

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600 С УЧЕТОМ АБЕРРАЦИЙ

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

Определены поляризационные характеристики радиотелескопа РАТАН-600 со вторичным отражателем в виде несимметричного параболического цилиндра при наличии aberrаций, связанных с выносом облучателя. Рассмотрен основной режим работы, когда используется лишь часть отражающих элементов, а также режим околозенитного синтеза ($\theta_0 = \pi/2$). Приведены расчетные значения элементов матрицы Мюллера, характеризующие диаграммы направленности антенны для основной и паразитной поляризаций, для случая линейного и кругового поляризационных базисов при различных продольных и поперечных выносах облучателя из фокуса антенны.

The polarization characteristics of the RATAN-600 radio telescope with an asymmetric parabolic cylinder secondary reflector are determined when the primary feed is shifted from the focus. The main regime of work the radio telescope when only a part of reflecting elements is used at the same time is considered. The regime of parallel aperture synthesis at the zenith is given too. The computed values of the elements of Muller's matrix characterizing antenna patterns for the main and the cross-polarization are presented. The calculation is made at the different values of shifts of the primary feed (for the case of linear and circular polarization basies).

В работах [1, 2] показано, что безабберационное поле радиотелескопа РАТАН-600 или область, в пределах которой возможно сканирование диаграммы путем перемещения облучателя, увеличивается с ростом угла места θ_0 и при больших θ_0 значительно превосходит безабберационное поле обычных параболюидов вращения. Это позволяет осуществлять на радиотелескопе режим сопровождения при помощи перемещения облучателя и тем самым существенно повысить чувствительность радиотелескопа, особенно на больших углах θ_0 .

В настоящей работе определены поляризационные характеристики радиотелескопа РАТАН-600 со вторичным отражателем в виде несимметричного параболического цилиндра при наличии aberrаций, связанных с выносом облучателя из фокуса антенны. Рассматривался основной режим работы антенны, когда одновременно используется лишь часть отражающих элементов, а также режим околозенитного синтеза, когда одновременно используются все отражающие элементы. Определение характеристик с учетом aberrаций необходимо для нахождения допустимой области сканирования диаграммы путем перемещения облучателя, а также для обработки результатов наблюдений, так называемой «чистки» измеренного распределения радиояркости [3].

В работе приведены результаты расчета диаграмм направленности (д. н.) радиотелескопа, а также элементов матрицы Мюллера, связывающих параметры Стокса на входе и выходе антенны, при наличии aberrаций. Диаграммы определялись апертурным методом по полю в раскрыве, при этом мы пользовались методикой, изложенной в работах [4—6].

Определение диаграммы направленности с учетом aberrаций. Зная форму раскрыва, который для антенны переменного профиля (АПП), как известно, имеет вид кольца (рис. 1), и распределение поля на нем, можно определить д. н. антенны. Поле в дальней зоне при облучателе, вынесенном из фокуса, определяется по формуле [7]

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

где \vec{n} — нормаль к плоскости раскрыва; \vec{E}_1 — амплитудное распределение поля на раскрыве; S — поверхность раскрыва; \vec{R}^0 — орт направле-

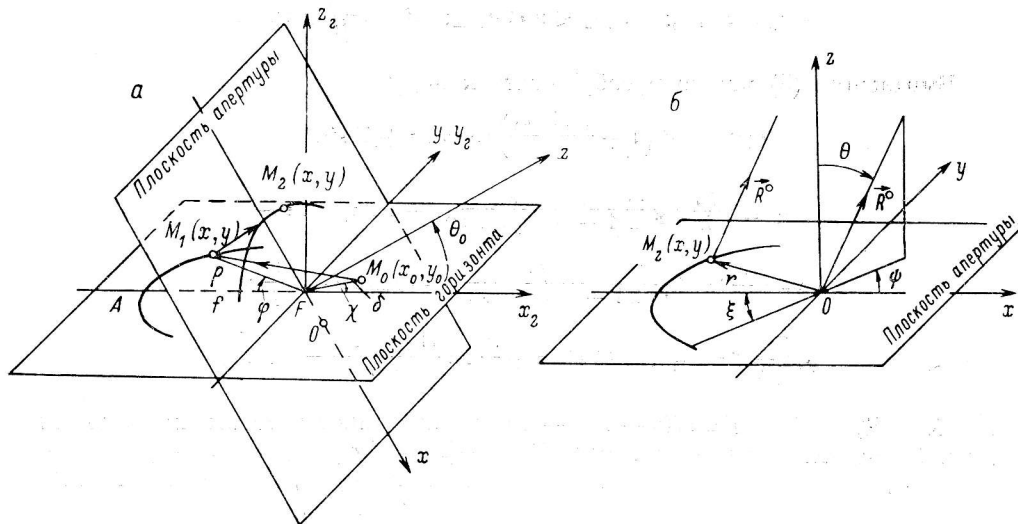


Рис. 1. Форма раскрыва антенны.

ния на точку наблюдения, причем $R_x^0 = \sin\theta \cos\phi$, $R_y^0 = \sin\theta \sin\phi$; R — расстояние до точки наблюдения; L определяет распределение фаз на раскрыве антенны при облучателе, вынесенном из фокуса антенны на расстояние $\delta = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$.

Остановимся на нахождении фазового множителя в интеграле (1).

а. Как показано в работе [7], при перемещении д. н. АПП путем выноса облучателя из фокуса в раскрыве антенны появляются фазовые ошибки. В выбранной системе координат (рис. 1, а) 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; $p = R - a_0 \cos\theta_0$ — параметр линии центров отражающих элементов; θ_0 — угол места источника излучения; R — радиус исходной окружности, по которой расположены элементы при юстировке; a_0 — постоянная величина ($a_0/R \ll 1$); φ — угол из фокуса, характеризующий положение или азимут отражающего элемента; φ_0 — угол в горизонтальной плоскости между центральным 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 ; $\rho = R/(1 + \cos\theta_0 \cos\varphi)$ — уравнение линии центров отражающих элементов; $\delta/\rho \ll 1$; f — фокусное расстояние.

Пользуясь результатами работы [8], можно показать, что

$$\Phi(\varepsilon) = -ik(R+L) = -ik \left[p \frac{\sin \theta}{\sin \theta_0} \cos(\varepsilon - \psi) + x_0 \frac{\cos \varepsilon - \cos \theta_0}{1 - \cos \theta_0 \cos \varepsilon} + y_0 \frac{\sin \varepsilon \sin \theta_0}{1 - \cos \theta_0 \cos \varepsilon} + u \sin \theta \cos(\varepsilon - \psi) \right], \quad (3)$$

где

$$\sin \varphi = \frac{\sin \varepsilon \sin \theta_0}{1 - \cos \theta_0 \cos \varepsilon}; \quad \cos \varphi = \frac{\cos \varepsilon - \cos \theta_0}{1 - \cos \theta_0 \cos \varepsilon};$$

ε, u — координаты точки в плоскости раскрыва (см. [6]);

$$-\varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0; \quad u_{\min} \leq u \leq u_{\max}; \quad ds \approx \frac{p}{\sin \theta_0} du d\varepsilon.$$

Выражение (3) можно преобразовать к виду

$$\begin{aligned} \Phi(\varepsilon) = & -i \left(1 + \frac{u \sin \theta_0}{p} \right) (X \cos \varepsilon + Y \sin \varepsilon) + \\ & + i 2\pi \frac{y_0}{\lambda} \operatorname{ctg} \frac{\theta_0}{2} \frac{\cos \theta_0}{1 - \cos \theta_0 \cos \varepsilon} (1 - \cos \varepsilon) \sin \varepsilon - \\ & - i \frac{x_0}{\lambda} 2\pi \operatorname{ctg}^2 \frac{\theta_0}{2} \frac{\cos \theta_0}{1 - \cos \theta_0 \cos \varepsilon} (1 - \cos \varepsilon)^2 + i \frac{u}{p} \times \\ & \times \left[\frac{y_0}{\lambda} 2\pi (1 + \cos \theta_0) \sin \varepsilon + \frac{x_0}{\lambda} 2\pi \frac{(1 + \cos \theta_0)^2}{\sin \theta_0} \cos \varepsilon \right], \end{aligned} \quad (4)$$

где $X = R_x^0 - R_{x_0}^0$; $Y = R_y^0 - R_{y_0}^0$ — новые координаты точки наблюдения (рис. 2), отсчитываемые от точки $R_{x_0}^0 = -(x_0/f) \operatorname{ctg}(\theta_0/2)$; $R_{y_0}^0 = -y_0/f$, т. е. от положения максимума, определяемого геометрической оптикой [7].

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

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

$$\begin{aligned} \Delta(x_0, y_0, \varepsilon, \theta_0) = & y_0 \operatorname{ctg} \frac{\theta_0}{2} \frac{\cos \theta_0}{1 - \cos \theta_0 \cos \varepsilon} (1 - \\ & - \cos \varepsilon) \sin \varepsilon - x_0 \operatorname{ctg}^2 \frac{\theta_0}{2} \frac{\cos \theta_0}{1 - \cos \theta_0 \cos \varepsilon} (1 - \cos \varepsilon)^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Из (5) следует, что вынос облучателя вдоль фокальной оси (x_0) создает в раскрыве антенны фазовые ошибки четных степеней, начиная с четвертой, или сферическую аберрацию, а вынос перпендикулярно к фокальной оси (y_0) — фазовые ошибки нечетных степеней или аберрацию типа «комы».

Кроме того, из полученного выражения видно, что аберрационная функция пропорциональна $\cos \theta_0$, т. е. величина аберраций уменьшается с увеличением угла места θ_0 . При $\theta_0 = \pi/2$ аберрационные члены, пропорциональные линейным степеням выноса x_0, y_0 , отсутствуют. Поэтому для определения аберраций при $\theta_0 = \pi/2$ необходимо учитывать члены второго порядка малости относительно x_0, y_0 , т. е. член $O(\delta^2/p)$. Этот случай рассмотрен ниже.

* Последние члены в выражении (4) не учитываем, так как $u/p \ll 1$.

На рис. 3 приведены рассчитанные по формуле (5) зависимости максимальной фазовой ошибки на краю апертуры $\psi_{\max} = k\Delta(x_0, y_0, \varepsilon, \theta_0)$ от величины выноса облучателя в длинах волн для различных углов места θ_0 . Задаваясь допустимым ψ_{\max} , по приведенным кривым можно определить максимально возможные величины выноса облучателя, т. е. пределы сканирования диаграммы при различных θ_0 . Из рис. 3, а видно, что для заданной величины ψ_{\max} область допустимых значений y_0 меняется мало при углах наблюдения $\theta_0 \leq 45^\circ$. При больших углах θ_0 область допустимых значений y_0 резко возрастает, что связано с уменьшением аберраций.

б. Распределение поля в раскрыве антенны находилось в приближении геометрической оптики с помощью матричного метода, который поз-

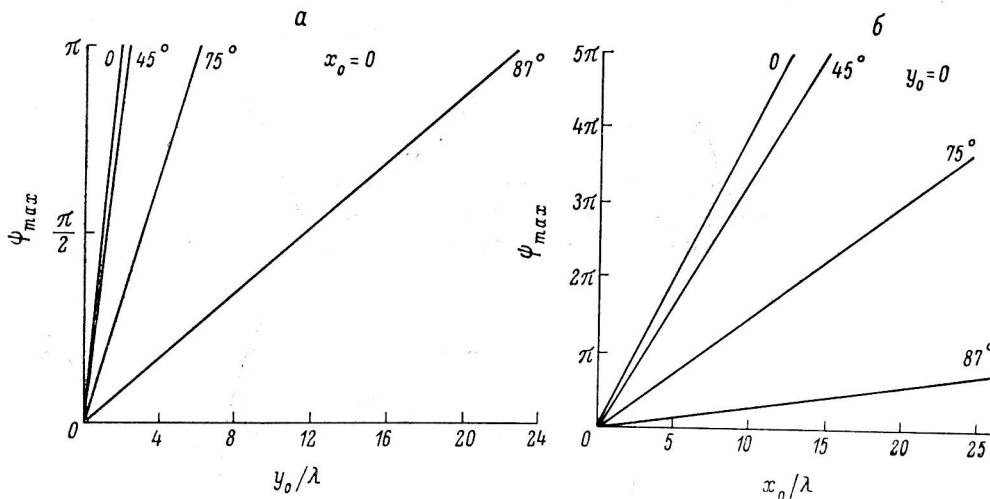


Рис. 3. Зависимость максимальной фазовой ошибки от выноса облучателя перпендикулярно к фокальной оси (а) и вдоль нее (б).

воляет определять распределение поля в случае как однозеркальных, так и многозеркальных антенн. Такой метод широко применяется в оптике при рассмотрении поляризационных свойств сложных оптических систем, состоящих из ряда поляризаторов [9].

Воспользовавшись матричным методом, можно показать, что поле в раскрыве связано с полем облучателя соотношением

$$\vec{E}_p = A_1 A_2 A_3 \dots A_N \vec{E}_{обл}, \quad (6)$$

где A_1, A_2, \dots, A_N — матрицы преобразования составляющих поля на отдельных зеркалах системы, состоящей из N зеркал. В случае несимметричного зеркала с повернутым первичным облучателем необходимо, кроме того, учитывать и матрицу поворота координат.

Радиотелескоп РАТАН-600 является двухзеркальной системой со вторичным зеркалом в виде несимметричного параболического цилиндра (рис. 4).

Как показано в [6], составляющие поля в раскрыве антенны $\vec{E}_{пл}$ связаны с составляющими поля первичного облучателя $\vec{E}_{сф}$ соотношением

$$\vec{E}_{пл} = k_1 A_1 A_2 \vec{E}_{сф}, \quad (7)$$

где A_2 — матрица преобразования сферической волны в цилиндрическую на параболическом цилиндре S_2 ; A_1 — матрица преобразования цилиндрической волны в плоскую на основном зеркале S_1 — конической поверхности; k_1 — амплитудный множитель.

Матрицы преобразования можно определить, используя граничные условия на идеально проводящей поверхности

$$\vec{E}_{\text{отр}} = 2\vec{n} (\vec{n} \cdot \vec{E}_{\text{пад}}) - \vec{E}_{\text{пад}}, \quad (8)$$

а также соотношения, определяющие связь между падающими и отраженными лучами

$$\vec{\rho} = \vec{r} - 2\vec{n} (\vec{n} \cdot \vec{r}). \quad (9)$$

В формулах (9) и (10) \vec{n} — орт нормали к поверхности, $\vec{E}_{\text{пад}}$, $\vec{E}_{\text{отр}}$ — векторы падающего и отражающего поля, \vec{r} , $\vec{\rho}$ — орты падающего и отраженных лучей.

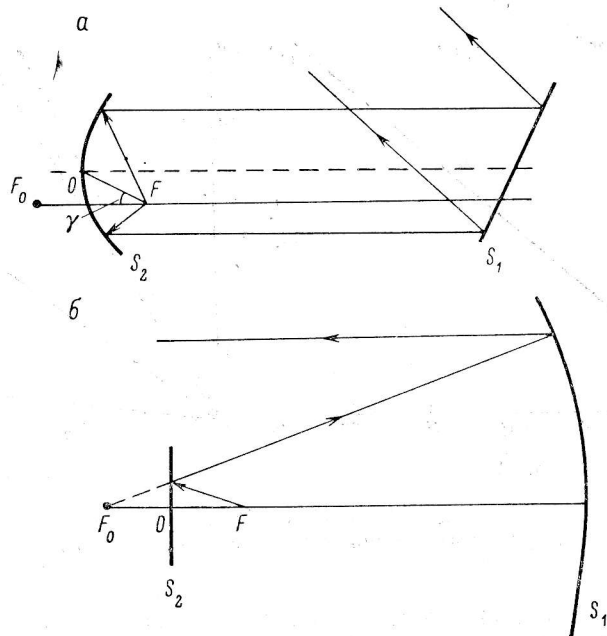


Рис. 4. Сечение антенной системы вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостями.

[Выражения для матриц A_1 и A_2 были получены нами в работе [6], поэтому здесь мы приводить их не будем.

в. Выражения для д. н. антенны для основных поляризаций f_x , f_y и кросс-поляризаций f_{xy} , f_{yx} аналогичны выражениям, полученным в работе [6], в которой рассматривались поляризационные характеристики радиотелескопа в отсутствие aberrаций. Отличие имеется лишь в фазовом множителе. При наличии aberrаций фазовый множитель $\Phi(\varepsilon)$ определяется выражением (4).

Так как поляризационные характеристики радиотелескопа определяются, как известно [10, 11], элементами матрицы Мюллера

$$\begin{bmatrix} I_{\text{вых}} \\ Q_{\text{вых}} \\ U_{\text{вых}} \\ V_{\text{вых}} \end{bmatrix} = a_0^2 \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{bmatrix} = a_0^2 M \begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

то кроме д. н. радиотелескопа определены также все матричные элементы m_{ij} .

В выражении (10) I_0 , Q_0 , U_0 , V_0 и $I_{\text{вых}}$, $Q_{\text{вых}}$, $U_{\text{вых}}$, $V_{\text{вых}}$ — параметры Стокса входного и выходного излучения, M — матрица Мюллера.

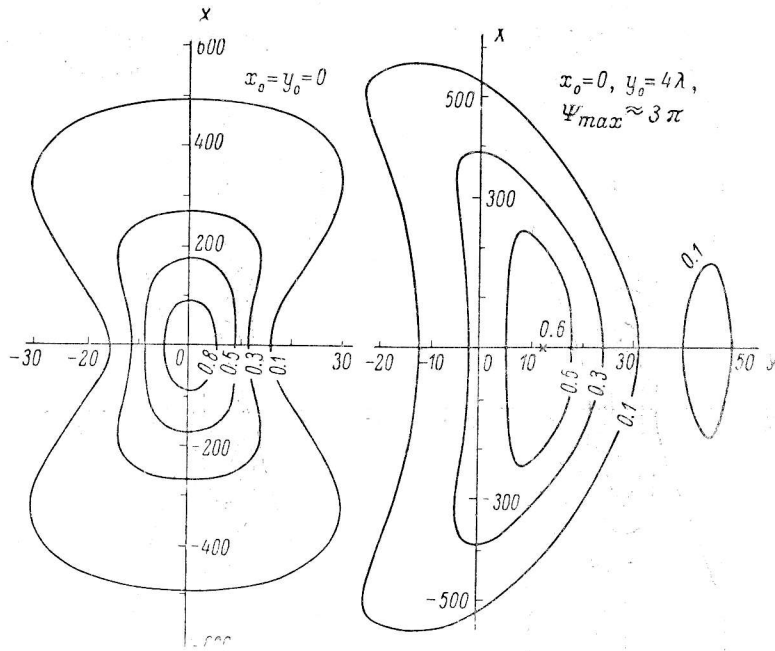


Рис. 5. Изофоты элемента m_{11} для $\theta_0=20^\circ$ при различных значениях выноса y_0 .

$$X = \frac{kp}{\sin \theta_0} \sin \theta \cos \psi; Y = \frac{kp}{\sin \theta_0} \sin \theta \sin \psi.$$

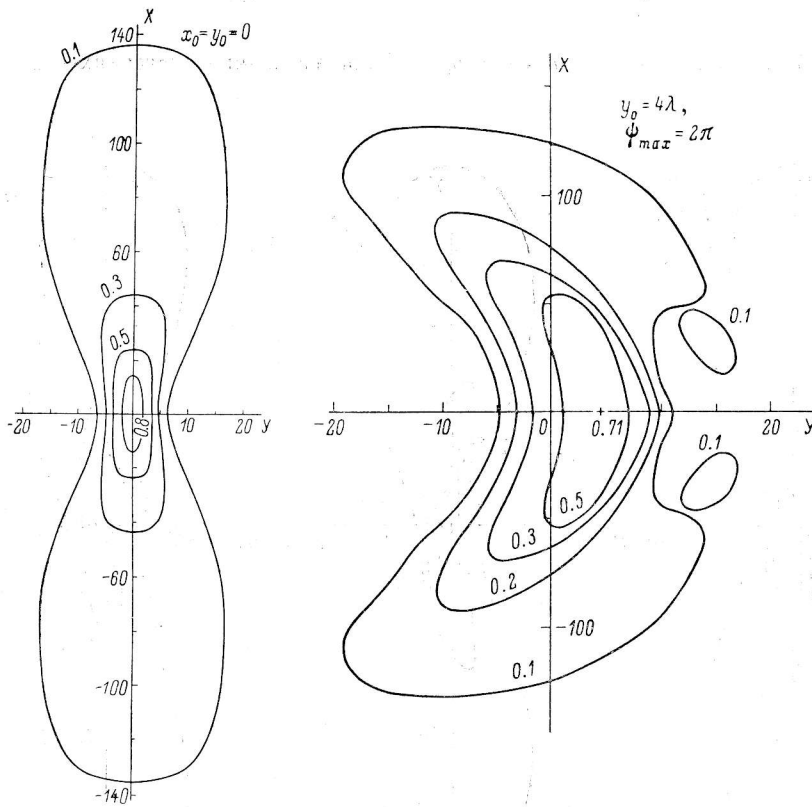


Рис. 6. Изофоты элемента m_{11} для $\theta_0=50^\circ$ при различных значениях выноса y_0 .

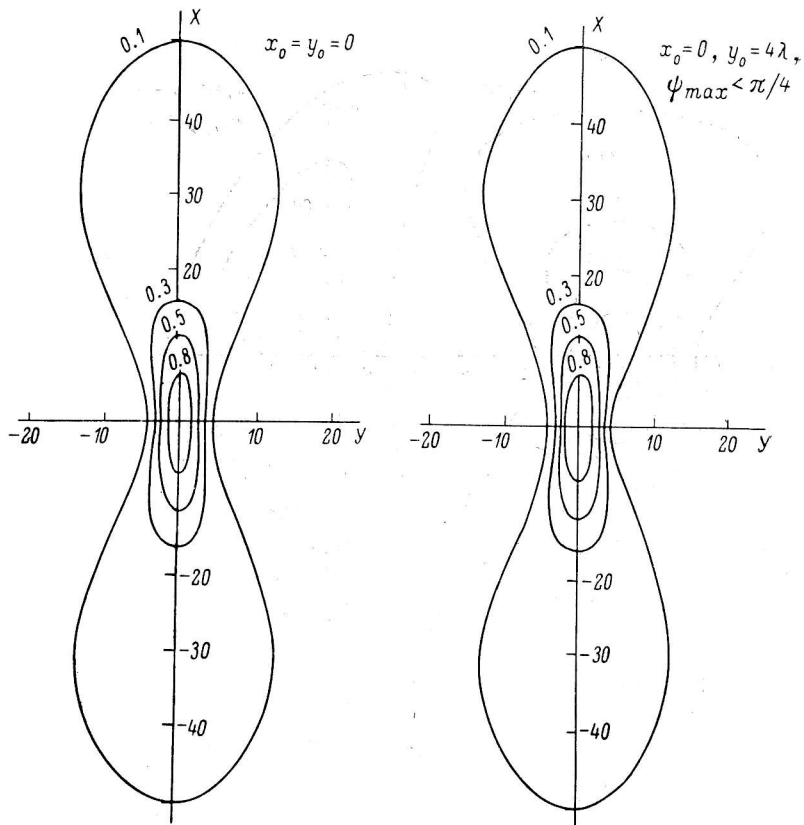


Рис. 7. Изофоты элемента m_{11} для $\theta_0=85^\circ$ при различных значениях выноса y_0 .

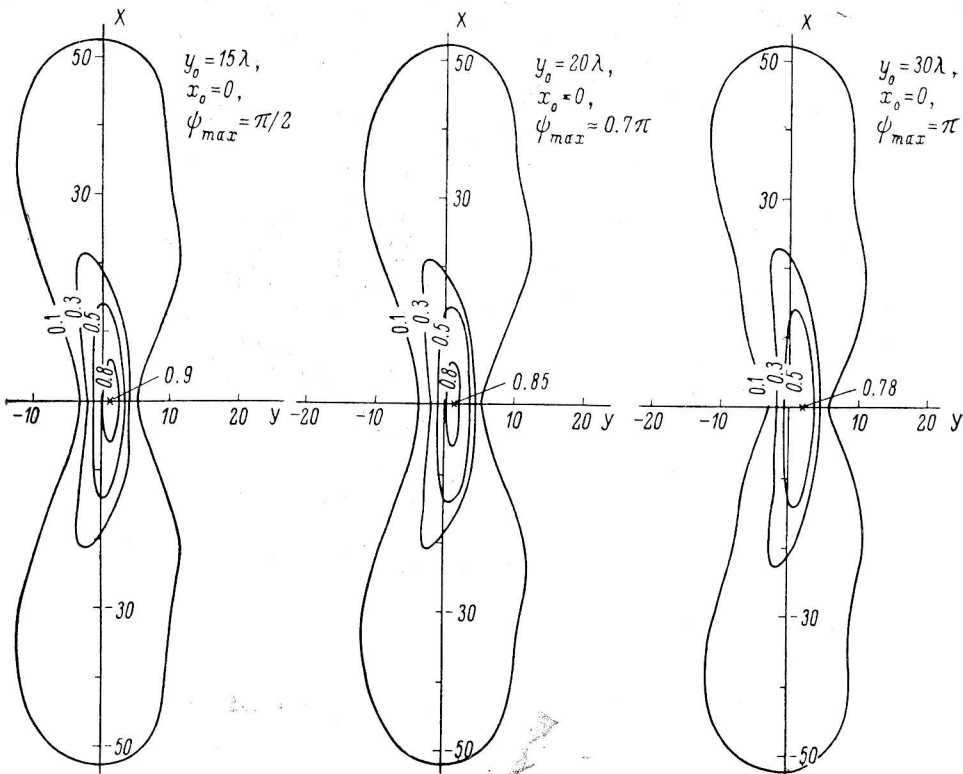


Рис. 8. Изофоты элемента m_{11} для $\theta_0=87^\circ$ при различных значениях выноса y_0 .

Диаграммы направленности и матричные элементы m_{ij} рассчитывались на ЭВМ БЭСМ-6 в вычислительном центре МГУ методом, рассмотренным в работе [4].

Результаты расчета. Диаграммы направленности и матричные элементы с учетом aberrаций рассчитывались для радиотелескопа РАТАН-600 при следующих параметрах: радиус исходной окружности $R=288$ м;

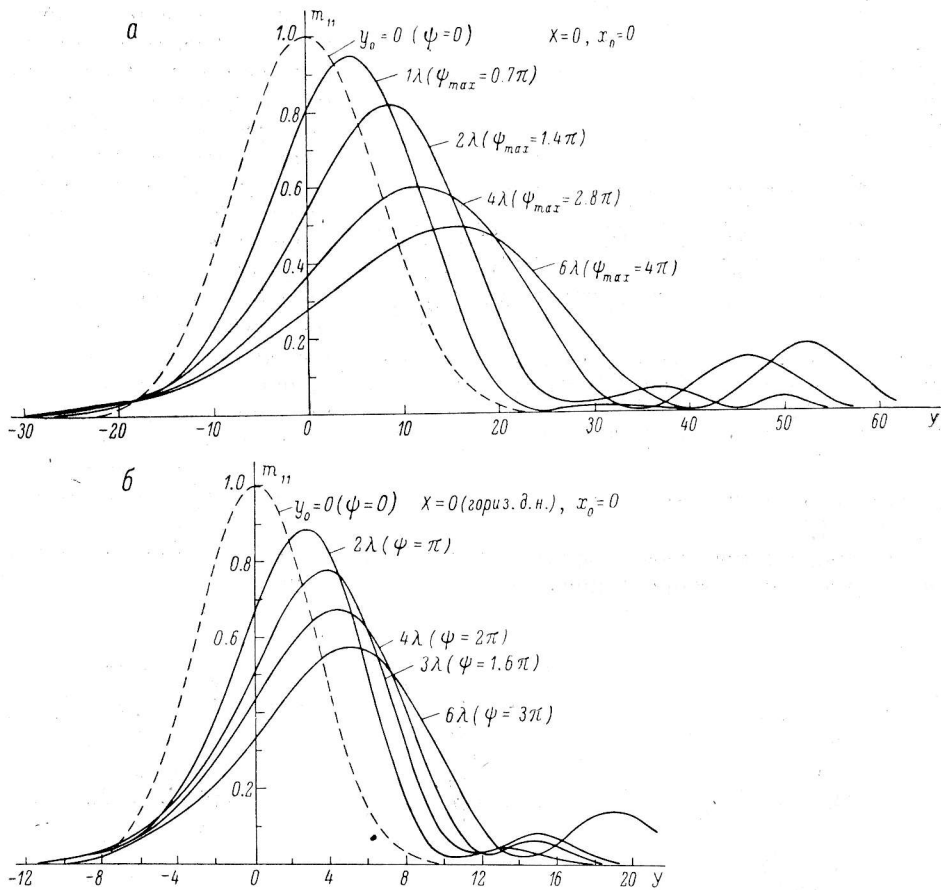


Рис. 9. Горизонтальные д. н. при различных значениях выноса y_0 для $\theta_0=20$ (а) и 50° (б).
 $X = k\rho \sin \theta \cos \psi / \sin \theta_0$.

длина волны $\lambda=4$ см; фокусное расстояние несимметричного параболического цилиндра $F=2.15$ м; угол наклона оси первичного облучателя относительно горизонтальной плоскости $\gamma=50^\circ$; $\alpha=\beta=\cos^2(1.045 w)$, что соответствует д. н. первичных облучателей, используемых на радиотелескопе. Расчет проводился для северного сектора радиотелескопа при углах места $\theta_0=20, 50^\circ$ (угол облучения антенны $\varphi_0=65^\circ$), для $\theta_0=75^\circ$ ($\varphi_0=55^\circ$), $\theta_0=85^\circ$ ($\varphi_0=50^\circ$), $\theta_0=87^\circ$ ($\varphi_0=47^\circ$).

При анализе вычисленных матричных элементов существенно отличными от нуля, как и в случае отсутствия aberrаций [6], являются только диагональные элементы m_{ii} , а также элементы, характеризующие переход друг в друга параметров I и V (m_{14}, m_{41}) и Q и U (m_{23}, m_{32}). Величины m_{11} совпадают с m_{44} , а m_{22} — с m_{33} .

Элемент m_{11} является д. н. по мощности для неполяризованного источника радиоизлучения, m_{22} — диаграммой направленности для линейно поляризованного источника (поляризация 100%); элемент m_{41} определяет диаграмму паразитной круговой поляризации для неполяризованного источника радиоизлучения.

Вначале рассмотрим влияние поперечного выноса облучателя на характеристики радиотелескопа.

1. На рис. 5—7 приведены сечения пространственной д. н., т. е. изофоты элемента m_{11} при углах места $\theta_0 = 20, 50, 85^\circ$ с облучателем, расположенным в фокусе антенны ($y_0 = 0$) и при выносе облучателя $y_0 = 4\lambda$.

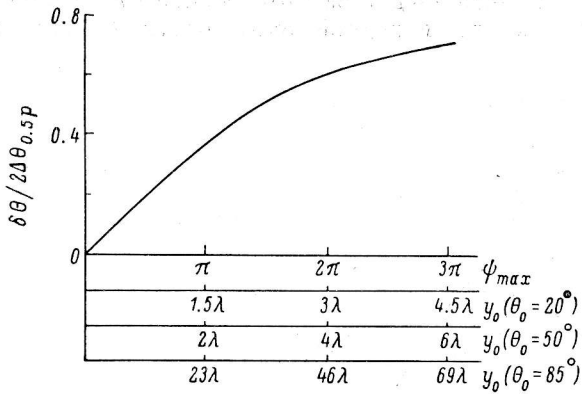


Рис. 10. Зависимость сдвига максимума $\delta\theta$ от величины максимальной фазовой ошибки ψ_{\max} для $\theta_0 = 20, 50, 85^\circ$.

Смещение $\delta\theta$ отнесено к ширине горизонтальной диаграммы по половине мощности, соответствующей заданному углу θ_0 .

Из сравнения приведенных изофот видно, что при одном и том же выносе облучателя из фокуса для различных углов θ_0 происходят разные искажения д. н. Так, при $y_0 = 4\lambda$ для $\theta_0 = 20^\circ$ (максимальная фазовая ошибка $\psi_{\max} \approx 3\pi$) и $\theta_0 = 50^\circ$ ($\psi_{\max} \approx 2\pi$) хорошо видны типичная для «комы» несимметрия диаграммы направленности и появление большого бокового лепестка: при $\theta_0 = 85^\circ$ наблюдается едва различимая асимметрия д. н.

в горизонтальной плоскости, так как фазовая ошибка при этом выносе $\psi_{\max} < \pi/4$.

На рис. 8 приведены изофоты элемента m_{11} для $\theta_0 = 87^\circ$ при различных значениях поперечного выноса y_0 . Так, при выносе $y_0 = 11\lambda$ ($\psi_{\max} = \pi/2$)

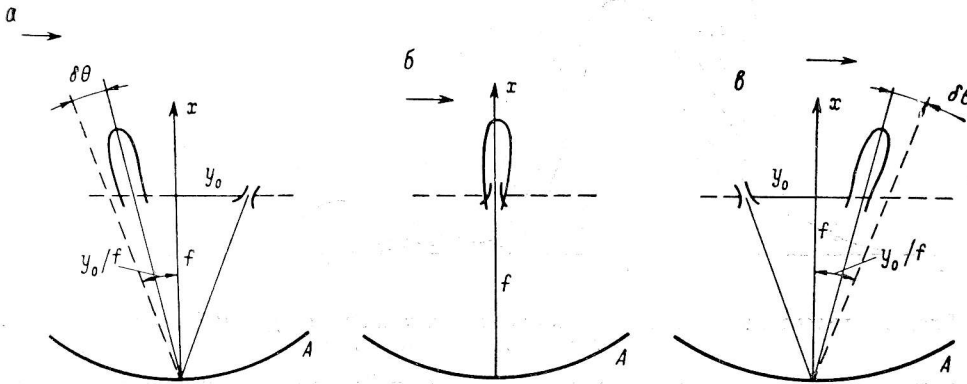


Рис. 11. Положение д. н. при различных выносах облучателя. $f = p / (1 + \cos \theta_0)$.

	y_0	$\delta\theta$	δt	$t_{\text{кульм}}$
a	> 0	$f(y_0)$	> 0	$t_{\text{кульм}} + \delta t$
б	0	0	0	$t_{\text{кульм}}$
в	< 0	$f(y_0)$	< 0	$t_{\text{кульм}} - \delta t$

наблюдается сравнительно небольшая несимметрия диаграммы, которая с увеличением выноса облучателя $y_0 = 20\lambda; 30\lambda$ ($\psi_{\max} \approx 0.7\pi; 1.0\pi$) растет, при этом интенсивность в максимуме уменьшается, происходит смещение главного лепестка.

Были рассчитаны также д. н. антенны для различных углов θ_0 при одинаковых значениях максимальной фазовой ошибки ψ_{\max} , что соответствует различным выносам облучателя для различных углов θ_0 .

На рис. 9 для углов места $\theta_0 = 20, 50^\circ$ построены горизонтальные д. н. ($X=0$) при различных значениях ψ_{\max} . Оказалось, что искажения мало зависят от θ_0 , т. е. от кривизны раскрыва, а определяются в основном

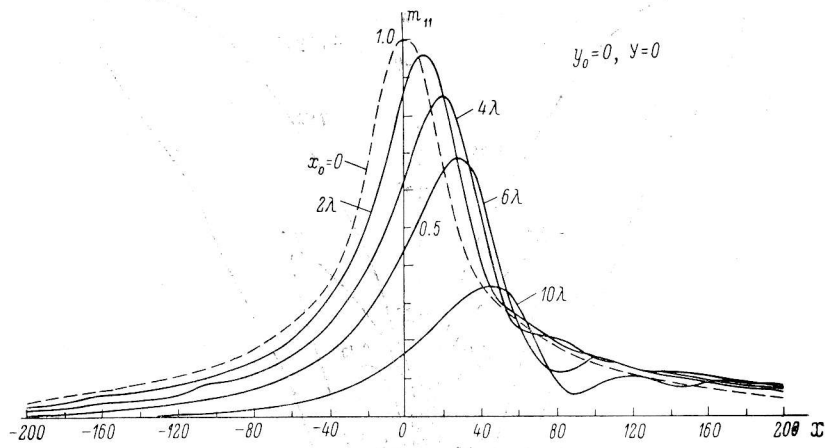


Рис. 12. Вертикальные диаграммы направленности для $\theta_0 = 50^\circ$ при различных значениях выноса x_0 .

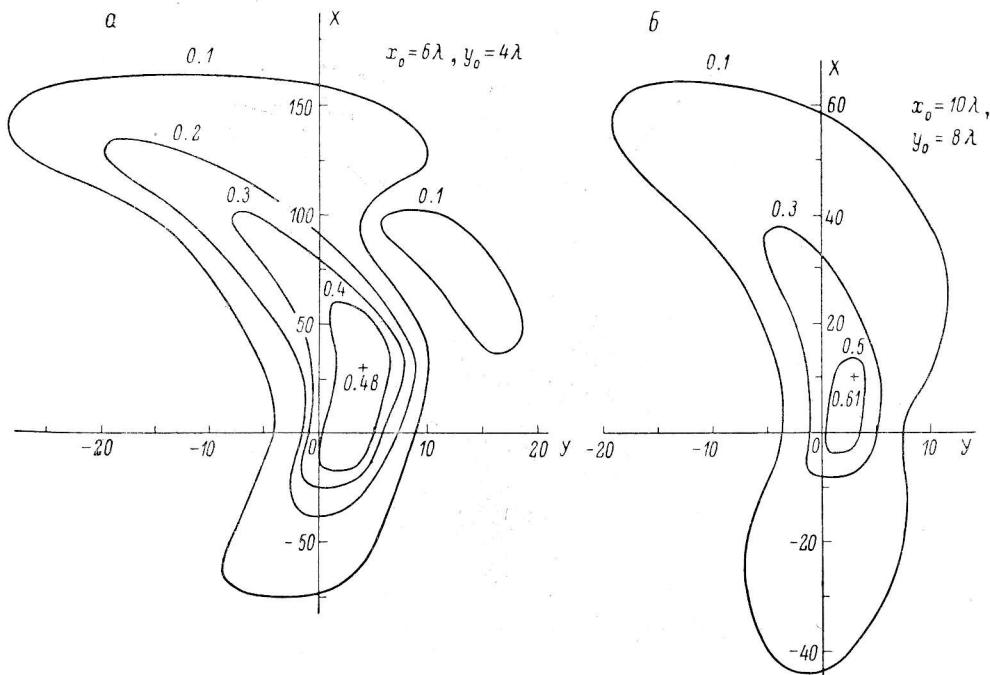


Рис. 13. Изофоты элемента m_{11} при различных значениях x_0 и y_0 для $\theta_0 = 50^\circ$ (а) и 75° (б).

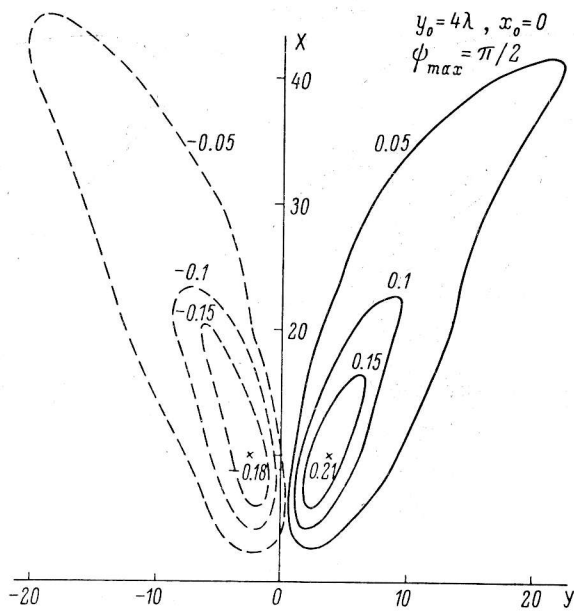
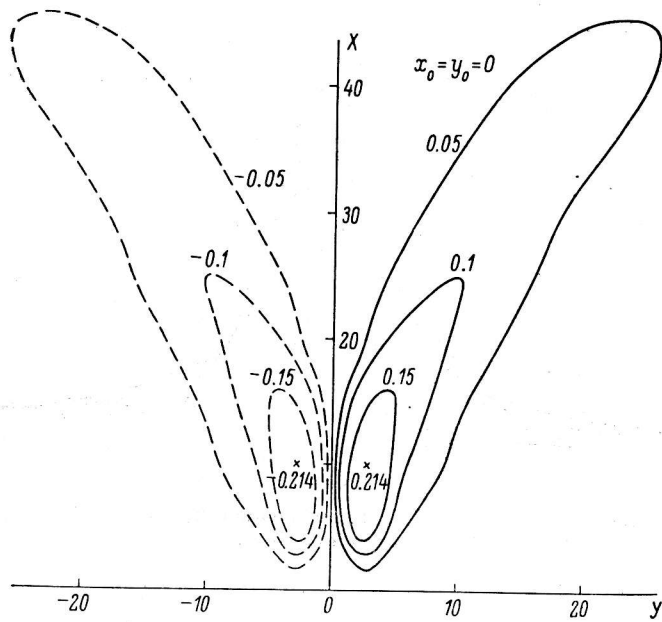


Рис. 14. Изофоты элемента m_{32} для $\theta_0 = 85^\circ$ при различных значениях выноса y_0 .

величиной максимальной фазовой ошибки ψ_{\max} . Это хорошо видно из рис. 10, где построен сдвиг максимума $\delta\theta$ в зависимости от ψ_{\max} для различных углов θ_0 . Как видно из рис. 10, для разных θ_0 при одинаковых значениях ψ_{\max} смещение $\delta\theta$ одно и то же, при больших значениях ψ_{\max} оно сравнимо с шириной диаграммы $\Delta\theta$. Смещение максимума диаграммы $\delta\theta$ приводит к изменению кульминации источника при наблюдениях с различными выносами y_0 , что необходимо учитывать при обработке результатов наблюдений.

При обработке необходимо также иметь в виду, что указанное смещение имеет отрицательный знак по отношению к положению диаграммы, соответствующему геометрической оптике ($R_{y_0}^0 = -y_0/f$).

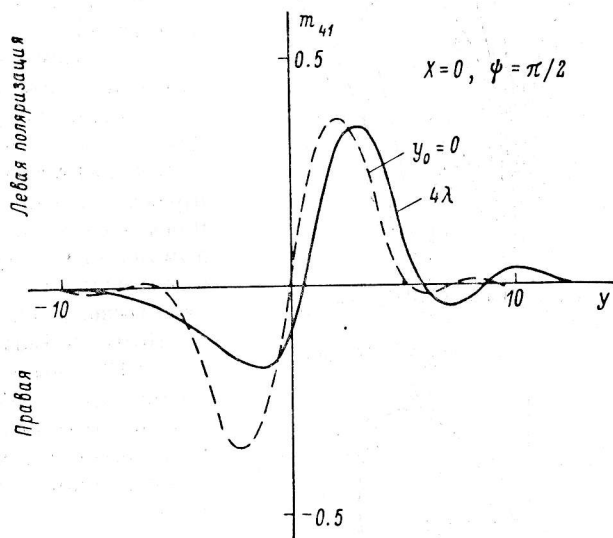


Рис. 15. Зависимость элемента m_{41} от Y ($Y = \frac{kp}{\sin \theta_0} \sin \theta \sin \psi$) при различных значениях y_0 для $\theta = 85^\circ$.

На рис. 11 показано положение диаграммы при различных выносах облучателя.

2. Было исследовано также влияние продольного выноса x_0 на д. н. радиотелескопа (элемент m_{11}). На рис. 12 построены вертикальные диаграммы направленности ($Y=0$) для угла $\theta_0 = 50^\circ$ при различных значениях x_0 .

Из приведенных диаграмм видно, что при выносе облучателя вдоль фокальной оси возникают искажения, типичные для сферической аберрации: расширяется главный лепесток, уменьшается поле в главном направлении. Кроме того, происходит смещение максимума главного лепестка относительно положения $R_{x_0}^0 = -(x_0/f) \operatorname{tg}(\theta_0/2)$, соответствующего геометрической оптике. Указанные искажения мало зависят от θ_0 , т. е. от кривизны раскрыва, а определяются практически только величиной ψ_{\max} .

На рис. 13 приведены изофоты элемента m_{11} для углов $\theta_0 = 50^\circ, 75^\circ$ при различных продольных и поперечных выносах. В этом случае диаграммы становятся полностью несимметричными и максимумы диаграмм смещены относительно точки $R_{x_0}^0 = -(x_0/f) \operatorname{tg}(\theta_0/2)$; $R_{y_0}^0 = -y_0/f$ как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях.

3. Элемент m_{32} характеризует изменение позиционного угла линейно поляризованного излучения, при этом процент линейной поляризации не меняется. На рис. 14 построены изофоты элемента m_{32} для угла $\theta_0 = 85^\circ$ при отсутствии аберраций ($y_0 = 0$) и выносе облучателя $y_0 = 4\lambda$.

Из сравнения построенных изофот видно, что при таком выносе облучателя ($\phi_{\max} < \pi/4$) наблюдается небольшая асимметрия изофот.

На рис. 15 приведены диаграммы паразитной круговой поляризации (элемент m_{41}) в горизонтальной плоскости, а на рис. 16 — изофоты элемента m_{41} для угла $\theta_0 = 85^\circ$ при поперечном выносе облучателя из фокуса $y_0 = 0$ и 4λ . Как видно из рисунков, при наличии aberrаций кривые m_{41} смещаются и становятся разными по величине для левой и правой круговых поляризации.

4. Наличие паразитной круговой поляризации у несимметричных антенн приводит к тому, что при работе с круговой поляризацией, т. е. при использовании кругового поляризационного базиса, д. н. для левой и правой круговых поляризаций смещены в пространстве [12].

Как показано в работах [6, 13], при исследовании циркулярно поляризованной волны интенсивности правой и левополяризованных составляющих определяются так:

$$\begin{aligned} I_R &= (m_{11} + m_{41}) I_{R0} = m_R I_{R0}, \\ I_L &= (m_{11} - m_{41}) I_{L0} = m_L I_{L0}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $m_R = m_{11} + m_{41}$ и $m_L = m_{11} - m_{41}$ — д. н. радиотелескопа для право- и левополяризованных составляющих.

Видно, что д. н. радиотелескопа для правой и левой круговых поляризаций зависят от матричного элемента m_{41} , т. е. от величины паразитной круговой поляризации.

На рис. 17, 18 приведены д. н. для левой и правой круговых поляризаций

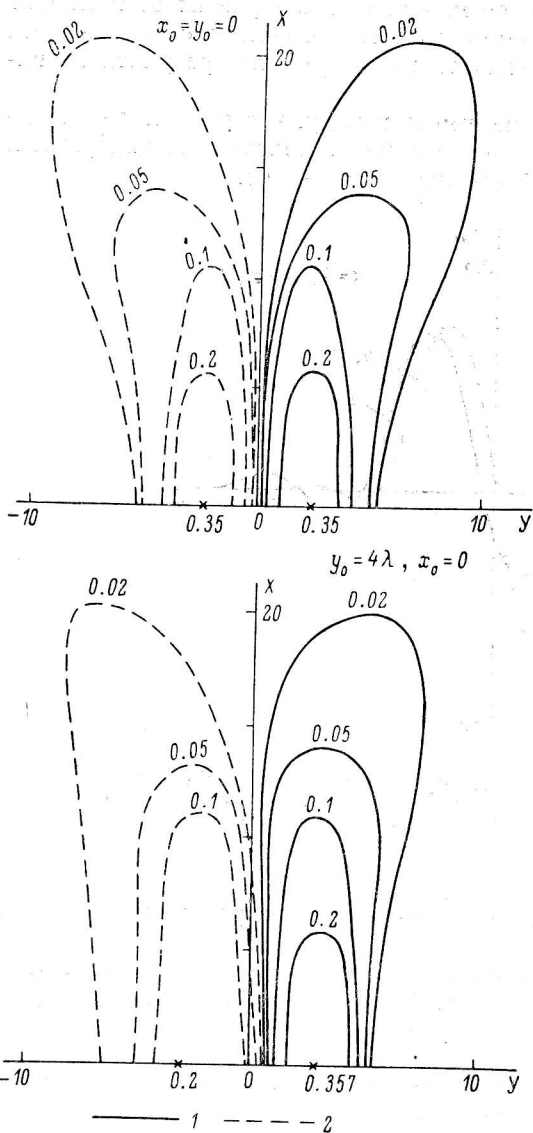


Рис. 16. Изофоты элемента m_{41} для $\theta_0 = 85^\circ$ при различных значениях выноса y_0 .
1 — левая, 2 — правая поляризация.

(m_R и m_L) для углов $\theta_0 = 50, 85^\circ$ с облучателем, расположенным в фокусе антенны ($y_0 = 0$) и при поперечном выносе облучателя из фокуса ($y_0 = 4\lambda$).

Для сравнения приведена кривая m_{11} , соответствующая д. н. для неполяризованного излучения в линейном базисе. Из рисунков видно, что при $y_0 = 0$ диаграммы m_R и m_L смещены на величину $2\delta\theta$ относительно друг друга. Сравнение кривой m_{11} с кривыми m_R и m_L показывает, что при использовании кругового базиса интенсивность в максимуме больше, чем при использовании линейного базиса, что связано с отсутствием

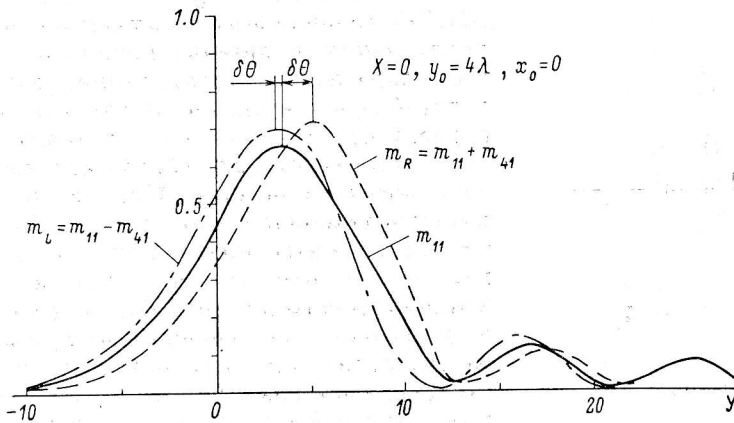
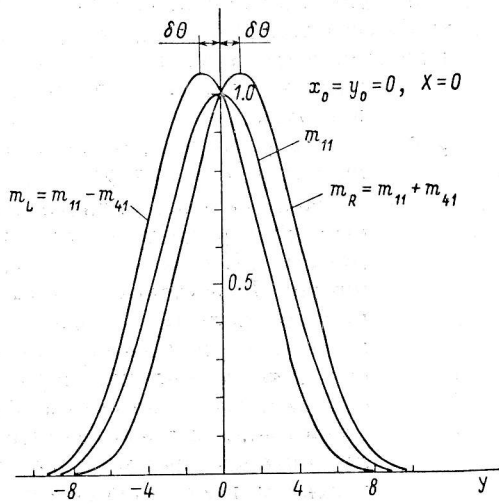


Рис. 17. Горизонтальные сечения $m_{11} \pm m_{41}$ для $\theta_0 = 50^\circ$ при различных выносах облучателя y_0 .

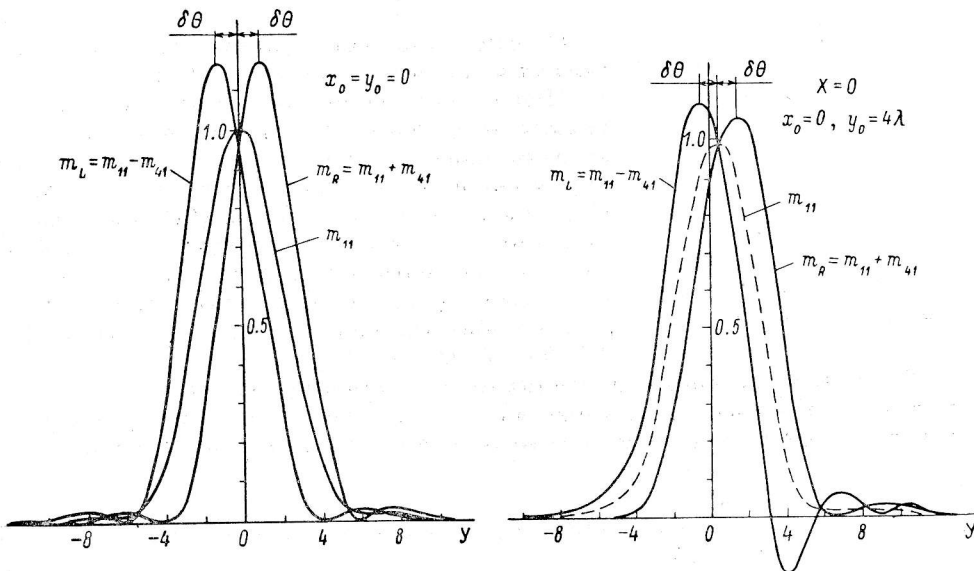


Рис. 18. Горизонтальные сечения $m_{11} \pm m_{41}$ для $\theta_0 = 85^\circ$ при различных значениях выноса y_0 .

потерь на кросс-поляризацию при использовании кругового базиса. При выносе облучателя из фокуса диаграммы m_R и m_L становятся разными по величине, и с увеличением максимальной фазовой ошибки ψ_{\max} нарушается симметрия сдвига диаграмм относительно кривой m_{11} .

На рис. 19 приведены изофоты диаграммы $m_R = m_{11} + m_{41}$ для угла $\theta_0 = 75^\circ$ при $x_0 = y_0 = 0$.

Режим околоразенитного синтеза ($\theta_0 = \pi/2$). Конструкция радиотелескопа РАТАН предусматривает возможность работы в нескольких режимах. В основном режиме одновременно используется примерно одна четверть отражающих элементов, и раскрыв антенны представляет собой часть кольца. Кроме того, применяя специальный конический облучатель (рис. 20), можно вблизи зенита осуществить режим околоразенитного синтеза с одновременным использованием всех отражающих элементов.

Как показано в работе [14], при работе АПП со специальным облучателем паразитная поляризация в антенне появляется только за счет паразитной поляризации, возникающей в параболоиде вращения \mathcal{Z} , так как коническая поверхность $11'$ основного зеркала и коническая поверхность $22'$ облучателя не изменяет состояния поляризации. Никаких особенностей в поляризационных характеристиках АПП при $\theta_0 = \pi/2$ по сравнению с параболоидом вращения нет, и поэтому здесь при исследовании влияния aberrаций мы будем рассматривать д. н. только для основной поляризации, т. е. рассматривать скалярную задачу. В этом случае дифракционная формула (1), связывающая поле в дальней зоне E с распределением поля E_1 в раскрыве, принимает вид

$$E = C \int_S E_1 \exp [ik (R + L)] dS. \quad (1a)$$

В выражении (1a) приняты такие же обозначения, как и в выражениях (1) и (2).

При использовании конического облучателя амплитудное распределение поля в раскрыве антенны близко к равномерному, поэтому при определении д. н. будем считать $E_1 = \text{const}$. При вычислении интеграла (1a) необходимо также иметь в виду, что при углах $\theta_0 = \pi/2$ в отличие от рассмотренного выше случая $\theta_0 < \pi/2$ в aberrационной функции (5) остаются лишь члены второго порядка малости, которые равны [15] $0 (\delta^2/R) = (\delta/2R) \sin^2(\varphi - \chi)$.

Учитывая сказанное и принимая во внимание, что $u/R \ll 1$, из (1a) получим следующее выражение для определения д. н. в режиме околоразенитного синтеза при использовании всех отражающих элементов:

$$F = \frac{E}{E_{\max}} \int_{-\pi}^{\pi} \exp ik [R \sin \theta \cos (\varepsilon - \psi) - A \cos 2 (\varepsilon - \chi)] d\varepsilon, \quad (12)$$

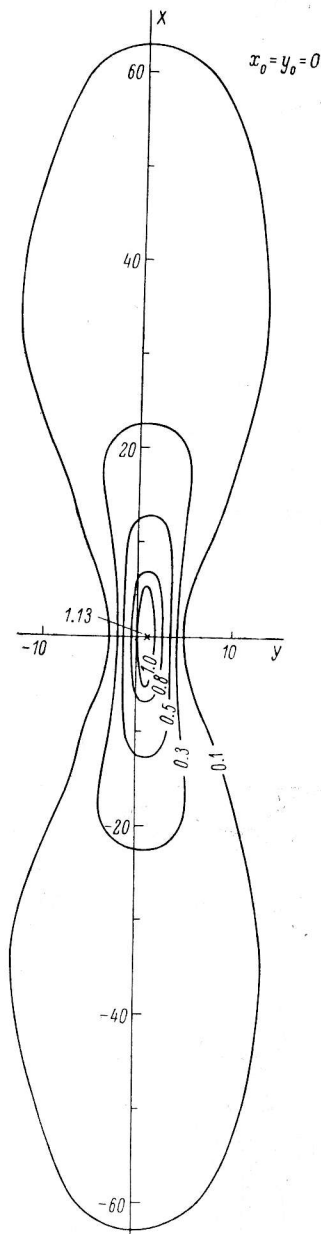


Рис. 19. Изофоты $m_R = m_{11} + m_{41}$ для $\theta_0 = 75^\circ$.

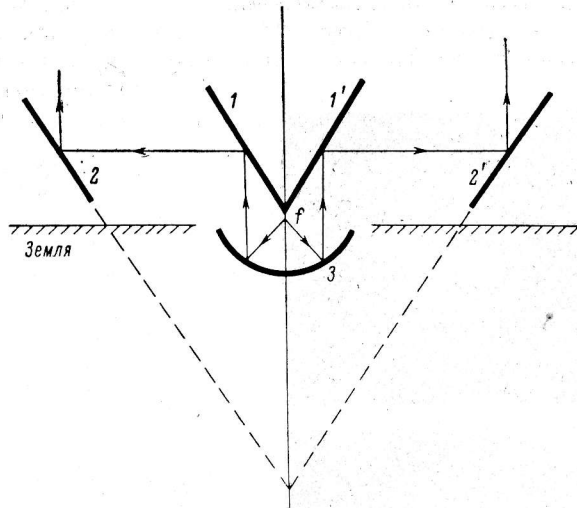


Рис. 20. Схема конического облучателя.

11' — коническая отражающая поверхность облучателя;
 22' — коническая отражающая поверхность основного зеркала; 3 — параболоид вращения.

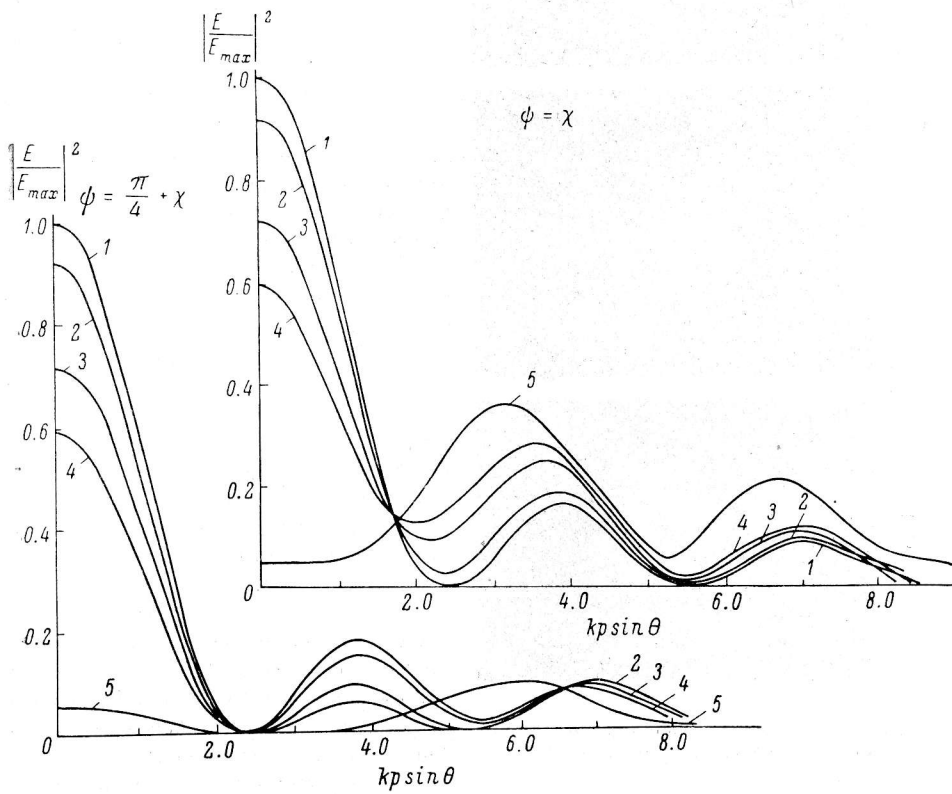


Рис. 21. Диаграммы направленности, рассчитанные по формуле (13). $\theta_0 = \pi/2$. Значения выноса облучателя δ/λ приведены для волны $\lambda = 4$ см.

	hA	δ/λ
1	0	0
2	0,4	43
3	0,8	60
4	1,0	68
5	2,0	96

где θ, ψ — координаты точки наблюдения; χ — угол между направлением выноса облучателя и осью x_r (рис. 1); ε — угол в раскрыве; $A = \delta^2/4R$; δ — вынос облучателя из фокуса или центра окружности.

Воспользовавшись известным разложением

$$e^{iz \cos v} = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} i^n J_n(z) l^{inz},$$

где $J_n(z)$ — функция Бесселя, получим окончательное выражение для д. н. при наличии aberrаций при работе вблизи зенита:

$$F = \frac{E}{E_{\max}} = J_0(kA) J_0(kR \sin \theta) + 2 \times$$

$$\times \sum_{m=1}^{\infty} i^m J_m(kA) J_{2m}(kR \sin \theta) \times \\ \times \cos 2m(\psi - \chi). \quad (13)$$

Выражение (13) определяет д. н. относительно точки

$$R_{x_0}^0 = -\frac{\delta \cos \chi}{R}, \quad R_{y_0}^0 = -\frac{\delta \sin \chi}{R}, \quad (14)$$

т. е. относительно положения диаграммы, соответствующего, как и в предыдущем случае ($\theta_0 \neq \pi/2$), геометрической оптике.

Из выражения (13) следует, что д. н. симметрична относительно сечений $\psi = \chi$ (направления выноса облучателя) и $\psi = \chi + \pi/2$, причем д. н. в этих сечениях одинаковые. Одинаковы д. н. и в сечениях $\psi = \pi/4 + \chi$ и $\psi = (3/4)\pi + \chi$. Поэтому представляет интерес рассмотрение д. н. в двух характерных сечениях: в направлении выноса облучателя ($\psi = \chi$) и под углом $\psi = \pi/4 + \chi$.

На рис. 21 представлены результаты расчетов д. н. по мощности по формуле (13) в этих сечениях для различных aberrаций, определяемых параметром kA . Как видно из рисунков, при $kA < 0.4$ диаграмма изменяется незначительно, а при $kA > 0.4$,

что соответствует выносу облучателя $40-50 \lambda$, д. н. существенно искажается, так как в этом случае сказывается периодическая фазовая ошибка, возникающая в кольцевом раскрыве за счет выноса облучателя.

Задавшись допустимым искажением диаграммы и определив соответствующий такому искажению вынос облучателя δ/λ , можно определить

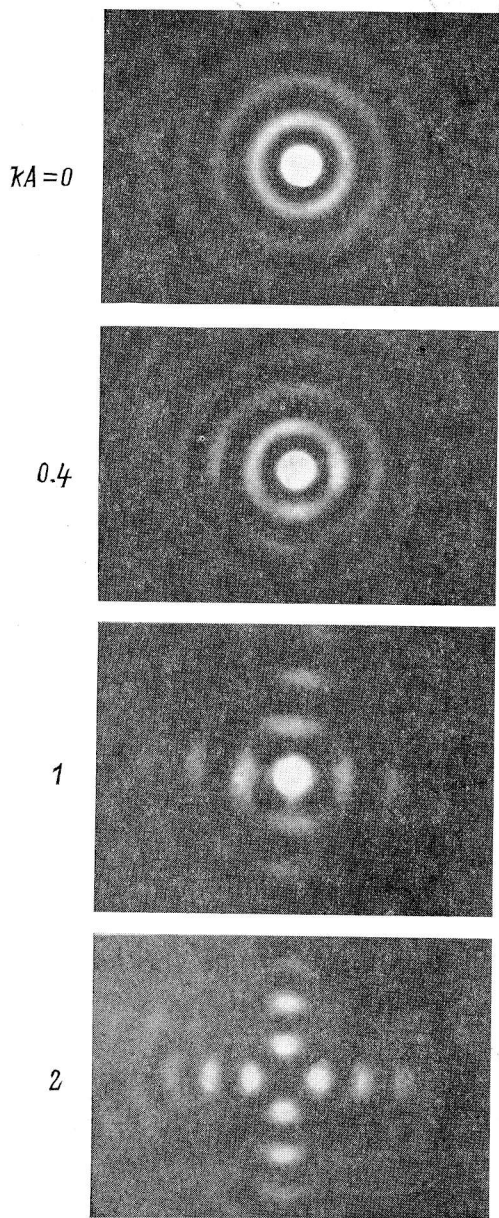


Рис. 22. Результаты оптического моделирования диаграмм направленности.

допустимую область сканирования диаграммы ($R_{x_0 \text{ доп}}^o$, $R_{y_0 \text{ доп}}^o$) вблизи зенита за счет выноса облучателя из фокуса.*

Для экспериментальной проверки полученных результатов использовался метод оптического моделирования [16]. Оптическая модель антенны, выполненная в виде кольца, соответствовала размерам радиотелескопа РАТАН-600 на длине волны $\lambda=4$ см. Для моделирования фазовых ошибок на апертуре использовались дифракционные решетки, у которых штрихи в I и III квадрантах были сдвинуты относительно штрихов во II и IV квадрантах. Величина сдвига определяла величину aberrаций. На рис. 22 показаны результаты оптического моделирования д. н. с учетом aberrаций при таких же значениях kA , как и на рис. 21. Как видно из приведенных рисунков, результаты оптического моделирования хорошо совпадают с расчетными. Так, на фотографиях хорошо видны четыре оси симметрии в д. н., что отмечалось и при расчете.

Таким образом, проведенные исследования позволили определить ряд характерных особенностей д. н. РАТАН-600 при наличии aberrаций, связанных с выносом облучателя из фокуса.

К таким особенностям в первую очередь относится смещение максимума диаграммы за счет aberrаций, а также появление асимметрии в пространственной диаграмме для основной поляризации (элемент m_{11}), для паразитной круговой поляризации (элемент m_{41}), а также для элемента m_{32} .

Полученные в работе результаты расчетов поляризационных характеристик РАТАН-600 позволяют оценить допустимые величины выноса облучателя из фокуса, при которых искажения диаграмм, связанные с aberrациями, еще невелики как для основного режима работы ($\theta_0 \neq \pi/2$), так и для режима околоразенитного синтеза ($\theta_0 = \pi/2$).

В заключение авторы выражают благодарность Н. Е. Гольневой и Н. Ф. Корнеевой за помощь в обработке результатов расчета.

Список литературы

1. Стоцкий А. А. Aberrации главного зеркала антенны переменного профиля и сканирование диаграммы направленности путем смещения облучателя. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 63—76.
2. Князева Л. В. Расчет ДН и характеристик сканирования антенны переменного профиля. — «Связь», 1975, № 22, с. 73—83.
3. Hogbom J. A. Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer Baselines. — Astrophys. Suppl., 1974, 15, p. 417—426.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Есепкина Н. А., Кайдановский Н. Л., Кузнецов Б. Г., Кузнецова Г. В., Хайкин С. Э. Исследование характеристик излучения остронаправленных зеркальных антенн с отражателем переменного профиля. — Радиотехника и электроника, 1961, 6, № 12, с. 1947.
9. О'Нейл. Статистическая оптика. М., «Мир», 1966.
10. Есепкина Н. А. Поляризационные характеристики антенн радиотелескопов. — Изв. вузов. Радиофизика, 1971, 14, № 5, с. 673.

* Аналогичное рассмотрение можно провести для случая, когда отражающие элементы вблизи зенита устанавливаются не по кругу, а по эллипсу ($\theta_0 = \pi/2 - \Delta\theta_0$, где $\Delta\theta_0 \ll 1$). Такой случай рассмотрен в работе [15].

11. Есепкина Н. А. Поляризационные характеристики антенн радиотелескопов. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1972, 4, с. 157.
 12. Schu T., Turgin R. N. Depolarisation properties of offset reflector antennas. — Trans. AP-21, 1973, 3, p. 339.
 13. Коржавин А. Н. К вопросу об измерении круговой поляризации на АПП. — Сообщ. САО, 1976, 16, с. 43.
 14. Есепкина Н. А., Парийский Ю. Н. Особенности работы антенн переменного профиля при наблюдении вблизи зенита. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 58—62.
 15. Васильев Б. А., Виноградов Г. К., Водоватов И. А., Высоцкий М. Г., Есепкина Н. А. Исследование диаграмм направленности радиотелескопа РАТАН-600 в режиме околосенитного синтеза при наличии аберраций. — Радиотехника и электроника, 1978, 24, № 7, с. 42.
 16. Есепкина Н. А., Петрунькин В. Ю., Водоватов И. А., Виноградов Г. К., Высоцкий М. Г. Использование методов когерентной оптики и голографии для исследования характеристик радиотелескопов. — Изв. вузов. Радиофизика, 1976, 19, № 11, с. 1696—1704.
-