

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600

Б. В. Брауде, Н. А. Есепкина

Изложена методика расчета шумовой температуры антенной системы радиотелескопа РАТАН-600 в режиме АПП и в режиме работы с плоским перископическим зеркалом. Результаты расчетов сопоставляются с экспериментальными данными. Полная шумовая температура антенной системы РАТАН-600 на волне 4 см на средних углах места составляет 26—28° К.

The methods of noise temperature calculation for the antenna system of the radio-telescope RATAN-600 in the VPA mode and in the mode of operation with the flat periscopic mirror are stated. The results of the calculations are compared with the experimental data. The total noise temperature of the RATAN-600 antenna system at a wavelength of 4 cm at mean angles of elevation is 26—28° K.

Основные параметры антенной системы радиотелескопа. Радиотелескоп РАТАН-600, предназначенный для работы в диапазоне волн 0.8—21 см, представляет собой антенну переменного профиля (АПП) с диаметром исходной окружности 600 м с отражающими элементами высотой 7.4 и шириной 2 м. Отражающие элементы имеют три степени свободы: радиальное (поступательное) перемещение и поворот вокруг вертикальной и горизонтальной осей. Кривая, по которой устанавливаются центры отражающих элементов, изменяется от параболы при наблюдении на горизонте до окружности при наблюдении в зените.

В зависимости от угла места θ_0 используется различная часть отражающих элементов. Для углов, близких к горизонту ($\theta_0 \approx 0$), работает примерно $\frac{1}{4}$ отражающих элементов, поэтому на радиотелескопе можно одновременно наблюдать в 4 направлениях. На средних углах места ($\theta_0 \approx 30 \div 80^\circ$) работает до $\frac{1}{3}$ отражающих элементов, что дает возможность наблюдать в трех направлениях. Для углов, близких к 90° , одновременно можно использовать все отражающие элементы.

Фокус перемещается в зависимости от угла места. В фокусе антенны расположен облучатель высотой 5.5 м. Радиотелескоп снабжен плоским перископическим зеркалом.

Параметры РАТАН-600 подробно рассмотрены в специальном сборнике [1]. Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию одной из основных характеристик антенной системы — шумовой температуры T_A . Предварительный расчет шумовой температуры РАТАН-600 был выполнен А. А. Стоцким [2]. В данной работе приводится более детальное исследование шумовой температуры антенны.

Общие соотношения, определяющие шумовую температуру остро-направленных приемных антенн. Шумовая температура антенны T_A определяется следующим известным выражением [3, 4]:

$$T_A = \left[\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} T(\theta, \varphi) f^2(\theta, \varphi) \cos \theta d\theta d\varphi \right] \left[\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} f^2(\theta, \varphi) \cos \theta d\theta d\varphi \right], \quad (1)$$

где $f(\theta, \varphi)$ — диаграмма направленности антенны; θ — угол места;

φ — азимутальный угол; $T(\theta, \varphi)$ — шумовая температура окружающих антенну источников теплового излучения.

В интересующем нас сантиметровом диапазоне волн основными источниками, определяющими шумовую температуру антенны, являются: внезапные источники радиоизлучения, тепловое излучение атмосферы Земли, тепловое излучение элементов конструкции самой антенно-волноводной системы. Эквивалентная этим источникам температура абсолютно черного тела $T(\theta, \varphi)$, входящая в (1), может быть определена следующим образом [5, 6, 7]:

$$T_{\text{металлак}} \approx 2.7^\circ \text{K}. \quad (2)$$

Шумовая температура атмосферы Земли

$$T_{\text{возд}} = T_{\text{ОВ}} \frac{\sin p_0}{\sin(p_0 + \theta)}, \quad (3)$$

где p_0 и $T_{\text{ОВ}}$ — параметры, зависящие от длины волны:

| λ , см | $T_{\text{ОВ}}$, °K | p_0 | λ , см | $T_{\text{ОВ}}$, °K | p_0 |
|----------------|----------------------|-------|----------------|----------------------|-------|
| 0.8 | 280 | 0.057 | 5 | 110 | 0.030 |
| 2 | 200 | 0.030 | 10 | 100 | 0.066 |
| 3 | 136 | 0.030 | 20 | 92 | 0.025 |
| 4 | 123 | 0.030 | | | |

Шумовая температура, обусловленная тепловым излучением элементов конструкций самой антенно-волноводной системы и поверхности Земли, может быть определена по закону Кирхгофа, согласно которому излучающая способность всякого нагретого тела находится в прямой зависимости от его поглощающей способности. Температуру элементов конструкции антенны и поверхности Земли можно принять равной $T_{\text{ОА}} \approx 300^\circ \text{K}$.

Если коэффициент полезного действия антенны в режиме передачи равен η_A , то шумовая температура эквивалентного антенне абсолютно черного тела составит

$$T_{\text{А собств}} = (1 - \eta_A) T_{\text{ОА}}. \quad (4)$$

Рассмотрим теперь элемент поверхности Земли, на которую падает волна с единичной амплитудой. Поглощенная этим элементом мощность составит $1 - |p|^2$, где p — коэффициент отражения от поверхности Земли (по Френелю). Соответствующая тепловому излучению Земли шумовая температура этого элемента в направлении падения волны

$$T_{\text{зем}} = T_{\text{ОА}} (1 - |p|^2). \quad (5)$$

Подставляя сюда значения коэффициентов Френеля для вертикальной и горизонтальной поляризации, найдем:

$$\begin{aligned} T_{\text{зем. в}} &= T_{\text{ОА}} (4\varepsilon \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \theta} \sin \theta) / (\varepsilon \sin \theta + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \theta})^2; \\ T_{\text{зем. г}} &= T_{\text{ОА}} (4 \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \theta} \sin \theta) / (\sin \theta + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \theta})^2, \end{aligned} \quad (6)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость земной поверхности, которую в сантиметровом диапазоне волн можно считать чисто вещественной величиной; θ — угол между поверхностью Земли и направлением на антенну из центра рассматриваемого элемента поверхности.

Шумовая температура антенны, обусловленная перечисленными выше источниками радиоизлучения, может быть выражена следующей суммой:

$$T_{\text{А}} = T_{\text{А собств}} + T_{\text{А металлак}} + T_{\text{А возд}} + T_{\text{А зем}}. \quad (7)$$

Первые две составляющие шумовой температуры (T_A *собств* и T_A *металлакт*) определяются выражениями (2) и (4), а остальные — по формуле (1) путем подстановки в подинтегральное выражение умноженных на η_A значений $T(\theta, \varphi)$ соответственно из (3) и (6). Вычисление этих составляющих требует специального рассмотрения.

Возьмем в общем случае антенну с прямоугольным раскрывом шириной a и высотой b . Примем, что в раскрыве антенны амплитуда поля постоянна, но имеются фазовые ошибки с большим периодом корреляции, характеризуемым площадкой шириной a_1 и высотой b_1 . Располагая раскрыв антенны согласно рис. 1, можно представить квадрат функции диаграммы направленности в следующем виде [7]:

$$f^2(\theta, \varphi) = (1 - e^{-4K^2\sigma^2}) (a_1 b_1 / ab) \{ \sin^2 [(Kb_1/2) \sin(\theta - \theta_0)] / [(Kb_1/2) \sin(\theta - \theta_0)]^2 \} \times \\ \times \{ \sin^2 [(Ka_1/2) \sin \varphi] / [(Ka_1/2) \sin \varphi]^2 \} + \\ + e^{-4K^2\sigma^2} \{ \sin^2 [(Kb/2) \sin(\theta - \theta_0)] / [(Kb/2) \sin(\theta - \theta_0)]^2 \} \times \\ \times \{ \sin^2 [(Ka/2) \sin \varphi] / [(Ka/2) \sin \varphi]^2 \}, \quad (8)$$

где σ — дисперсия фазовой ошибки, связанной с неточностью изготовления фокусирующей по ерхности антенного устройства; $K = 2\pi/\lambda$ — волновое число.

Первое слагаемое (8) описывает рассеянное поле антенны, а второе — представляет собой диаграмму идеально сформированного по я. Принятая в (8)

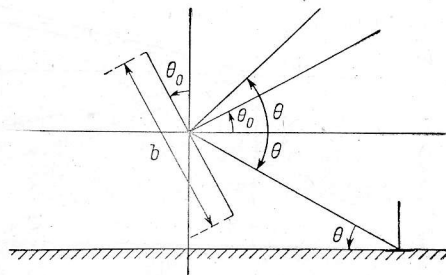


Рис. 1. Расположение отражающего элемента АПП по отношению к горизонту.

форма записи диаграммы направленности дает следующее простое выражение для интеграла в знаменателе уравнения (1) [7]:

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{2\pi} f^2(\theta, \varphi) \cos \theta d\theta d\varphi \approx \frac{\lambda^2}{ab} \text{ или } \frac{\lambda^2}{a_1 b_1}. \quad (9)$$

Подставляя (8) и (9) в (1) и учтя, что шумовая температура рассматриваемых источников не зависит от угла φ , найдем:

$$T_A = (1 - e^{-4K^2\sigma^2}) (b_1/\lambda) \int_{-\pi/2 + \theta_0}^{\pi/2 + \theta_0} T(\theta) \{ \sin^2 [(Kb_1/2) \sin(\theta - \theta_0)] / [(Kb_1/2) \sin(\theta - \theta_0)]^2 \} \times \\ \times \cos \theta d\theta + e^{-4K^2\sigma^2} (b/\lambda) \int_{-\pi/2 + \theta_0}^{\pi/2 + \theta_0} T(\theta) \times \\ \times \{ \sin^2 [(Kb/2) \sin(\theta - \theta_0)] / [(Kb/2) \sin(\theta - \theta_0)]^2 \} \cos \theta d\theta. \quad (10)$$

Это уравнение с учетом (3) и (6) позволяет определить шумовую температуру антенны, обусловленную тепловым излучением источников с известной яркостной температурой.

Шумовая температура радиотелескопа при работе в режиме АПП.
Схема расположения элементов РАТАН-600 при работе в режиме АПП

представлена на рис. 2, на котором дан разрез антенны вертикальной плоскостью, проходящей через главную фокальную ось. Из этой схемы видно, что шумовая температура радиотелескопа складывается из шумовой температуры самой антенны и шумовой температуры облучателя. Шумовая температура антенны определяется шумами метagalактики, атмосферы Земли и земной поверхности. Шумовая температура облучателя содержит шесть составляющих: 1) от земной поверхности основной площадки радиотелескопа; 2) от теплового излучения дальних холмов через щели в щитах АПП; 3) от теплового излучения дальних холмов выше щитов АПП; 4) от теплового излучения бетонных фундаментов, на которых смонтированы щиты АПП; 5) от теплового излучения атмосферы Земли выше угла закрытия окружающих антенну холмов; 6) от шумов Галактики выше угла закрытия холмов.

Для вычисления всех составляющих шумовой температуры антенны необходимы следующие основные геометрические и угловые ее характери-

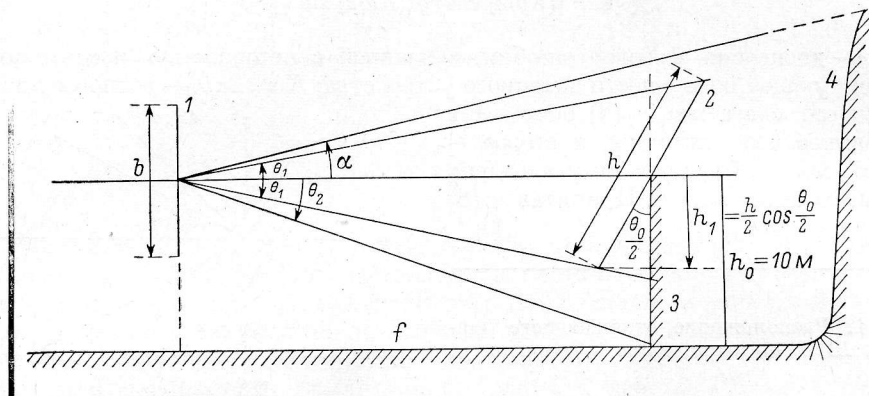


Рис. 2. Схема расположения элементов РАТАН-600 при работе в режиме АПП (северный сектор).

стики: фокусное расстояние антенны $f = R/(1 + \cos \theta_0)$; угол облучения половины щита из центра облучателя $\theta_1 = \frac{h}{2f} \cos \frac{\theta_0}{2}$; угол облучения оснований фундаментов щитов $\theta_0 = \frac{h_0}{f}$. Здесь $R = 300$ м — радиус исходной окружности АПП, все остальные обозначения ясны из рис. 2.

Шумовая температура основной зеркальной системы АПП. Как уже указывалось, шумовая температура собственно антенны складывается в основном из шумовых температур Метagalактики, атмосферы Земли и земной поверхности. Найдем сначала шумовую температуру антенны, обусловленную тепловым излучением атмосферы Земли. Подставляя в (10) значение $T(\theta)$ из (3), нетрудно усмотреть, что когда основной лепесток диаграммы антенны отклонен от горизонта на угол, превышающий ширину диаграммы по уровню половинной мощности, входящая в (10) функция $T(\theta)$ является медленно меняющейся по сравнению с быстро изменяющейся функцией диаграммы антенны типа $\frac{\sin^2 x}{x^2}$ при $\frac{b}{\lambda} \gg 1$ и $\frac{b_1}{\lambda} \ll 1$. С учетом этой особенности при вычислении (10) можно вынести за знак интеграла функцию $T(\theta)$ из (3), положив в ней $\theta = \theta_0$. Температура антенны при этом оказывается равной шумовой температуре атмосферы в направлении максимума диаграммы.

Шумовую температуру антенны, обусловленную тепловым излучением поверхности Земли, найдем из (10) после подстановки выражений для $T(\theta)$ из (6). Предварительно произведем некоторые упрощения в уравнениях (6). Имея в виду, что ϵ существенно больше единицы, получаем:

$$\begin{aligned} T_{\text{зем. в}}(\theta) &\approx T_{\text{ОА}} (4\sqrt{\varepsilon} \sin \theta) / (1 + \sqrt{\varepsilon} \sin \theta)^2; \\ T_{\text{зем. г}}(\theta) &\approx T_{\text{ОА}} (4\sqrt{\varepsilon} \sin \theta) / (\sqrt{\varepsilon} + \sin \theta)^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Поскольку нас интересует шумовая температура антенны при некотором подъеме главного луча над горизонтом, можно в качестве выражения для $T_{\text{зем. в}}(\theta)$ взять его среднее значение при $\theta = \pi/2$ и $\arcsin(1/\sqrt{\varepsilon})$ (угол Брюстера):

$$T_{\text{зем. в}} \approx T_{\text{ОА}} [1/2 + 2\sqrt{\varepsilon}]. \quad (12)$$

Подставляя (12) в (10) и производя интегрирование по нижней полусфере, найдем:

$$\begin{aligned} T_{\text{А зем. в}} = T_{\text{ОА}} [1/2 + 2\sqrt{\varepsilon}/(1 + \sqrt{\varepsilon})^2] (1/\pi) \{ &(1 - e^{-4K^2\sigma^2}) [F(Kb_1) - F(Kb_1 \sin \theta_0)] + \\ &+ e^{-4K^2\sigma^2} [F(Kb) - F(Kb \sin \theta_0)] \}, \end{aligned} \quad (13)$$

где функция F определяется следующим выражением:

$$F(U) = Si U - [\sin^2(U/2)/(U/2)]. \quad (14)$$

При горизонтальной поляризации имеем:

$$\begin{aligned} T_{\text{А зем. г}} = T_{\text{ОА}} (2/\pi^2 \sqrt{\varepsilon}) [\cos \theta_0 \ln \operatorname{ctg}(\theta_0/2) + \sin \theta_0 - 1] \times \\ \times [(1 - e^{-4K^2\sigma^2})(\lambda/b_1) + e^{-4K^2\sigma^2}(\lambda/b)]. \end{aligned} \quad (15)$$

Эта формула получена из (10) путем замены функции $\sin^2 x$ ее средним значением, равным $1/2$, и пренебрежением слагаемым $\sin \theta$ в знаменателе (11) по сравнению с $\sqrt{\varepsilon}$. Формулами (13) и (15) следует пользоваться при условии: $\theta_0 \gg \lambda/2b$; $\theta_0 \gg \lambda/2b_1$.

Заметим здесь, что при вычислении шумовой температуры, обусловленной тепловым излучением земной поверхности, мы пользовались выражением для диаграммы антенны в дальней зоне, между тем как земная поверхность находится в зоне Френеля. Возможность такого простого подхода обоснована в [8], где показано, что при разложении поля антенны в непрерывный спектр распространяющихся в направлении нормалей к поверхности земли плоских волн угол θ характеризует амплитуду и фазовую скорость этих волн, причем мощность, поглощаемая в земле в области вещественных углов θ , не зависит от высоты антенны над землей.

В заключение отметим, что под значением b во всех приведенных формулах следует принимать величину

$$b = h \cos \theta_0/2. \quad (16)$$

Некоторые вопросы влияния закона распределения поля в апертуре антенны на ее шумовую температуру рассмотрены в приложении.

Шумовая температура облучателя АПП. Как указано выше, шумовая температура облучателя АПП складывается из шести составляющих.

1. Шумовая температура от земной поверхности основной площадки радиотелескопа. Она определяется из уравнения (10) с учетом (11) при интегрировании в нижней полусфере в секторе углов $\theta_2 \leq \theta \leq \pi/2$.

Для вычисления интеграла (10) вводим промежуточный угол $\theta'_2 = 2/Kb$ (или $2/Kb_1$). В интервале $\theta'_2 \leq \theta \leq \theta_2$ принимаем $\sin^2 \left[\frac{Kb}{2} \sin \theta \right] \approx \frac{Kb}{2} \sin \theta$, а в интервале $\theta'_2 \leq \theta \leq \pi/2$ принимаем $\sin^2 \left[\frac{Kb}{2} \sin \theta \right]$ равным его среднему значению, т. е. $1/2$. После интегрирования с учетом малости углов θ_2 и θ'_2 имеем:

$$T_{\text{А зем. в}} = T_{\text{ОА}} [(1 - e^{-4K^2\sigma^2}) F_{\text{В}}(b_1) + e^{-4K^2\sigma^2} F_{\text{В}}(b)];$$

$$\theta_2 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

$$F_B(b) = (2\sqrt{\varepsilon}/\pi) Kb [\theta_2'^2/(1 + \sqrt{\varepsilon}\theta_2') - \theta_2^2/(1 + \sqrt{\varepsilon}\theta_2)] + (4\sqrt{\varepsilon}/\pi) (1/Kb) \times \\ \times \{\ln[(1 + \sqrt{\varepsilon}\theta_2')/\theta_2'(1 + \sqrt{\varepsilon})] - 1/(1 + \sqrt{\varepsilon}\theta_2) + 1/(1 + \sqrt{\varepsilon})\}. \quad (17)$$

$\theta_2' = \frac{2}{Kb}$; $\theta_2' \geq \theta_2$; если $\theta_2' < \theta_2$, то принимаем $\theta_2' = \theta_2$.

Соответственно для горизонтальной поляризации получаем:

$$T_{A \text{ зем. г}} = T_{OA} [(1 - e^{-4K^2\sigma^2}) F_{\Gamma}(b_1) + e^{-4K^2\sigma^2} F_{\Gamma}(b)]; \\ \theta_2 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad (18)$$

$$F_{\Gamma}(b) = (2/\pi^2 \sqrt{\varepsilon}) (\lambda/b) \{\ln[\sqrt{\varepsilon}/(1 + \sqrt{\varepsilon})\theta_2'] - 1/(1 + \sqrt{\varepsilon})\}.$$

$\theta_2' = \frac{2}{Kb}$; $\theta_2' \geq \theta_2$; если $\theta_2' < \theta_2$, то принимаем $\theta_2' = \theta_2$.

2. Шумовая температура от теплового излучения дальних холмов через щели в щитах АПП.

Если обозначить отношение ширины зазора между щитами к ширине щита через δ (в нашем случае оно составляет 0.03—0.04), то в соответствии с (10) имеем после интегрирования в интервале $-\theta_1 \leq \theta \leq \theta_1$:

$$T_{A \text{ зем. в}} = \delta T_{OA} [4\sqrt{\varepsilon}/(1 + \sqrt{\varepsilon})^2] (2/\pi) \{(1 - e^{-4K^2\sigma^2}) F(Kb_1\theta_1) + e^{-4K^2\sigma^2} F(Kb\theta_1)\}, \quad (19)$$

где $F(Kb_1\theta_1)$ и $F(Kb\theta_1)$ вычисляются по формуле (14). В уравнении (19) шумовая температура холмов определялась по формулам (11) при $\theta = \pi/2$. Она имеет одинаковое значение как для вертикальной, так и для горизонтальной поляризации.

3. Шумовая температура от теплового излучения дальних холмов выше щитов АПП.

Интегрируя (10) в интервале $\theta_1 \leq \theta \leq \alpha$, где α — угол закрытия окружающих антенну холмов, получим:

$$T_{A \text{ зем. в}} = T_{OA} [4\sqrt{\varepsilon}/(1 + \sqrt{\varepsilon})^2] (1/\pi) \{(1 - e^{-4K^2\sigma^2}) \times \\ \times [F(Kb_1 \sin \alpha) - F(Kb_1\theta_1)] + e^{-4K^2\sigma^2} [F(Kb \sin \alpha) - F(Kb\theta_1)]\}. \quad (20)$$

4. Шумовая температура от теплового излучения фундаментов, на которых смонтированы щиты АПП.

Если фокусное расстояние удовлетворяет условию

$$f \geq \frac{b^2}{\lambda}, \quad (21)$$

то фундаменты щитов находятся в волновой зоне и шумовая температура, обусловленная их тепловым излучением, определяется уравнением типа (20), которое в данном случае примет следующий вид:

$$T_{A \text{ фунда. в. г}} = T_{OA} [4\sqrt{\varepsilon}/(1 + \sqrt{\varepsilon})^2] (1/\pi) \{(1 - e^{-4K^2\sigma^2}) \times \\ \times [F(Kb_1\theta_2) - F(Kb_1\theta_1)] + e^{-4K^2\sigma^2} [F(Kb\theta_2) - F(Kb\theta_1)]\}, \quad (22)$$

где θ_1 и θ_2 — углы облучения фундаментов.

Когда условие (21) не выполняется, фундаменты находятся в зоне Френеля. Можно показать, что в этом случае шумовая температура определяется следующими соотношениями:

$$T_{A \text{ фунда. в. г}} = T_{OA} [4\sqrt{\varepsilon}/(1 + \sqrt{\varepsilon})] (1/2) [F_1(t_2) - F_1(t_1)]; \\ \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \\ t_1 = \frac{2h_1}{b}; \quad t_2 = \frac{2h_2}{b}; \quad (23)$$

$$F_1(t_i) = 1/2 \int_0^{t_i} \{ [C(b(1-t)/\sqrt{2\lambda f}) + C(b(1+t)/\sqrt{2\lambda f})]^2 + \\ + [S(b(1-t)/\sqrt{2\lambda f}) + S(b(1+t)/\sqrt{2\lambda f})]^2 \} dt.$$

Значения функции $F_1(t_i)$ определяются численными методами; $C(x)$ и $S(x)$ — интегралы Френеля.

5. Шумовая температура от теплового излучения атмосферы Земли. Из уравнений (10) и (3) после интегрирования в интервале $\alpha \leq \theta \leq \pi/2$ получим:

$$T_{\text{А возд}} = T_{\text{ОВ}} \left[\left(\frac{1}{\alpha} \right) - \left(\frac{1}{p_0} \right) \ln \left(1 + \frac{p_0}{\alpha} \right) \right] \left[\left(1 - e^{-4K^2\sigma^2} \right) \left(\frac{\lambda}{2\pi^2 b_1} \right) + e^{-4K^2\sigma^2} \left(\frac{\lambda}{2\pi^2 b} \right) \right]. \quad (24)$$

$\alpha \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$

При выводе этой формулы учтено, что $\left(\frac{Kb}{2} \right) \alpha > 1$. Это позволяет при интегрировании заменить $\sin^2 \left[\left(\frac{Kb}{2} \right) \sin \theta \right]$ его средним значением, равным 0.5. Кроме того, учтено, что $p_0 \ll 1$.

6. Шумовая температура от теплового излучения Метагалактики. После интегрирования (10) с учетом (2) в интервале $\alpha \leq \theta \leq \pi/2$, найдем:

$$T_{\text{А метагалакт}} = T_{\text{метагалакт}} \left(\frac{1}{\pi} \right) \{ (1 - e^{-4K^2\sigma^2}) [F(Kb_1) - F(Kb_1 \sin \alpha)] + e^{-4K^2\sigma^2} [F(Kb) - F(Kb \sin \alpha)] \}. \quad (25)$$

В заключение отметим, что если угол закрытия $\alpha < \theta_1$, то область $-\theta_1 \leq \theta \leq \theta_1$ в уравнении (19) следует разбить на два интервала: $-\theta_1 \leq \theta \leq \alpha$ и $\alpha \leq \theta \leq \theta_1$, причем во втором интервале источником теплового излучения следует считать атмосферу Земли.

Результаты численных расчетов. По приведенным выше формулам при указанных геометрических размерах радиотелескопа были произведены расчеты шумовой температуры антенны на волнах 0.8, 4 и 20 см. Диэлектрическая проницаемость Земли принята $\epsilon = 5$. Как показали результаты наблюдений на РАТАН-600, в разработанной конструкции радиотелескопа получены следующие точности изготовления: среднеквадратичная ошибка при изготовлении щитов АПП $\sigma \approx 0.6$ мм с периодом корреляции $b_1 \approx 0.2$ м; среднеквадратичная ошибка при изготовлении зеркала облучателя $\sigma \approx 0.1$ мм с периодом корреляции $b_1 \approx 1.0$ м.

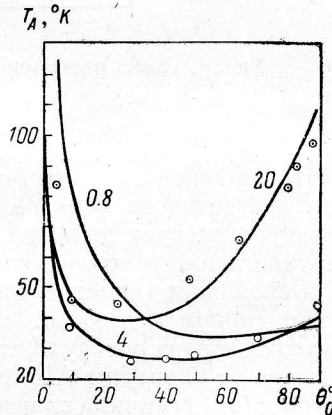


Рис. 3. Зависимость шумовой температуры РАТАН-600 от угла места при работе в режиме АПП.

Кружками отмечены измеренные значения шумовой температуры на $\lambda = 4$ и 21 см.

При такой точности изготовления элементов влияние рассеянного поля на шумовую температуру антенны оказывается пренебрежимо малым для волн 4 и 20 см. На волне 0.8 см это влияние несколько больше, однако, как показывают расчеты, основной вклад в шумовую температуру антенны на волне 0.8 см вносит составляющая, связанная с атмосферой Земли, которая практически не зависит от точности изготовления элементов антенны. По этой причине во всех расчетах принималось $\sigma = 0$. К. п. д. антенны η_A принят равным 1. Угол закрытия окружающих антенну холмов $\alpha \approx 0.013$.

Полная шумовая температура антенны содержит следующие составляющие:

$$T_A = T_{\text{А отр. щит}} + T_{\text{А облuch}};$$

$$T_{\text{А отр. щит}} = T_{\text{А возд}} + T_{\text{А зем}} + T_{\text{А метагалакт}};$$

$$T_{\text{А облuch}} = \sum_{i=1}^{i=6} T_{\text{обл } i}. \quad (26)$$

Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 3. На этом же

рисунке приведены экспериментальные значения шумовой температуры, измеренные на волнах 4 и 21 см.

Измерение шумовой температуры выполнено Г. М. Тимофеевой, Д. В. Корольковым и Н. Ф. Рыжковым.

Шумовая температура радиотелескопа при работе с плоским перископическим зеркалом. Схема работы радиотелескопа с перископом представлена на рис. 4. Основная диаграмма антенны формируется щитами перископа, облучаемыми АПП, создающей плоский фронт волны вдоль горизонта. Расчет шумовой температуры антенны в режиме перископа выполняется по ранее выведенным формулам для АПП, причем

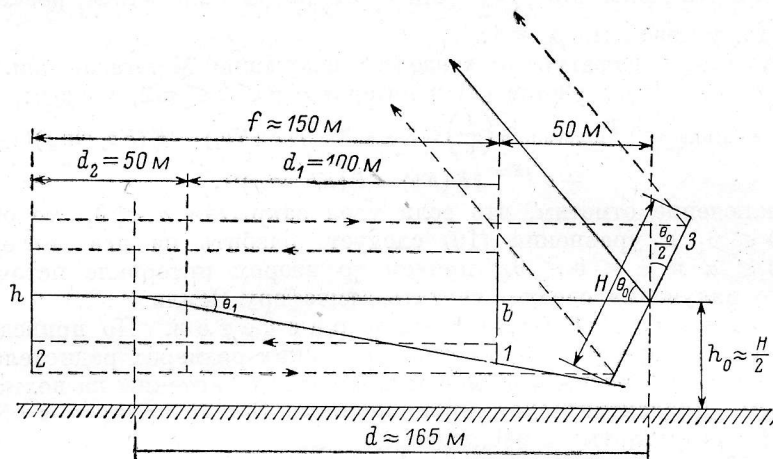


Рис. 4. Схема расположения элементов РАТАН-600 при работе с перископом (южный сектор).

щиты перископа играют роль щитов АПП, а облучателем является АПП при работе вдоль горизонта. К найденной таким образом шумовой температуре следует добавить шумовую температуру облучателя АПП при вертикальном расположении ее щитов.

Основными геометрическими параметрами радиотелескопа при работе с перископом являются: высота щитов перископа $H \approx 8.5$ м; отношение ширины зазора между щитами к ширине щита перископа $\delta \approx 0.015$; расстояние от апертуры АПП, играющей роль облучателя, до перископа $d = 165$ м (эта величина складывается из расстояния от перископа до облучателя, равного $1/6R$, расстояния от облучателя до апертуры АПП $d_1 = \frac{R \cos \varphi}{1 + \cos \varphi}$, где $2\varphi = 120^\circ$ — угол облучения щитов АПП; небольшого расстояния, равного примерно $1/3$ глубины d_2 АПП, учитывающего различную расходимость лучей АПП в горизонтальной и вертикальной плоскостях); угол облучения полущита перископа из центра синфазного раскрыва АПП

$$\theta_1 = \frac{H \cos \theta_0/2}{2d}. \quad (27)$$

Высота центров щитов перископа над землей h_0 примерно равна $1/2 H$, что позволяет не учитывать тепловое излучение фундаментов перископа ($\theta_2 \approx \theta_1$); угол закрытия окружающих антенну холмов $\alpha \approx 0.05$.

Полная температура антенны при работе с плоским перископическим зеркалом

$$T_A = T_{A \text{ перископа}} + \sum_{i=1}^{i=6} T_{A \text{ АПП } i} + T_{A \text{ облуч.}} \quad (28)$$

Результаты вычислений шумовой температуры РАТАН-600 для работы с перископом для волн 0,8, 4 и 20 см приведены на рис. 5.

Выводы. 1. Из полученных результатов следует, что расчетные и измеренные значения шумовой температуры антенны хорошо совпадают (рис. 3).

2. Полная шумовая температура антенны на средних углах места составляет 26—28° К на $\lambda=4$ см.

3. Как показали расчеты, существенный вклад в шумовую температуру вносят составляющие, связанные с переизлучением антенны по вертикали,

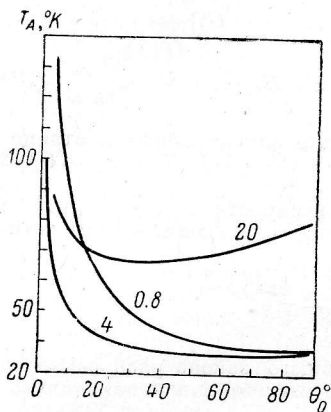


Рис. 5. Зависимость шумовой температуры РАТАН-600 от угла места при работе с перископом.

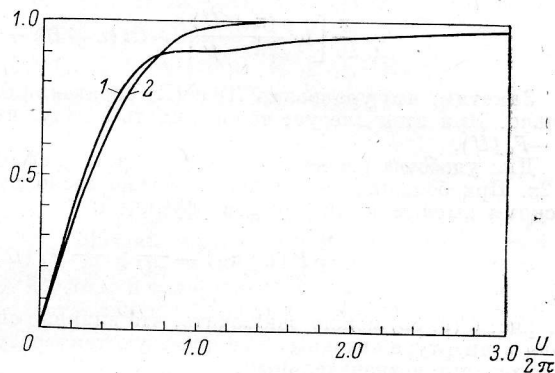


Рис. 6.

1 — $(2/\pi) F(U)$; 2 — $(16/\pi^2) F_0(U)$.

и особенно составляющая, обусловленная тепловым излучением фундаментов. На $\lambda=4$ см, когда фундаменты находятся в ближней зоне, эта составляющая примерно в 2 раза больше, чем составляющая, связанная с тепловым излучением холмов над щитами. Поэтому ее можно уменьшить за счет сетчатых экранов, расположенных под щитами, или путем шпировки фундаментов. Так, на волне 4 см при работе в Зенит ($\theta_0=90^\circ$) шумовая температура антенны с отражающими экранами у фундаментов составляет 25 при 43° К без экранов.

4. При достигнутой на радиотелескопе РАТАН-600 точности изготовления (суммарная ошибка $\approx 0.6 \div 0.8$ мм) влияние рассеянного поля на шумовую температуру пренебрежимо мало для волн 4 и 20 см. На волне 0,8 см это влияние несколько больше, однако, как показывают расчеты, основной вклад в шумовую температуру на этой волне вносит составляющая, обусловленная атмосферой Земли, которая практически не зависит от точности изготовления антенны. Поэтому при расчете шумовой температуры мы полагаем $\sigma=0$. В случае необходимости влияние рассеянного фона на шумовую температуру легко учесть, задавшись величиной и интервалом корреляции ошибок и воспользовавшись приведенными выше формулами.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Ю. Н. Парийскому, Д. В. Королькову, Г. М. Тимофеевой, Н. Ф. Рыжкову за полезные дискуссии и предоставление результатов измерений шумовой температуры радиотелескопа РАТАН-600.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

О ВЛИЯНИИ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ В АПЕРТУРЕ АНТЕННЫ НА ЕЕ ШУМОВУЮ ТЕМПЕРАТУРУ

Если в интервале углов $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ (рис. 2), где θ отсчитывается от направления главного максимума диаграммы, находится источник с постоянной яркостной температурой T_a , то шумовая температура антенны от этого источника при постоянном амплитудном распределении поля в апертуре составляет

$$T_A = T_a \left(\frac{1}{\pi} \right) [F(U_2) - F(U_1)]; \quad U_2 = \left(\frac{Kb}{2} \right) \sin \theta_2; \quad U_1 = \left(\frac{Kb}{2} \right) \sin \theta_1, \quad (1)$$

где b — высота апертуры, а функция $F(U)$ определяется уравнением (14).

В случае косинусного распределения поля в апертуре диаграмма антенны по мощности имеет вид $f_0^2(x) = \frac{\cos^2 x}{(1 - \frac{4x^2}{\pi^2})^2}$. Интегрирование этой функции в соответствии с (I) дает следующее выражение для шумовой температуры:

$$T_A = T_A \left(\frac{8}{\pi^3} \right) [F_0(U_2) - F_0(U_1)]; \quad U_2 = \left(\frac{Kb}{2} \right) \sin \theta_2; \quad U_1 = \left(\frac{Kb}{2} \right) \sin \theta_1, \quad (II)$$

где функция $F_0(U)$ имеет вид:

$$F_0(U) = \frac{U \cos(U/2)}{4(1 - U^2/\pi^2)} + \left(\frac{\pi^2}{16} \right) [Si(\pi + U) - Si(\pi - U)] + \frac{\pi}{16} \left[\ln \left| \frac{\pi + U}{\pi - U} \right| - Ci(\pi + U) + Ci(|\pi - U|) \right]. \quad (III)$$

Заметим, что уравнения (I) и (II) справедливы и для случая, когда θ_i отрицательно. При этом следует только иметь в виду, что $F(-U) = -F(U)$ и $F_0(-U) = -F_0(U)$.

Для удобства расчетов на рис. 6 даны графики зависимости $F(U)$ и $F_0(U)$ от $U/2\pi$. При больших значениях U можно воспользоваться следующими асимптотическими выражениями для этих функций:

$$\frac{2}{3} F(U) \approx 1 - \frac{2}{\pi U}; \quad \frac{16}{\pi^3} F_0(U) \approx 1 - \frac{4\pi}{U^3}.$$

Из рис. 6 (с. 83) можно заключить, что влияние спадающего закона распределения поля в апертуре антенны на ее шумовую температуру в рассмотренном нами случае оказывается незначительным.

Список литературы

1. Изв. ГАО, 1972, 188, 243 с.
2. Стоцкий А. А. Расчет шумовой температуры РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 83—88.
3. Кузьмин А. Д., Саломонович А. Е. Радиоастрономические методы измерений параметров антенн. М., «Сов. радио», 1964.
4. Цейтлин Н. М. Применение методов радиоастрономии в антенной технике. М., «Сов. радио», 1966.
5. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М., «Наука», 1973. 415 с.
6. Ногг D. C. Effective antenna temperatures due to oxygen and water vapor in atmosphere. — J. Appl. Phys., 1959, 30, p. 1417—1425.
7. Брауде Б. В. Шумовая температура остронаправленных приемных антенн. — Вопросы радиоэлектроники, сер. ТРС, 1974, вып. 2, с. 162—171.
8. Брауде Б. В. Исследование влияния земной поверхности на шумовую температуру остронаправленных приемных антенн. — Вопросы радиоэлектроники, сер. ТРС, 1961, вып. 4, с. 11—25.