

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ
КОЛЬЦЕВОЙ ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ
РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600
ПРИ НАБЛЮДЕНИИ В ЗЕНИТ**

Е. К. Майорова, А. А. Стоцкий

Приведены результаты расчета эффективной площади и шумовой температуры радиотелескопа РАТАН-600 при наблюдении в зенит с использованием всего кольцевого зеркала и специального двухзеркального облучателя. Обсуждается оптимальная форма диаграммы направленности приемного рупора.

The results of calculation of the effective area and the noise temperature of the radio telescope RATAN-600 at the observations in zenith with the use of the whole circular mirror and special two-mirrors feed are presented. An optimum form of the beam in the receiving horn is discussed.

Одним из проектных режимов работы радиотелескопа РАТАН-600, позволяющим достигнуть максимальных значений эффективной площади и разрешающей способности, является наблюдение околоразенитной области с использованием всего кольцевого зеркала [1].

В этом режиме работы щиты, образующие главное зеркало радиотелескопа, устанавливаются под углом 45° к вертикали. При существующих щитах, вы-

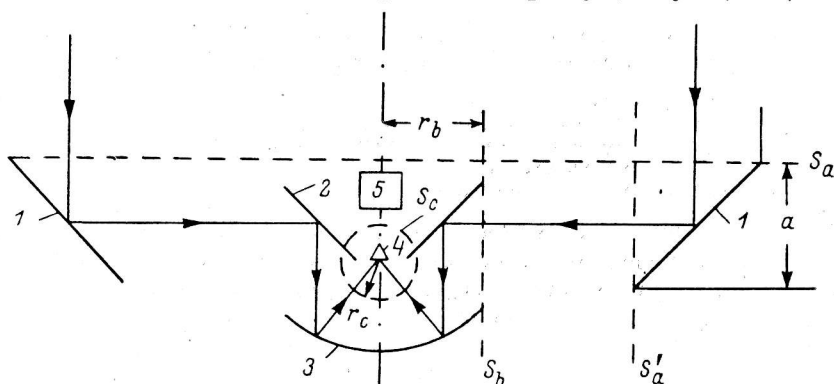


Рис. 1. Сечение кольцевой фокусирующей системы РАТАН-600 при наблюдении в зенит. 1 — главное зеркало; 2 — коническое зеркало; 3 — параболическое зеркало; 4 — приемный рупор; 5 — радиометр.

той $a_0=7.4$ м, получается кольцевой раскрыв со средним диаметром 576 м, шириной 5.23 м и геометрической площадью 9464 м². При планируемом увеличении высоты щитов до $a_0=11.1$ м ширина кольцевого раскрыва будет 7.85 м и площадь возрастет до 14 203 м².

Облучатель главного зеркала располагается в центре радиотелескопа и представляет собой специальную двухзеркальную систему, состоящую из параболического и конического зеркал и приемного рупора (рис. 1).

Смещение облучателя в горизонтальной плоскости и изменение формы главного кольцевого зеркала в пределах возможных радиальных перемещений щи-

тов (± 0.5 м) позволяют в небольших пределах изменять направление наблюдения.

В настоящей работе проведем расчет основных энергетических характеристик перископической системы, образованной главным зеркалом и коническим зеркалом облучателя: коэффициента использования вертикального размера кольцевого раскрыва η_a и кпд перископической системы η_n .

На основании полученных значений η_a и η_n оценим шумовую температуру и эффективную площадь радиотелескопа при наблюдении в зенит в диапазоне длин волн λ от 2 до 21 см.

Особенностью геометрии кольцевой фокусирующей системы является ее полная осевая симметрия. Поэтому расчет целесообразно проводить для радиального сечения кольцевой фокусирующей системы, используя двумерную модель, как это было сделано в [2], и обобщая полученные результаты на все кольцо.

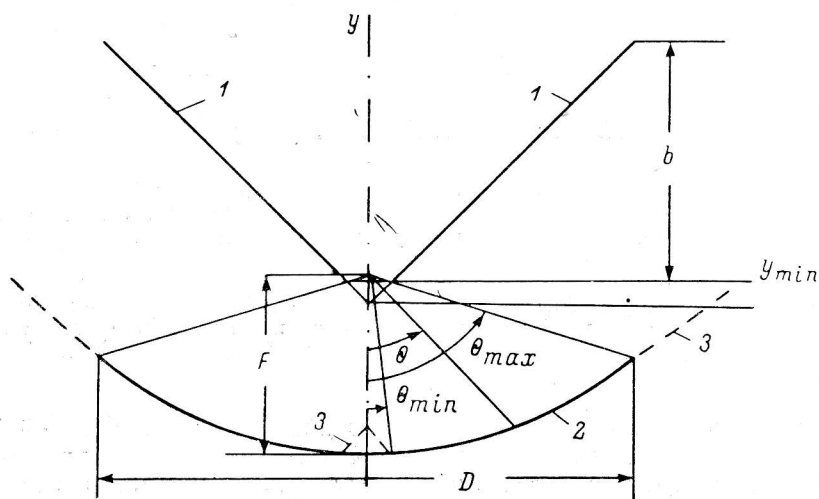


Рис. 2. Схема облучателя.

1 — коническое зеркало; 2 — параболическое зеркало; 3 — противозумовые экраны.

Все расчеты проведем для щитов высотой как 7.4, так и 11.1 м, исходя из размеров существующей конструкции облучателя (рис. 2):

Высота конического зеркала $b=4.8$ м
 Фокусное расстояние параболического зеркала $F=3.6$ м
 Минимальный угол облучения параболического зеркала $\theta_{\min}=7.9^\circ$.
 Максимальный угол облучения $\theta_{\max}=72.7^\circ$
 Диаметр конического и параболического зеркал $D=10.6$ м

Проведем сначала оценки основных параметров перископической системы η_a и η_n , исходя из распределения поля, заданного на вертикальном раскрыве конического зеркала. Для этого воспользуемся результатами расчетов, полученными в [2] для косинусоидального распределения поля на раскрыве облучателя:

$$E_b(y) = E_0 \cos\left(\frac{\pi}{2} m \frac{2y}{b}\right). \quad (1)$$

Параметр m определяет уровень мощности поля на краю раскрыва:

$$m = \frac{2}{\pi} \arccos \sqrt{P_{\text{кр}}}.$$

Величины η_a и η_n определяются соотношениями:

$$\eta_a = \frac{\left| \int_{-a/2}^{a/2} E'_a(y) dy \right|^2}{a \int_{-b/2}^{b/2} |E_b(y)|^2 dy}; \quad \eta_n = \frac{\int_{-a/2}^{a/2} |E'_a(y)|^2 dy}{\int_{-b/2}^{b/2} |E_b(y)|^2 dy}, \quad (2)$$

где $E'_a(y)$ и $E_b(y)$ — напряженности поля на раскрывах S'_a и S_b .

Результаты расчетов зависимостей этих величин от $P_{кр}$ для разных длин волн приведены на рис. 3.

Теперь рассмотрим, как связана амплитуда поля $|E_b(y)|$ на цилиндрическом синфазном раскрыве S_b конического зеркала облучателя с диаграммой направленности рупора $|E_c(\theta)|$ (т. е. распределением поля на сферическом раскрыве S_c).

На основании закона сохранения энергии в приближении геометрической оптики можно написать

$$|E_c(\theta)|^2 r_c^2 \cos \theta d\theta = |E_b(y)|^2 r_b dy.$$

В соответствии с геометрией отражающих поверхностей

$$y = 2F \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}; \quad dy/d\theta = F/\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right).$$

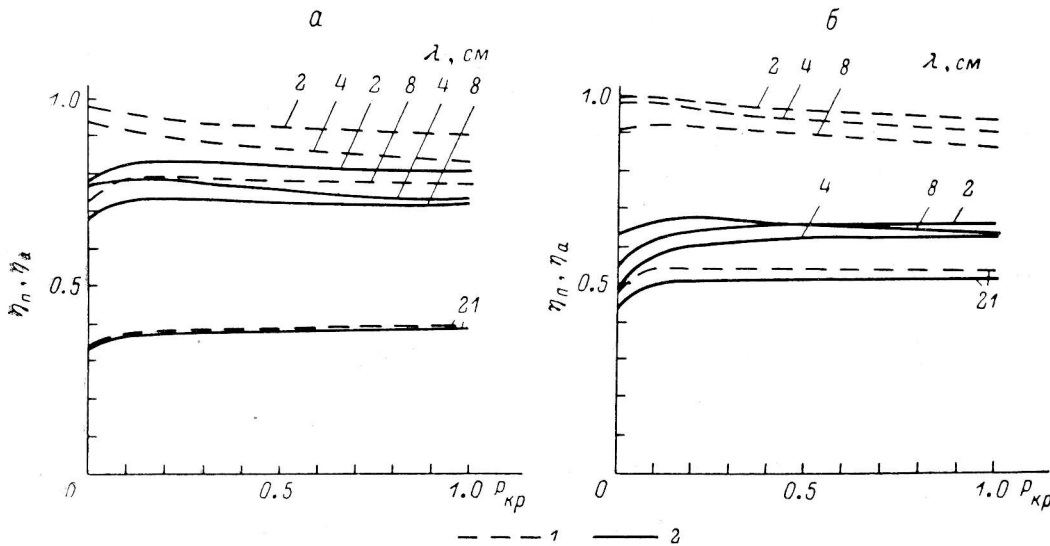


Рис. 3. Зависимость коэффициента использования вертикального размера кольцевого раскрыва η_a и кд перископической системы η_{π} от уровня мощности на краю цилиндрического раскрыва облучателя $P_{кр}$ при косинусоидальном распределении поля на нем.

$a - a_0 = 7.4$ м; $b - a_0 = 11.1$ м; 1 — η_{π} ; 2 — η_a .

Следовательно,

$$|E_b(y)|^2 = |E_c(\theta)|^2 \frac{r_c^2}{r_b F} \sin \theta \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right).$$

Удобно перейти к нормированному распределению мощности $P(\gamma)$ и мощности $\bar{F}(\theta)$ относительно мощности в середине цилиндрического раскрыва при $y = y_{ср} = \frac{y_{\min} + y_{\max}}{2}$ и соответствующем ему направлении $\theta = \theta_{ср} = 2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{y_{ср}}{2F}$, а также ввести безразмерную высоту $\gamma = 2 \frac{y - y_{\min}}{b} - 1$:

$$P(\gamma) = \left| \frac{E_b(\gamma)}{E_b(0)} \right|^2; \quad \bar{F}(\theta) = \left| \frac{E_c(\theta)}{E_c(\theta_{ср})} \right|^2.$$

Тогда

$$P(\gamma) = \bar{F}(\theta) \frac{\sin \theta \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\sin \theta_{ср} \cos^2\left(\frac{\theta_{ср}}{2}\right)}. \quad (3)$$

Используя соотношение (3), найдем диаграмму направленности рупорного облучателя, при которой на цилиндрическом раскрыве получается симметричное косинусоидальное распределение вида (1):

$$P(\gamma) = \cos^2\left(\frac{\pi}{2} m\gamma\right). \quad (4)$$

Полученные диаграммы направленности показаны на рис. 4.

Из результатов расчета η_a и η_n , приведенных на рис. 3, видно, что зависимость параметров перископической системы от уровня облучения краев раскрыва облучателя $P_{кр}$ в рассматриваемом режиме работы радиотелескопа весьма слабая, за исключением, может быть, области малых значений $P_{кр}$.

С другой стороны, как видно из рис. 4, создание равномерного распределения поля на этом раскрыве требует диаграммы направленности рупора с большим уровнем облучения края параболического зеркала, что неизбежно приведет

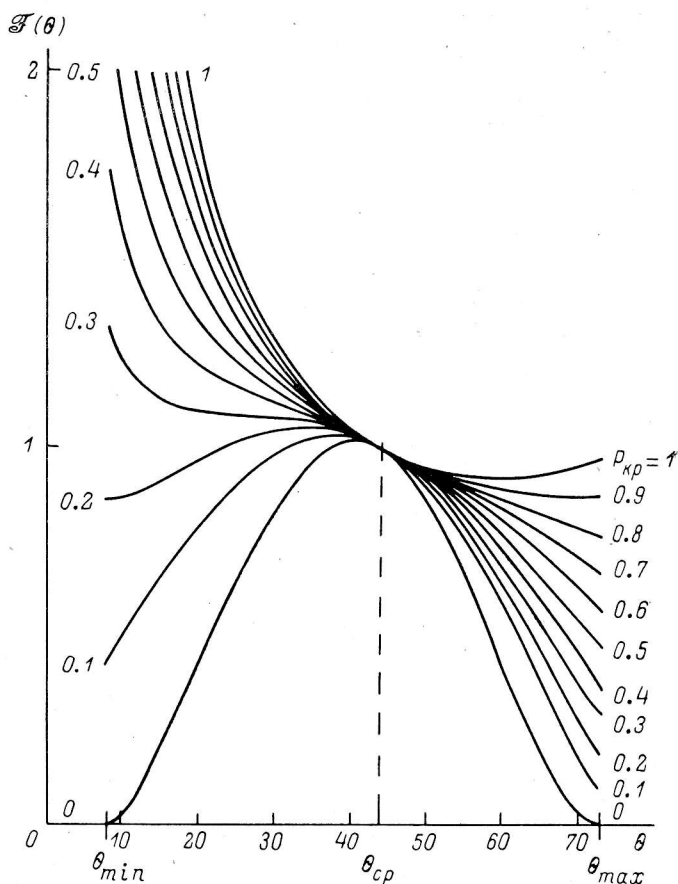


Рис. 4. Диаграмма направленности рупора по мощности $F(\theta)$, дающая косинусоидальное распределение поля на цилиндрическом раскрыве облучателя с уровнем мощности на краю $P_{кр}$.

к дополнительным потерям из-за переоблучения этого зеркала. Поэтому практически наиболее приемлемыми являются достаточно сильно спадающие к краю распределения на раскрыве S_b .

Как видно из рис. 4, для получения распределения $P(\gamma)$, спадающего на краях до нуля, требуется диаграмма направленности рупора, также спадающая до нуля к краям зеркала и имеющая глубокий провал на оси. Форма ее близка к синусоидальной:

$$F(\theta) = \sin^2\left(\pi \frac{\theta}{\theta_{\max}}\right). \quad (5)$$

(Здесь и далее диаграммы направленности и распределения поля будем нормировать к их максимальному значению.)

Для повышения уровня облучения краев цилиндрического раскрыва необходимо увеличивать уровень облучения как края, так и середины параболического зеркала, причем для сохранения симметрии распределения $P(\gamma)$, как это видно из рис. 4, возрастание облучения середины должно происходить быстрее, чем края. При достижении величины $P_{кр} \approx 0.25$ осевой провал в диаграмме на-

направленности рупора вообще пропадает. В этом случае диаграмма направленности рупора приближается к косинусоидальной:

$$F(\theta) = \cos^2 \left(\pi m \frac{\theta}{\theta_{\max}} \right), \quad (6)$$

где $m = \frac{2}{\pi} \arccos \sqrt{F_{\text{кр}}}$; $F_{\text{кр}} = F(\theta_{\max})$.

Для того чтобы проследить, как изменяется распределение амплитуды поля на цилиндрическом раскрыве $E_b(\gamma)/E_{b\max}(\gamma) = \sqrt{P(\gamma)}$ в зависимости от уровня диаграммы рупора в центре $F_{\text{ц}}$ и в направлении на края параболического зеркала $F_{\text{кр}}$, удобно для $F(\theta)$ применить следующую аппроксимацию:

$$F(\theta) = \begin{cases} \cos^2 \frac{\pi}{2} \left(m \frac{\theta}{\theta_{\max}} - l \right), & \theta \leq \frac{1+l}{m} \theta_{\max}; \\ 0 & \theta > \frac{1+l}{m} \theta_{\max}, \end{cases} \quad (7)$$

где m и l связаны с уровнем мощности в центре и в направлении на края зеркала следующими соотношениями:

$$l = \frac{2}{\pi} \arccos \sqrt{F_{\text{ц}}}; \quad m = \frac{2}{\pi} \arccos \sqrt{F_{\text{кр}}} + l.$$

Аппроксимации (5) и (6) являются частными случаями (7) при $F_{\text{ц}} = F_{\text{кр}} = 0$ и $F_{\text{ц}} = 1$, $F_{\text{кр}} = 0$.

На рис. 5 показаны распределения $E_b(\gamma)/E_{b\max}(\gamma)$ при $F(\theta)$ вида (7) при разных значениях $F_{\text{ц}}$ и $F_{\text{кр}}$.

Рассчитаем теперь значения коэффициентов η_a и $\eta_{\text{ц}}$, исходя из диаграммы направленности первичного рупора вида (7).

Вычисления будем проводить по следующей схеме.

1. По заданной диаграмме рупора в приближении геометрической оптики по формуле (3) рассчитывается поле E_b на цилиндрическом раскрыве облучателя S_b .

2. По найденному распределению поля E_b в соответствии с методикой, изложенной в работе [2], находится поле E'_a на поверхности цилиндра S'_a . Этот цилиндр рассматривается как внутренний раскрыв главного кольцевого конического зеркала. Распределение поля на нем полностью определяет энергетические характеристики фокусирующей системы радиотелескопа.

3. По распределению полей E_b и E'_a по формулам (2) рассчитываются коэффициенты $\eta_{\text{ц}}$ и η_a и эффективный вертикальный размер главного зеркала $a_{\text{эф}} = \eta_a \cdot a_0 \cos 45^\circ$, равный эффективной ширине кольцевого раскрыва.

Результаты расчетов $\eta_{\text{ц}}$ и η_a при минимальном и максимальном уровнях в центре ($F_{\text{ц}} = 0$ и $F_{\text{ц}} = 1$) и разных значениях облучения края $F_{\text{кр}}$ приведены на рис. 6, а, б. Зависимости $\eta_{\text{ц}}(F_{\text{ц}})$ и $\eta_a(F_{\text{ц}})$ при изменении $F_{\text{ц}}$ от 0 до 1, как показали расчеты, практически линейны.

Из сравнения зависимостей, приведенных на рис. 6 и 3, видно, что рупор с диаграммой направленности, аппроксимируемой функцией вида (7), обеспечивает параметры перископической системы, близкие к параметрам с оптимальным косинусным распределением поля на раскрыве S_b .

Полученные результаты показывают, что с точки зрения получения низкой шумовой температуры и максимальной эффективной площади на волнах $\lambda = 21$ см ($a_0 = 7.4$ и 11.1 м) и $\lambda = 8$ см ($a_0 = 7.4$ м) целесообразно использовать обычный облучатель с диаграммой направленности, близкой к косинусоидальной, с уровнем облучения края параболического цилиндра $F_{\text{кр}} = 0.1 \div 0.2$; на волнах же $\lambda = 2$ см ($a_0 = 7.4$ м), 4 см ($a_0 = 7.4$ м) и 8 см ($a_0 = 11.1$ м) оптимальной является диаграмма направленности с глубоким провалом в центре и спадающая почти до нуля к краям.

При размере щитов $a_0 = 11.1$ м на волнах $\lambda = 2$ и 4 см надо различать диаграмму направленности, оптимальную с точки зрения минимальной шумовой

температуры, и диаграмму направленности, оптимальную с точки зрения максимальной эффективной площади. Низкие шумовые температуры дает диаграмма с $F_{\text{н}}=F_{\text{кр}}=0$, а максимальную эффективную площадь — диаграмма, близкая к косинусоидальной, с уровнем облучения края параболического цилиндра $F_{\text{кр}}=0.2$. Перейдем к оценке параметров радиотелескопа в целом. Для расчета шумовой температуры радиотелескопа $T_{\text{ш}}$ воспользуемся формулами:

$$T_{\text{ш}} = T_{\text{А}} + T_{\text{пр}}; \quad T_{\text{А}} = T_{\text{н}} + \eta_{\text{ш}} (T_{\text{мг}} + T_{\text{атм}} + T_{\text{ш}}) + T_{\text{рун}}; \quad T_{\text{н}} = T_{\text{ф}} (1 - \eta_{\text{ш}}),$$

где $T_{\text{атм}}=3 \text{ К}$ — шумовая температура атмосферы в зените;
 $T_{\text{мг}}=3 \text{ К}$ — шумовая температура метагалактического фона;

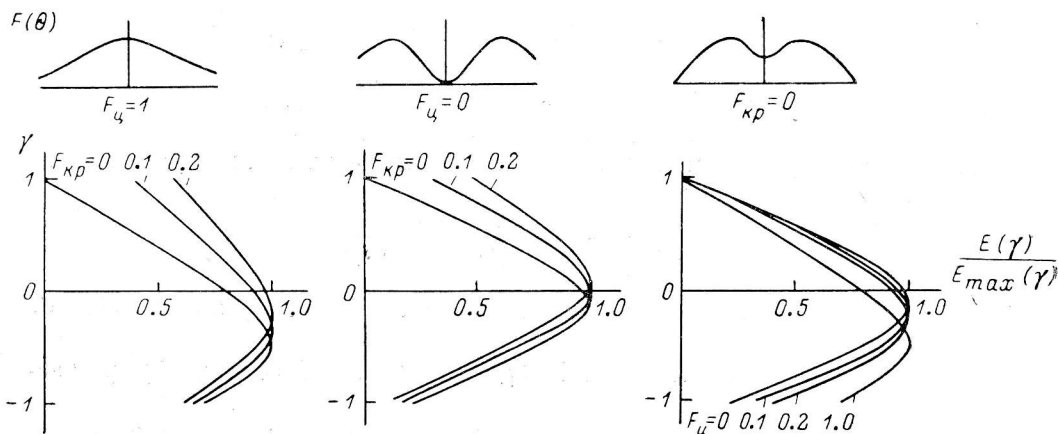


Рис. 5. Распределение поля по вертикали на цилиндрическом раскрытии облучателя $E(\gamma)/E_{\text{max}}(\gamma)$ при разных видах диаграммы направленности рупора $F(\theta)$.

$T_{\text{ш}}=8 \text{ К}$ — шумовая температура, обусловленная щелями между щитами;

$T_{\text{рун}}=5 \text{ К}$ — собственная шумовая температура приемного рупора, включая компоненту, связанную с переоблучением параболического зеркала. Предполагается, что для уменьшения шумовой температуры, обусловленной переоблучением параболического зеркала, по краям и в центре его будут установлены конические экраны (рис. 2). В случае отсутствия экранов $T_{\text{рун}}$, а следовательно, и $T_{\text{ш}}$ дополнительно увеличатся на 5—10 К;

$T_{\text{ф}}$ — яркостная температура окружающего фона за главным зеркалом радиотелескопа. На коротких волнах основной вклад в $T_{\text{ф}}$ дают окружающие радиотелескоп холмы, покрытые лесом и кустарником, а на длинных — холмы и частично атмосфера. Проведенные оценки показывают, что можно принять: на волне 21 см $T_{\text{ф}}=220 \text{ К}$, на волне 8 см $T_{\text{ф}}=240 \text{ К}$, на волне 4 см $T_{\text{ф}}=250 \text{ К}$, на волне 2 см $T_{\text{ф}}=290 \text{ К}$;

$T_{\text{пр}}$ — шумовая температура радиоприемного устройства. При вычислении рассматриваются два случая: $T_{\text{пр}}=20$ и 100 К.

Расчет эффективной площади радиотелескопа $S_{\text{эф}}$ проведем по формуле

$$S_{\text{эф}} = 2\pi R a_{\text{эф}} \eta_{\sigma} \eta_{\text{ш}} \eta_{\text{обл}},$$

где $R=288 \text{ м}$ — средний радиус кольцевого раскрытия; $\eta_{\text{ш}}=0.92$ — коэффициент, учитывающий влияние щелей; $\eta_{\text{обл}}$ — коэффициент, учитывающий переоблучение параболического зеркала:

$$\eta_{\text{обл}} = \frac{\int_{\theta_{\text{min}}}^{\theta_{\text{max}}} |F(\theta)| \sin \theta d\theta}{\int_0^{\theta_{\text{max}}} |F(\theta)| \sin \theta d\theta};$$

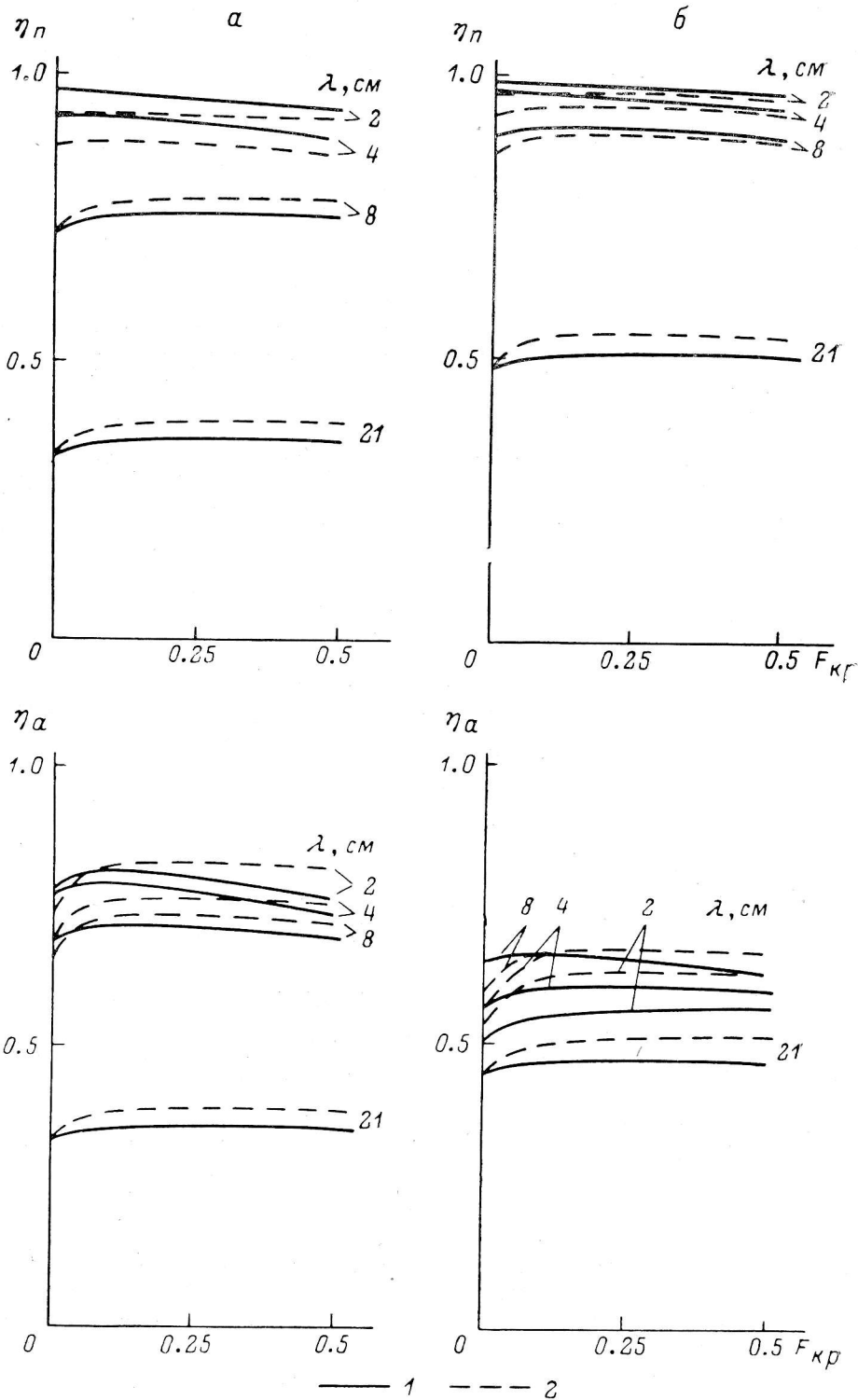


Рис. 6. Зависимость коэффициента использования вертикального размера кольцевого раскрыва η_a и КПД перископической системы η_n от уровня облучения края параболического цилиндра.

$a - a_0 = 7.4$ м; $б - a_0 = 11.1$ м; 1 — $F_{ц} = 0$; 2 — $F_{ц} = 1$.

η_σ — коэффициент, учитывающий систематические и случайные ошибки отражающей поверхности.

Систематические ошибки, связанные с отклонением цилиндрической поверхности щитов от идеальной конической поверхности главного зеркала, при наблюдении в зенит пренебрежимо малы [3]. Среднеквадратичная величина случайных ошибок, как показали специальные исследования [4], при стандартных методах юстировки и тщательной установке щитов не превышает $\sigma=0.5$ мм.

В соответствии с этим применим формулу

$$\eta_\sigma = e^{-(2\pi\sigma/\lambda)^2}.$$

Результаты расчетов $T_{ш}$, $S_{эф}$, а также величины $G=S_{эф}/T_{ш}$, характеризующей эффективность радиотелескопа, приведены в табл. 1. Расчеты проводились для диаграмм направленности, значения $F_{ц}$ и $F_{кр}$ которых близки к оптимальным: для волн 2 и 4 см это $F_{ц}=F_{кр}=0$, для волны 8 см при $a_0=7.4$ м $F_{ц}=1$, $F_{кр}=0.2$, для волны 8 см при $a_0=11.1$ м $F_{ц}=0$, $F_{кр}=0.1$, для волны 21 см $F_{ц}=1$, $F_{кр}=0.2$.

ТАБЛИЦА 1

λ см	a_0 м	$a_{эф}$ м	$T_{ц}$ К	T_A К	$T_{ш}$		$S_{эф}$ м ²	G	
					$T_{ш}=20$ К	$T_{ш}=100$ К		$T_{ш}=20$ К	$T_{ш}=100$ К
					К	К		м ² /К	
21	7.4	2.0	135	142	162	242	3330	21	14
	11.1	4.0	99	112	132	212	6659	50	32
8	7.4	3.7	52	68	88	168	6218	71	37
	11.1	5.2	19	37	57	137	8705	152	64
4	7.4	4.0	17	35	55	135	6572	119	49
	11.1	4.5	4	23	43	123	7395	172	60
2	7.4	4.1	6	25	45	125	6485	144	52
	11.1	4.1	1	20	40	120	6485	162	54

Представляет интерес оценить, насколько существенно увеличение размеров щитов с 7.4 до 11.1 м и применение радиометров с низким уровнем собственных шумов (20 К), подобно описанному в [5]. В табл. 2 приведены отношения величин $G(a_0, T_{ш})$, вычисленных при разных комбинациях значений a_0 и $T_{ш}$.

ТАБЛИЦА 2

λ , см	$\frac{G(11.1 \text{ м}; T_{ш})}{G(7.4 \text{ м}; T_{ш})}$		$\frac{G(a_0; 20 \text{ К})}{G(a_0; 100 \text{ К})}$		$\frac{G(11.1 \text{ м}; 20 \text{ К})}{G(7.4 \text{ м}; 100 \text{ К})}$
	$T_{ш}=20$ К	$T_{ш}=100$ К	$a_0=7.4$ м	$a_0=11.1$ м	
21	2.4	2.3	1.5	1.6	3.6
8	2.1	1.7	1.9	2.4	4.1
4	1.4	1.2	2.4	2.9	3.5
2	1.1	1.0	2.8	3.0	3.1

Видно, что как увеличение размеров щитов, так и снижение шумовой температуры радиометра весьма существенно повышают эффективность радиотелескопа, причем для длинных волн более существенно увеличение размеров щитов, а для коротких волн — снижение шумовой температуры радиометра.

Интересно сравнить полученные оценки G с эффективностью радиотелескопа, достигнутой при проведении глубоких обзоров в режиме низких собственных шумов на волне 7.6 см [5].

При этих наблюдениях шумовая температура радиометра с трактом была $T_{ш}=26.5$ К, а шумовая температура антенны благодаря применению противозумовых сетчатых экранов была снижена до $T_A=11.5$ К. Наблюдения проводились на одном секторе ($1/4$ кольца), так что эффективная площадь в этом режиме с учетом спадающего распределения поля по горизонтали примерно в 5—

6 раз меньше, чем при кольцевом раскрыве. По наблюдениям опорных источников она была около 1000 м^2 [6].

Таким образом, в этих экспериментах была реализована величина $G = 26 \text{ м}^2/\text{К}$. Сравнивая ее со значениями G , приведенными в табл. 1 (для волны 8 см), видим, что использование кольцевого раскрыва при «горячем» приемнике ($T_{\text{пр}} = 100 \text{ К}$) и существующих щитах размером 7.4 м даст увеличение эффективности радиотелескопа всего лишь в 1.4 раза. При применении «холодного» приемника ($T_{\text{пр}} = 20 \text{ К}$) эффективность увеличится примерно в 2.7 раза. Если размеры щитов будут увеличены до 11.1 м, то при использовании «холодного» приемника можно ожидать, что эффективность радиотелескопа с кольцевым раскрывом при наблюдении в зенит будет примерно в 6 раз больше, чем достигнутая в эксперименте «Холод».

Литература

1. Е с е п к и н а Н. А., П а р и й с к и й Ю. Н. Особенности работы антенны переменного профиля при наблюдении вблизи зенита. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 58—62.
2. М а й о р о в а Е. К., С т о ц к и й А. А. Расчет перископической системы антенны переменного профиля. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1981, 13, с. 117—130.
3. Ш и в р и с О. Н., П а р и й с к и й Ю. Н. О возможности увеличения разрешающей способности Большого пулковского радиотелескопа. — Изв. ГАО, 1970, 185, с. 191—201.
4. И с с л е д о в а н и е точности отражающей поверхности главного зеркала РАТАН-600 (Северный сектор) / С. Я. Голосова, Н. А. Есепкина, Ю. К. Зверев и др. — Астрофизич. исслед. (Изв. САО), 1982, 15, с. 132—150.
5. Р а д и о т е л е с к о п РАТАН-600 в режиме низких собственных шумов / А. Б. Берлин, Л. Г. Гассанов, В. Я. Гольнев и др. — Радиотехника и электроника, 1982, 7, с. 1268—1273.
6. О п р е д е л е н и е плотностей потоков радиоисточников на комплексе широкополосных радиометров сплошного спектра радиотелескопа РАТАН-600 / К. Д. Алиакберов, М. Г. Мингалиев, М. Н. Наугольная и др. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1985, 19, с. 60—65.

Поступила в редакцию 10.12.84