

## РАСЧЕТ ТРЕХЗЕРКАЛЬНОЙ ПЕРИКОПИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АНТЕННЫ ПЕРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ

*Е. К. Майорова*

Приведены результаты расчета трехзеркальной перископической системы антенны переменного профиля в приближении дифракции Френеля. На основе расчетов получены количественные оценки характеристик перископической системы Южный сектор—перископ радиотелескопа РАТАН-600. Сделан вывод о возможности повышения его эффективности путем увеличения размеров перископического отражателя.

The results are presented of calculation of the three-mirror periscopic system of the variable profile antenna in Frenel diffraction approximation. Quantitative estimation of characteristics of the periscopic system South sector—periscope of the radiotelescope RATAN-600 are obtained on the basis of the calculation. A conclusion of a possible raise of efficiency of this radiotelescope by means of increasing the dimensions of the periscopic reflector is drawn.

Радиотелескоп РАТАН-600 является антенной переменного профиля, у которой в Южном секторе имеется плоское перископическое зеркало, подобное антеннам «Краусс» или «Нансей», предназначенное для осуществления режима сопровождения. При работе в таком режиме элементы главного (Южного) отражателя должны образовывать круговой цилиндр, а вторичный облучатель иметь специальную форму для коррекции фазовых ошибок кругового отражателя [1].

Южный сектор с плоским отражателем может быть использован также и при работе АПП в режиме прохождения. В этом случае отражающая поверхность главного зеркала и облучатель представляют собой вырезку из параболического цилиндра.

При работе АПП с перископом главное зеркало, вторичный облучатель и перископ образуют трехзеркальную перископическую систему. Расчет основных параметров такой системы может быть сделан из рассмотрения ее сечения вертикальной плоскостью, проходящей через облучатель, главное зеркало и плоский перископический отражатель.

Для расчетов воспользуемся упрощенной моделью, представляющей собой бесконечно протяженный в горизонтальной плоскости облучатель с вертикальным размером  $b$  и параллельные ему главный и перископический отражатели с вертикальными размерами  $a$  и  $c$  соответственно (рис. 1). Вертикальный размер перископического отражателя меняется в зависимости от высоты  $h$  наблюдаемого источника по закону  $c = c_0 \cos(h/2)$ .

Аналогичная модель была предложена в работе [2] и использовалась в работах [2, 3] для оценок основных характеристик двухзеркальной перископической системы радиотелескопа РАТАН-600.

В настоящей работе проводятся расчеты основных характеристик трехзеркальной перископической системы, которые определяют ее эффективность в режиме наблюдения космических источников. К ним относятся: эффективный вертикальный размер перископического отражателя  $c_{эф}$ , компонента шумовой температуры антенны, обусловленная переоблучением в перископической системе  $T_n$ , отношение сигнал/шум системы  $c_{эф}/T_n$ .

Поле на раскрытие облучателя задается синфазным, со спадающим амплитудным распределением:

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

Параметр  $m$  определяет уровень поля на краю раскрыва облучателя, а  $\Omega$  — его асимметрию. При расчетах параметры  $m$  и  $\Omega$  принимаются равными соответственно 0.8 и 0.2. В этом случае распределение поля в раскрыве облучателя близко к реальному для центрального сечения антенны РАТАН-600.

Эффективный вертикальный размер перископического отражателя рассчитывается по формуле

$$c_{эф} = c\eta_c, \quad (2)$$

где  $\eta_c$  — коэффициент использования вертикального размера перископического отражателя, определяемый отношением мощности поля в главном лепестке диаграммы направленности к мощности поля в раскрыве облучателя:

$$\eta_c = \frac{\left| \int_{-c/2}^{c/2} E_c(y_c) dy_c \right|^2}{c \int_{-b/2}^{b/2} |E_b(y_b)|^2 dy_b}, \quad (3)$$

где  $E_c(y_c)$  — комплексное поле на раскрыве перископического отражателя.

Величина  $\eta_c$  определяет эффективный размер отражателя  $c_{эф}$  с учетом как амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве отражателя, так и дифракционных потерь в перископической системе.

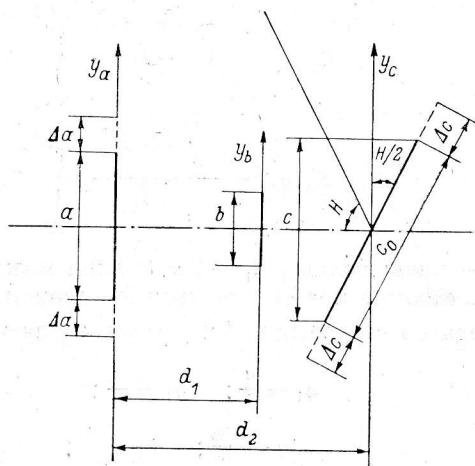


Рис. 1. Вертикальное сечение трехзеркальной перископической системы антенны переменного профиля.

Компонента шумовой температуры, обусловленная переоблучением в трехзеркальной перископической системе, равна:

$$T_{II} = T_0(1 - \eta_1) + T_0(1 - \eta_2)\eta_1, \quad (4)$$

где  $\eta_1$  — КПД перископической системы облучатель—главное зеркало, равный отношению мощности, проходящей через раскрыв главного зеркала, к мощности, проходящей через раскрыв облучателя:

$$\eta_1 = \frac{\int_{-a/2}^{a/2} |E_a(y_a)|^2 dy_a}{\int_{-b/2}^{b/2} |E_b(y_b)|^2 dy_b}; \quad (5)$$

$\eta_2$  — КПД перископической системы главное зеркало—перископический отражатель, равный отношению мощности, проходящей через раскрыв перископического отражателя, к мощности, проходящей через раскрыв главного зеркала:

$$\eta_2 = \frac{\int_{-c/2}^{c/2} |E_c(y_c)|^2 dy_c}{\int_{-a/2}^{a/2} |E_a(y_a)|^2 dy_a}, \quad (6)$$

$E_a(y_a)$  — комплексное поле в раскрыве главного зеркала;  $T_0$  — яркостная температура окружающего фона, принимаемая равной 290 К.

Отношение сигнал/шум рассчитывается по формуле

$$\frac{C_{\text{эфф}}}{T_{\text{ш}}} = \frac{C_{\text{эфф}}}{T_{\text{А}} + T_{\text{пр}}}, \quad (7)$$

где  $T_{\text{ш}}$  — шумовая температура радиотелескопа;  $T_{\text{А}}$  — шумовая температура антенны;  $T_{\text{пр}}$  — шумовая температура радиоприемного устройства, принимаемая равной 20 К.

Шумовая температура антенны вычисляется следующим образом:

$$T_{\text{А}} = T_{\text{п}} + \eta_{\text{п}}(T_{\text{атм}} + T_{\text{мг}} + T_{\text{ш}}) + T_{\text{рун}}. \quad (8)$$

Здесь  $T_{\text{атм}}$  — шумовая температура атмосферы (ее значения для разных длин волн и высот источника брались по результатам, полученным Хоггом [4]);  $T_{\text{мг}} = 3 \text{ К}$  — температура метагалактического фона;  $T_{\text{ш}} = 8 \text{ К}$  — шумовая температура, обусловленная щелями между элементами зеркал;  $T_{\text{рун}} = 3 \text{ К}$  — шумовая температура первичного рупорного облучателя;  $\eta_{\text{п}} = \eta_1 \eta_2$ .

Расчет полей на раскрыве главного отражателя  $E_a(y_a)$  и перископического отражателя  $E_c(y_c)$  проводится на основе интеграла Кирхгофа в приближении дифракции Френеля:

$$E_a(y_a) = \frac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d_1} e^{j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{\lambda d_1}} \int_{-b/2}^{b/2} E_b(y_b) e^{-j\pi \frac{(y_b - y_a)^2}{\lambda d_1}} dy_b; \quad (9)$$

$$E_c(y_c) = \frac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d_2} e^{j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{\lambda d_2}} \int_{-a/2}^{a/2} E_a(y_a) e^{-j\pi \frac{(y_a - y_c)^2}{\lambda d_2}} dy_a, \quad (10)$$

где  $\lambda$  — длина волны;  $d_1$  — расстояние между облучателем и главным зеркалом;  $d_2$  — расстояние между главным зеркалом и перископом.

Вводятся следующие безразмерные параметры:

$$q_1 = \frac{a}{b}; \quad q_2 = \frac{c}{a}; \quad u_1^2 = \frac{b^2}{4d_1\lambda}; \quad u_2^2 = \frac{a^2}{4\lambda d_2};$$

$$\gamma = \frac{2y_b}{b}; \quad \xi = \frac{2y_a}{a}; \quad \delta = \frac{2y_c}{c}; \quad g_b = \frac{E_b}{E_0}.$$

Тогда выражения (9), (10) в этих переменных принимают вид:

$$\frac{E_a}{E_0}(\xi) = e^{-j\frac{2\pi d_1}{\lambda}} e^{-j\frac{\pi}{4}} u_1 \int_{-1}^1 g_b(\gamma) e^{-j\pi u_1^2 (\gamma - q_1 \xi)^2} d\gamma; \quad (11)$$

$$\frac{E_c}{E_0}(\delta) = e^{-j\frac{2\pi(d_1+d_2)}{\lambda}} e^{-j\frac{\pi}{4}} u_1 u_2 \int_{-1}^1 e^{-j\pi u_2^2 (\xi - q_2 \delta)^2} \int_{-1}^1 e^{-j\pi u_1^2 (\gamma - q_1 \xi)^2} g_b(\gamma) d\gamma d\xi. \quad (12)$$

Подставляя их в (5), (6), получаем следующие выражения для  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\eta_c$ :

$$\eta_1 = u_1^2 q_1 \frac{\int_{-1}^1 \left| \int_{-1}^1 g_b(\gamma) e^{-j\pi u_1^2 (\gamma - q_1 \xi)^2} d\gamma \right|^2 d\xi}{\int_{-1}^1 |g_b(\gamma)|^2 d\gamma}; \quad (13)$$

$$\eta_2 = u_2^2 q_2 \frac{\int_{-1}^1 \left| \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 g_b(\gamma) e^{-j\pi u_1^2 (\gamma - q_1 \xi)^2} e^{-j\pi u_2^2 (\xi - q_2 \delta)^2} d\gamma d\xi \right|^2 d\delta}{\int_{-1}^1 \left| \int_{-1}^1 g_b(\gamma) e^{-j\pi u_1^2 (\gamma - q_1 \xi)^2} d\gamma \right|^2 d\xi}; \quad (14)$$

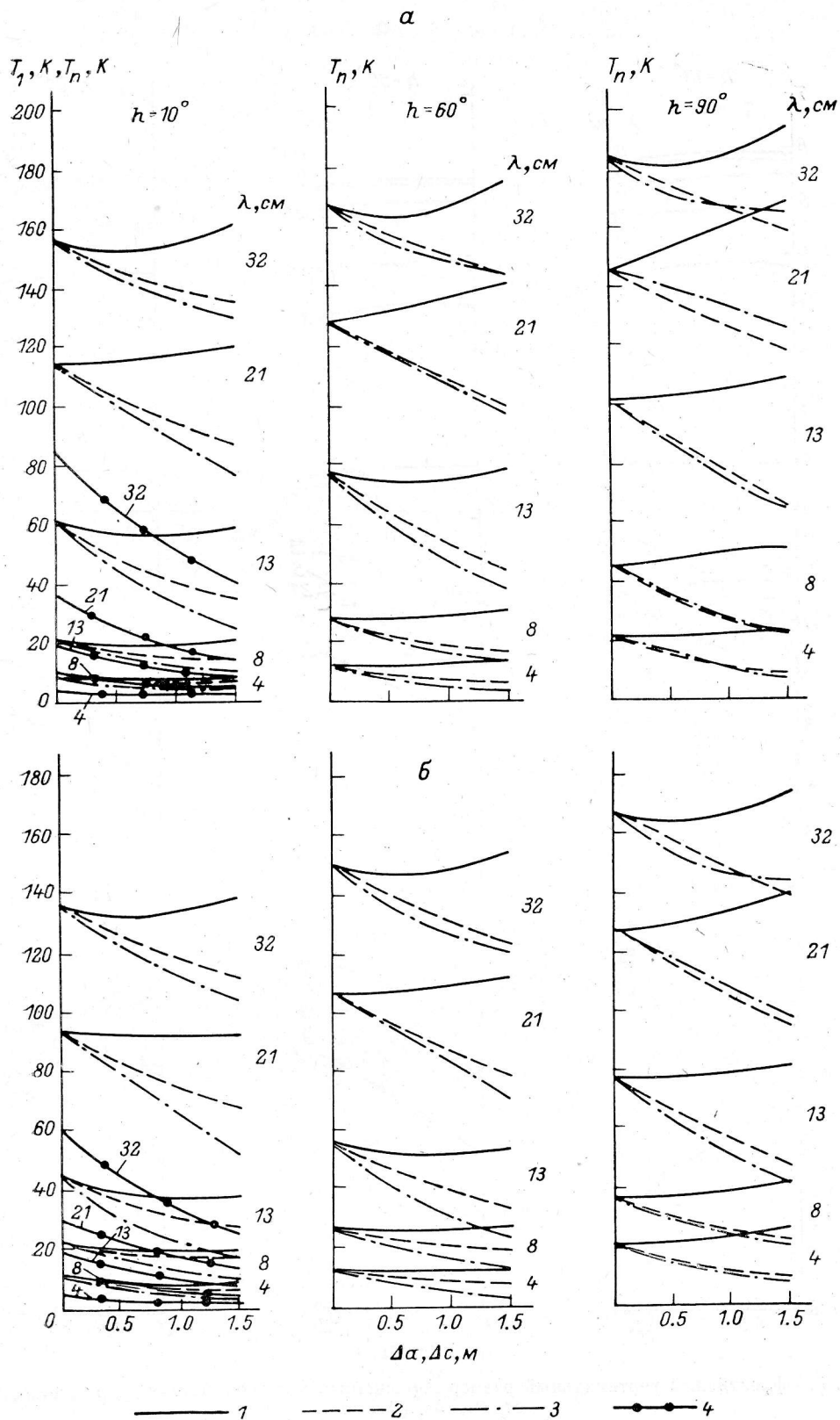


Рис. 2. Компонента шумовой температуры, обусловленная переоблучением  $T_{II}$ , в зависимости от  $\Delta a$  (1), от  $\Delta c$  (2), от  $\Delta a$ ,  $\Delta c$  (3).  
 $\alpha$  — вертикальный размер облучателя  $b=5.5$  м;  $\beta$  —  $b=6.8$  м; 4 — компонента шумовой температуры, обусловленная переоблучением главного зеркала  $T_I$  в зависимости от  $\Delta a$ .

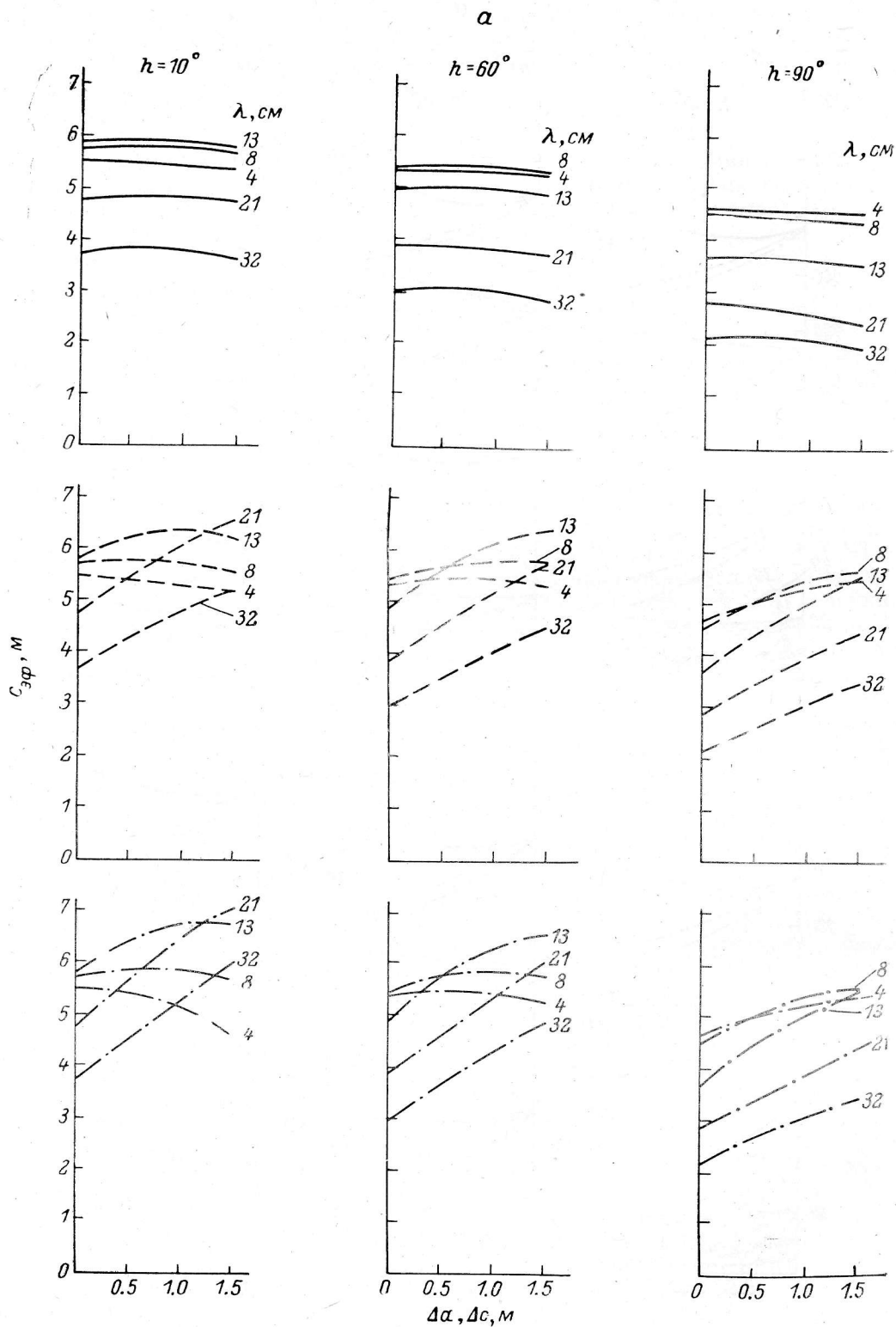


Рис. 3. Эффективный вертикальный размер перископического облучателя  $c_{\text{эф}}$  в зависимости от  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta c$ , ( $\Delta\alpha$ ,  $\Delta c$ ).

$a - b = 5.5$  м;  $b - b = 6.8$  м.

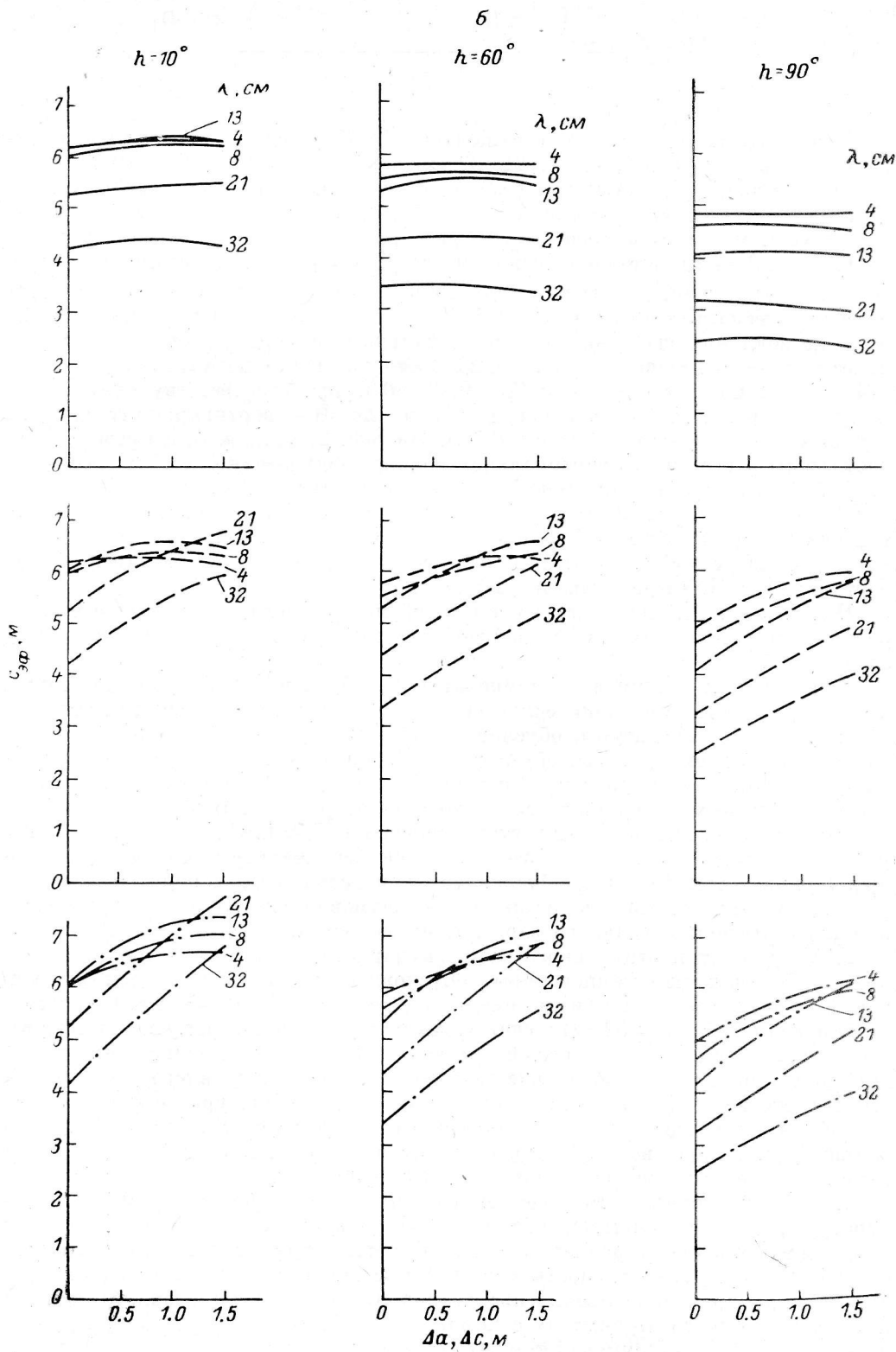


Рис. 3 (продолжение).

$$\eta_c = \frac{u_1^2 u_2^2 g_1 g_2}{2} \frac{\left| \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 g_b(\gamma) e^{-j\pi u_1^2 (\gamma - q_1 \xi)^2} e^{-j\pi u_2^2 (\xi - q_2 \delta)^2} d\gamma d\xi d\delta \right|^2}{\int_{-1}^1 |g_b(\gamma)|^2 d\gamma}. \quad (15)$$

Расчет  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\eta_c$  проводится с помощью ЭВМ методом численного интегрирования для волн  $\lambda = 4, 8, 13, 21, 32$  см и высот источника  $h = 10, 60, 90^\circ$ , как для реально существующих размеров перископической системы ( $a = 7.4$  м,  $c_0 = 8.5$  м,  $b = 5.5$  м,  $d_1 = 132$  м,  $d_2 = 184$  м), так и для системы, у которой эти размеры меняются в некоторых пределах.

На рис. 2—4 представлены зависимости  $T_n$ ,  $c_{эф}$  и  $c_{эф}/T_m$  от величины приращения вертикального размера главного зеркала  $\Delta a$ , вертикального размера перископического отражателя  $\Delta c$ , а также случай, когда одновременно на одну и ту же величину увеличиваются вертикальные размеры главного и перископического отражателей  $\Delta a$ ,  $\Delta c$ . Зависимости даны для нескольких волн ( $\lambda = 4, 8, 13$  см) и высот источников ( $h = 10, 60, 90^\circ$ ).  $\Delta a = 0$  соответствует вертикальному размеру главного зеркала  $a = 7.4$  м,  $\Delta c = 0$  — вертикальному размеру перископического отражателя  $c_0 = 8.5$  м. На рис. 2, а, 3, а, 4, а представлены результаты расчетов при вертикальном размере облучателя  $b = 5.5$  м, на рис. 2, б, 3, б, 4, б — при вертикальном размере облучателя 6.8 м.

Кроме того, на рис. 2 линией 4 показано, как изменяется компонента шумовой температуры, обусловленная переоблучением в двухзеркальной перископической системе облучатель—главное зеркало в зависимости от приращения вертикального размера главного зеркала.

На основании полученных зависимостей можно сделать следующие выводы о поведении основных характеристик трехзеркальной перископической системы.

1. Компонента шумовой температуры, обусловленная переоблучением в трехзеркальной перископической системе, складывается из двух составляющих: шумовой температуры, обусловленной переоблучением главного зеркала,  $T_1$ , и шумовой температуры, обусловленной переоблучением плоского отражателя,  $T_2$ . Для перископической системы с размерами  $b = 5.5$  м,  $a = 7.4$  м,  $c_0 = 8.5$  м и низких источников эти составляющие равны (для волн  $\lambda = 4, 8$  см), для волны 13 см и выше имеет место соотношение  $T_1 \approx 0.5 T_2$ . Очевидно, что при увеличении высоты наблюдаемого источника увеличивается лишь составляющая шумовой температуры, обусловленная переоблучением перископического отражателя, в то время как составляющая шумовой температуры, обусловленная переоблучением главного зеркала, не меняется.

2. Увеличение вертикального размера главного зеркала почти не влияет на компоненту шумовой температуры, обусловленную переоблучением в трехзеркальной перископической системе на коротких волнах ( $\lambda = 4, 8$  см), на длинных же волнах ( $\lambda = 13 \div 32$  см) может привести даже к некоторому ее повышению (при  $\Delta a \approx 1.5$  м). Это объясняется тем, что наряду со снижением составляющей шумовой температуры, обусловленной переоблучением главного зеркала,  $T_1$  имеет место возрастание составляющей шумовой температуры, обусловленной переоблучением плоского перископического отражателя,  $T_2$ . Этот эффект тем больше, чем длиннее волна и больше высота источника. Увеличение  $T_2$  связано с уменьшением параметра  $q = c/a$  при увеличении  $\Delta a$ .

3. Из рис. 2 видно, что существенное снижение компоненты шумовой температуры, обусловленной переоблучением  $T_n$ , может быть достигнуто при увеличении вертикального размера перископического отражателя. Отсюда следует, что наибольшую эффективность антишумовые экраны дадут на плоском отражателе. Одновременное увеличение вертикального размера главного зеркала и перископического отражателя с помощью антишумовых экранов даст дополнительное снижение шумовой температуры лишь на низких и средних углах. При  $h = 90^\circ$  снижение температуры за счет одновременного увеличения вертикальных размеров главного и плоского зеркал почти не отличается от величины снижения шумовой температуры за счет увеличения вертикального размера одного плоского зеркала.



4. Расчеты показывают (рис. 2, б), что снижение шумовой температуры радиотелескопа может быть достигнуто и путем увеличения вертикального размера облучателя. Таким образом, в отличие от двухзеркальной системы

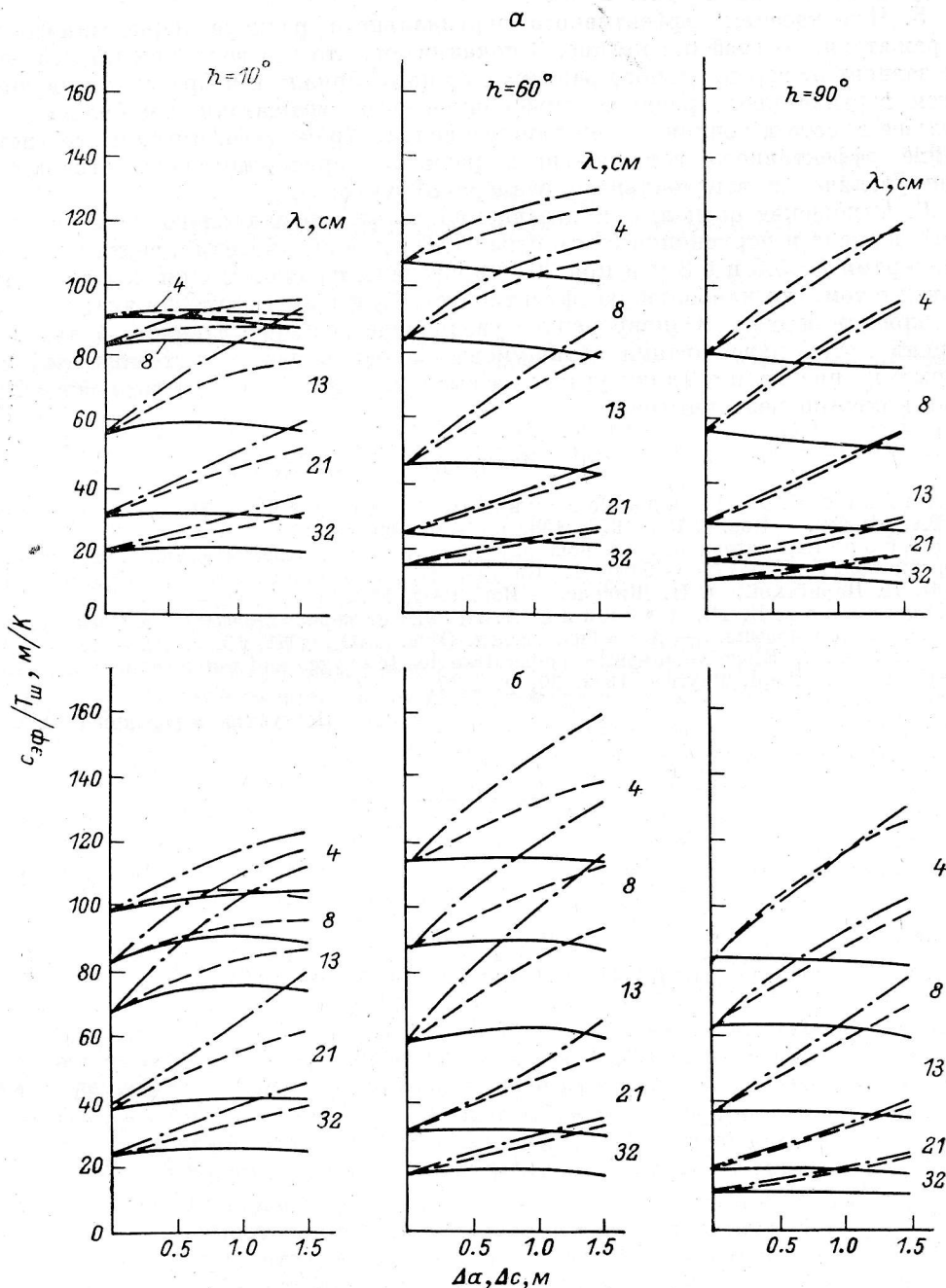


Рис. 4. Отношение сигнал/шум  $c_{эф}/T_{ш}$  в зависимости от  $\Delta a, \Delta c$ , ( $\Delta a, \Delta c$ ).

а —  $b = 5.5$  м; б —  $b = 6.8$  м.

радиотелескопа РАТАН-600 [3] при увеличении вертикального размера облучателя в трехзеркальной перископической системе не только увеличивается площадь, но и уменьшается шумовая температура, т. е. отношение сигнал / шум увеличивается в еще большей степени. Следовательно, как и ранее [3], мы приходим к выводу о целесообразности увеличения вертикального размера



облучателя. При этом общий ход зависимости  $T_n = f(\Delta a, \Delta c)$ , полученный для перископической системы с вертикальным размером облучателя  $b=6.8$  м (рис. 2, б), повторяет ход зависимости для системы с вертикальным размером облучателя  $b=5.5$  м (рис. 2, а).

5. Что касается эффективного вертикального размера перископического отражателя, то графики на рис. 3 показывают, что его величина практически не зависит от вертикального размера главного зеркала и возрастает с увеличением вертикального размера перископического отражателя тем больше, чем больше высота источника и чем длиннее волна. Кроме того, имеет место увеличение эффективного вертикального размера перископического отражателя при увеличении вертикального размера облучателя.

6. Отношение сигнал/шум в зависимости от вертикального размера главного зеркала и перископического отражателя для облучателя с вертикальными размерами  $b=5.5$  и  $6.8$  м и при  $20$  К приведены на рис. 4. Они подтверждают вывод о том, что наибольшую эффективность будут иметь антишумовые экраны на плоском зеркале. Одновременное увеличение размеров главного и плоского зеркал путем навешивания антишумовых экранов даст дополнительный выигрыш на низких и средних углах, на высоких углах наблюдаемого источника этот выигрыш незначителен.

#### Литература

1. Хайкин С. Э., Кайдановский Н. Л., Есепкина Н. А. Радиотелескоп РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 3—12.
2. Выбор параметров отражающих элементов и расчет электрических характеристик радиотелескопа РАТАН-600/Б. В. Брауде, Н. А. Есепкина, Н. Л. Кайдановский, Ю. Н. Парийский, О. Н. Шиврис. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 40—53.
3. Майорова Е. К., Стоцкий А. А. Расчет перископической системы антенны переменного профиля. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1981, 13, с. 117—130.
4. Hogg D. C. Effective antennas temperature due to oxygen and water vapor in the atmosphere. — J. Appl. Physics, 1959, 30, p. 1417.

Поступила в редакцию 10.11.81