

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ОБЛУЧАТЕЛЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600 И РАСЧЕТ ШУМОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АНТЕННЫ

Д. В. Корольков, Е. К. Майорова, А. А. Стоцкий

Экспериментальное исследование диаграммы направленности облучателя радиотелескопа РАТАН-600 на волне 4 см, включающее измерения распределения мощности по главному зеркалу, боковые лепестки и рассеянный фон, позволило рассчитать шумовую температуру собственно антенны в зависимости от угла места наблюдений и разделить вклады в общую шумовую температуру от различных частей антенны. Показано, что специальные антишумовые экраны позволят снизить температуру антенны в 1.5—2 раза.

The experimental investigation of the feed beam of the radiotelescope RATAN-600 at a wavelength of 4 cm, which includes the measurements of power distribution over the main dish, minor lobes and the scattered background, allowed to calculate the noise temperature of different parts of the antenna. It is shown that special anti-noise screens allow to decrease the antenna temperature 1.5—2 times.

Основной вклад в шумовую температуру зеркальной антенны дают следующие компоненты:

- 1) излучение неба в области главного лепестка диаграммы направленности;
- 2) шумы, обусловленные потерями в главном зеркале и рассеянием на неоднородностях его поверхности;
- 3) шумы, обусловленные переоблучением главного зеркала и полем рассеяния облучателя.

Две последние компоненты составляют собственно шумовую

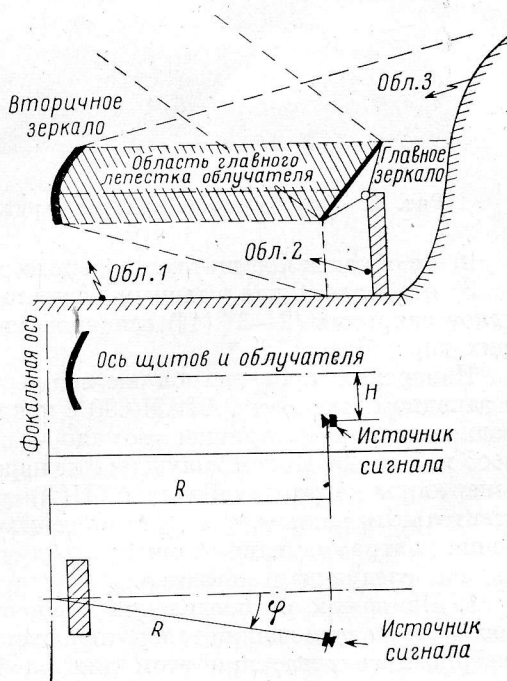


Рис. 1. Схема радиотелескопа, области, ответственные за избыточную шумовую температуру антенны, и схема расположения измерительного генератора.

температуру антенны или избыточную шумовую температуру. Особенностью антенны РАТАН-600 [2] является то, что диаграмма направленности облучателя расположена параллельно поверхности Земли, при этом может происходить переоблучение главного зеркала по вертикали. В облучатель

через боковые лепестки и рассеянный фон его диаграммы будет попадать из нижней полусферы излучение Земли, а из верхней — окружающих гор и атмосферы. В результате этого третья из приведенных выше компонента шума может внести значительную долю в общую шумовую температуру антенны РАТАНа. Целью настоящей работы является подробное экспериментальное исследование диаграммы облучателя с далекими лепестками и рассеянным фоном и определение вкладов в общую шумовую температуру антенны теплового излучения, попадающего в облучатель из следующих областей:

1) от поверхности Земли, окружающей облучатель вплоть до фундаментов главного зеркала (область 1 на рис. 1);

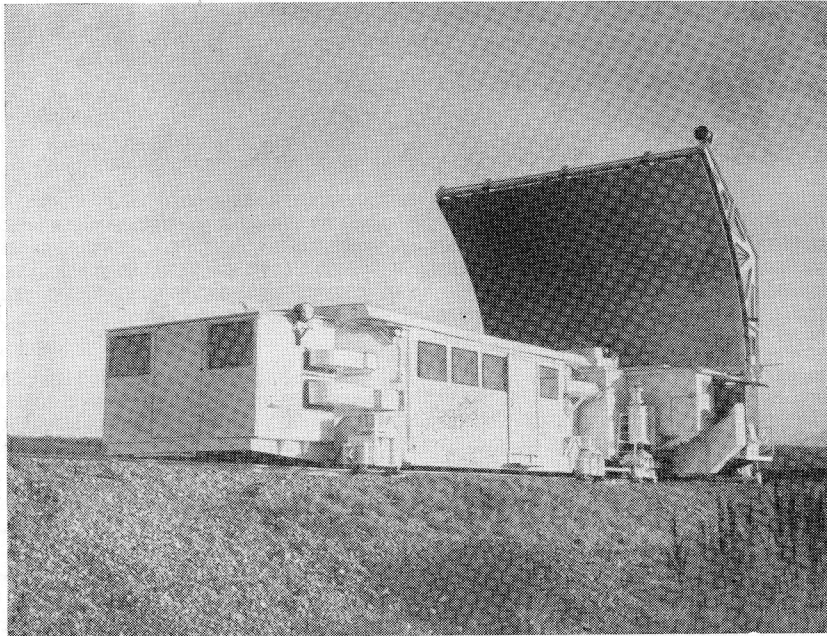


Рис. 2. Облучатель (вторичное зеркало) радиотелескопа РАТАН-600.

2) от области под щитами главного зеркала (фундамента — область 2);

3) от области над главным зеркалом; в этой области из-за больших углов закрытия ($2-3^\circ$ [1]) основное значение имеет излучение окружающих гор (область 3).*

Измерения проводились на волне 4 см на северном (действующем) и западном секторах РАТАН-600 с использованием основного облучателя радиотелескопа (вторичное зеркало — параболический цилиндр размером 8×5 м, рис. 2). Прием излучения от переносного генератора (применялись генераторы на диодах Ганна и ЛПД) производился штатным высокочувствительным радиометром, установленном в кабине облучателя. Для измерения диаграммы направленности облучателя с рассеянным фоном применялась следующая методика.

1. Измерение распределения мощности в главном лепестке производилось путем перемещения генератора сверху вниз по ряду избранных щитов северного сектора, при этом для удобства перемещения генератора и устранения интерференции все щиты были наклонены на угол 10° .

* Некоторые эксперименты указывают на то, что шумовая температура в области над щитами («холмы») $T_{0\text{эф}} < 300^\circ \text{K}$, однако количественных оценок мы пока не имеем. Поэтому везде принято $T_0 = 300^\circ \text{K}$.

Измерения рассеянного излучения выше и ниже щитов (вплоть до уровня Земли на северном секторе) производились с помощью автоподъемника в нескольких точках сектора радиотелескопа. Получена зависимость $P_{\text{рас}} = f(\varphi, h)$ при расстоянии от облучателя $R = 288$ м (облучатель в центре РАТАНА).

2. Распределение мощности в раскрыве вторичного зеркала (облучателя) снималось в трех сечениях путем перемещения по вертикали генератора, подвешенного на направляющих тросах.

3. Распределение рассеянного поля на поверхности Земли $P_R(\varphi)$ снималось путем установки генератора на некоторых фиксированных расстояниях R от облучателя (в горизонтальной плоскости, расположенной на 5.3 м ниже центра щитов главного зеркала).* Облучатель при этом вращался с помощью поворотного круга в центре РАТАНА.

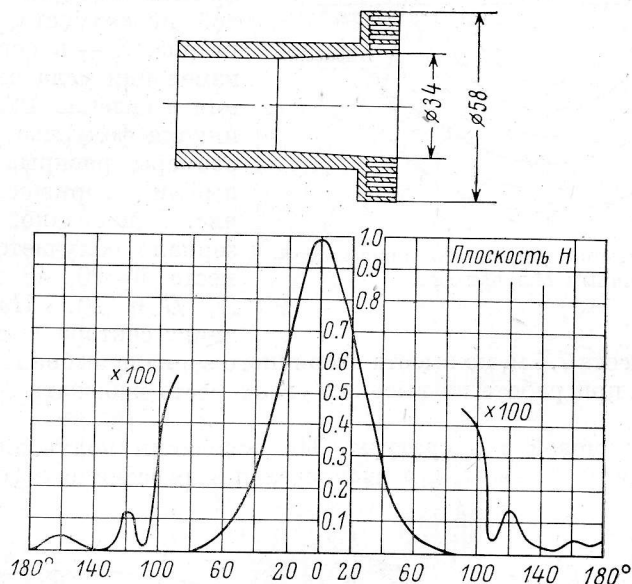


Рис. 3. Первичный облучатель («квазискалярный рупор») и его диаграмма направленности.

4. Нормировка проводилась по максимальному уровню сигнала в главном лепестке диаграммы направленности облучателя P_{max} , взятой на том же расстоянии от облучателя, что и при измерении рассеянного излучения $P_R(\varphi)$.

Результаты измерений. 1. В качестве первичных облучателей на радиотелескопе РАТАН-600 в настоящее время используются рупоры с концентрическими четверть-волновыми канавками, обладающие осесимметричной диаграммой направленности и малым уровнем бокового и заднего излучения. Конструкция и диаграмма направленности рупора показаны на рис. 3. Характер облучения вторичного зеркала иллюстрирует рис. 4, на котором показаны линии постоянной мощности диаграммы направленности первичного облучателя и контур отражающей поверхности вторичного зеркала. Интегрирование диаграммы направленности в пределах контура вторичного зеркала показывает, что вторичное зеркало перехватывает 97% мощности, излученной первичным облучателем. Из 3%, уходящих за пределы зеркала, около 2% уходит в небо и ~1% в землю, соответственно вносимая шумовая температура составляет около 3° К.

2. Распределение мощности в раскрыве облучателя и схема измерений приведены на рис. 5. Измерения проведены на оси системы на расстоянии

* Поверхность Земли не горизонтальна.

5.5 м от фокальной оси f' и в плоскостях, расположенных под углом $\pm 30^\circ$. Распределение пересчитано к цилиндрическому фронту волны.

3. Схематически поверхность, на которой проведены измерения распределения мощности по главному зеркалу и переоблучение, может быть

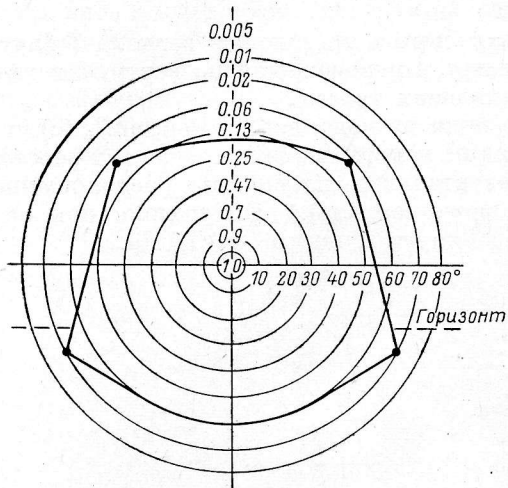


Рис. 4. Облучение вторичного зеркала первичным облучателем.

$l=450$ м, высота 7.4 м, но высота вторичного зеркала выбрана равной 5.5 м, с тем чтобы при работе на высоких углах места избежать сильного переоблучения.

Расчет шумовой температуры. На основании полученных диаграмм направленности облучателя и распределения рассеянного фона были про-

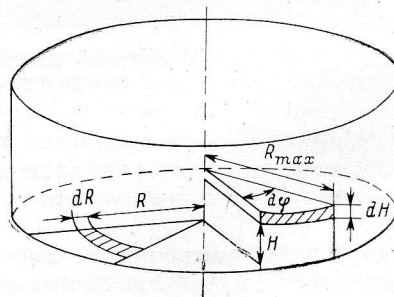
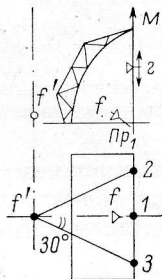
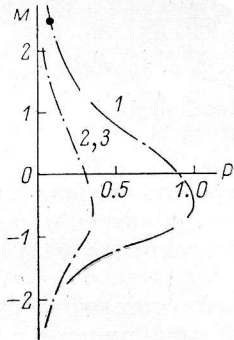


Рис. 5. Распределение мощности в раскрыве облучателя и схема измерений.

1 — центральное сечение; 2, 3 — сечение $\pm 30^\circ$.

Рис. 6. Геометрия поверхностей, на которых измерялось распределение мощности в диаграмме облучателя.

ведены расчеты доли шумовой температуры радиотелескопа $\Delta T_{1, 2, 3}$, обусловленной переоблучением и полем рассеяния облучателя в нижней и верхней полусферах (в областях 1—3, рис. 1):

$$\Delta T_{1, 2, 3} = T_0 (1 - \tau_{\text{п}}) = T_0 \left[\frac{P_1}{P_0} + \frac{P_2}{P_0} + \frac{P_3}{P_0} \right], \quad (1)$$

где P_1 — мощность поля рассеяния на поверхности Земли в области 1, P_2 — в области 2, P_3 — в области 3; P_0 — мощность излучения, принимаемая

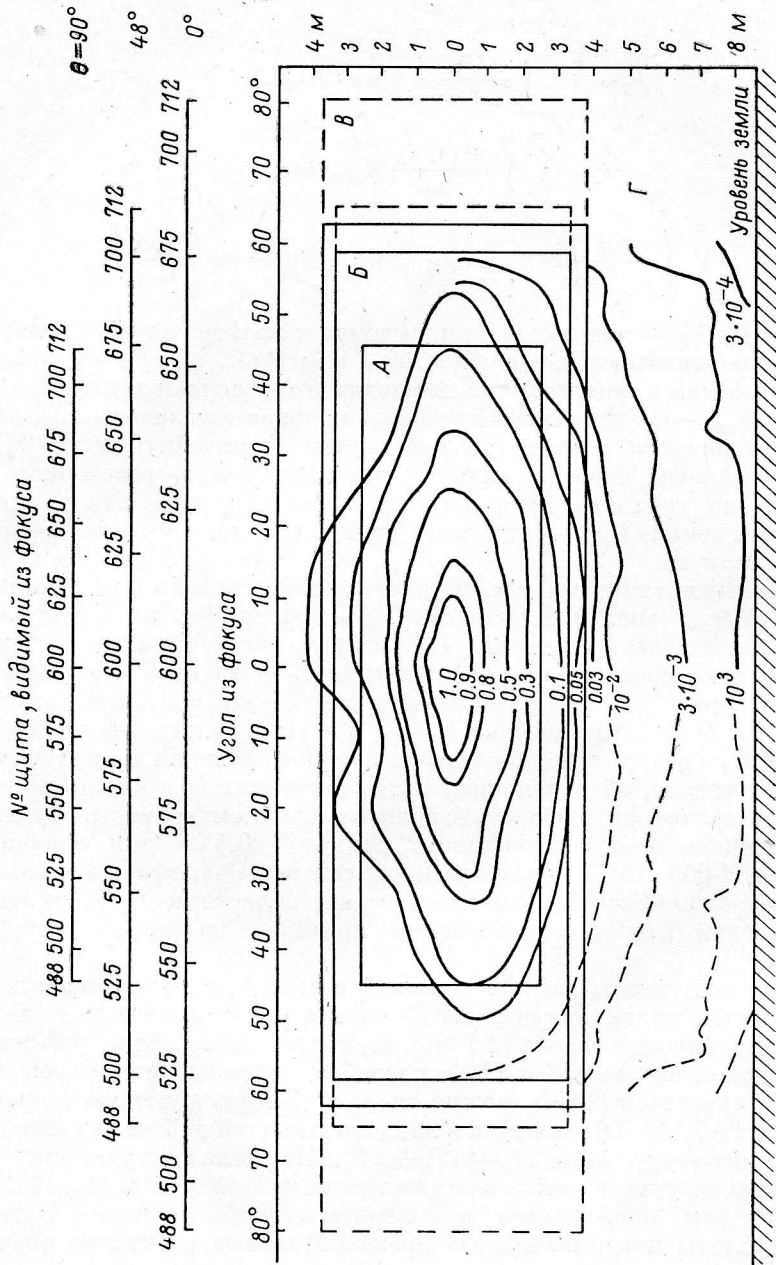


Рис. 7. Общая картина распределения мощности у главного зеркала $P(h, \varphi)/P_{\max}$.
 А — контур главного зеркала (сектора) при угле места наблюдений $\theta=90^\circ$; Б — при $\theta=48^\circ$ (штриховая линия — невыставленная часть сектора); В — при $\theta=0^\circ$; Г — область фундаментов.

антенной со всех направлений; $\eta_{\text{п}}$ — коэффициент переоблучения главного зеркала.

Мощности P_1, P_2, P_3, P_0 вычислялись по следующим формулам (рис. 6):

$$P_0 = \int_0^{\pi} \int_{-h_1}^{h_1} \frac{P(h, \varphi)}{P_{\text{max}}} R_{\text{max}} dh d\varphi;$$

$$P_1 = \int_0^{R_{\text{max}}} \int_0^{\pi} \frac{P(R, \varphi)}{P_{\text{max}}} \sin \beta \cdot R d\varphi dR;$$

$$P_2 = \int_0^{\pi} \int_{-h_1}^{h_{\text{п}}} \frac{P(h, \varphi)}{P_{\text{max}}} R_{\text{max}} dh d\varphi;$$

$$P_3 = \int_0^{\pi} \int_{h_{\text{в}}}^{h_1} \frac{P(h, \varphi)}{P_{\text{max}}} R_{\text{max}} dh d\varphi; \quad \sin \beta = \sin \left(\arctg \frac{5.3 \text{ м}}{R} \right),$$

где $P(h, \varphi) = P_h(\varphi)$ — мощность, принимаемая с элементарной площадки $R_{\text{max}} dh d\varphi$ с координатами h, φ в областях 2 и 3; $P(R, \varphi) = P_R(\varphi)$ — мощность, принимаемая с элементарной площадки $R dR d\varphi$ с координатами R, φ в области 1; P_{max} — максимальный уровень мощности в главном лепестке диаграммы вторичного зеркала на расстоянии R от облучателя; $h_{\text{п}}$ — расстояние от центра щита до нижнего края щита; $h_{\text{в}}$ — расстояние от центра щита до верхнего края щита; h_1 — расстояние от центра щита до поверхности земли; R_{max} — исходный радиус главного зеркала антенны (граница области 1).

Расчет проводился путем графического интегрирования измеренных кривых $P_h(\varphi)/P_{\text{max}}$ (рис. 7) и $P_R(\varphi)/P_{\text{max}}$ (рис. 8) по азимуту в пределах $0 - \pi$. Так были получены интегралы $I(h)$ и $I(R)$, интегрирование которых в пределах h и R , соответствующих областям 1—3 на рис. 1, позволило получить значения P_1, P_2, P_3 , а также полный интеграл по диаграмме облучателя P_0 . Найденные значения $P_{1, 2, 3, 0}$ подставлялись в формулу (1) при $T_0 = 300^\circ \text{ К}$, в результате получены следующие значения доли шумовой температуры антенны, обусловленной полем рассеяния облучателя в нижней и верхней полусферах. Область 1: доля шумовой температуры, обусловленная излучением земной поверхности, равна $T = 0.5^\circ \text{ К}$ для северного сектора РАТАН-600, 0.8° К — для западного сектора. Зависимость шумовой температуры радиотелескопа, вносимой всеми областями 1—3, от угла места наблюдений (или от наклона щитов) приведена на рис. 9 (верхняя кривая).

Используя результаты расчета шумовой температуры атмосферы в зависимости от угла места, полученные Хоггом, а также данные для температур метагалактического фона (2.7° К), шумовой температуры, вносимой щелями в главном зеркале (5° К [4]) и переоблучением вторичного зеркала первичным облучателем (3° К), можно оценить полную шумовую температуру антенны РАТАН-600, включая и найденную в этой работе избыточную шумовую температуру $\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3$. На рис. 10 приведены результаты этого расчета, а также прямые измерения полной шумовой температуры антенны, проведенные на северном секторе на волне 4 см.

Эти результаты показывают, что предварительные расчетные оценки шумовой температуры, сделанные ранее [2], как предполагалось, оказались завышенными.

Возможности уменьшения шумовой температуры РАТАН-600. Результаты измерений рассеянного поля облучателя позволяют также оценить, насколько можно снизить шумовую температуру антенны за счет установки специальных антишумовых экранов. Поскольку основной вклад в шумовую температуру, обусловленную полем рассеяния облучателя, дают области между нижней кромкой щитов и землей и над щитами, представляется

целесообразным поместить в этих областях экранирующие поверхности. Оценить оптимальные размеры экранов можно с помощью рис. 9. На этом рисунке приведены графики, показывающие, насколько уменьшится шумовая температура антенны, если снизу и сверху щитов установить экраны размерами l_0 каждый.

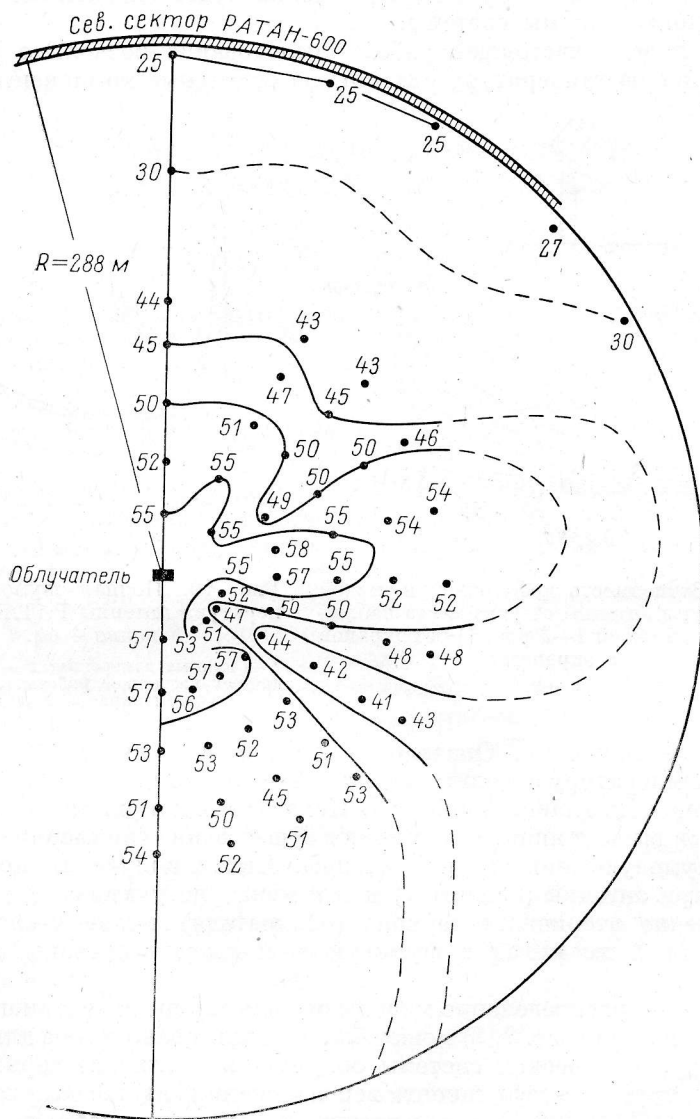


Рис. 8. Распределение мощности (рассеянного фона) на поверхности земли внутри кольца РАТАН-600 $P(R, \varphi)/P_{\max}$ (уровень в отрицательных децибеллах относительно P_{\max}).

Как видно из этих графиков, оптимальной является величина экранов $l_0 = 1 \div 2$ м. Дальнейшее увеличение размеров экранов дает незначительное снижение шумовой температуры. На рис. 10 приведены величины ожидаемой шумовой температуры РАТАН-600 при установке экранов размером 1.5 (кривая 3). В экранировке поверхности земли нет необходимости, так как вклад этой области в шумовую температуру антенны невелик ($\sim 1^\circ \text{K}$).

Закключение. Из прямых измерений шумовой температуры антенны РАТАН-600 следует, что на средних углах места на волне 4 см полная шумовая температура составляет около 30°K . Такая шумовая температура антенны является вполне удовлетворительной по величине для столь большой и сложной антенны, однако при переходе к охлаждаемым гелием приемным устройствам ($T_{\text{ш}} \approx 20^\circ\text{K}$) антенна будет вносить все же существенную долю в шумы системы.

Проведенное в настоящей работе исследование позволило разделить общую шумовую температуру антенны на отдельные компоненты и наме-

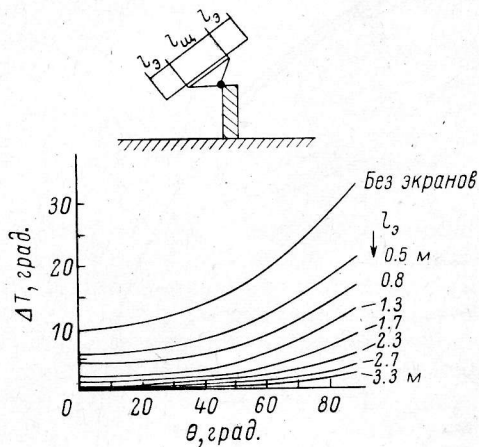


Рис. 9. Зависимость избыточной шумовой температуры антенны от угла места наблюдения (от областей 1—3 рис. 1) без экранов и с экранами.

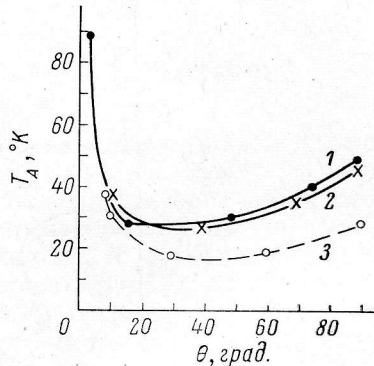


Рис. 10. Полная шумовая температура антенны РАТАН-600 на волне 4 см.

1 — прямые измерения; 2 — расчет по данным настоящей работы; 3 — расчет с учетом экранов $l=1.5$ м.

тить пути ее снижения. Оказалось, что основной вклад в избыточную шумовую температуру антенны вносят излучения земли в областях 2 и 3 — под и над щитами главного зеркала. Показано, что применение специальных экранов выше и ниже щитов может существенно (примерно в 1.5 раза) снизить шумовую температуру антенны. Вклад излучения поверхности земли внутри антенны (область 1) мал и может не учитываться ($< 1^\circ\text{K}$). Переоблучение вторичного зеркала (облучателя) также незначительно. Обусловленный им вклад в шумовую температуру антенны составляет около 3°K .

Полученное распределение мощности поля по щитам главного зеркала и за его пределами (рис. 7, 8) может быть использовано также для расчетов к. п. д. перископической системы облучатель — главное зеркало и для оценки апертурного коэффициента использования главного зеркала радиотелескопа РАТАН-600 при различных углах места наблюдения.

Авторы благодарны многим товарищам, помогавшим в этих трудоемких измерениях, в том числе А. Б. Берлину, Г. М. Тимофеевой, А. В. Ипатову, А. И. Крупейченко, Г. А. Пинчуку, А. Д. Дибижеву.

Список литературы

1. Хайкин С. Э., Кайдановский Н. Л., Парийский Ю. Н., Есепкина Н. А. Радиотелескоп РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 3—11.
2. Стоцкий А. А. Расчет шумовой температуры антенны радиотелескопа РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 83—87.