

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600 С УЧЕТОМ АБЕРРАЦИЙ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ НА ГОРИЗОНТЕ

Н. А. Есепкина, Н. С. Бахвалов, Б. А. Васильев,
Л. Г. Васильева, А. В. Темирова

Определены поляризационные характеристики радиотелескопа РАТАН-600 при наблюдении на горизонте при наличии aberrаций, связанных с выносом облучателя. Получены выражения для диаграмм направленности системы Южного сектора радиотелескопа с перископическим зеркалом. Показано, что aberrации на горизонте значительно больше, чем при наблюдении источников радиоизлучения на высоких углах места на Северном секторе.

The polarization characteristics of the RATAN-600 radiotelescope at an altitude $\theta_0=0^\circ$ (South sector with a flat mirror) are determined when the primary feed is shifted from the focus. The formulas for antenna patterns are presented. It is shown that the South sector aberrations are considerably greater than the North sector aberrations at high altitudes.

В работе [1] получены выражения поляризационных характеристик радиотелескопа РАТАН-600 с учетом aberrаций для углов места источников излучения $0 < \theta_0 \leq \pi/2$. Случай $\theta_0=0^\circ$ требует специального рассмотрения, так как при наблюдении на горизонте форма раскрыва вырождается в прямоугольную, и антенна представляет собой два параболических цилиндра, повернутых друг относительно друга на 90° (рис. 1). При этом основной отражатель антенны переменного профиля (АПП) представляет собой симметричный параболический цилиндр, а вторичное зеркало — несимметричный параболический цилиндр. Этот случай соответствует режиму работы Южного сектора с перископом [2]. Угол наблюдения θ_0 при этом изменяется только за счет поворота перископа, а не за счет изменения формы поверхности радиотелескопа, как при работе в обычном режиме, например, на Северном секторе.

В настоящей работе определены поляризационные характеристики радиотелескопа РАТАН-600 при наблюдении источников излучения на горизонте ($\theta_0=0^\circ$) при наличии aberrаций, связанных с выносом облучателя из фокуса антенны. При этом рассматривался основной режим ра-

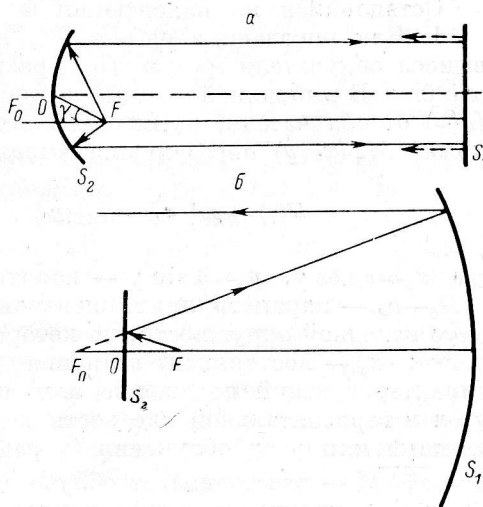


Рис. 1. Сечение антенной системы вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостями.

S_1 — основное зеркало; S_2 — параболический цилиндр.

боты радиотелескопа, когда одновременно используется лишь часть отражающих элементов со вторичным отражателем в виде несимметричного параболического цилиндра.

В работе приведены результаты расчета диаграмм направленности (д. н.) радиотелескопа, а также элементов матрицы Мюллера, связывающей параметры Стокса на входе и выходе антенны, при наличии аберраций. Диаграммы определялись апертурным методом по полю в раскрыве, при этом мы пользовались методикой, изложенной в работах [3—5]. Другие методы расчета диаграмм направленности АПП изложены в работах [6, 7].

Определение диаграммы направленности с учетом аберраций

Зная форму раскрыва и распределение поля на нем, можно определить д. н. антенны и в этом случае. Поле в дальней зоне при облучателе, вынесенном из фокуса, определяется по формуле [8]

$$\mathbf{E} = \frac{ik}{2\pi} \int_S [(\mathbf{n}\mathbf{E}_1)\mathbf{R}^0] \exp[-ik(R+L)] \frac{dS}{R}, \quad (1)$$

где \mathbf{n} — нормаль к плоскости раскрыва; \mathbf{E}_1 — амплитудное распределение поля на раскрыве; S — поверхность раскрыва; \mathbf{R}^0 — орт направления на точку наблюдения, причем

$$R_x^0 = \sin \theta \cos \Psi; \quad R_y^0 = \sin \theta \sin \Psi;$$

R — расстояние до точки наблюдения; L определяет распределение фаз на раскрыве антенны при облучателе, вынесенном из фокуса антенны на расстояние $\delta = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$ (рис. 2).

Остановимся на нахождении фазового множителя в интеграле (1).

1. Как показано в работе [8], при перемещении д. н. АПП путем выноса облучателя из фокуса в раскрыве антенны появляются фазовые ошибки. В выбранной системе координат (рис. 2) оптическая длина пути $L(\varphi)$ от облучателя, расположенного в точке $M_0(x_0, y_0)$, до точки раскрыва $M_2(x, y)$ определяется выражением

$$L(\varphi) = p + x_0 \cos \varphi + y_0 \sin \varphi + 0\left(\frac{\delta^2}{\rho}\right), \quad -\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_0, \quad (2)$$

где $x_0 = \delta \cos \chi$, $y_0 = \delta \sin \chi$ — координаты первичного облучателя; $p = R_0 - a_0$ — параметр линии центров отражающих элементов; R_0 — радиус исходной окружности, по которой расположены элементы при юстировке; a_0 — постоянная величина ($a_0/R_0 \ll 1$); φ — угол из фокуса, характеризующий положение или азимут отражающего элемента; φ_0 — угол в горизонтальной плоскости между центральными и крайними элементами или угол облучения (в радиотелескопе РАТАН-600 $\varphi_0 \leq 65^\circ$); $\delta = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$ — расстояние от облучателя до фокуса антенны F , $\rho = p/(1 + \cos \varphi)$ — уравнение линии центров отражающих элементов; $f = p/2$ — фокусное расстояние; $\delta/f \ll 1$. Пользуясь результатами работы [8], для $\theta_0 = 0^\circ$ получим:

$$\Phi(\varphi) = (R+L) = Y \operatorname{tg}(\varphi/2) + X u/(2F) - x_0(1 - \cos \varphi) - y_0 \sin \varphi \operatorname{tg}^2(\varphi/2) + C, \quad (3)$$

где $-\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_0$; координата u определяет положение точки в прямоугольном раскрыве; $u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$; $dS \approx \rho du d\varphi$; C — постоянная величина, значение которой равно $C = R+L$ при $\varphi = 0^\circ$ и $u = 0$; $X = R_x^0$; $Y = R_y^0 - R_{y_0}^0$ — новые координаты точки наблюдения, отсчитываемые от точки $R_{x_0}^0 = 0$; $R_{y_0}^0 = -y_0/f$, т. е. от положения максимума, определяемого гео-

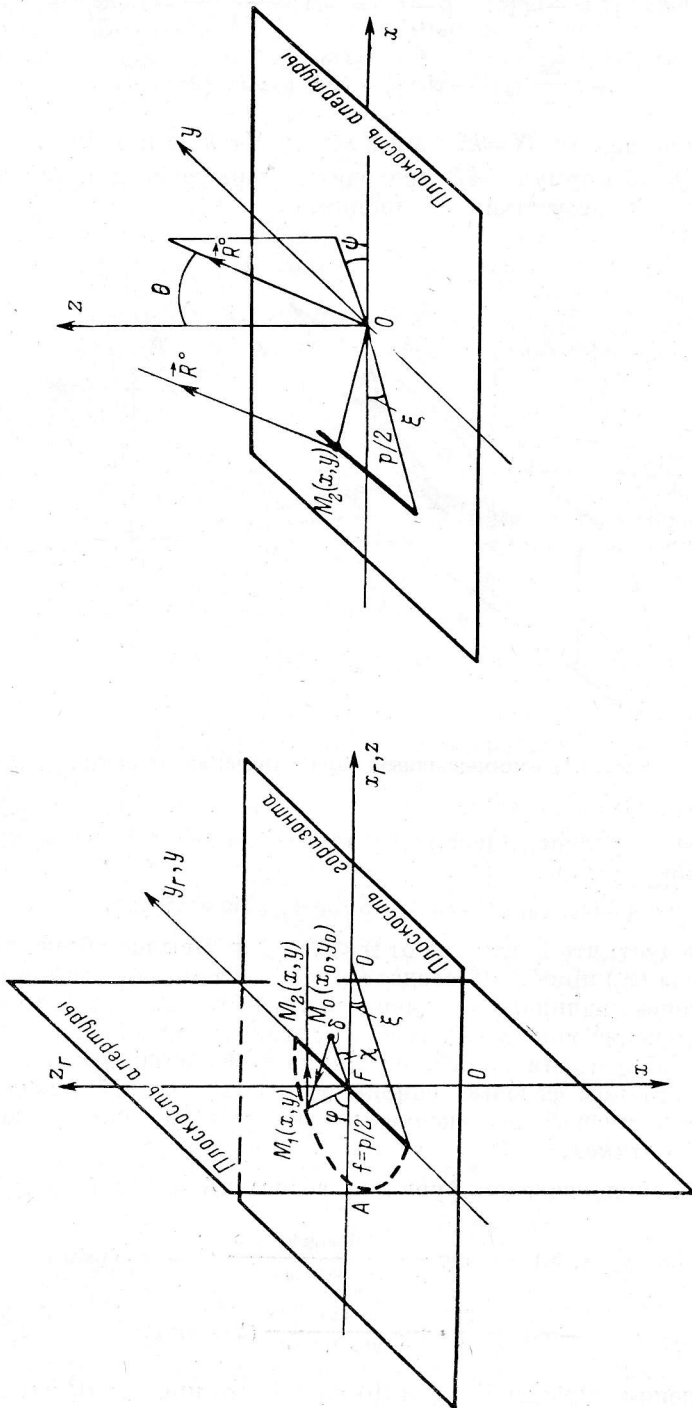


Рис. 2. Форма раскрыва антенны.

метрической оптикой [8]. Таким образом, фазовая функция в интеграле (1) определяется выражением

$$\Phi_1(u, \varphi) = -ik(R + L - C) = -iY \frac{\sin \varphi}{1 + \cos \varphi} - iX \frac{u}{2F} + \\ + i \frac{2\pi}{\lambda} x_0 (1 - \cos \varphi) + i \frac{2\pi}{\lambda} y_0 \sin \varphi \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right), \quad (4)$$

где λ — длина волны; $X = k2F \sin \theta \cos \psi$; $Y = kp \sin \theta \sin \psi$.

При $x_0 = y_0 = 0$ формула (4) переходит в выражение для фазового множителя в случае отсутствия аберраций.

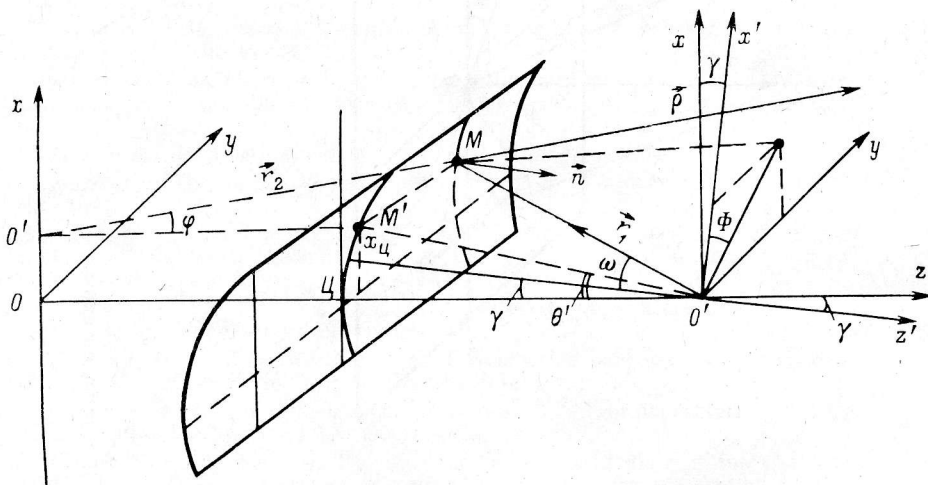


Рис. 3. Несимметричный параболический цилиндр.

В формуле (4) члены, пропорциональные выносам x_0, y_0 , представляют собой функцию аберраций:

$$\Delta(x_0, y_0, \varphi) = x_0 (1 - \cos \varphi) + y_0 \sin \varphi \operatorname{tg}^2 (\varphi/2). \quad (5)$$

Из (5) следует, что в отличие от $0 < \theta_0 \leq \pi/2$ вынос облучателя вдоль фокальной оси (x_0) при $\theta_0 = 0^\circ$ создает в раскрыве антенны фазовые ошибки четных степеней, начиная со второй, как в обычных параболах, и не смещает положение максимума д. н. в вертикальной плоскости zox ($R_{x_0}^0 = 0$). Вынос облучателя перпендикулярно к фокальной оси (y_0) создает в раскрыве антенны фазовые ошибки нечетных степеней или аберрацию типа «комы» и смещает положение максимума д. н., определяемого геометрической оптикой.

Для сравнения приведем функцию аберраций в случае $0 < \theta_0 \leq \frac{\pi}{2}$ [1]:

$$\Delta(x_0, y_0, \varepsilon, \theta_0) = y_0 \operatorname{ctg} \frac{\theta_0}{2} \frac{\cos \theta_0}{1 - \cos \theta_0 \cos \varepsilon} (1 - \cos \varepsilon) \sin \varepsilon - \\ - x_0 \operatorname{ctg}^2 \frac{\theta_0}{2} \cdot \frac{\cos \theta_0}{1 - \cos \theta_0 \cos \varepsilon} (1 - \cos \varepsilon)^2. \quad (6)$$

Из сравнения выражений (5) и (6) видно, что при $\theta_0 = 0^\circ$ влияние аберрации больше, чем на средних и высоких углах наблюдения θ_0 , так как в формуле (5) отсутствуют множители, зависящие от угла θ_0 и уменьшающиеся с ростом этого угла.

Для определения д. н. АПП перейдем к нахождению распределения поля в раскрыве антенны.

2. Распределение поля в раскрыве двухзеркальной антенны, состоящей из двух параболических цилиндров, повернутых друг относительно друга на 90° (рис. 1), будем находить в приближении геометрической оптики с помощью матричного метода, рассмотренного в работах [1, 5].

Используя результаты [5], получим следующее выражение для составляющих поля в раскрыве антенны:

$$\begin{aligned} E_{xp} &= \frac{F}{\sqrt{\rho r_1}} [-E_\omega \cos \eta + E_\Phi \sin \eta]; \\ E_{yp} &= \frac{F}{\sqrt{\rho r_1}} [-E_\omega \sin \eta - E_\Phi \cos \eta], \end{aligned} \quad (7)$$

где E_ω , E_Φ — сферические составляющие поля первичного облучателя выражения для которых приведены в работе [5]; $r_1 = \frac{2F}{(1 + \cos \theta') \cos \varphi}$; F — фокусное расстояние вторичного зеркала — несимметричного параболического цилиндра;

$$\sin \eta = \frac{\sin \Phi \cos \omega}{\cos \varphi}; \quad \cos \eta = \frac{\cos \Phi}{\cos \varphi}.$$

Связь между углами ω , Φ в сферическом фронте и углами φ , θ' в цилиндрическом фронте (рис. 3) определяется теми же соотношениями, что и в [5]:

$$\begin{aligned} \sin \varphi &= \sin \omega \sin \Phi; \\ \operatorname{tg} (\theta' - \gamma) &= \operatorname{tg} \omega \cos \Phi; \end{aligned} \quad (8)$$

γ — угол поворота первичного облучателя относительно горизонтальной плоскости.

Формулы для диаграммы направленности

При вертикальной поляризации поля облучателя (вектор электрического поля в раскрыве облучателя параллелен оси x) диаграммы направленности для основной поляризации f_x и кросс-поляризации f_{xy} определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} f_x &= \frac{E_x^x(X, Y, x_0, y_0)}{E_x^x(0, 0, 0, 0)} = \frac{1}{f_x(0, 0, 0, 0)} \times \\ &\times \int_{-\varphi_0}^{+\varphi_0} \int_{u_{\min}}^{u_{\max}} A_1(\Phi, \omega) F(u, \varphi) \exp [\Phi_1(u, \varphi, X, Y, x_0, y_0)] du d\varphi; \\ f_{xy} &= \frac{E_y^x(X, Y, x_0, y_0)}{E_x^x(0, 0, 0, 0)} = \frac{1}{f_x(0, 0, 0, 0)} \times \\ &\times \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} \int_{u_{\min}}^{u_{\max}} A_2(\Phi, \omega) F(u, \varphi) \exp [\Phi_1(u, \varphi, X, Y, x_0, y_0)] du d\varphi. \end{aligned} \quad (9)$$

При горизонтальной поляризации поля облучателя (вектор электрического поля в раскрыве облучателя параллелен оси y) диаграммы f_y и f_{yx} для основной и кросс-поляризации определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} f_y &= \frac{E_y^y(X, Y, x_0, y_0)}{E_y^y(0, 0, 0, 0)} = \frac{1}{f_y(0, 0, 0, 0)} \times \\ &\times \int_{-\varphi_0}^{+\varphi_0} \int_{u_{\min}}^{u_{\max}} A_4(\Phi, \omega) F(u, \varphi) \exp [\Phi_1(u, \varphi, X, Y, x_0, y_0)] du d\varphi; \end{aligned} \quad (10)$$

$$f_{yx} = \frac{E_x^y(X, Y, x_0, y_0)}{E_y^y(0, 0, 0, 0)} = \frac{1}{f_y(0, 0, 0, 0)} \times \\ \times \int_{-\varphi_0 u \min}^{+\varphi_0 u \max} \int A_3(\Phi, \omega) F(u, \varphi) \exp[\Phi_1(u, \varphi, X, Y, x_0, y_0)] du d\varphi.$$

Используемые в выражениях (9) и (10) величины определяются следующим образом:

$$A_1(\Phi, \omega) = -\alpha \cos^2 \Phi + \beta \sin^2 \Phi \cos \omega / \sqrt{1 - \sin^2 \omega \sin^2 \Phi}; \\ A_2(\Phi, \omega) = \sin \Phi \cos \Phi (\beta - \alpha \cos \omega) / \sqrt{1 - \sin^2 \omega \sin^2 \Phi}; \\ A_3(\Phi, \omega) = \sin \Phi \cos \Phi (\beta \cos \omega - \alpha) / \sqrt{1 - \sin^2 \omega \sin^2 \Phi}; \\ A_4(\Phi, \omega) = -\alpha \sin^2 \Phi \cos \omega + \beta \cos^2 \Phi / \sqrt{1 - \sin^2 \omega \sin^2 \Phi};$$

$$F(u, \varphi) = \sqrt{\frac{\cos \varphi}{1 + \cos \varphi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{u + u_0}{2F}\right)^2}}; \quad (11)$$

$$\cos \omega = \cos \varphi \cdot \cos(\theta' - \gamma);$$

$$\cos \Phi = \cos \varphi \cdot \sin(\theta' - \gamma) / \sin \omega;$$

$$u = 2F \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\theta'}{2} \right) - \operatorname{tg} \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right]; \quad u_0 = 2F \operatorname{tg} \left(\frac{\gamma}{2} \right);$$

$$u_{\min} = 2F \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\theta'_{\min}}{2} \right) - \operatorname{tg} \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right];$$

$$u_{\max} = 2F \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\theta'_{\max}}{2} \right) - \operatorname{tg} \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right].$$

Фазовый множитель $\Phi_1(u, \varphi, X, Y)$ определяется выражением (4).

Так как поляризационные характеристики радиотелескопа определяются, как известно [9, 10], элементами матрицы Мюллера, то кроме д. н. радиотелескопа были определены также все матричные элементы $m_{i,j}$.

Диаграммы направленности и матричные элементы рассчитывались на ЭВМ БЭСМ-6 в вычислительном центре МГУ методом, рассмотренным в работе [3].

Из сравнения полученных для д. н. выражений с учетом aberrаций при $\theta_0 = 0^\circ$ с аналогичными выражениями при $0 < \theta_0 \leq \pi/2$ [1] видно, что при $\theta_0 = 0^\circ$ меняется не только форма раскрыва, но также фазовый и амплитудный множитель, что приводит к тому, что поляризационные характеристики системы Южного сектора с плоским отражателем отличаются от характеристик Северного сектора.

Результаты расчета при $\theta_0 = 0^\circ$

Диаграммы направленности и матричные элементы с учетом aberrаций рассчитывались для радиотелескопа РАТАН-600 при следующих его параметрах: радиус исходной окружности $R_0 = 288$ м; длина волны $\lambda = 4$ см; фокусное расстояние несимметричного параболического цилиндра $F = 2.15$ м; угол наклона оси первичного облучателя относительно горизонтальной плоскости $\gamma = 50^\circ$; $\alpha = \beta = \cos^2(1.045\omega)$, что соответствует д. н. первичных облучателей, используемых на радиотелескопе. Расчет проводился для Южного сектора радиотелескопа при $\theta_0 = 0^\circ$ и угле облучения антенны $\varphi_0 = 62^\circ$.

В результате расчета оказалось, что, как и при $0 < \theta_0 \leq \pi/2$, отличными от нуля являются диагональные элементы m_{ii} , а также элементы m_{23} , m_{32} и m_{41} , m_{14} , характеризующие переход друг в друга параметров Q и U , I и V соответственно. Величины m_{11} совпадают с m_{44} , а $m_{22} = m_{33}$.

Элемент m_{11} является д. н. по мощности для неполяризованного источ-

ника радиоизлучения, m_{22} — д. н. для линейнополяризованного источника (поляризация 100%).

■ Несмотря на то, что синфазный раскрыв антенны имеет вид прямо-

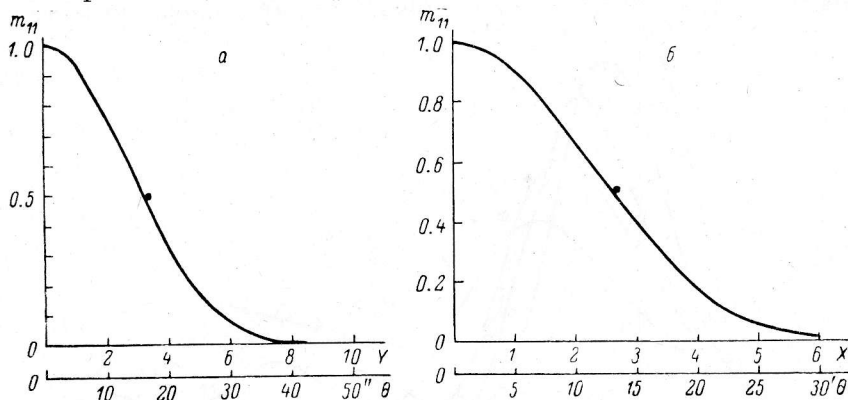


Рис. 4. Горизонтальная (а) и вертикальная (б) д. н. при отсутствии aberrаций.

угольника, элемент m_{41} , определяющий паразитную круговую поляризацию, отличен от нуля и составляет $\sim 1\%$. Это связано с формой вторичного зеркала — несимметричного параболического цилиндра [11].

На рис. 4 приведены горизонтальная ($X=0$) и вертикальная ($Y=0$) д. н. антенны при отсутствии aberrаций ($x_0=y_0=0$). На этом же рисунке нанесены экспериментальные точки, полученные по наблюдениям источника радиоизлучения PKS 1830-21 на системе Южного сектора радиотелескопа с перископическим зеркалом.* На рис. 5 построены сечения пространственной д. н., т. е. изофоты элемента m_{11} с облучателем, расположенным в фокусе антенны.

На рис. 6 построены горизонтальные д. н. антенны ($X=0$) при различных выносах облучателя (y_0) перпендикулярно к фокальной оси. Из рис. 6 видно, что в этом случае влияние aberrаций на д. н. Южного сектора антенны с перископическим зеркалом такое же, как на низких углах ($\theta_0 \leq 20^\circ$) Северного сектора (см. [1]).

На рис. 7 построены изофоты элемента m_{11} при поперечном выносе облучателя $y_0=2, 5\lambda$. Как видно из рисунка, при этом возникают искажения, типичные для комы: появляется большой боковой лепесток, происходит смещение максимума главного лепестка, уменьшается поле в главном направлении. В этом случае отсутствуют искажения, связанные с изменением кривизны раскрыва, т. е. пространственная д. н. антенны не кривляется, как при наблюдениях на средних углах места Северного сектора.

Падение усиления антенны, а также

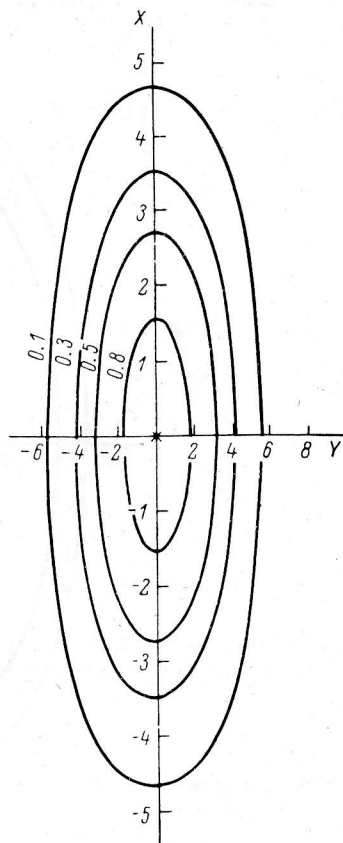


Рис. 5. Изофоты элемента m_{11} при $x_0=y_0=0$.

* Все экспериментальные результаты, приведенные в статье, получены А. В. Темировой при исследовании д. н. Южного сектора с перископическим зеркалом. В настоящее время результаты этой работы готовятся к печати.

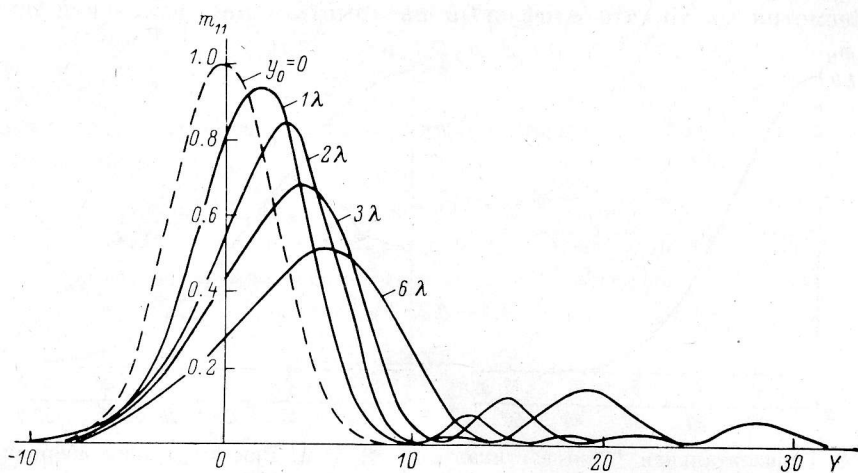


Рис. 6. Горизонтальные д. н. при различных выносах y_0 .
 $Y = kr \sin \theta \sin \phi$.

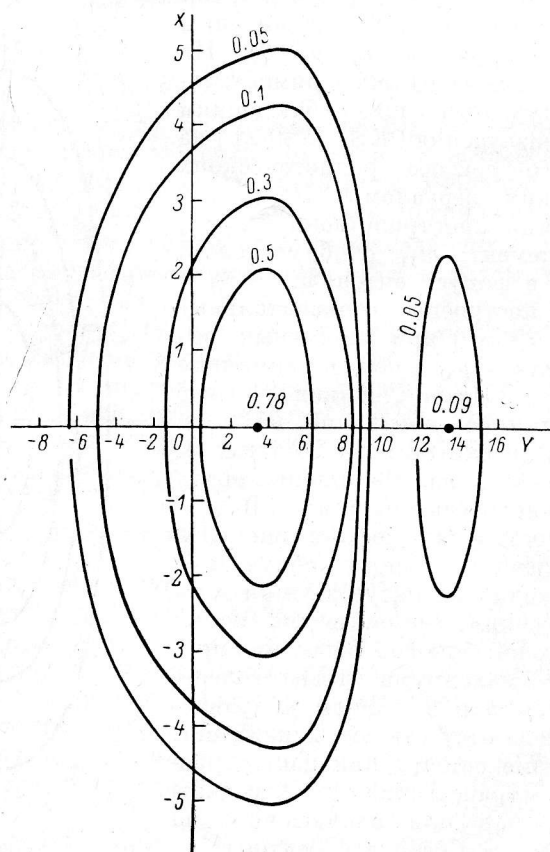


Рис. 7. Изофоты элемента m_{11} при $y_0 = 2.5 \lambda$; $x_0 = 0$.

величина первого бокового лепестка в зависимости от величины поперечного выноса облучателя из фокуса антенны (y_0) представлены на рис. 8, 9. Там же для сравнения нанесены экспериментальные точки. Некоторое отличие между расчетом и экспериментом (рис. 8) объясняется тем, что выбранное нами при

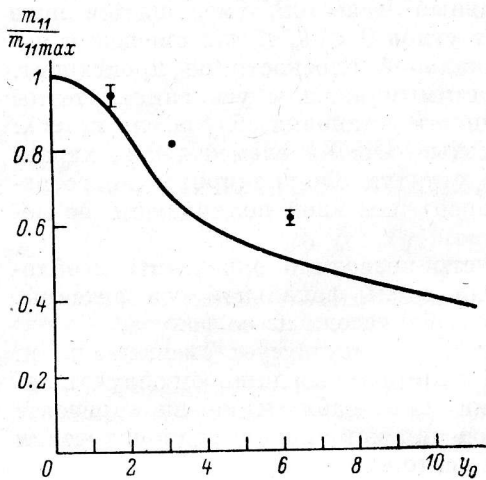


Рис. 8. Уменьшение усиления антенны в зависимости от поперечного выноса облучателя (y_0).

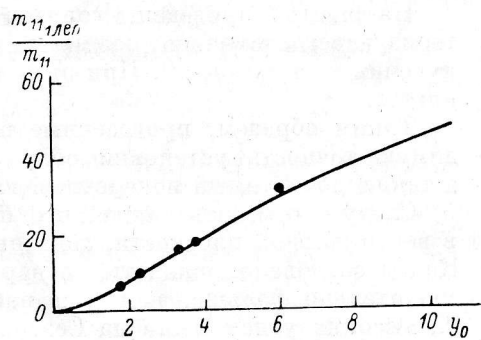


Рис. 9. Зависимость величины первого бокового лепестка от поперечного выноса облучателя.

расчете распределение поля в раскрыве антенны, по-видимому, более равномерное, чем на радиотелескопе. Поэтому наше расчетное распределение поля требует дальнейшего уточнения. Если принять допустимым падение усиления антенны за счет aberrаций 10—20%, то допустимый вынос

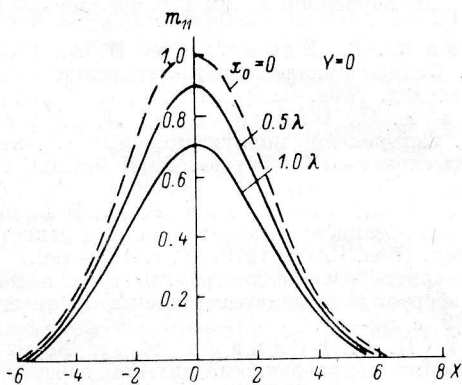


Рис. 10. Вертикальные д. н. при различных значениях продольного выноса облучателя (x_0).
 $X = k2F \sin \theta \cos \psi$; $Y = 0$.

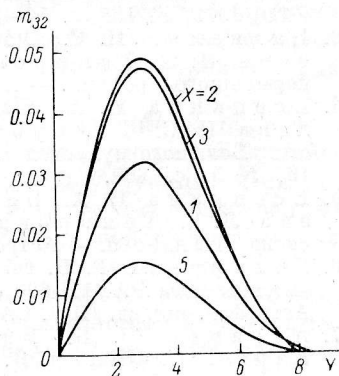


Рис. 11. Горизонтальные сечения элемента m_{32} при $x_0 = y_0 = 0$.

облучателя перпендикулярно к фокальной оси Южного сектора окажется $y_0 \approx (2 \div 3) \lambda$. Как было показано ранее [1], при наблюдении на углах места $\theta_0 > 75^\circ$ на Северном секторе при том же падении усиления допустимый поперечный вынос облучателя в этом случае окажется $y_0 \approx (15 \div 30) \lambda$. Это связано с тем, что с увеличением угла θ_0 резко падает влияние aberrации типа комы [см. выражение (6)]. Расчетные величины первых боковых лепестков, как видно из рис. 9, хорошо согласуются с экспериментальными.

Было также определено влияние продольного выноса x_0 на д. н. радиотелескопа. На рис. 10 построены вертикальные д. н. антенны при различных значениях x_0 . В случае $\theta_0=0^\circ$ при выносе облучателя вдоль фокальной оси возникают искажения, типичные для фазовых ошибок четных степеней [см. (4)]: расширяется главный лепесток, уменьшается поле в главном направлении. В отличие от углов $0 < \theta_0 \leq \pi/2$ смещения максимума главного лепестка в вертикальной плоскости не происходит, так как ($R_{x_0}^0=0$). Если считать допустимым падение усиления антенны 10–20%, то из рис. 10 видно, что точность установки облучателя $x_0 \approx \lambda$.

На рис. 11 приведены горизонтальные сечения элемента m_{32} , характеризующего изменение позиционного угла линейно поляризованного излучения при $x_0=y_0=0$. При этом процент линейной поляризации не меняется.

Таким образом, проведенные расчеты позволили определить необходимую точность установки облучателя вдоль фокальной оси антенны, а также допустимый поперечный вынос облучателя из ее фокуса.

Следует отметить также, что при $\theta_0=0^\circ$ отсутствует смещение д. н. в вертикальной плоскости, связанное с продольным выносом облучателя. Как и следовало ожидать, абберации при наблюдении на горизонте значительно больше, чем при наблюдении источников радиоизлучения на высоких углах места на Северном секторе.

В заключение авторы выражают благодарность Н. Е. Гольневой и Э. Д. Шиврис за помощь в обработке результатов.

Литература

1. Есепкина Н. А., Бахвалов Н. С., Васильев Б. А., Васильева Л. Г., Водоватов И. А., Темирова А. В. Поляризационные характеристики радиотелескопа РАТАН-400 с учетом аббераций. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1980, 12, с. 106–124.
2. Гиндилис Л. М., Есепкина Н. А., Кардашев Н. С. О работе антенны переменного профиля с плоским перископическим отражателем. — *Изв. ГАО*, 1972, № 188, с. 54–57.
3. Бахвалов Н. С., Васильева Л. Г., Есепкина Н. А., Соболева Н. С., Темирова А. В. Поляризационные характеристики антенны переменного профиля. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1973, 5, с. 135–149.
4. Есепкина Н. А., Бахвалов Н. С., Васильева Л. Г., Соболева Н. С., Темирова А. В. Определение поляризационных характеристик Большого пулковского радиотелескопа. — *Изв. вузов. Радиофизика*, 1973, 16, № 5, с. 669.
5. Есепкина Н. А., Бахвалов Н. С., Васильев Б. А., Васильева Л. Г., Темирова А. В. Поляризационные характеристики радиотелескопа РАТАН-600. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1979, 11, с. 182–196.
6. Гельфрейх Г. Б. Об одном алгоритме расчета диаграммы-направленности антенны типа РАТАН-600 с учетом аббераций и поляризационных эффектов. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1977, 9, с. 89–98.
7. Абрамов И. Б., Бахвалов Н. С., Белкина М. Г., Жилейкин Я. М., Фельд Я. Н. Диаграммы направленности антенны переменного профиля. — *Радиотехника и электроника*, 1980, 25, № 9, с. 1829.
8. Есепкина Н. А., Васильев Б. А., Водоватов И. А., Высоцкий М. Г., Виноградов Г. К. Исследование характеристик излучения радиотелескопа РАТАН-600 методом оптического моделирования. — *Радиотехника и электроника*, 1977, 22, № 7, с. 1484–1492.
9. Есепкина Н. А. Поляризационные характеристики антенн радиотелескопов. — *Изв. вузов. Радиофизика*, 1974, 14, 5, с. 673.
10. Есепкина Н. А. Поляризационные характеристики антенн радиотелескопов. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1972, 4, с. 157.
11. Коржавин А. Н. Поляризационные эффекты вторичного зеркала антенны переменного профиля. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1979, 11, с. 170–181.