданную точку и сопровождения источника.

Параболическая антенна характеризуется диаметром  $D$  и фокусным расстоянием  $F$ . Обычно в конструкциях антенн используют  $F/D = 0,4 - 0,45$ . Невозможно создать жесткую конструкцию параболоида при больших размерах, неизменяющуюся при наклонах зеркала. Поэтому во всех современных антеннах применяют принцип гомологии, который состоит в том, что при любых наклонах зеркала деформации распределяют так, чтобы параболическая форма поверхности сохранилась, хотя параметры ее не остаются постоянными, и положение фокуса при этом изменится.

Предельная минимальная волна, на которой работает антенна, задается допустимыми потерями усиления из-за рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях поверхности. Если  $\overline{\epsilon^2}$  - средний квадрат отклонения поверхности от параболоида вращения, то усиление антенны равно

$$G = G_0 e^{-4\pi \frac{\sqrt{\overline{\epsilon^2}}}{\lambda}} \quad (I)$$

При  $\sqrt{\overline{\epsilon^2}} = \lambda / 25$   $G / G_0 = 0,8$ . У современных крупных антенн

$D / \lambda_{\text{min}} \sim 10^5$ . Это отношение называют качеством зеркала и используют для сравнения между собой различных инструментов.

Электромагнитная энергия концентрируется в фокусе параболического зеркала. Вблизи фокуса распределение интенсивности обусловлено

дифракцией Фраунгофера на краях рефлектора. В главной фокальной плоскости она распределена по формуле Эйри:

$$I(v) = \left[ \frac{2J_1(v)}{v} \right]^2, \quad (2)$$

где  $J_1(v)$  - функция Бесселя первого порядка,  $v = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{a}{F} \right) \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $a$  - радиус зеркала. Распределение интенсивности вдоль оси ( $z$ ) зеркала равно

$$I(u) = \left( \frac{\sin \frac{u}{4}}{\frac{u}{4}} \right)^2, \quad (3)$$

где

$$u = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{a}{F} \right)^2 z.$$

Размеры фокального пятна определяются по расстояниям между первыми нулями распределений:

$$\pm z = 2\lambda \left( \frac{F}{D} \right)^2 \quad \text{и} \quad \pm \sqrt{x^2 + y^2} = 1,22\lambda \left( \frac{F}{D} \right).$$

Для отбора энергии и фокуса зеркала применяют облучатели, по размерам не превосходящие фокального пятна, у которых фазовые центры должны быть совмещены с фокальной точкой зеркала. В качестве таких облучателей, в простейшем случае, применяют рупоры, открытые концы волноводов, полуволновые диполи с рефлекторами. Кабельная или волноводная линия передачи соединяет облучатель со входом радиометра.

Получили распространение двухзеркальные системы облучения. При

этом фокус основного зеркала совмещается с одним из фокусов вторичного, во втором фокусе вторичного зеркала помещается облучатель, отводящий энергию в линию передачи. Если в качестве вторичного употребляется гиперboloид (система Кассегрена), то он помещается перед фокусом главного зеркала. В системе Грегори применяют эллипсоид вращения, располагающийся за фокусом, это не исключает режим работы по одноканальной схеме. Размеры вторичного зеркала должны быть такими, чтобы оно затеняло не более 1% площади основного зеркала:  $d < 0,1D$  и  $d \gg \lambda$ .

Для поддержания облучателя и линии передачи на зеркале устанавливаются штанги и опоры для штанг. Элементы этих конструкций рассеивают поле в раскрыве антенны, и поэтому влияют на распределение поля, излучаемого антенной в пространстве.

Конструктивно поверхность зеркала набирается из отдельных панелей. Например, у крупнейшей антенны в Советском Союзе РТ-70, имеющей диаметр зеркала 70 м, таких панелей 1188. Среднеквадратичная погрешность выставления панелей в расчетное положение меняется от 0,6 в центре до 0,9 мм на крае зеркала. Панели крепятся на несущем каркасе обычно представляющим собой ажурную конструкцию из алюминиевых труб.

Чтобы иметь возможность направлять антенну в заданную точку на небесной сфере, она монтируется на поворотном устройстве. В основном сейчас приняты азимутально-угломестные системы, обеспечивающие вращение антенны в двух взаимно перпендикулярных плоскостях: по азимуту и углу места. Вращение антенны обеспечивают приводные устройства, управляемые по задаваемой программе ЭВМ. Абсолютная точность выставления антенны в заданное положение и сопровождения радиосточников не хуже  $\pm 5$  с дуги. Вычислительно-управляющий комплекс по заданной программе также смещает облучатель: в соответствии с гомологическими деформациями поверхности отслеживает положение фокуса.

Блок-схема радиотелескопа представлена на рис. 1.



Рис. 1

В лабораторной работе вы познакомились подробнее с 2-метровым радиотелескопом, работающим на длине волны 21 см. Хотя этот радиотелескоп невелик, но все основные элементы действующих инструментов в нем имеются. На этом инструменте могли бы решаться задачи службы Солнца, радиометеорологии, пассивной локации, навигации.

## 1. РАДИОМЕТР

### 1.1. Введение

Радиоизлучение космических источников и собственное излучение

различных тел и сред представляет собой случайный процесс. Энергия такого радиоизлучения непрерывно распределена по спектру и практически охватывает весь радиодиапазон. Спектральная плотность излучения может меняться в широких пределах в зависимости от механизма генерации волн и физических условий внутри излучающего объекта. Можно считать, что спектральная плотность мощности зависит от частоты по степенному закону  $S_\nu \sim \nu^{-\alpha}$ , где спектральный индекс меняется в широких пределах:  $-0,5 < \alpha < 1,5$ . Если в спектрах имеются детали, то их характерный масштаб порядка пол-октавы. Поэтому при измерении таких излучений применяют аппаратуру с широкой полосой  $\Delta\nu = (0,01 - 0,2) \nu$ , и считают спектральную плотность постоянной в пределах полосы.

В радиоастрономии наблюдают также спектральные линии. Естественно, что для них характерные масштабы другие, чем для непрерывного спектра, и полоса прибора выбирается, исходя из условий задачи.

Интенсивность сигналов космического радиоизлучения, поступающая с антенны на вход приемника, весьма мала (например,  $10^{-20}$  Вт) и в большинстве случаев в десятки раз меньше собственных шумов приемных устройств. Поэтому измерение сигнала происходит на фоне собственных шумов. Радиоизлучение источников и собственные шумы аппаратуры стационарны во времени. Применяя усреднение сигнала во времени, можно свести задачу к измерению малого приращения постоянного тока или напряжения. При этом используют различные схемы компенсации постоянной составляющей. Для определения истинного среднего значения необходимо усреднение при  $\tau \rightarrow \infty$ . При конечной постоянной времени прибора, имеющей место на практике, будут наблюдаться статистические колебания выходного прибора около истинного среднего значения. Указанные колебания делают невозможным регистрацию сколь угодно



малого приращения сигнала, ограничивая тем самым чувствительность. Величина колебаний выходного напряжения или тока характеризуется среднеквадратичным отклонением - дисперсией. Из теории вероятностей известно, что при большом числе независимых измерений относительная ошибка измерений  $1/\sqrt{n}$ . Выражая мощность на выходе прибора и её дисперсию в температурных единицах  $T_{ш}$  и  $\delta T_{ш}$ , имеем

$$\frac{\delta T_{ш}}{T_{ш}} \sim \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (I.1)$$

Число независимых измерений в нашем случае эквивалентно числу случайных импульсов, представляющих шумовой сигнал, пропущенных приемником за время усреднения  $\tau$ . Длительность шумового импульса обратно пропорциональна полосе пропускания приёмника. Следовательно, число независимых отсчётов будет  $\Delta\nu\tau$ . Тогда среднеквадратичное отклонение, определяющее чувствительность прибора, будет равно

$$\delta T_{ш} = b T_{ш} / \sqrt{\Delta\nu\tau}, \quad (I.2)$$

где  $b$  - коэффициент порядка единицы, зависящий от схемы радиометра и формы полосы пропускания приёмника. Температура собственных шумов приёмника  $T_{ш.п}$  определяется известным соотношением

$$T_{ш.п} = (F - 1) T_0, \quad (I.3)$$

где  $F$  - коэффициент шума приёмника (шум-фактор),  $T_0 = 290\text{K}$  - условная температура окружающей среды, к величине которой приводятся все измерения.

В радиометрах на вход приёмника включаются пассивные элементы: ферритовые вентили, циркуляторы, модуляторы, переключатели, которые вносят дополнительное ослабление сигнала. Поэтому шумовая температура, приведённая ко входу радиометра, равна

$$T_{ш} = \frac{1-\eta}{\eta} T + \frac{1}{\eta} T_{ш.п} , \quad (I.4)$$

где  $\eta$  - коэффициент передачи пассивных элементов,  $T$  температура этих элементов.

Величину  $\sqrt{\Delta\nu\tau}$  называют радиометрическим выигрышем. Обычно в СВЧ радиометрах  $\Delta\nu \approx 10$  МГц,  $\tau = 1$  с и  $\sqrt{\Delta\nu\tau} \approx 3 \cdot 10^3$ . Это означает, что можно измерить принимаемый сигнал, в 3000 раз меньший собственных шумов приёмника. При увеличении чувствительности радиометров применяют усилители с малым шум-фактором (параметрические, квантовые усилители) и расширяют полосу приёмника по высокой частоте, если нет ограничений из-за формы сигнала и распределения внешних помех по диапазону. Только в редких случаях применяют большие времена накопления. Условились также, что для удобства сравнения различных радиометров данные о флуктуационной чувствительности приводятся для постоянной времени  $\tau = 1$  с. Наибольшую чувствительность в настоящее время имеют радиометры, у которых на входе стоят параметрические усилители, охлаждаемые газообразным гелием с температурой  $20^\circ\text{K}$  в установках замкнутого цикла. В Советском Союзе лучшая чувствительность  $0,002^\circ\text{K}$  достигнута на радиометре САО АН СССР на длине волны  $\lambda = 8$  см, который установлен на радиотелескопе РАТАН-600.

## 1.2. Флуктуационная чувствительность радиометра

В статистической радиофизике подробно рассматривается прохождение случайных сигналов через радиотехнические цепи. Это позволяет строго вычислить флуктуационный порог чувствительности радиометра. В литературе имеется много разных подходов к решению этой проблемы, но их изложение довольно громоздко. Физическую картину происходящих

в радиометре процессов проиллюстрируем на основании приближённого рассмотрения, приведённого в [1] для компенсационной схемы.

Будем считать, что сигнал  $S(t)$  и шумы приёмника  $n(t)$  представляют собой стационарные случайные процессы с нормальным распределением амплитуд, и мощность сигнала много меньше мощности собственных шумов, т.е.  $\overline{S^2} \ll \overline{n^2}$ . Задача состоит в нахождении дисперсии флуктуаций выходного тока  $I_{ш}^2$ .

Функция корреляции тока, создаваемого собственными шумами на выходе квадратичного детектора в рассматриваемом случае равна

$$\overline{i(t) i(t+\tau)} = \beta^2 \overline{n^2} \overline{n_\tau^2} = \beta^2 (\overline{n^2})^2 [1 + 2R^2(\tau)] \quad (I.5)$$

где  $\beta$  - чувствительность детектора,  $R(\tau)$  - коэффициент корреляции.

Если  $B_{вч}(\omega)$  - квадрат модуля коэффициента передачи высокочастотной части приёмника (до детектора), то коэффициент корреляции равен

$$R(\tau) = \int_0^\infty B_{вч}(\omega) \cos \omega \tau d\omega_0 \cos \omega_0 \tau = r(\tau) \cos \omega_0 \tau. \quad (I.6)$$

( $\omega_0$  - центральная частота полосы).

Спектральная плотность мощности на выходе детектора определится как

$$\begin{aligned} S(\nu) &= 4 \int_0^\infty \overline{i i_\tau} \cos 2\pi \nu \tau d\tau = \\ &= 4\beta^2 (\overline{n^2})^2 \left[ \int_0^\infty \cos 2\pi \nu \tau d\tau + 2 \int_0^\infty r^2(\tau) \cos^2 2\pi \nu_0 \tau \cos 2\pi \nu \tau d\tau \right]. \end{aligned} \quad (I.7)$$

Первый член даёт постоянную составляющую шумов, которая в схеме радиометра компенсируется сторонним источником тока, второй - описывает флуктуации

$$S_2(\nu) = 4\beta^2 (\overline{n^2})^2 \int_0^\infty r^2(\tau) \cos 2\pi \nu \tau d\tau. \quad (I.8)$$

В выражении для  $S_2(\nu)$  опущены высокочастотные компоненты вокруг частоты  $2\nu_0$ , т.к. обычно после детектора ставят узкополосные фильтры. Спектральная плотность флуктуаций при  $\nu = 0$  (т.е. на постоянном токе) равна

$$S_2(0) = 4\beta^2 \overline{(n^2)^2} \int_0^{\infty} r^2(\tau) d\tau. \quad (I.9)$$

Поскольку  $2\beta^2 \overline{(n^2)^2}$  - полная интенсивность флуктуаций, то выражение

$$\frac{2\beta^2 \overline{(n^2)^2}}{S_2(0)} = \frac{1}{2 \int_0^{\infty} r^2(\tau) d\tau} = \Delta\nu_{\text{рад}} \quad (I.10)$$

определяет эффективную полосу протектированных шумов.

На рис. I.1 приведён вид спектров до и после детектора

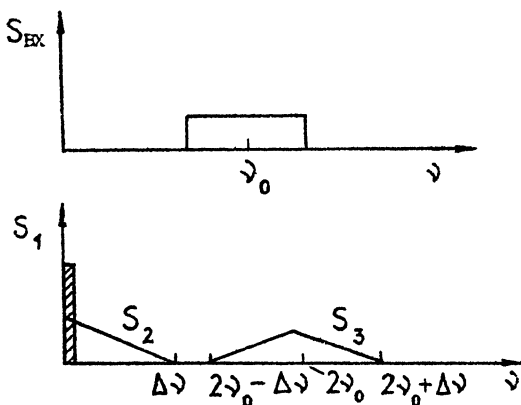


Рис. 1.1

Выражение для  $\Delta\nu_{\text{рад}}$  можно также определить через полосу высокочастотной части приёмника. Для этого выразим спектральную плотность шумов  $S_2(\nu)$  через спектральную плотность шумов на входе приёмника (см. [4]):

$$S_2(\nu) = 2\beta^2 (\kappa T_{\text{ш}})^2 \int_0^{\infty} B_{\text{вч}}(f) B_{\text{вч}}(\nu + f) df, \quad (I.11)$$

$$S_2(0) = 2\beta^2 (\kappa T_{\text{ш}})^2 \int_0^{\infty} B_{\text{вч}}^2(\nu) d\nu.$$

Подставим  $S_2(0)$  в виде (II) в формулу (IO) и учтём, что  $\overline{n^2} =$   
 $= \kappa T_{\text{ш}} \int_0^{\infty} B_{\text{вч}}(\nu) d\nu$ , тогда получим  

$$\Delta\nu_{\text{рад}} = 1/2 \int_0^{\infty} r^2(\tau) d\tau = \left[ \int_0^{\infty} B_{\text{вч}}(\nu) d\nu \right]^2 / \int_0^{\infty} B_{\text{вч}}^2(\nu) d\nu. \quad (I.12)$$

Последующие за детектором каскады усиления будем описывать как  
 низкочастотный фильтр, имеющий энергетический коэффициент передачи  
 $B_{\text{нч}}$ . Низкочастотный фильтр вырезает в спектре  $S_2(\nu)$  только полосу  
 около нулевой частоты. На выходе низкочастотного фильтра найден  
 средний квадрат флуктуаций тока

$$\begin{aligned} \overline{I_{\text{ш}}^2} &= \int_0^{\infty} S_2(\nu) B_{\text{нч}}(\nu) d\nu \approx S_2(0) \int_0^{\infty} B_{\text{нч}}(\nu) d\nu = \int_0^{\infty} B_{\text{нч}}(\nu) d\nu \\ &= 4\beta^2 (\overline{n^2})^2 \int_0^{\infty} r^2(\tau) d\tau \int_0^{\infty} B_{\text{нч}}(\nu) d\nu = 2\beta^2 (\overline{n^2})^2 \frac{\int_0^{\infty} B_{\text{нч}}(\nu) d\nu}{\Delta\nu_{\text{рад}}}. \end{aligned} \quad (I.13)$$

Если сигнал подаён на вход радиометра, то постоянная составляющая тока  
 на входе детектора также, как в выражении (7), определяется формулой

$$S_c(\nu) = 2\beta^2 (\overline{s^2})^2 \int_0^{\infty} \cos 2\pi\nu\tau d\tau = 2\beta^2 (\overline{s^2})^2 \delta(\nu), \quad (I.14)$$

где  $\delta(\nu)$  -  $\delta$ -функция аргумента  $\nu$ .

Так сигнал на выходе НЧ фильтра равен

$$I_c^2 = \int_0^{\infty} S_c(\nu) B_{\text{нч}}(\nu) d\nu = \beta^2 (\overline{s^2})^2 B_{\text{нч}}(0). \quad (I.15)$$

Учтём также, что  $\overline{s^2} = \kappa \delta T \int_0^{\infty} B_{\text{вч}}(\nu) d\nu$ , где  $\delta T$  - приращение темпе-  
 ратуры сигнала.

Чувствительность радиометра определим, приравнивая отношение сиг-  
 нала и шуму единице:  $I_c^2 = \overline{I_{\text{ш}}^2}$ .

Отсюда получим

$$\delta T = \sqrt{2} T_{\text{ш}} \sqrt{\left( \int_0^{\infty} B_{\text{нч}}(0) d\nu / B_0 \right) 2 \int_0^{\infty} r^2(\tau) d\tau} = \quad (I.16)$$

$$= \sqrt{2 T_{ш}} \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} B_{нч}(\nu) d\nu}{B(0)} \frac{\int_0^{\infty} B_{вч}^2(\nu) d\nu}{\left[ \int_0^{\infty} B_{вч}(\nu) d\nu \right]^2}} = \sqrt{2 T_{ш}} \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta \nu \text{ рад}}}$$

Отношение  $\int_0^{\infty} B_{нч}(\nu) d\nu / B(0) = \Delta F$  представляет эффективную прямоугольную полосу низкочастотного фильтра, эквивалентную реальной полосе по коэффициенту передачи. В случае RC- фильтра  $\Delta F = 1/4\tau$ ,  $\tau = RC$  - постоянная времени прибора в секундах. Если полоса высокочастотного тракта радиометра прямоугольная и равна  $\Delta \nu$ , то

$$\int_0^{\infty} B_{вч}^2(\nu) d\nu / \left[ \int_0^{\infty} B_{вч}(\nu) d\nu \right]^2 = \Delta \nu$$

Выражение для чувствительности тогда принимает вид

$$\delta T = \frac{\sqrt{2}}{2} T_{ш} \frac{1}{\sqrt{\Delta \nu T}} \quad (1.17)$$

(Сравните с (2)).

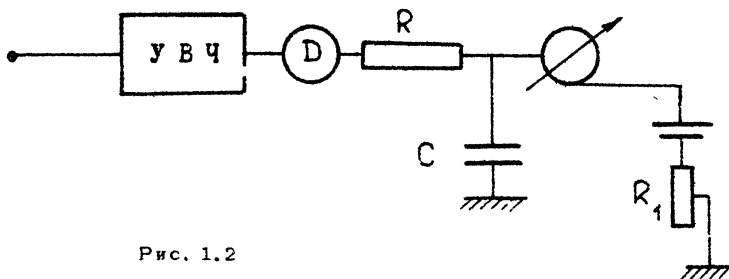


Рис. 1.2

На рис. 1.2 приведена блок-схема компенсационного радиометра, в которой компенсация постоянной составляющей шумового тока осуществлена с помощью батарейки, включённой в обратную сторону, и потенциометра  $R_1$ . На самом деле чувствительность радиометра, даваемая форму-

лой (18), на практике реализовать не удаётся из-за невозможности обеспечить необходимую стабильность коэффициента усиления  $G$  в тракте радиометра. Из-за флуктуаций усиления  $\delta G$  не удаётся отслеживать компенсацию, и на выходе радиометра появляется паразитный сигнал, который существенно ухудшает чувствительность. С учетом этого чувствительность становится равной

$$(\delta T)_G = T_{ш} \frac{\delta G}{G} > \delta T.$$

Чтобы ослабить влияние флуктуаций коэффициента усиления тракта, необходимо, чтобы сигнал компенсации менялся также в соответствии с этими флуктуациями. Это достигается в схемах модуляционного радиометра, наиболее употребительного на практике. Простейшая схема изображена на рис. 1.3<sup>1)</sup>, где  $M$  - модулятор, УВЧ - усилитель высокой частоты, Д - детектор, УНЧ - усилитель низкой частоты, СД - синхронный детектор,  $\Gamma$  - генератор опорного напряжения,  $T_c$  и  $T_{\text{э}}$  - температуры сигнала и эквивалента.

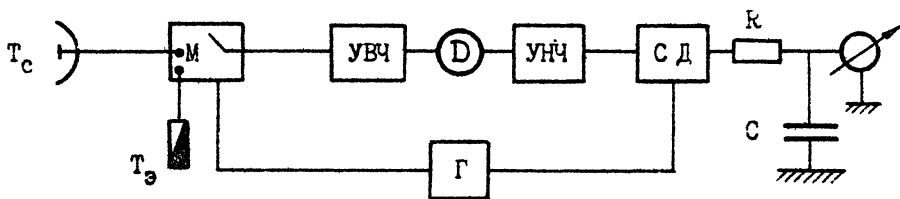


Рис. 1.3

На входе приёмника модуляционного радиометра помещён модулятор, который с частотой  $\Omega$  переключает вход приёмника с сигнального плеча на эквивалент. Модулятор управляется генератором опорного напряжения. В схему также введён фазово-чувствительный синхронный детектор,

<sup>1)</sup> На рис. 1.2 и 1.3 для простоты изображены радиометры прямого усиления; в общем случае это могут быть приёмники супергетеродинного типа.

преобразующий напряжение на частоте модуляции  $\Omega$  в постоянный ток. С целью сохранения фазовых соотношений на частоте модуляции на синхронный детектор подаётся опорное напряжение от того же генератора, который управляет переключением модулятора. Обычно частота опорного генератора составляет несколько сотен Герц. В первую половину периода модуляции ко входу приёмника подклѐчен сигнал и на усредняющее устройство (RC-цепь) поступает положительное напряжение постоянного тока. Во второй полупериод ко входу приёмника подклѐчен эквивалент, и после синхронного детектора в усредняющее устройство поступает отрицательное приращение постоянного тока. Таким образом, если флуктуации коэффициента усиления медленнее, чем частота переключений, то после синхронного детектора происходит вычитание постоянной составляющей тока собственных шумов приёмника. В этом случае чувствительность радиометра будет описываться выражением типа (2). Воспроизведение расчётов флуктуационной чувствительности модуляционного радиометра довольно громоздко, его можно посмотреть в работе [6]. Общие соотношения для радиометров даны в [6].

Ниже приведѐм выражение для флуктуационной чувствительности радиометра с учётом флуктуаций коэффициента усиления:

$$\delta T = \frac{b T_{ш}}{\sqrt{\Delta \nu \tau}} \sqrt{1 + \frac{(T_c - T_3)^2}{T_{ш}^2} \left( \frac{\overline{\delta G}}{G} \right)^2} \quad (I.18)$$

Коэффициент в выражении (18) зависит от формы модулирующего сигнала и способа демодуляции после детектора. При прямоугольной форме модуляции и демодуляции меандром  $b = \sqrt{2}$ . В этом случае чувствительность радиометра в два раза хуже, чем у идеального компенсационного. Это объясняется тем, что из-за модуляции сигнал принимается только половину времени наблюдения. Из выражения (I.18) видно, что полностью освободиться от флуктуаций коэффициента усиления можно только в слу-



чае, когда  $T_c \approx T_3$ .

### 1.3. Экспериментальная установка и методика измерений

Конструкция радиометра на длину волны  $\lambda = 21$  см (см. рис.1.4)

Радиометр модуляционный МР-20 супергетеродинного типа разработан и изготовлен в институте радиофизики и электроники АН Арм. ССР. Радиометр предназначен для измерения интенсивности радиоизлучения шумовых сигналов.

Технические характеристики:

1. Частота настройки	1,40 ГГц
2. Погрешность настройки частоты	0,2 %
3. Флуктуационная чувствительность	0,2 °К
4. Постоянные времени	1; 4; 16 с
5. Полоса пропускания	80 МГц
6. Нестабильность коэффициента усиление в течение 15 мин.	0,4 %
7. Нелинейность	1 %
8. Потребляемая мощность	20 Вт
9. Время прогрева	30 мин
10. Рабочий диапазон температур	10 - 35°С
11. КСВ входа прибора	1,2
12. Питается от сети (50 Гц)	220 В $\pm$ 10 %

Модуляционный радиометр МР-20 собран на современных элементах с применением специальных малошумящих схем. Ниже приведено краткое описание важнейших узлов высокочастотной части радиометра.

1. Входной циркулятор  $\Pi_1$  развязывает вход радиометра от модулятора и обеспечивает хорошее согласование входа прибора. Циркулятор

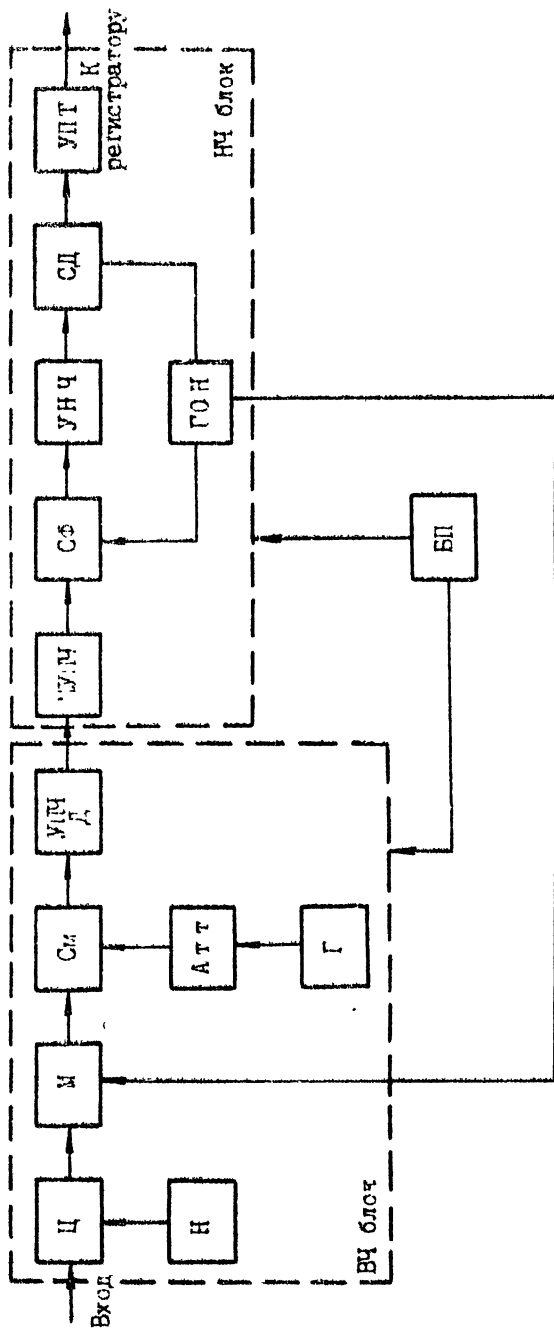


Рис. 1.4. Блок-схема радиометра

- |                              |                                    |
|------------------------------|------------------------------------|
| Ц - циркулятор               | Г - гетеродин                      |
| М - модулятор                | МУНЧ - мачшумный УНЧ               |
| См - смеситель               | СФ - синхронный фильтр             |
| УПЧ- усилитель пром. частоты | СД - синхронный детектор           |
| Д - детектор квадратичный    | ГОН - генератор опорных напряжений |
| Н - согласованная нагрузка   | УПТ - усилитель постоянного тока   |
| АТТ- аттенуатор              | БП - блок питания                  |

нагружен согласованной нагрузкой и работает вентилем, т.е. односторонне проводящим элементов.

2. Модулятор представляет собой переключатель, собранный на  $p\text{-}n$  - диодах, соединённых с циркулятором  $\text{Ц}_2$ . Переключение происходит между входом приёмника и согласованной нагрузкой, присоединённой к циркулятору  $\text{Ц}_2$ .

3. Смеситель собран по балансной схеме на щелевом мосте. На передней панели прибора имеется миллиамперметр смесителя, показывающий токи кристаллов.

4. Гетеродином является генератор на диоде Ганна, регулировка мощности осуществляется аттенуатором.

5. Усилитель промежуточной частоты состоит из четырёх резисторных усилителей на транзисторах.

6. Блок питания состоит из трёх стабилизированных источников питания (+12, -12 и -8,5 В).

#### Методика измерений

Радиометр - прибор, измеряющий сигнал на фоне собственных шумов, которые компенсируются полностью или частично. Поэтому он не является измерителем абсолютной величины сигнала, и, чтобы определить мощность сигнала, нужно произвести ряд вспомогательных манипуляций. Радиометр измеряет приращение мощности относительно выбранного (произвольного, вообще говоря, нуля), возникающее при включении сигнала. Для определения аппаратного нуля в нашем случае на вход радиометра подключается согласованная нагрузка, находящаяся при температуре окружающей среды  $T_A$ . Уровень мощности от согласованной нагрузки фиксируется на ленте самописца. Затем подключается сигнал, мощность которого требуется определить. Измеряемой величиной является ступенька, между уровнями записи на ленте самописца. Пусть её величина рав-

на  $n$  миллиметров.

Если теперь на вход радиометра подадим сигнал известной мощности, то при линейности динамической характеристики прибора самописец зарегистрирует ступеньку в  $n_k$  миллиметров. Этой процедурой осуществляется калибровка шкалы прибора, т.е. определяется отношение мощность/миллиметр. В качестве таких эталонов применяют генераторы шума. Для нашего случая генератором шума является полупроводниковый диод. Через направленный ответвитель от генератора шума на вход радиометра поступает сигнал с температурой  $T_k = 20$  К. В радиометрии удобно выражать измеряемую мощность в температурах. По законам излучения абсолютно чёрного тела интенсивность полностью определяется кинетической температурой тела. Согласно закону Рэлея-Джинса связь между этими величинами линейная:  $I = \frac{2k}{\lambda^2} T$  ( $k$ -постоянная Больцмана,  $\lambda$  - длина волны), в радиодиапазоне закон выполняется в большинстве случаев. Для приращения от температуры измеряемого сигнала имеем следующее выражение:

$$\Delta T_c = \frac{n}{n_k} (T_A - T_k),$$

откуда температура сигнала равна

$$T_c = T_k \pm \frac{n}{n_k} (T_k - T_A), \quad (1.20)$$

знак минус или плюс зависит от того, больше или меньше  $T_c$  в сравнении с  $T_k$ . Для приведённого на рис. 1.5 примера нужно брать знак минус.

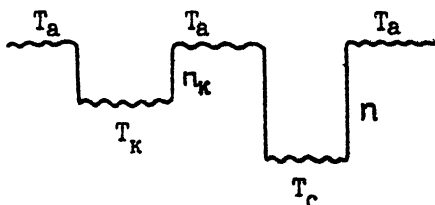


Рис. 1.5

## 1.4. Упражнения

Приведение радиометра в рабочее состояние.

На лицевой панели радиометра установлены следующие органы управления и контроля:

а) сетевой разъём и кнопка включения питания радиометра, клемма для заземления. Включение сети показывает индикаторная лампочка;

б) микроамперметр и кнопочные переключатели для контроля тока гетеродина, блока низкой частоты и питающих напряжений.

В положении "выход" стрелка микроамперметра может занимать любое положение;

в) ручка "смещение нуля" для установки положения каретки самописца в нужное на диаграммной ленте положение;

г) кнопка включения постоянной времени;

д) ручка "усиление" для установления нужного масштаба записи;

Тепловая калибровка прибора делается при подключении согласованной нагрузки  $T_A$  и генератора шума  $T_K$ . Проверку калибровки делать после прогрева радиометра.

### Из м е р е н и е

1. Определение флуктуационной чувствительности радиометра. Для этого нужно записать на ленте самописца "нулевую дорожку" в отсутствие сигнала на входе радиометра. В нашем случае для этого нужно подключить ко входу согласованную нагрузку  $T_A$ . Установить при выбранной постоянной времени такую скорость лентопротяжки у самописца, чтобы на записи чётко было видно изменение шумового сигнала. Затем от любого произвольного уровня на ленте через равные интервалы времени  $\Delta t > \tau$  (чтобы отсчёты были независимы) снять отсчёты. Найдём среднее значение уровня записи

$$a = \frac{1}{N} \sum_1^N a_i$$

и отклонение от среднего  $a - a_i$ .

Вычислим среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\sum_1^N (a - a_i)^2 / (N-1)}.$$

Сделав тепловую калибровку, вычислим флуктуационную чувствительность в градусах:

$$\delta T = (T_K - T_A) \frac{\sigma}{n_K}.$$

Зная экспериментально найденное значение  $\delta T$ , вычислим шумовую температуру приемника  $T_{ш}$ .

2. Измерение шумовой температуры антенны. Подсоединить ко входу радиометра антенну, измерить температуру сигнала  $T_C$  в соответствии процедурой, описанной в предыдущем пункте. Поскольку при измерениях имеем дело со случайными шумовыми сигналами, то для повышения точности измерения их нужно делать циклами: нуль-сигнал-нуль-калибровка-нуль, ведя регистрацию в каждом положении в течении минуты. Сигнал  $T_C$  и калибровка  $T_K$  отсчитываются при аппроксимации нулевой линии на момент записи  $T_C$  или  $T_K$  (иными словами берется среднее значение положений нулевых линий до и после соответствующей операции). Случайная ошибка будет уменьшена, если произвести несколько циклов измерений.

При оценке погрешности измерений  $T_C$  нужно определить случайную ошибку, вызванную разбросом данных по циклам, и учесть систематические погрешности:  $\Delta T_K = 1K$  и точность измерения  $T_A = 273 + tC$  - температуры нагрузки градусником.

## 1.5 Контрольные вопросы.

1. Как экспериментально определить нелинейность динамической характеристики радиометра?
2. Как экспериментально определить стабильность усиления радиометра?
3. Как измерить постоянную времени на выходе радиометра?
4. Определите коэффициент шума приемника, если у циркулятора на входе потери составляют 0,5 дБ, а прямые потери в модуляторе 0,2 дБ.
5. Познакомьтесь в книге [1] с корреляционным радиометром.
6. Приемник супергетеродинного типа не имеет на входе усилителя ВЧ или фильтра зеркального канала. Как наличие зеркального канала отразится на чувствительности радиометра?

## 2. ПАРАБОЛИЧЕСКАЯ АНТЕННА РАДИОТЕЛЕСКОПА

### 2.1. Введение

Из многих типов радиотелескопов выделяют радиотелескопы с параболическими полноповоротными антеннами, достоинством которых является широкая диапазонность, что позволяет использовать инструмент на многих волнах одновременно, и возможность наблюдения источника радиоизлучения в любой видимой точке небесной сферы, что позволяет накапливать сигнал при непрерывном сопровождении источника. Параболические антенны служат базовыми инструментами для всех многоэлементных систем или решёток. Поэтому знакомство с антеннами радиотелескопов нужно начинать с параболоидов.

Основными характеристиками радиотелескопа являются его разрешающая способность и чувствительность. Для антенн со сложной апертурой

эти два параметра определяются максимальными размерами, а при круглом раскрытии — диаметром зеркала  $D$ . Разрешающая способность или угловое разрешение антенны зависят от пространственного распределения излучающей мощности. Ниже будет показано, что в пространственном распределении выделяется главный луч диаграммы направленности и окружающие его боковые лепестки, амплитуда которых составляет 20 дБ и менее от амплитуды главного луча в максимуме. Ширина главного луча на уровне половинной интенсивности составляет  $\theta_0 \approx \lambda/D$  радиан, её принимают, как правило, за разрешающую способность. В астрономии пользуются понятием интенсивности, её же называют поверхностной яркостью  $I_\nu$  или просто яркостью. Она определена как поток энергии через единичную площадку, перпендикулярно его поверхности, в интервале частот  $\nu$ ,  $\nu + d\nu$  в единицу времени, внутри единичного телесного угла. Интенсивность измеряется в единицах Вт/м<sup>2</sup>Гц стерадиан. Энергия, падающая на площадку внутри телесного угла  $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$ , ось которого образует с нормалью  $\vec{n}$  угол  $\theta$ , равна

$$dU_\nu = I_\nu \cos\theta d\theta d\varphi d\Omega. \quad (2.1)$$

Распределение яркости по источнику излучения  $I_\nu(\theta, \varphi)$  можно измерить, если угловое разрешение антенны много меньше угловой протяжённости источника. Во многих случаях  $I_\nu(\theta, \varphi)$  не известна и не всегда можно измерить телесный угол, занимаемый источником. Для характеристики мощности излучения объектов вводят величину  $S(\nu) = \int_{\Omega_{\text{и}}} I_\nu d\Omega$ , которую называют плотностью потока. Потоки дискретных источников выражают в единицах Вт/м<sup>2</sup>Гц. Единицей потока является величина  $10^{-26}$  Вт/м<sup>2</sup>Гц = 1 е. п., её называют Янский, в честь Карла Янского, открывшего в 1932 г. космическое радиоизлучение.

Антенна радиотелескопа собирает электромагнитную энергию, падающую на её поверхность  $S$ . Антенна принимает только одну поляризацию,



и в случае неполяризованного излучения мощность, принятая антенной, равна

$$U_{\nu} = \frac{1}{2} S_{\nu} \epsilon \quad (2.2)$$

От облучателя сигнал передаётся по кабелю к приёмнику. Если  $\eta$  - коэффициент полезного действия тракта (КПД), то на вход приёмника поступает мощность  $\frac{1}{2} S_{\nu} \epsilon \eta$ . Минимальный сигнал, который может быть принят радиотелескопом, зависит от флуктуационной чувствительности радиометра  $\Delta T_{\min}$ , его мощность равна  $k \Delta T_{\min}$ .

Таким образом, минимальная плотность потока излучения, которую способен зарегистрировать радиотелескоп, равна

$$(S_{\nu})_{\min} = 2k \Delta T_{\min} / \epsilon \eta \sim \Delta T_{\min} / D^2 \eta \quad (2.3)$$

Для современных радиотелескопов  $(S_{\nu})_{\min} \sim 10^{-4}$  е.п. Если  $U_{\nu}$  средняя спектральная плотность мощности в полосе пропускания  $\Delta \nu$  радиометра (до квадратичного детектора), то мощность, которую измеряет радиотелескоп:  $U = \frac{1}{2} S_{\nu} \epsilon \eta \Delta \nu$ , можно представить в виде

$$U = k T_A \Delta \nu,$$

где спектральную плотность мощности сигнала, принятого антенной от дискретного источника  $T_A = S_{\nu} \epsilon \eta / 2k$ , называют температурой антенны.

Температура антенны измеряется в единицах абсолютной температуры.

Антенна, даже ненаправленная на какой-либо дискретный источник, принимает излучение, распределённое в пространстве, от атмосферы, земли, Галактики, Вселенной. Поэтому температура антенны всегда отлична от нуля, её ещё называют шумовой температурой антенны  $T_{A.ш}$ . В лабораторном помещении её определяет излучение ок-

ружающих предметов.

## 2.2. Параболическая антенна

Пространственное распределение поля излучения антенны формируется под влиянием дифракции электромагнитной волны на её поверхности. У параболической антенны поле на раскрыве имеет одну поляризацию. Поэтому задача о дифракции в первом приближении может рассматриваться как скалярная.

Пусть на раскрыв антенны падает плоская волна

$$E = A(x, y, z) e^{-iL(x, y, z)}, \quad (2.4)$$

где  $A$  и  $L$  - амплитуда и фаза волны. Начало координат выберем в центре раскрыва параболоида. (рис. 2.1).

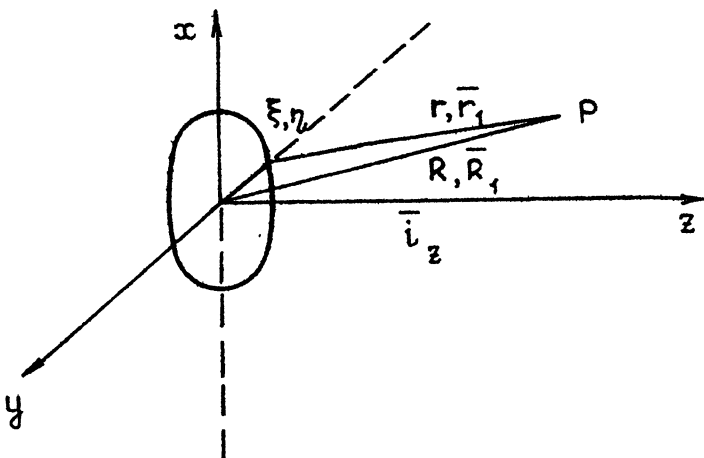


Рис. 2.1

Поле в точке  $P$  может быть найдено из решения волнового уравнения

$$\Delta E^2 + \kappa^2 E = 0 \quad (2.5)$$

с граничным условием в плоскости  $z = 0$

$$E_0 = \Psi(\xi, \eta) = A(\xi, \eta) e^{-iL(\xi, \eta)} \quad (2.6)$$

и условием излучения при  $z \rightarrow \infty$ . Решением уравнения, полученным методом функции Грина или с помощью интегральной теоремы Кирхгофа, является следующее выражение:

$$E_p(R) = \frac{1}{4\pi} \int_S \Psi(\xi, \eta) \frac{e^{-i\kappa r}}{r} \left[ (i\kappa + 1/r) \vec{i}_z \vec{r}_1 + i\kappa \right] d\xi d\eta, \quad (2.7)$$

где интеграл берётся по поверхности раскрыва  $S$ . Обычно в пространстве рассматриваются три области: ближнего поля, дифракции Френеля и дальняя или волновая. Область ближнего поля простирается на расстояние до нескольких длин волн, и поле описывается интегралом  $E_p(R)$ . Рассмотрим промежуточную область между ближним полем и волновой зоной, область дифракции Френеля. Здесь можно для вычисления поля  $E_p$  воспользоваться следующими приближениями:

- 1)  $1/r < \kappa = 2\pi/\lambda$ ,
- 2) пренебречь изменениями  $\vec{i}_z \vec{r}_1$  на поверхности, и заменить величиной  $\vec{i}_z \vec{R}_1 = \cos\theta$ ,
- 3) заменить в интеграле  $1/r$  на  $1/R$ ,
- 4) изменение  $r$  учесть в фазе.

Для этого представим  $r$  в виде ряда и в сферической системе координат ( $x = R \sin\theta \cos\varphi$ ,  $y = R \sin\theta \sin\varphi$ ,  $z = R \cos\theta$ ) запишем

$$r = R - (\xi \sin\theta \cos\varphi + \eta \sin\theta \sin\varphi) + \quad (2.8)$$

$$\mp \frac{\xi^2 + \eta^2 - (\xi \sin \theta \cos \varphi + \eta \sin \theta \sin \varphi)^2}{2R} = R - (\xi \cos \varphi + \eta \sin \varphi) \sin \theta + r_g.$$

При сделанных предположениях интеграл равен

$$E_p = \frac{i}{2\lambda} \frac{e^{-ikR}}{R} \int_{\sigma} \psi(\xi, \eta) e^{-ikr_g + ik(\xi \cos \varphi + \eta \sin \varphi) \sin \theta} (\cos \theta + 1) d\xi d\eta. \quad (2.9)$$

В фазовом множителе  $2\pi r_g / \lambda < \pi(\xi^2 + \eta^2) / R\lambda \sim \pi D^2 / R\lambda < 1$ ; при удалении точки наблюдения  $P$  от антенны при  $R \gg D^2 / \lambda$  фаза  $\pi D^2 / R\lambda \ll 1$ . При этих расстояниях формируется дальняя зона антенны или область дифракции Фраунгофера. Поскольку энергия излучения сосредоточена в узком конусе вокруг  $z$ , то можно принять  $\cos \theta \approx 1$ . Тогда поле в точке  $P$  равно

$$E_p = \frac{i}{\lambda R} e^{-ikR} \int_{\sigma} \psi(\xi, \eta) e^{ik \sin \theta (\xi \cos \varphi + \eta \sin \varphi)} d\xi d\eta \quad (2.10)$$

и энергия, излучаемая антенной,

$$E_p E_p^* = \frac{1}{(\lambda R)^2} \left| \int_{\sigma} \psi(\xi, \eta) e^{ik \sin \theta (\xi \cos \varphi + \eta \sin \varphi)} d\xi d\eta \right|^2. \quad (2.11)$$

Величина

$$F(\theta, \varphi) = |g(\theta, \varphi)|^2 = \left| \int_{\sigma} \psi(\xi, \eta) e^{ik \sin \theta (\xi \cos \varphi + \eta \sin \varphi)} d\xi d\eta \right|^2 \quad (2.12)$$

называется угловым спектром мощности или диаграммой направленности антенны. Диаграмма направленности сформирована при  $R \gg D^2 / \lambda$  и не зависит от расстояния  $R$ . При этих расстояниях размер зоны Френеля  $\sqrt{R\lambda} \gg D$  и все точки раскрыва излучают синфазно. При меньших расстояниях синфазность нарушается, и угловой спектр будет зависеть от расстояния  $g(\theta, \varphi, D^2 / \lambda R)$ .

Рассмотрим поле излучения кругового раскрыва. Введём координаты на

поверхности раскрыва:  $\xi = \rho \cos \varphi'$ ,  $\eta = \rho \sin \varphi'$   
и безразмерные величины:  $r = \rho/a$ ,  $u = (2\pi/\lambda) \sin \theta$   
( $a$  - радиус апертуры). Тогда (2.13)

$$g(u, \varphi) = \int_0^1 \int_0^{2\pi} \Psi(r, \varphi') e^{ikr \cos(\varphi - \varphi')} r dr d\varphi'.$$

В случае равномерного распределения амплитуд и фаз по раскрыву

$$\Psi(r, \varphi') = 1 \quad \text{и} \quad g(u) = \int_0^1 r J_0(u, r) dr \quad \text{или} \quad (2.14)$$

$$g(u) = J_1(u^2) / u,$$

где  $J_0$  и  $J_1$  - функции Бесселя. Из этого примера видна структура диаграммы направленности антенны: она представляет собой главный луч и совокупность вторичных максимумов - боковых лепестков. Ширина главного луча по уровню половинной мощности по порядку величины равна  $\theta_{0,5} = 70 \lambda / D$  в градусах.

Для характеристики направленности излучения в антенной технике вводят коэффициент направленного действия (КНД)

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi F(\theta, \varphi) / \int_{4\pi} F d\Omega, \quad (2.15)$$

который представляет собой отношение мощности, излучаемой в единицу телесного угла в данном направлении  $F(\theta, \varphi)$  к средней мощности в единице телесного угла  $\int_{4\pi} F(\theta, \varphi) d\Omega / 4\pi$ .

Если коэффициент полезного действия антенны  $\eta$ , то  $G(\theta, \varphi) = D(\theta, \varphi) \eta$  представляет собой величину, называемую усилением антенны. Другими словами КНД можно интерпретировать и как выигрыш, который представляет отношение мощности, которую бы излучала антенна максимально по всем направлениям  $4\pi F_{\max}$ , к реально излучаемой мощности  $\int_{4\pi} F d\Omega$ . Тогда максимальная мощность, излучаемая антенной, равна  $\int_{4\pi} F d\Omega$ .

$$W(\theta, \varphi) = \frac{c}{4\pi} |E_p^*|^2 = \frac{c}{\lambda^2} \left| \int_{\sigma} \Psi(\xi, \eta) e^{ik \sin \theta (\xi \cos \varphi + \eta \sin \varphi)} d\xi d\eta \right|^2, \quad (2.16)$$

а полная- потоку вектора Пойтинга через её поверхность:

$$W_A(\theta, \varphi) = \frac{c}{4\pi} \int_{\sigma} |\Psi(\xi, \eta)|^2 d\xi d\eta. \quad (2.17)$$

По определению КИД в направлении максимума излучения  $\theta = 0$  имеем

$$D = \frac{4\pi}{\lambda^2} \frac{\left| \int_{\sigma} \Psi(\xi, \eta) d\xi d\eta \right|^2}{\int_{\sigma} |\Psi(\xi, \eta)|^2 d\xi d\eta}. \quad (2.18)$$

Если распределение амплитуд и фаз на раскрыве антенны равномерное:

$\Psi(\xi, \eta) = 1$ , то  $D_{\max} = \frac{4\pi}{\lambda} \sigma$ , где  $\sigma$  - геометрическая площадь раскрыва антенны. Если распределение неравномерное, то

$$D = \frac{4\pi}{\lambda^2} \sigma_{\text{эфф}} \quad \text{или} \quad \sigma_{\text{эфф}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D, \quad (2.19)$$

где  $\sigma_{\text{эфф}}$  - эффективная площадь антенны зависит от распределения поля на ее поверхности или от облучения антенны. Использование геометрической площади характеризуется апертурным коэффициентом использования поверхности (КИП):  $\text{КИП} = D/D_{\max} = \sigma_{\text{эфф}}/\sigma < 1$ .

Создать столбообразное распределение поля на раскрыве не всегда возможно. Поэтому в большинстве случаев применяют спадающие к краям распределения, облучая края антенны по уровню 0,1. Часть энергии облучения, вышедшая за пределы поверхности, увеличивает боковое рассеяние антенны и уменьшает КИД. К уменьшению КИД приводит также рассеяние поля на элементах конструкции антенны (штанги, опоры, контррефлектор и т. д.). В среднем, у антенн параболического типа

КПД = 0,5 + 0,7. У современных, хорошо облучённых радиотелескопов, КПД достигает 0,75.

При измерениях приходится сравнивать излучение тел, находящихся на разных расстояниях в направлении оси антенны. Рассмотрим структуру поля на оси круглого раскрыва при синфазном облучении с распределением амплитуд

$$\Psi(\rho, \varphi) = 1 - \left(\frac{\rho}{\pi}\right)^2 \quad (2.20)$$

Такое распределение поля на раскрыве даёт уровень боковых лепестков - 25 дБ.

Поле вдоль оси равно

$$E_p = \frac{i}{\lambda} \frac{e^{-ikR}}{R} \int_0^{2\pi} \int_0^a \Psi(\rho, \varphi) e^{-ik \frac{\rho^2}{R^2}} \rho d\rho d\varphi \quad (2.21)$$

и плотность энергии тогда будет

$$|E_p|^2 = 26,1 \left[ 1 - \frac{16n}{\pi} \sin \frac{\pi}{8n} + \frac{128n^2}{\pi^2} \left( 1 - \cos \frac{\pi}{8n} \right) \right], \quad (2.22)$$

где  $n = \frac{R}{2 \frac{D^2}{\lambda}}$ .

График функции (2.22) представлен на рис. 2.2.

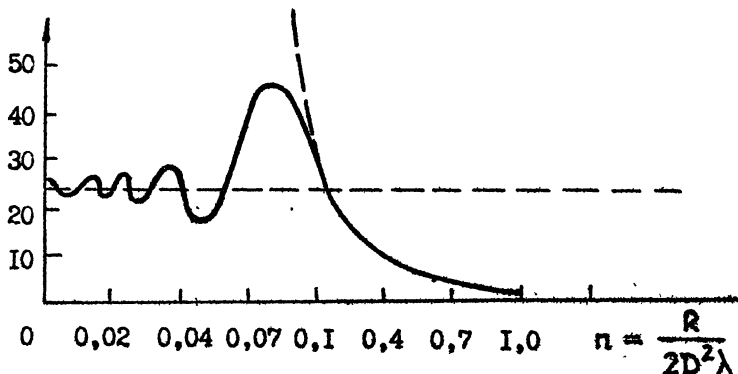


Рис. 2.2

При  $n = 0,1$  плотность мощности превышает в 42 раза эту величину при  $n = 1$ . Осцилляции поля соответствуют области дифракции Френеля, когда на раскрытии антенны из точки наблюдения видны несколько зон Френеля ( $\sqrt{R\lambda} < D$ ), и антенна излучает как несинфазная поверхность. Распределение поля в пространстве изменится, если имеются отклонения от синфазности на раскрытии. Для параболических антенн оно возникает при смещении облучателя из фокуса. Линейные фазовые ошибки могут быть при смещении облучателя в фокальной плоскости параболоида. Они приводят к смещению луча в зеркально-симметричном направлении относительно положения облучателя. К более сложным эффектам приводят квадратичные фазовые ошибки. Они возникают при выносе облучателя из фокуса вдоль оси параболоида: фаза нарастает от центра к краям  $\beta \rho^2$  и на краю равна  $\beta' = \beta a^2$ . Для параболоида фазовая ошибка на краю зеркала просто связана с величиной  $\delta$  выноса из фокуса. Если  $\delta \ll F$  - фокусного расстояния, то

$$\beta' = -\frac{\kappa a^2}{2F^2} \frac{\delta}{1 + (a/2F)^2} \quad (2.23)$$

Знак  $\beta'$  определяется знаком  $\delta$ :  $\delta < 0$  при смещении из фокуса к зеркалу,  $\delta > 0$  при смещении от зеркала. Для поля вдоль оси будем иметь следующее выражение:

$$E_p = \frac{i}{\lambda} \frac{e^{-i\kappa R}}{R} \int_0^a \int_0^{2\pi} \Psi(\rho, \varphi) e^{-i(\kappa \frac{\rho^2}{2R} + \beta \rho^2)} \rho d\rho d\varphi. \quad (2.24)$$

Интеграл сводится к виду (2.21) при замене в фазовом множителе  $1/R + 2\beta'/\kappa a^2 = 1/R'$ .

При  $\beta' < 0$  ( $\delta > 0$ ) для каждой величины  $\beta'$  можно найти та-  
 $R$ , когда  $1/R' = 0$ . Это означает, что на конечном расстоянии поле антенны будет такое же, как в дальней зоне. Другими словами, происходит фокусировка антенны на заданное расстояние  $R$ . Его можно приближённо вычислить, пользуясь формой линзы:



$$\frac{1}{F} = \frac{1}{R} + \frac{1}{F+R} \quad (2.25)$$

При  $\beta > 0$  ( $\delta < 0$ ) антенна работает подобно рассеивающей линзе, не давая действительного изображения. Рассмотрим пример влияния фокусировки для усиления равномерно облученной антенны  $\psi = 1$  (рис. 2.3). Пользуясь вышеприведенными формулами, получим

$$\frac{G_R}{G_\infty} = \left[ \frac{\sin \left( \frac{\kappa a^2}{4R} + \frac{\beta'}{2} \right)}{\frac{\kappa a^2}{4R} + \frac{\beta'}{2}} \right]^2 : \frac{\sin \frac{\beta'}{2}}{\frac{\beta'}{2}}, \quad (2.26)$$

где  $G_R$  - усиление антенны на расстоянии  $R$ ,  $G_\infty$  - усиление на бесконечности.

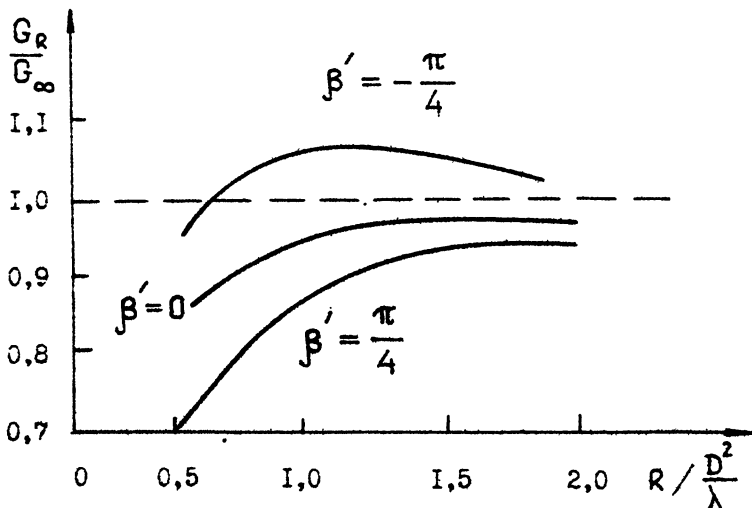


Рис. 2.3

При фазовой ошибке на краю раскрыва  $\beta' = \pi/4$  антенна сфокусирована на расстояние  $R = D^2/\lambda$ , а при  $R = 0,5 \frac{D^2}{\lambda}$   $G_R = G_\infty$ .

### 2.3. Экспериментальная установка и методика измерений

Экспериментальная установка состоит из радиотелескопа и излучателя, имитирующего дискретный источник радиоизлучения. Радиотелескоп и излучатель работают на длине волны  $\lambda = 21$  см.

Излучатель представляет собой полуволновый диполь с контррефлектором, который установлен на штанге. Штанга укреплена на тележке, которая может перемещаться вдоль направляющей рейки. Для отсчета расстояния между антенной и излучателем на рейке нанесены деления. Генератором является полупроводниковый шумовой диод, генерирующий случайный шумовой сигнал в диапазоне до 5 ГГц, температура этого сигнала  $T_{\text{ш}} = 3 \cdot 10^6$  К. Чтобы уменьшить излучаемую мощность ГШ подсоединен к диполю коаксиальным кабелем, в котором сигнал затухает примерно в 50 раз. Даже без ослабления в кабеле, излучаемая в пространство мощность очень мала:  $P = k T_{\text{ш}} \Delta \nu < 10^{-11}$  Вт, где  $\Delta \nu \sim 200$  МГц задается полосой полуволнового диполя. Генератор питается стабилизированным постоянным напряжением (20 В), его ток тоже ( $\approx 200$  мА) стабилизирован.

Радиотелескоп имеет параболическую антенну диаметром  $D = 2$  м, ее фокусного расстояния  $F = 79$  см. Антенна смонтирована на поворотном устройстве, позволяющим вращать ее по азимуту и углу мес.а, и, благодаря этому, антенна может быть направлена в любую точку небесной сферы. Для вращения антенны на поворотном устройстве установлен электрический и ручной привод. Управление электрическим приводом осуществляется при переключении тумблеров на блоке управления. По азимуту антенна передвигается: влево - вправо, стоп; по высоте - вверх - вниз, стоп. Предусмотрены два рабочих режима: быстрый (переброс) для переброса антенны в исходное положение и сопровождение источника по скорости; величина скорости сопровождения подбирается подстройкой.

Для отсчета углов по азимуту и углу места имеется грубая шкала с делениями через  $10^{\circ}$  и точная шкала от 0 до  $10^{\circ}$  с делениями через  $5'$ . Индикаторами угловых перемещений являются сельсины, расположенные в блоках индикаторов высоты и азимута.

На поворотном устройстве имеются также приводы ручного управления по азимуту и углу места. Оба привода червячного типа. Индикация углов выведена на шкалы с делениями через  $1^{\circ}$ , нониус позволяет вести отсчет углов с ценой деления  $1'$ .

Зеркало облучается открытым концом круглого волновода, который возбуждается диполем. При такой системе облучения получается симметричная в Е-и Н-плоскостях диаграмма направленности антенны. Для фокусировки антенны облучатель перемещается вдоль оси зеркала. Облучатель соединен с радиометром длинным коаксиальным кабелем.

На радиотелескопе установлен модуляционный радиометр супергетеродинного типа, настроенный на длину волны  $\lambda = 21$  см. Радиометр предназначен для измерения мощности слабых шумовых сигналов. Полоса пропускания тракта до квадратичного детектора равна  $\Delta\nu = 80$  МГц, постоянные времени выходных фильтров могут быть выбраны в зависимости от условий эксперимента:  $\tau = 1; 4; 16$  с. Флуктуационная чувствительность радиометра при  $\tau = 1$  с равна  $\Delta T_{\min} = 0,2$  К. Для определения температуры принимаемого сигнала делается сравнение его с температурой генератора шума ( $T_{\text{гшр}} = 20$  К). Генератор шума так же работает на полупроводниковом диоде. Он включен на вход радиометра через направленный ответвитель. Усиление радиометра может изменяться с помощью кнопочного переключателя на передней панели блока; имеются следующие положения переключателя: 50; 150; 500; 1500; 5000; 15000. Запись принимаемых сигналов производится на самописец КСП-4, подключенный к радиометру.

Подробнее с радиометром можно ознакомиться по техническому опи-

санию и инструкции по эксплуатации.

Измерителем мощности излучения, принимаемой антенной, является радиометр. Радиометр измеряет приращение мощности относительно выбранного нулевого отсчёта. В лабораторной работе предполагается проведение относительных измерений, т.е. измерение разности антенных температур при различных положениях антенны относительно излучателя (снятие диаграммы направленностей) или при различных расстояниях между излучателем и антенной (снятие распределения поля вдоль оси).

В экспериментальной установке мы имеем дело с излучением и приемом шумового сигнала. Отношение мощности принимаемого сигнала на входе радиометра ( $T_A \sim 10^4$  К) к его чувствительности  $\Delta T_{\text{min}} = 0,2$  К, т.е. отношение сигнал/шум, в данном эксперименте очень велико, поэтому регистрируемые сигналы не требуют статистической обработки.

В радиоастрономии и радиометрии удобно выражать измеряемую мощность в температурах, поэтому температурные единицы следует употребить и в данной работе. Зависимость между интенсивностью и соответствующей температурой дает закон Рэлея-Джинса:  $I_\lambda = \frac{2k}{\lambda^2} T$ , где  $k$  - постоянная Больцмана. Определение температуры принимаемого сигнала делается при сравнении его с температурой генератора шума  $T_{\text{гшр}} = 20$  К:  $T_c = \frac{n_c}{n_{\text{гш}}} T_{\text{гшр}}$  где  $n_c$  и  $n_{\text{гш}}$  - отсчеты на ленте самописца величины сигнала и выхода от ГШр.

## 2.4. Упражнения

Приведение экспериментальной установки в рабочее состояние.

Для приведения экспериментальной установки в рабочее состояние необходимо включить в сеть:

1. блок питания генератора шума излучателя,
2. блоки управления и индикации положения антенны,

3. радиометр,

4. самописец КСП-4.

Для нормальной работы радиометра и генератора шума необходим прогрев в течение получаса, т.е. они должны быть включены за 30 минут до начала измерений.

На передней панели радиометра выведены регулировки режима работы прибора, их нужно установить в нужное положение. Для этого ручкой "смещение нуля" установить положение каретки самописца в нужное на диаграммной ленте положение. Кнопкой включить постоянную времени

$\tau = 1$  с. С помощью кнопочных переключателей подобрать нужный масштаб записи: при изменении температуры антенны от минимальной до максимальной запись сигнала должна уменьшаться на диаграммной ленте самописца. Сделать тепловую калибровку прибора, включить ПИ радиометра. Предлагается сделать следующие измерения.

1. Измерить распределение поля в фокусе зеркала. Для этого нужно установить излучатель в наиболее удаленное положение. Перемещая облучатель вдоль оси зеркала, записать на ленте самописца график приносимой мощности в зависимости от расстояния облучателя до главного фокуса зеркала. Выразив расстояние в длинах волн, построить график распределения мощности в фокусе зеркала.

2. Сфокусировать антенну на излучатель при наибольшем расстоянии между ними. Вычислить фазовую ошибку на краю зеркала.

3. Снять диаграмму направленности антенны по азимуту для E- и H-плоскостей облучателя. Определить полуширину диаграммы. Аппроксимировать диаграмму гауссовой кривой.

Для снятия диаграммы по азимуту нужно включить блок управления по азимуту. Отвести антенну на 12-15 градусов от направления на излучатель. Затем, включив режим сопровождения по скорости, вращать ан-

тенну излучателя и регистрировать на ленте самописца принимаемый сигнал в зависимости от координат антенны (координаты записать на ленте). Построить нормированную диаграмму и определить её полуширину.

4. Вычислить КНД антенны по главному лучу и оценить эффективную площадь антенны.

5. Снять распределение поля антенны вдоль оси параболоида при различных выносах облучателя ( $\delta = 0$  и  $\delta$  при фокусировке п. 2).

Для этого нужно медленно перемещать излучатель вдоль оси. Антенну установить в горизонтальном направлении, чтобы её ось была направлена на излучатель. На ленте самописца фиксировать величину выходного сигнала в зависимости от расстояния между излучателем и антенной. Расстояние нужно отсчитывать от раскрыва параболоида. На полученной кривой выделить область дифракции Френеля, определить при каких расстояниях мощность излучения меняется  $\sim R^2$ .

6. Вычислить, используя экспериментальную кривую п. 5, как меняется усиление антенны вдоль оси при выбранной величине  $\delta$ .

7. Измерить мощность принимаемого излучения. Для этого нужно сделать калибровку принятого сигнала по генератору шума радиометра.

Чтобы антенные измерения были качественны, необходимо обеспечить стабильность характеристик приборов: излучателя и радиометра. Для применяемой аппаратуры необходимая стабильность гарантирована. Но нестабильность может возникнуть из-за переотражения местными предметами. Поэтому не нужно, чтобы между антенной и излучателем находились какие-либо предметы или люди. При манипуляциях с антенной и излучателем люди должны находиться за ними.

## 2.5. Контрольные вопросы.

1. Определите предельную волну для данной антенны.
2. Зная КНД антенны, найдите её усиление.
3. Как экспериментально проверить, что вы измеряли: распределение напряжённости поля или мощности излучения?
4. Можно ли измерить боковые лепестки у данной антенны? Как это сделать и какая минимальная величина их амплитуды может быть измерена? Попробуйте измерить их и оценить ослабление по боковому излучению.
5. Какое угловое разрешение двух источников возможно в проделанном вами эксперименте?
6. Что будет с диаграммой направленности, если её снимать по протяжённому источнику?
7. Какова точность выставления антенны в заданном направлении?
8. Измерьте шумовую температуру антенны (см. гл. I).

## Л и т е р а т у р а

1. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. - М.: Наука, 1973.
2. Целкунов С., Фриис Г. Антенны. - М.: Сов. радио, 1955.
3. Методы измерений характеристик антенн СВЧ.-М.: Радио и связь, 1986.
4. Борн М., Вольф. Основы физической оптики. - М.: Наука, 1970.
5. Техническое описание и инструкция по эксплуатации радиометра. - Ереван: ИРФЭ АН Арм. ССР, 1981.
6. Бункин Ф.В., Карлов Н.В. К вопросу о чувствительности радиометров. - ЖТФ, 1955, т.25, №3, с.430-435; №4, с.733-741.
7. Краус Д.Д. Радиоастрономия. - М.: Сов. радио, 1973.

Дата поступления статьи

15 февраля 1986 г.

Казимир Станиславович Станкевич

РАДИОТЕЛЕСКОП

---

Подписано в печать 22.07.86 г. МЦ 00568. Формат 60x84/16.  
Бумага множительная. Печать офсетная. Объем 2,5 усл. печ. л.  
Тираж 120. Заказ 4395. Бесплатно.

---

Отпечатано на ротационте НИРФИ