

ШУМОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА АНТЕННЫ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600

Е. К. Майорова

Проведены теоретические исследования общей шумовой температуры антенны радиотелескопа РАТАН-600 и отдельных ее составляющих с учетом реального спадающего распределения поля в раскрыве облучателя. Получены эквивалентные яркостные температуры отдельных областей окружающего антенну пространства и проведены оценки вклада излучения этих областей в общую шумовую температуру радиотелескопа. Получены зависимости общей шумовой температуры антенны радиотелескопа РАТАН-600 от высоты наблюдаемого источника во всем рабочем диапазоне длин волн для основных режимов работы радиотелескопа.

Theoretical investigations are carried out the general noise temperature of the RATAN-600 radiotelescope antenna and of its separate components allowing for the real decreasing field distribution in the horn aperture. The equivalent brightness temperatures of separate areas round the antenna are obtained, and contribution of emissions of these areas into the general noise temperature of the radiotelescope is estimated. Relations of the general noise temperature of the radiotelescope antenna and the height of the observed source within the whole wavelength range for the main regimes of operation are determined.

Первые теоретические исследования шумовой температуры антенны радиотелескопа РАТАН-600 были проведены в работах [1, 2]. Основными результатами этих исследований были количественные оценки составляющих шумовой температуры антенны и выделение компонент, дающих основной вклад в шумовую температуру радиотелескопа. К ним относятся: шумы неба — в коротковолновой части рабочего диапазона длин волн (λ 1.35—3.9 см) и шумы, обусловленные наличием горизонтальной перископической системы, — в области длинных волн (λ 8—31 см). Исследования проводились в предположении равномерного распределения поля в раскрыве облучателя (вторичного зеркала, рис. 1).

В настоящей работе предпринята попытка оценить общую шумовую температуру антенны РАТАН-600 и отдельных ее составляющих для спадающего распределения поля в раскрыве облучателя. Последнее представляет интерес с точки зрения уточнения компонент шумовой температуры радиотелескопа, обусловленных переоблучением главного и плоского зеркал в вертикальной плоскости, а также получения эквивалентных яркостных температур окружающего фона.

Методика расчета шумовой температуры антенны радиотелескопа РАТАН-600. Основной особенностью радиотелескопа РАТАН-600 является наличие многозеркальной антенной системы: двухзеркальной в режиме АПП (антенны переменного профиля) [3] и трехзеркальной в режиме работы Южного сектора с плоским отражателем [4] (рис. 1).

Шумовую температуру такой системы можно представить как сумму шумовых температур входящих в нее зеркал. Поскольку зеркала не являются независимыми, а образуют горизонтальные перископические системы [4—6], характеризующиеся определенными значениями кнд, выражения для общей шумовой температуры антенны радиотелескопа могут быть записаны следующим образом:

$$T_A = T^* + \eta_{II} T_{гн} \eta_{обл} \text{ — режим АПП;} \\ T_A = T^* + \eta_{II1} (T_{гн} + \eta_{II2} T_{пл}) \eta_{обл} \text{ — режим Юг+Плоский,} \quad (1)$$

где $T_{гл}$, $T_{пл}$, T^* — шумовые температуры соответственно главного зеркала, плоского отражателя и облучателя перископической системы; $\eta_{п, пл}$ — КПД перископической системы главное—вторичное зеркало, $\eta_{п2}$ — КПД перископической системы плоское—главное—вторичное зеркало.

В соответствии с конструкцией облучателя перископической системы, который представляет собой несимметричный параболический цилиндр, в фокальной линии которого располагаются приемные рупора, шумы его будут складываться из двух составляющих. К первым относятся шумы, обусловленные переоблучением несимметричного параболического цилиндра, попадающие на вход приемного устройства через боковые лепестки и рассеянный фон диаграммы направленности (ДН) приемного рупора ($T_{обл}$), вторые — связаны с ДН самого несимметричного параболического цилиндра — вторичного зеркала ($T_{вт}$):

$$T^* = T_{обл} + \eta_{обл} T_{вт},$$

где $\eta_{обл}$ — коэффициент переоблучения вторичного зеркала, характеризующий долю мощности, излучаемую рупором, которая попадает на раскрыт вторичного зеркала.

При расчете шумовой температуры антенны необходимо также учесть, что главное и плоское зеркала не являются сплошными, а состоят из отдельных отражающих элемен-

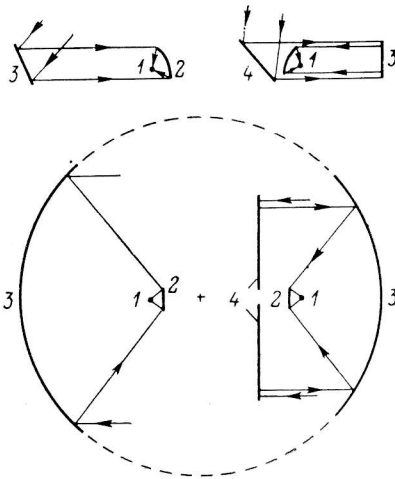


Рис. 1. Схематическое изображение радиотелескопа РАТАН-600.

1 — приемный рупор; 2 — вторичное зеркало; 3 — главное зеркало; 4 — плоское зеркало.

тов, между которыми имеется свободное пространство (щели), излучение которого дает дополнительный вклад в шумовую температуру антенны.

С учетом этих особенностей антенны РАТАН-600 выражения (1) переписутся в виде: режим АПП

$$T_A = T_{обл} + \eta_{обл} \eta_{щ} [T_{вт} + \eta_{п} T_{гл}] + T_{щ} \eta_{п} \eta_{обл};$$

режим Юг+Плоский

$$T_A = T_{обл} + \eta_{обл} \eta_{щ1} [T_{вт} + \eta_{п1} \eta_{щ2} (T_{гл} + \eta_{п2} T_{пл})] + T_{щ1} \eta_{п1} \eta_{обл} + T_{щ2} \eta_{обл} \eta_{п2} \eta_{п1} \eta_{щ1}, \quad (2)$$

где $\eta_{щ1}$, $\eta_{щ2}$ — коэффициенты, характеризующие долю мощности вторичного зеркала (главного зеркала), уходящую в пространство между щитами главного зеркала (плоского зеркала); $T_{щ1}$, $T_{щ2}$ — шумовая температура, обусловленная излучением пространства между щитами главного (плоского) зеркала.

Как известно [6], шумовая температура антенны без потерь, окруженная пространством с некоторым распределением яркостной температуры $T_a(\varphi, \theta)$, определяется выражением

$$T_A(\varphi_0, \theta_0) = \int_{4\pi} T_a F d\Omega \bigg/ \int_{4\pi} F d\Omega, \quad (3)$$

где $F(\varphi - \varphi_0, \theta - \theta_0)$ — диаграмма направленности антенны по мощности; θ_0, φ_0 — угол места и азимут направления максимального излучения антенны.

Проведем некоторые преобразования формулы (3), для чего разобьем окружающее данное зеркало пространство на отдельные области, в которых распределение яркостной температуры окружающего фона подчиняется определенному закону или имеются источники излучения одной природы. Тогда

$$T_A = \sum_i^N \frac{\int_{\Omega_i} T_a^i F d\Omega}{\int_{\Omega_i} F d\Omega} \frac{\int_{\Omega_i} F d\Omega}{\int_{4\pi} F d\Omega} = \sum_i^N T_a^i \eta_i, \quad (4)$$

где Ω_i — телесные углы областей с вышеперечисленными свойствами; η_i — доля мощности, излучаемая антенной в данном телесном угле ДН антенны; T_s^i — эквивалентная яркостная температура фонового излучения, принимаемого антенной в телесном угле Ω_i .

Для определения шумовой температуры зеркала по формуле (4) необходимо прежде всего разбить окружающее данное зеркало пространство на отдельные области с характерными излучающими свойствами. Следует отметить, что в ряде случаев это разбиение удобно проводить, исходя из структуры ДН зеркала, разбивая, например, пространство на область главного и область боковых лепестков [5]. Возможно также разбиение пространства на область полного луча $\Omega_{пол}$, охватывающего главный и несколько ближних боковых лепестков и составляющего неизотропную часть ДН антенны, и область, где распределение мощности в среднем приближается к равномерному по величине и изотропно распределенному в пространстве, — область рассеянного фона Ω_p .

При расчете шумовой температуры главного зеркала в режиме АПП и плоского — в режиме Юг+Плоский, пространство, окружающее эти зеркала,

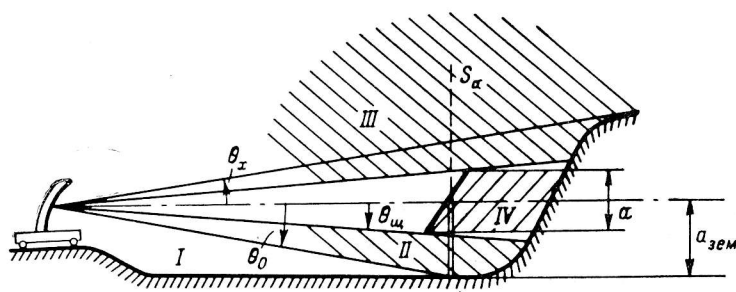


Рис. 2. Схема областей, дающих основной вклад в шумовую температуру антенны радиотелескопа.

разбивается таким способом. Шумовая температура зеркал в этом случае определяется по формуле

$$T_i = T_s^{пол} \eta_{пол} + T_s^p \eta_p, \quad (5)$$

где $T_s^{пол}$ — эквивалентная яркостная температура фона в области полного луча ДН данного зеркала; T_s^p — эквивалентная яркостная температура в области рассеянного фона ДН антенны; $\eta_{пол}$ — доля энергии, заключенная в области полного луча ДН; η_p — доля энергии, заключенная в рассеянном фоне ДН.

Аналогичная процедура применяется и при расчете шумовой температуры вторичного зеркала и главного зеркала в режиме Юг+Плоский. Однако это лишь первый этап расчета шумовой температуры этих зеркал. Далее, для расчета шумовой температуры, обусловленной приемом излучения в полном луче ДН зеркала, разбиение пространства в этой области осуществляется, исходя из характера распределения яркостной температуры окружающего фона. Здесь можно выделить четыре области: I — область основной площадки радиотелескопа, II — между нижним краем щитов и поверхностью земли, III — над щитами, IV — за главным зеркалом (рис. 2).

Основными источниками излучения в этих областях являются: в областях I, IV — излучение земной поверхности, в области II — излучение фундаментов щитов, в области III — излучение холмов за главным зеркалом и излучение атмосферы Земли.

При таком разбиении шумовые температуры этих зеркал в области полного луча их ДН будут определяться выражением

$$T_i = T_s^I \eta_I + T_s^{II} \eta_{II} + T_s^{III} \eta_{III}, \quad i = \text{вт, гл}, \quad (6)$$

где T_s^I , T_s^{II} , T_s^{III} — эквивалентные яркостные температуры областей I, II, III; η_I , η_{II} , η_{III} — доли мощности, излучаемые в эти области.

Шумовая температура главного зеркала в режиме АПП и плоского зеркала в режиме Юг+Плоский. Расчет шумовой температуры главного зеркала в режиме АПП проводится по формуле (5), где

$$T_{\text{пол}}^{\text{р}} = \int_{\Omega_{\text{пол}}} T_{\text{я}} F_i d\Omega \bigg/ \int_{\Omega_{\text{пол}}} F_i d\Omega; \quad \eta_{\text{пол}} = \int_{\Omega_{\text{пол}}} F_i d\Omega \bigg/ \int_{4\pi} F_i d\Omega;$$

$$T_{\text{р}}^{\text{р}} = \int_{\Omega_{\text{р}}} T_{\text{я}} F_i d\Omega \bigg/ \int_{\Omega_{\text{р}}} F_i d\Omega; \quad \eta_{\text{р}} = \int_{\Omega_{\text{р}}} F_i d\Omega \bigg/ \int_{4\pi} F_i d\Omega, \quad i = \text{гл, пл}$$

Основными источниками шума в области полного луча ДН главного зеркала в режиме АПП и плоского зеркала в режиме Юг+Плоский являются космические источники и атмосфера Земли с яркостными температурами $T_{\text{к}}$ и $T_{\text{атм}}$ соответственно.

Основная часть наблюдаемого фона космического радиоизлучения обусловлена излучением межзвездной среды в Галактике и метagalacticким фоном. На частотах 1—3 ГГц галактическим излучением можно пренебречь по сравнению с другими составляющими [7]. Составляющую яркостной температуры $T_{\text{к}}$, обусловленную излучением Метagalacticки в диапазоне миллиметровых—дециметровых волн, можно считать постоянной и равной 2.7 К.

Достаточно сильным источником тепловых шумов является атмосфера Земли, в частности входящие в нее водяные пары и кислород. При малых поглощениях, в приближении плоскостной атмосферы, ее яркостная температура пропорциональна косекансу угла возвышения h :

$$T_{\text{атм}}(h) = T_{\text{атм}}(90^\circ) / \sin h.$$

С учетом областей, где поглощение атмосферы не мало ($h < 5^\circ$), $T_{\text{атм}}$ можно аппроксимировать функцией [1]

$$T_{\text{атм}}(h) = T_{\text{атм}}(90^\circ) \left(\sin h + \frac{T_{\text{атм}}(90^\circ)}{T_{\text{атм}}(0^\circ)} \cos h \right).$$

Расчет и экспериментальное исследование яркостной температуры атмосферы в зените $T_{\text{атм}}(90^\circ)$ проводилось в ряде работ. В настоящих расчетах используются результаты, полученные Хоггом для стандартной атмосферы [8], которые хорошо согласуются с экспериментальными данными [9]. Для более точных оценок яркостной температуры атмосферы в коротковолновом диапазоне волн, где $T_{\text{атм}}(90^\circ)$ сильно зависит от влажности, необходимы более точные данные о метеопараметрах атмосферы.

Для оценок $T_{\text{пол}}^{\text{р}}$ и $T_{\text{р}}^{\text{р}}$ используются результаты теоретических и экспериментальных исследований ДН радиотелескопа, изложенные в работах [10—12].

Для оценок размеров рассеянного фона и доли энергии, заключенной в нем, можно использовать следующие соотношения [13]:

$$\theta_{0.5} = 0.53 \frac{\lambda}{l}; \quad \eta_{\text{пол}} = (1 - \eta_{\text{р}}) = e^{-\left(4\pi \frac{\sigma}{\lambda} \cos \frac{h}{2}\right)^2},$$

где $\theta_{0.5}$ — полуширина рассеянного фона, задаваемого гауссианой; σ — среднеквадратичная ошибка поверхности зеркала; l — радиус корреляции ошибки.

Основными ошибками являются: ошибки поверхности отдельных отражающих элементов зеркал $\sigma_1 = 0.3 \div 0.45$ мм [14] с $l_1 = 20$ см, ошибки, связанные с точностью установки элементов, и более крупномасштабные ошибки $\sigma_2 = 0.5 \div 1.0$ мм с $l_2 = 2$ м (размер щита) и более.

Расчеты показали, что шумовая температура главного зеркала в режиме АПП и плоского зеркала в режиме Юг+Плоский с точностью до долей процента совпадает с яркостной температурой неба в направлении максимума ДН радиотелескопа. Вывод этот полностью согласуется с выводом, полученным в работе [2].

Шумовая температура вторичного зеркала радиотелескопа РАТАН-600. Оценим величину шумов, принимаемых вторичным зеркалом в области полного луча его ДН и обусловленных наличием горизонтальной перископической

системы вторичное—главное зеркало. Вопрос о влиянии на шумовую температуру радиотелескопа поля рассеяния вторичного зеркала, обусловленного неточностью изготовления его отражающей поверхности, достаточно подробно рассмотрен в работах [1, 2]. Показано, что при существующей среднеквадратичной ошибке поверхности вторичного зеркала $\sigma=0.1\div 0.2$ мм и радиусе корреляции $l=25$ см величина этой составляющей шумовой температуры оказывается меньше 1 К.

Расчет шумовой температуры вторичного зеркала в области полного луча его ДН $T_{вт}$ проводится по формуле (6), где

$$T_{\theta}^i = \frac{\int_{\Omega_i} T_{\theta}^i F_{вт} d\Omega}{\int_{\Omega_i} F_{вт} d\Omega}; \quad \eta_i = \frac{\int_{\Omega_i} F_{вт} d\Omega}{\int_{4\pi} F_{вт} d\Omega}, \quad i = I, II, III,$$

$F_{вт}$ — ДН вторичного зеркала по мощности; T_{θ}^i , T_{θ}^i — яркостная и эквивалентная яркостная температура i -й области.

Найдем эквивалентные яркостные температуры областей I—III. Область I (рис. 2) — область основной площадки радиотелескопа, которая представляет собой довольно шероховатую поверхность, покрытую в зависимости от времени года травой или снегом. Яркостная температура элемента такой поверхности зависит от характера покрова, длины волны, на которой проводятся измерения, а также от угла места элемента поверхности θ .

В работе [15] показано, что если размеры неровностей поверхности Δz удовлетворяют условию

$$\Delta z < \lambda/10 \sin \theta, \quad (7)$$

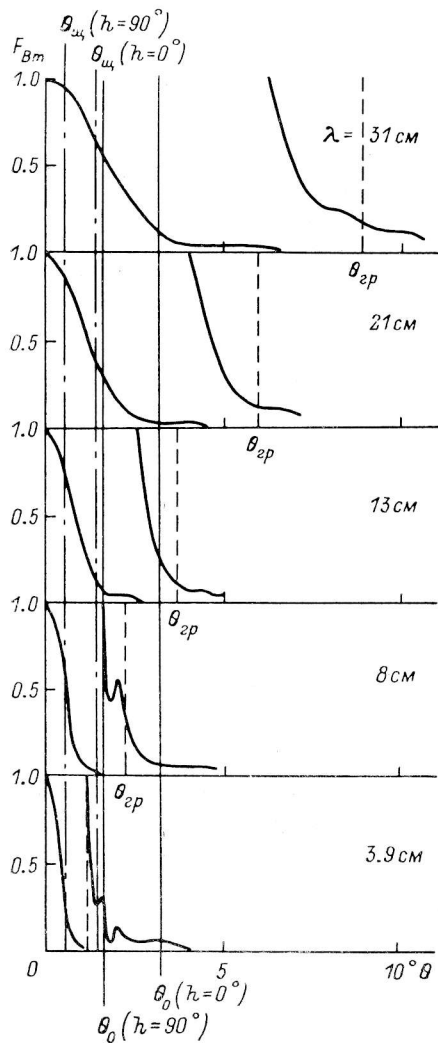


Рис. 3. Распределение мощности на вертикальной плоскости S_{α} , проходящей через внутренний раскрыв главного зеркала (Северный сектор).

то расчет доли энергии, поглощаемый элементом поверхности, можно проводить, используя коэффициенты Френеля, выведенные для однородной и равномерной поверхности.

При расчете эквивалентной яркостной температуры области I основная площадка радиотелескопа разбивается на две части: область, где выполняется условие (7), и область, где это условие не выполняется. На рис. 3 показаны распределения мощности поля $F_{вт}(\theta)$ на вертикальной плоскости S_{α} (рис. 2), проходящей через внутренний раскрыв главного зеркала, для волн 4, 8, 13, 21 и 31 см. Распределения приведены для центрального сечения антенны. Угол θ отсчитывается от горизонтальной линии, соединяющей центры раскрывов вторичного и главного зеркал. Сплошными вертикальными линиями обозначены углы θ_0 , под которыми видна линия пересечения вертикальной плоскости S_{α} с поверхностью основной площадки радиотелескопа при установке антенны на высоты источников 0 и 90° , штриховой линией — угол $\theta_{гр}$, под которым видна граница области, где выполняется условие (7), при максимальных размерах неровностей основной площадки радиотелескопа $\Delta z=20$ см.

Расчет $F_{\text{вт}}(\theta)$ проводился в приближении дифракции Френеля, исходя из распределения поля на раскрыве вторичного зеркала, которое, в свою очередь, рассчитывалось из ДН приемного рупора [16, 17]. На поверхности основной площадки радиотелескопа распределение поля определялось путем интерполяции распределения $F_{\text{вт}}(\theta)$.

В области $\theta_0 < \theta < \theta_{\text{гр}}$ яркостная температура области I рассчитывалась по формуле

$$T_{\text{я}}^{\text{I}} = T_0 (1 - P_{\text{г, в}}^2), \quad (8)$$

где $T_0 = 300$ К; $P_{\text{в, г}}$ — коэффициенты отражения Френеля для вертикально и горизонтально поляризованных волн.

В области $\theta > \theta_{\text{гр}}$ яркостная температура поверхности принималась равной 280—300 К [18, 19].

Очевидно, что для волн $\lambda \leq 8$ см $T_{\text{я}}^{\text{I}} = T_{\text{я}}^{\text{I}}$. Для волн $\lambda > 8$ см $T_{\text{я}}^{\text{I}}$ рассчитывалась по формуле

$$T_{\text{я}}^{\text{I}} = \left[\int_{\theta_{\text{гр}}}^{\theta_0} T_{\text{я}}^{\text{I}} F_{\text{вт}}(\theta) d\theta + T_0 \int_{-\pi/2}^{\theta_{\text{гр}}} F_{\text{вт}}(\theta) d\theta \right] / \int_{-\pi/2}^{\theta_0} F_{\text{вт}}(\theta) d\theta.$$

Результаты расчетов $T_{\text{я}}^{\text{I}}$ в области I для $T_{\text{я}}^{\text{I}} = 0.5 (T_{\text{я}}^{\text{I}} + T_{\text{я}}^{\text{I}})$, диэлектрической проницаемости почвы $\epsilon = 5$ приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1

T, К	λ, см			Режим
	13	21	31	
$T_{\text{я}}^{\text{I}}$	100—136	90—105	70—80	АПП
$T_{\text{я}}^{\text{I}}$	100—130	90—100	70—80	Юг+Плоский

В области II основными источниками излучения являются бетонные опоры (фундаменты) щитов, яркостная температура которых лежит в пределах 260—300 К. Нижняя граница получена по формуле (8) в предположении, что выполняется условие (7). Верхняя граница соответствует предположению, что фундаменты из-за многочисленных переотражений, которые могут иметь место в этой области, излучают как абсолютно черное тело. Кроме того, в этой области выполняется условие $T_{\text{я}}^{\text{II}} \approx T_{\text{я}}^{\text{II}}$.

Источниками излучения в области III являются холмы за главным зеркалом и атмосфера Земли. Постоянную составляющую излучения дают космические источники (2.7 К). Эквивалентная яркостная температура области III рассчитывается по формуле

$$T_{\text{я}}^{\text{III}} = \frac{\int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} d\varphi \int_0^{\theta_x} T_x F_{\text{вт}}^{\text{III}}(\theta) d\theta + \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} d\varphi \int_{\theta_x}^{\pi/2} (T_{\text{атм}} + T_{\text{к}}) F_{\text{вт}}^{\text{III}}(\theta) d\theta}{\int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} d\varphi \int_0^{\pi/2} F_{\text{вт}}^{\text{III}}(\theta) d\theta}, \quad (9)$$

где T_x — яркостная температура холмов за главным зеркалом; θ_x — угол закрытия холмов; $F_{\text{вт}}^{\text{III}}$ — ДН вторичного зеркала в области III.

Расчет $F_{\text{вт}}^{\text{III}}$ осуществлялся с помощью преобразования Фурье от распределения поля на вертикальной плоскости S_{α} , проходящей через внутренний раскрыв главного зеркала выше кромки щитов. Распределение это рассчитывалось в приближении дифракции Френеля, исходя из распределения поля в раскрыве вторичного зеркала [16]. Расчеты проводились методами численного интегрирования с помощью ЭВМ.

Что касается яркостной температуры холмов, то поскольку электрические свойства земного покрова в этой области далеко не однозначны и могут сильно

меняться как от сезона к сезону, так и от направления на различные участки холмов, рассмотрим два случая. Свойства излучающей земной поверхности в области холмов приближаются к свойствам абсолютно черного тела. Примером могут служить склоны, покрытые густой растительностью, при не слишком малых углах скольжения. В этом случае $T_0 = 290$ К [18].

Во втором случае поверхность Земли можно считать достаточно гладкой, так что выполняется соотношение (7). Тогда T_x рассчитывается по формуле (8). Расчет проводится для значений диэлектрической проницаемости почвы $\epsilon = 5$ и 20.

Пределы интегрирования в формуле (9) зависят от величины угла закрытия холмов θ_x . Значения его в зависимости от азимутального угла φ были измерены для всех четырех секторов радиотелескопа и приведены на рис. 4.

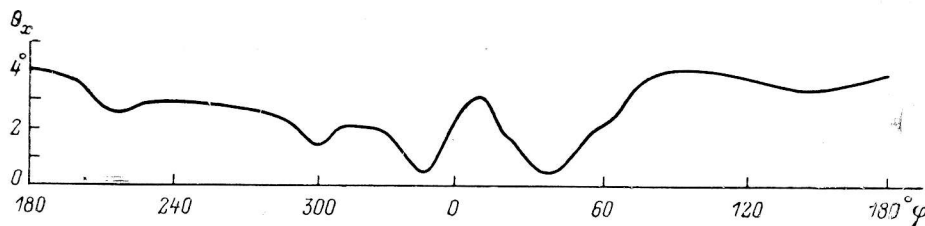


Рис. 4. Зависимость углов закрытия холмов θ_x в области III от азимутального угла φ .

Результаты расчетов $T_{\text{в}}^{\text{III}}$ и $F_{\text{в}}^{\text{III}}$ приведены на рис. 5 и в табл. 2. Из рис. 5 видно, что с увеличением длины волны имеет место расширение ДН вторичного зеркала в области III и разворот ее от поверхности Земли. Этот эффект приводит к увеличению вклада излучения атмосферы в общее излучение, приходящее из области III, и снижению ее эквивалентной яркостной температуры на длинных волнах.

Аналогичным образом были рассчитаны эквивалентные яркостные температуры областей I—III при работе радиотелескопа с плоским отражателем. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2

$T_{\text{в}}^{\text{III}}, \text{K}$	$\lambda = 8 \text{ см}$			$\lambda = 13 \text{ см}$			$\lambda = 21 \text{ см}$			$\lambda = 31 \text{ см}$		
	10°	50°	90°	10°	50°	90°	10°	50°	90°	10°	50°	90°
Область за главным зеркалом в режиме АПП												
$T_x = 290 \text{ K}$	150	170	214	125	159	185	118	124	157	90	95	124
$\epsilon = 5$	127	143	180	106	134	157	100	104	132	76	80	102
$\epsilon = 20$	100	110	134	80	100	117	76	79	100	60	63	78
Область за главным зеркалом в режиме Юг + Плоский												
$T_x = 290 \text{ K}$	240			217			192			175		
$\epsilon = 5$	204			185			163			149		
$\epsilon = 20$	152			138			122			110		

Расчет коэффициентов $\eta_I, \eta_{II}, \eta_{III}$, характеризующих доли мощности, излучаемые вторичным зеркалом в областях I, II, III, проводился, исходя из значений КПД перископической системы вторичное—главное зеркало η_{II} и вспомогательного коэффициента, характеризующего отношение мощностей, излучаемых вторичным зеркалом в область II и в область раскрыва главного зеркала, η^* :

$$\eta^* = \frac{\int_{-a/2}^{-a/2} |E_a(y_a)|^2 dy_a}{\int_{-a/2}^{a/2} |E_a(y_a)|^2 dy_a} = \eta_{II}/\eta_{III}$$

Связь между η_I , η_{II} , η_{III} и КПД перископической системы η_n очевидна:

$$\eta_I + \eta_{II} + \eta_{III} = 1 - \eta_n.$$

Если, кроме того, учесть, что с достаточной степенью точности (3–5 %) распределение поля на вертикальном раскрыве главного зеркала можно считать симметричным, получим

$$\eta_I + \eta_{II} = \eta_{III} = (1 - \eta_n)/2.$$

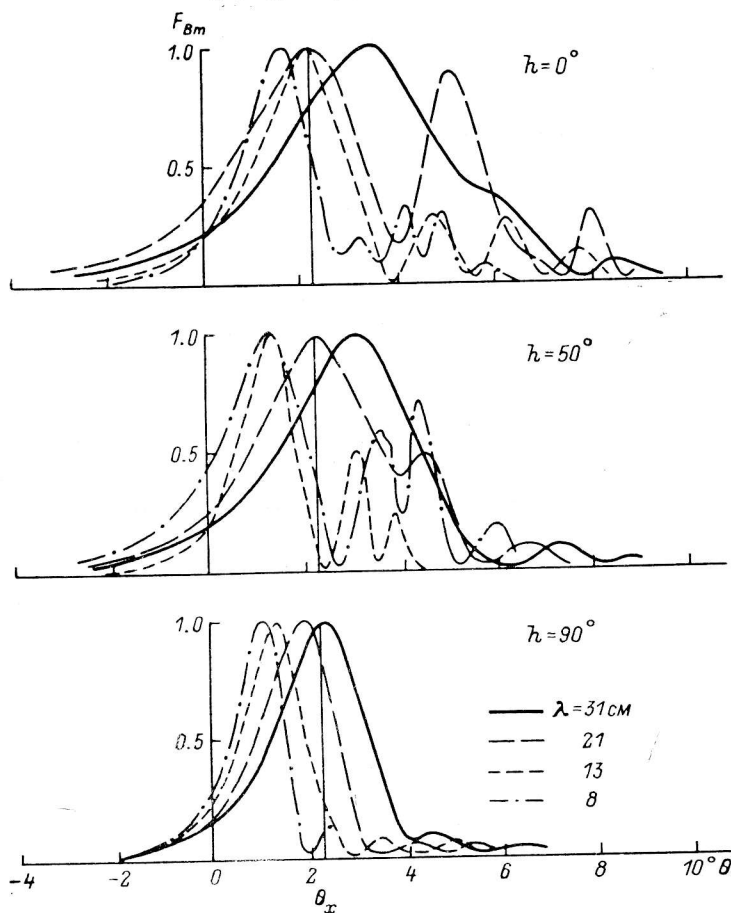


Рис. 5. Диаграмма направленности вторичного зеркала в вертикальной плоскости в области III ($\varphi=0^\circ$).

Тогда выражения для компонент шумовой температуры $T_{вт}^I$, $T_{вт}^{II}$, $T_{вт}^{III}$ запишутся в виде

$$T_{вт}^{III} = T_0^{III} (1 - \eta_n)/2; \quad (10)$$

$$T_{вт}^I + T_{вт}^{II} = T_0 (1 - \eta_n)/2; \quad (11)$$

$$T_{вт}^I = T_0^I \eta_n \eta^*; \quad (12)$$

$$T_{вт}^{II} = T_0 (1 - \eta_n)/2 - T_0^I \eta_n \eta^*. \quad (13)$$

Для волн $\lambda \leq 8$ равенство (11) очевидно, поскольку эквивалентные яркостные температуры областей I и II в этом диапазоне волн практически совпадают. Для волн $\lambda > 8$ см справедливость этого равенства становится очевидной из следующих рассуждений. Электромагнитная волна единичной амплитуды, падая на поверхность основной площадки радиотелескопа в области, где выполняется условие (7), частично поглощается, частично (в соответствии с законами отражения Френеля) переотражается в область II, температура

которой близка к температуре абсолютно черного тела. Поглощаясь там, она увеличивает излучательную способность области II. Вследствие малости углов падения практически все волны, отразившись от поверхности основной площадки радиотелескопа в области $\theta_0 < \theta < \theta_{гп}$, попадут в область фундаментов главного зеркала. Таким образом, энергетически эти области можно рассматривать как единую область с эквивалентной яркостной температурой T_0 .

Такой подход позволяет упростить расчет общей шумовой температуры вторичного зеркала $T_{вт}$ и в конечном счете шумовой температуры радиотелескопа, связанной с переоблучением главного зеркала в вертикальной плоскости, $T_{п}$. Из формул (10), (11) получаем следующие соотношения для $T_{вт} = T_{п}$:

$$T_{п} = T_0 (1 - \eta_{п}), \text{ где } T_0 = (T_0^{III} + T_0)/2.$$

При расчете общей шумовой температуры вторичного зеркала и отдельных ее составляющих использовались результаты расчета кнд перископической системы вторичное—главное зеркало, выполненные с помощью как двумерной [5], так и трехмерной моделей [16] перископической системы. Последняя учитывает ряд особенностей фокусирующей системы антенны радиотелескопа, которые не были учтены в двумерной модели, такие как некоторое различие характера вертикального распределения поля в раскрыве главного зеркала в разных радиальных сечениях антенны, неодинаковость расстояний между главным и вторичным зеркалом в разных радиальных сечениях и др. Как показали оценки, на коротких волнах с достаточной степенью точности может быть использована двумерная модель перископической системы для расчетов $T_{вт}$.

ТАБЛИЦА 3

T, К	$\lambda = 2$ см			$\lambda = 4$ см			$\lambda = 8$ см			$\lambda = 13$ см			$\lambda = 21$ см			$\lambda = 31$ см		
	10°	50°	90°	10°	50°	90°	10°	50°	90°	10°	50°	90°	10°	50°	90°	10°	50°	90°
$T_{вт}^I$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	2	2	5	3	3	10
$T_{вт}^{II}$	1	1	7	2	2	12	6	8	28	8	14	52	19	32	68	37	53	78
$T_{вт}^{III}$	1	1	7	2	2	12	4	5	20	4	8	30	8	13	35	11	17	33
$T_{вт}$	2	2	14	4	4	24	10	13	48	13	23	84	29	47	108	51	73	121
$T_{гп}$	32	9	8	18	6	5	16	5	4	15	5	3	13	4	2	8	2	1

В табл. 3 приведены значения компонент $T_{вт}^I$, $T_{вт}^{II}$, $T_{вт}^{III}$, рассчитанные для режима работы радиотелескопа с одним сектором (режим АПП) и для режима Юг+Плоский (табл. 5).

Из расчетов следует, что основная доля шумов обусловлена излучением областей II, III, и величина их тем больше, чем длиннее волна. Вклад излучения основной площадки радиотелескопа в шумовую температуру компоненты $T_{вт}$ на волнах $\lambda \leq 8$ см не превышает 1 К, на длинных волнах ($\lambda > 8$ см) — 10 К.

Шумовая температура главного зеркала в режиме работы радиотелескопа с плоским отражателем. Расчет шумовой температуры главного зеркала в режиме работы радиотелескопа с плоским отражателем $T_{гп}$ проводится по формулам (5), (6).

Шумовую температуру, обусловленную полем рассеяния главного зеркала, можно оценить, задаваясь среднеквадратичной ошибкой поверхности главного зеркала, радиусом корреляции ошибки, и используя результаты расчетов, приведенные в работе [1]. При существующей среднеквадратичной ошибке поверхности главного зеркала величина этой составляющей шумовой температуры не превышает 1 К.

При расчете шумовой температуры главного зеркала в области полного луча его ДН рассматриваются области: а) область основной площадки радиотелескопа — I; б) область фундаментов под щитами плоского отражателя — II; в) область над щитами плоского отражателя — III.

Методика расчета эквивалентных яркостных температур этих областей аналогична рассмотренной в предыдущем разделе. При вычислении значений $T_{\text{э}}^{\text{I}}$ и $T_{\text{э}}^{\text{III}}$ вместо ДН вторичного зеркала используется ДН главного зеркала в режиме работы с плоским отражателем, которая рассчитывается в приближении дифракции Френеля, исходя из распределения поля на раскрыве главного зеркала, для области I [16]. В области III ДН главного зеркала связана преобразованием Фурье с распределением поля на вертикальной плоскости, проходящей через раскрыв плоского зеркала выше кромки щитов. Все расчеты проводятся методами численного интегрирования с помощью ЭВМ. Результаты расчета эквивалентных яркостных температур областей I, III приведены в табл. 1, 4.

ТАБЛИЦА 4

$T_{\text{э}}^{\text{III}}, \text{K}$	$\lambda = 8 \text{ см}$			$\lambda = 13 \text{ см}$			$\lambda = 21 \text{ см}$			$\lambda = 31 \text{ см}$		
	10°	50°	90°	10°	50°	90°	10°	50°	90°	10°	50°	90°
$T_x = 290 \text{ K}$	100	126	160	80	105	140	60	71	110	40	55	90
$\epsilon = 5$	85	107	136	68	90	119	51	60	93	34	46	77
$\epsilon = 20$	63	80	100	50	67	89	38	45	69	25	34	57

Стоит отметить, что в отличие от фундаментов главного зеркала, представляющих собой практически сплошные поверхности из бетона, фундаменты плоского отражателя выполнены в виде металлических балки опор. Электромагнитные волны, отраженные от поверхности основной площадки радиотелескопа, могут свободно проходить между их металлическими конструкциями в пространство с более низкими шумовыми температурами. Это приводит к снижению вклада этих волн в излучение области II.

Для простоты расчетов предположим, что отраженные от основной площадки радиотелескопа волны, пройдя между металлическими конструкциями фундаментов, попадут в области с достаточно низкими яркостными температурами, так что их вкладом в шумовую температуру области II можно совсем пренебречь, что, вообще говоря, является некоторой идеализацией. Чтобы скомпенсировать возникающую при такой идеализации ошибку в определении шумовой температуры области II, положим ее яркостную температуру более высокой, чем она является в действительности, $T_{\text{э}}^{\text{II}} = T_{\text{э}}^{\text{II}} = 260 \div 300 \text{ K}$.

Учитывая вышеприведенные рассуждения, а также связь между кдд перископической системы главное—плоское зеркало $\eta_{\text{п2}}$ и коэффициентами η_{I} , η_{II} , η_{III} , получим:

$$\eta_{\text{I}} = (1 - \eta_{\text{п2}})/2 - \eta_{\text{п2}}\eta^*;$$

$$\eta_{\text{II}} = \eta_{\text{п2}}\eta^*; \quad \eta_{\text{III}} = (1 - \eta_{\text{п2}})/2,$$

где η^* — вспомогательный коэффициент, характеризующий отношение мощностей, излучаемых главным зеркалом в область II и на раскрыв плоского зеркала. Значения кдд перископической системы главное—плоское зеркало получены в работе [4], значения η^* рассчитывались с помощью ЭВМ методами численного интегрирования.

Используя полученные значения яркостных температур областей I—III и значения коэффициентов η_{I} , η_{II} , η_{III} , по формуле (6) мы рассчитали значения компонент шумовой температуры главного зеркала $T_{\text{гд}}^{\text{I}}$, $T_{\text{гд}}^{\text{II}}$, $T_{\text{гд}}^{\text{III}}$ в режиме работы радиотелескопа с плоским отражателем и ее общее значение $T_{\text{гд}}$. Результаты расчетов приведены в табл. 5.

Расчеты показали, что основными источниками шумов являются: на коротких волнах — области фундаментов и холмов за плоским зеркалом, на длинных волнах — области фундаментов, холмов и основной площадки радиотелескопа, причем вклад области II может в 1.5—2 раза превосходить вклад областей I, III в шумовую температуру $T_{\text{гд}}$ на длинных волнах.

Расчет компоненты шумовой температуры радиотелескопа, обусловленной переоблучением вторичного зеркала. Оценим величину шумов, обусловленных переоблучением вторичного зеркала и попаданием в ДН приемного рупора

Т А Б Л И Ц А 5

T, К	λ = 2 см			λ = 4 см			λ = 8 см			λ = 13 см			λ = 21 см			λ = 31 см		
	10°	50°	90°	10°	50°	90°	10°	50°	90°	10°	50°	90°	10°	50°	90°	10°	50°	90°
T_{BT}^I	0			0			0			2			3			7		
T_{BT}^{II}	5			5			7			8			18			33		
T_{BT}^{III}	5			5			5			7			13			22		
T_{BT}	10			10			12			17			34			62		
$T_{ГЛ}^I$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	6	6	6	7	6	6	5
$T_{ГЛ}^{II}$	1	1	3	2	2	6	5	8	17	10	14	15	9	12	18	8	11	23
$T_{ГЛ}^{III}$	1	1	3	2	2	6	2	3	7	4	6	13	5	7	13	4	6	9
$T_{ГЛ}$	2	2	6	4	4	12	7	11	25	16	22	34	20	25	38	18	23	37
$T_{ПЛ}$	30	8	7	16	5	4	13	4	4	11	4	3	8	3	2	6	2	1

излучения атмосферы Земли, опор и фундаментов главного зеркала и поверхности основной площадки радиотелескопа.

В работе [20] приведена схема облучения вторичного зеркала, из которой видно, что часть мощности приемного рупора уходит за края вторичного зеркала, что приводит к появлению дополнительных шумов на входе радиоприемного устройства радиотелескопа.

Оценка этих шумов проводится по формуле

$$T_{обл} = \frac{\int_{\Omega_B} T_{атм}(\theta, \varphi) F(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi + T_0 \int_{\Omega_H} F(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}{\int_{4\pi} F(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi},$$

где F — ДН приемного рупора по мощности; T_0 — яркостная температура фундаментов, холмов и основной площадки радиотелескопа, которая задается постоянной и равной 300 К; Ω_B — телесный угол, ограничивающий контур вторичного зеркала в верхней полуплоскости; Ω_H — телесный угол, ограничивающий контур вторичного зеркала в нижней полуплоскости. Границей верхней и нижней полуплоскости является фокальная линия вторичного зеркала.

Коэффициент переоблучения вторичного зеркала $\eta_{обл}$ рассчитывается по формуле

$$\eta_{обл} = \frac{\int_{\Omega_{обл}} F(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}{\int_{4\pi} F(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}.$$

Приемный рупор имеет осесимметричную ДН с осью, наклоненной к горизонту на угол 50° [20]. Предполагается, что задние лепестки ДН рупора изотропно распределены в пространстве, уровень их однороден и может быть аппроксимирован некоторой постоянной величиной Δ .

Расчет коэффициента переоблучения вторичного зеркала $\eta_{обл}$ и шумовой температуры $T_{обл}$ проводился с помощью ЭВМ методами численного интегрирования. При расчете учитывался тот факт, что перед вторичным зеркалом располагается металлическая поверхность — крыша кабины облучателя, отражающая часть задних лепестков ДН рупора в небо.

Расчет проводился исходя из диаграммы направленности приемных рупоров, используемых при наблюдениях на радиотелескопе. Пример одного из них приводится в работе [20]. Для исследования влияния уровня задних лепестков ДН рупора на величину $T_{обл}$ расчет проводился для трех значений параметра Δ : 0.001, 0.005, 0.1.

Расчеты показали, что значение $T_{обл}$ практически не зависит от длины волны при заданной ДН рупора, а зависит лишь от уровня задних лепестков ДН. При изменении Δ от 0.001 до 0.01 значение компоненты шумовой температуры

радиотелескопа, обусловленной переоблучением вторичного зеркала, может меняться от 0.5 до 6 К. Величина коэффициента $\eta_{обл}$ лежит в пределах 0.9—0.98.

Следует отметить, что проведенное рассмотрение является довольно идеализированным. Близость приемных рупоров от металлических поверхностей кабины облучателя и имеющие место переотражения в этой области могут существенно изменить картину задних лепестков ДН рупора. Эти же обстоятельства затрудняют теоретическую оценку эквивалентной яркостной температуры этой области.

Несмотря на это, полученные оценки не противоречат результатам экспериментальных исследований шумовой температуры вторичного зеркала, приведенным в работе [20].

Общая шумовая температура антенны радиотелескопа РАТАН-600. Расчет общей шумовой температуры антенны радиотелескопа проводится по формулам (1), (2). Значения $T_{ш}$, $\eta_{ш}$, $\eta_{ш1}$, $\eta_{ш2}$ рассчитываются по формулам:

$$T_{ш} = T_{э}^{IV} (1 - \eta_{ш});$$

$$\eta_{ш, ш1} = 1 - \frac{t_{ш}}{t_{гд}} \delta; \quad \eta_{ш2} = 1 - \frac{t_{ш}}{t_{пл}} \delta,$$

где $t_{ш}$ — ширина щелей; $t_{гд}$, $t_{пл}$ — ширина щитов соответственно главного и плоского зеркал; $T_{э}^{IV}$ — эквивалентная яркостная температура пространства между щитами (область IV); δ — коэффициент прохождения электромагнитной волны через бесконечную щель.

Величина коэффициента прохождения оценивается с помощью графиков, приведенных в работе [21]. При размере щелей $t_{ш} = 8$ см для вертикально поляризованной волны $\delta = 1$ при $\lambda < 13.7$ см и 0.95 при $13.7 \text{ см} < \lambda < 21$ см, 1 при $\lambda = 31$ см; для горизонтально поляризованной волны $\delta = 0.98 - 1$ при $\lambda \leq 8$ см, 1.14 при $\lambda = 13$ см, 0 при $\lambda \geq 21$ см.

Эквивалентная яркостная температура области IV лежит в пределах 200—250 К. В этом случае значения компонент $\eta_{обл}\eta_{ш}T_{ш, ш1}$ и $\eta_{обл}\eta_{ш1}\eta_{ш2}\eta_{ш1}T_{ш2}$ могут составлять от 4 до 9 К в зависимости от длины волны и принимаемой поляризации.

Компонента шумовой температуры, обусловленная отражением в рупорах, рассчитывается по формуле

$$T_{руп} = 300 (1 - \eta_{руп}); \quad \eta_{руп} = 1 - \left(\frac{КСВ - 1}{КСВ + 1} \right)^2$$

Значения $T_{руп}$ для рупоров, используемых в наблюдениях, лежат в пределах 1—6 К.

Значения общей шумовой температуры антенны радиотелескопа, рассчитанные по формулам (1), (2) с использованием результатов, полученных в данной работе, приведены на рис. 6. Там же приведены значения T_A , полученные экспериментальным путем на Северном секторе и в режиме работы радиотелескопа Южный сектор с плоским отражателем [22, 23]. Полученные экспериментальным путем значения общей шумовой температуры антенны радиотелескопа ложатся в доверительные пределы расчетных зависимостей $T_A(h)$.

В табл. 6 приведены значения $\Delta T_{экс}^A = T_A(h) - T_A(50^\circ)$, полученные из экспериментальных зависимостей $\Delta T_A(h)$, которые были сняты на Южном секторе с плоским отражателем при изменении угла наклона плоского отражателя

ТАБЛИЦА 6

T, K	$\zeta = 2$ см			$\zeta = 4$ см			$\zeta = 8$ см			$\zeta = 13$ см		
	10°	50°	90°	10°	50°	90°	10°	50°	90°	10°	0°	90°
$\Delta T_A^{Рэс}$	22	0	3	11	0	7	5	0	13	1	0	11
$\Delta T_A^{экс}$	22	0	27	7	0	6.7	3	0	11	1	0	13

в автоматическом режиме работы антенны [24]. В табл. 6 для сравнения приведены также расчетные значения этих величин $\Delta T_A^{\text{расч}}$.

Заключение. Проведенные исследования позволили получить более точные значения отдельных составляющих шумовой температуры антенны радиотеле-

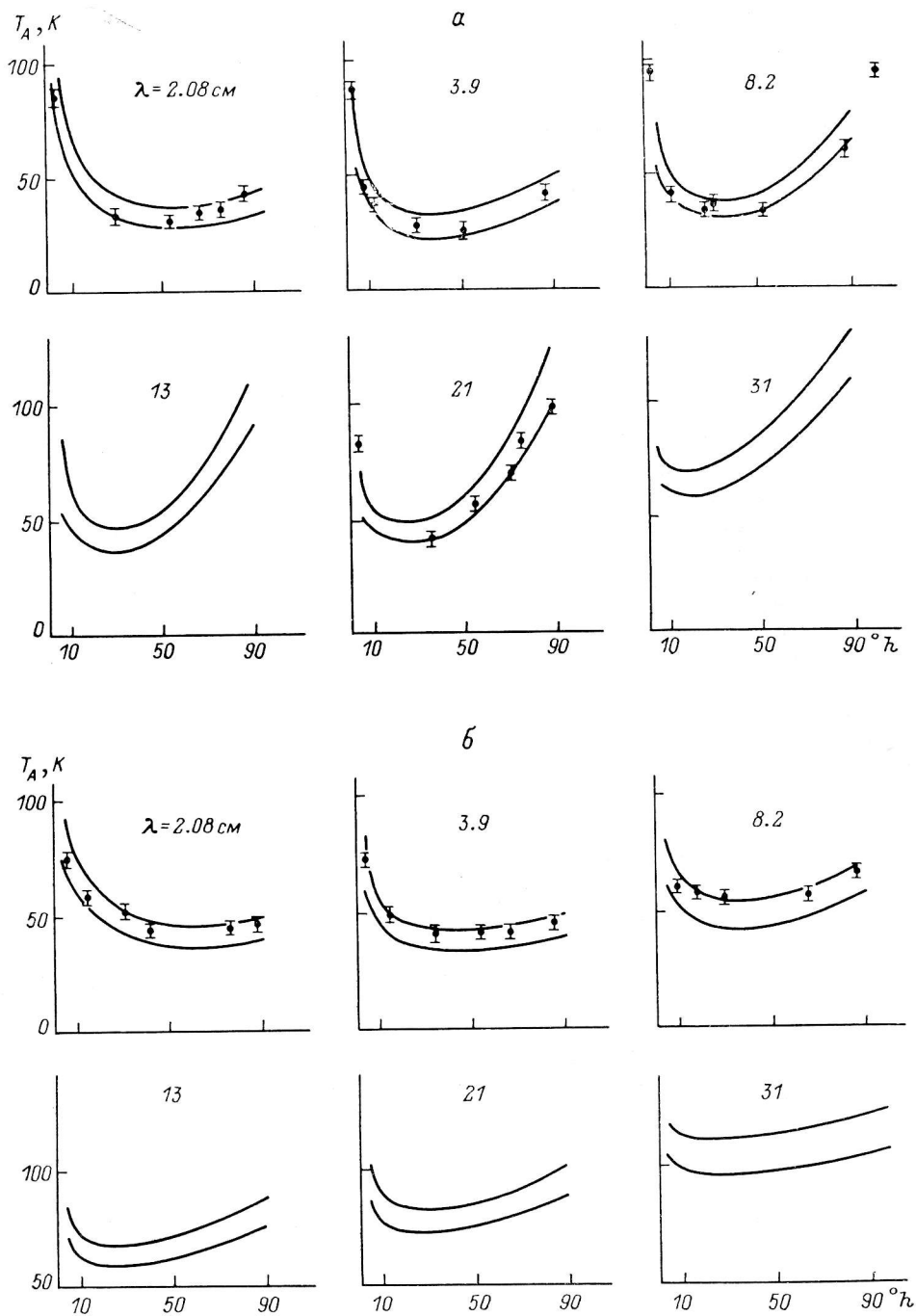


Рис. 6. Общая шумовая температура антенны радиотелескопа РАТАН-600.

a — в режиме АПШ; *б* — в режиме Юг+Плоский.

скопа РАТАН-600 для основных режимов его работы с учетом реального спадающего распределения поля в раскрытие облучателя.

Получены эквивалентные яркостные температуры отдельных областей окружающего пространства и оценен вклад излучения этих областей в общую шу-

мовую температуру радиотелескопа. Получены диаграммы направленности антенны в областях за главным и плоским зеркалом, связанные с переоблучением этих зеркал в вертикальной плоскости.

Предложенная методика и созданный на ее основе комплекс программ на ФОРТРАНе позволяет оперативно рассчитывать шумовую температуру радиотелескопа при различных изменениях в конструкции антенны и приемных рупоров. Последнее может быть полезно для оптимизации системы с точки зрения максимального снижения ее шумовой температуры.

Получены зависимости общей шумовой температуры антенны радиотелескопа от высоты наблюдаемого источника во всем рабочем диапазоне длин волн РАТАН-600. Для ряда длин волн, где нет надежных экспериментальных данных о шумовой температуре антенны, полученные результаты могут быть весьма полезны.

Сравнение имеющихся экспериментальных данных с полученными в настоящей работе теоретическими зависимостями $T_A(h)$ показывает их хорошее совпадение.

В заключение автор выражает глубокую благодарность А. А. Стоцкому за консультацию в работе и полезные замечания.

Литература

1. Стоцкий А. А. Расчет шумовой температуры антенны радиотелескопа РАТАН-600 // Изв. ГАО. 1972. № 188. С. 83—87.
2. Брауде Б. В., Есепкина Н. А. Теоретическое исследование шумовой температуры антенной системы радиотелескопа РАТАН-600 // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1978. 10. С. 75—84.
3. Выбор размеров отражающих элементов и расчет электродинамических характеристик радиотелескопа РАТАН-600 / Б. В. Брауде, Н. А. Есепкина, Н. Л. Кайдановский и др. // Изв. ГАО. 1972. № 188. С. 40—53.
4. Майорова Е. К. Расчет трехзеркальной перископической системы антенны переменного профиля // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1983. 17. С. 102—110.
5. Цейтлин Н. М. Антенная техника и радиоастрономия. М.: Сов. радио, 1976.
6. Майорова Е. К., Стоцкий А. А. Расчет перископической системы антенны переменного профиля // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1981. 13. С. 117—130.
7. Корольков Д. В., Есепкина Н. А., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. Л.: Наука, 1973.
8. N o g g D. C. Effective antennas temperature due to oxygen and water vapor in the atmosphere // J. Appl. Physics. 1959. 30. P. 1417.
9. Майорова Е. К., Трушкин С. А. Определение яркостных температур атмосферы в диапазоне 1.38—31 см длин волн на РАТАН-600 // Сообщ. САО (в печати).
10. Использование космических источников радиоизлучения для исследования характеристик радиотелескопа РАТАН-600 / Б. В. Брауде, Н. А. Есепкина, Ю. К. Зверев и др. // Радиотехника и электроника. 1981. XXVI. № 7. С. 1530—1544.
11. Темирова А. В. Экспериментальное исследование диаграмм направленности Северного сектора радиотелескопа РАТАН-600 // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1983. 17. С. 131—147.
12. Темирова А. В. Экспериментальное исследование диаграмм направленности Южного сектора РАТАН-600 с перископическим зеркалом // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1985. 19. С. 101—108.
13. J a s o b W. M. V a a r s. The measurement of large antennas with cosmic radio sources // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1973. Vol. ap-21, 4. P. 461—474.
14. Отчет ЦНИИГАиК по теме «Исследование радиотелескопа РАТАН-600 геодезическими методами с целью повышения его эффективности». М. 1982.
15. Альперт Я. Л. Распространение радиоволн и ионосфера. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
16. Майорова Е. К., Стоцкий А. А. Расчет энергетических характеристик фокусирующей системы радиотелескопа РАТАН-600 // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1982. 15. С. 117.
17. Коржавин А. Н. Поляризационные эффекты вторичного зеркала антенны переменного профиля // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1979. 11. С. 170—181.
18. Башарин А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974.
19. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972.
20. Корольков Д. В., Майорова Е. К., Стоцкий А. А. Экспериментальное исследование диаграммы направленности облучателя радиотелескопа РАТАН-600 и расчет шумовой температуры антенны // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1978. 10. С. 85—92.
21. Кинг Р., У Тай-Цзунь. Рассеяние и дифракция электромагнитных волн. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.

22. Шумовая температура антенны радиотелескопа РАТАН-600 — анализ составляющих и возможности снижения / А. В. Ипатов, Д. В. Корольков, Е. К. Майорова и др. // XI Всесоюзная радиоастрономическая конференция по аппаратуре, антеннам и методам: Тез. докл. Ереван, 1978. С. 165.
23. Исследование параметров антенны РАТАН-600 и радиоспектрометра на волне 21 см / А. П. Венгер, И. В. Госачинский, В. Г. Грачев и др. // *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО). 1981. 14. С. 118—124.
24. Майорова Е. К., Трушкин С. А. Применение метода вертикальных разрезов атмосферы на РАТАН-600 // *Радиотехника и электроника* (в печати).

Поступила в редакцию
2 марта 1987 г.
