

## ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕННЫ ПЕРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ

*Н. С. Бахвалов,\* Л. Г. Васильева,\* Н. А. Есепкина,\*\*  
Н. С. Соболева, А. В. Темирова*

Определены поляризационные характеристики антенны переменного профиля с вторичным отражателем в виде параболического цилиндра, с учетом кросс-поляризации, возникающей в антенне, для случая частично поляризованного излучения. Поляризационные свойства антенны характеризуются при этом матрицей  $M$ , связывающей параметры Стокса излучения на входе и выходе антенны. Приводятся значения элементов этой матрицы, рассчитанные на БЭСМ-6 для Большого пулковского радиотелескопа, а также значения этих элементов, найденные экспериментальным путем. Расчетные и экспериментальные значения находятся в хорошем соответствии.

The complete polarization characteristics of a variable profile antenna with a parabolic cylinder secondary reflector are determined, allowing for the cross-polarization in the antenna, for the case of the partially polarized emission. The polarization properties of the antenna therewith are described by the matrix  $M$  relating the Stokes parameters of the emission at the input to those at the output of the antenna. The values of the elements of this matrix are presented for the Large Pulkovo Radio Telescope calculated with the help of the BESM-6 computer. The calculated values are in good agreement with the experimental ones.

1. При исследовании источников радиоизлучения обычно пытаются определить распределение радиояркости во всех параметрах Стокса  $I, Q, U, V$ . Однако и среда, в которой распространяется радиоизлучение, и антенна, и приемник воздействуют на истинные параметры источника  $I_0, Q_0, U_0, V_0$ . Поэтому параметры Стокса на выходе приемного устройства отличаются от истинных параметров источника и связаны с последним соотношением [1]

$$S_{\text{вых}} = M_1 M M_2 S_0.$$

Здесь  $S_{\text{вых}} = \begin{pmatrix} I_{\text{вых}} \\ Q_{\text{вых}} \\ U_{\text{вых}} \\ V_{\text{вых}} \end{pmatrix}$  — вектор-параметр Стокса выходного излучения;  $S_0 =$

$= \begin{pmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{pmatrix}$  — вектор-параметр Стокса входного или исследуемого излучения;

$M_1, M, M_2$  — матричные операторы, причем матрица  $M_1$  описывает воздействие приемно-усилительного устройства и входного тракта на исследуемое излучение.

\* Сотрудники Вычислительного центра МГУ.

\*\* Сотрудник Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина.

дуемое излучение, матрица  $M$  — воздействие антенной системы и матрица  $M_2$  — влияние среды, расположенной между источником и наблюдателем.

Матрица  $M_1$  для приемного устройства с идеальным входным трактом, в котором отсутствует поглощение, отражение и прочие эффекты, рассмотрена, например, в работе [2]. Определить элементы матрицы  $M_2$  в общем случае довольно трудно, так как для этого необходим учет механизмов распространения радиоволн. Однако в некоторых частных случаях при известных механизмах нахождение элементов матрицы  $M_2$  не представляет трудности.

В настоящей статье мы остановимся на рассмотрении влияния антенной системы на исследуемое излучение, т. е. будем рассматривать только матрицу  $M$ . Мы определим элементы этой матрицы для радиотелескопа в виде антенны переменного профиля (АПП) и сравним полученные значения элементов с результатами эксперимента. Предлагаемый способ представления поляризационных характеристик антенны или радиотелескопа пригоден для изучения полностью поляризованного, частично поляризованного и неполяризованного излучения.

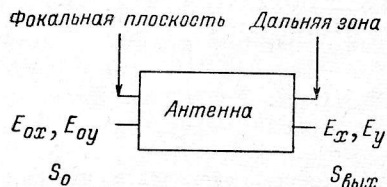


Рис. 1. Параметры излучения на входе и выходе антенны.

$E_{ox}, E_{oy}, S_0$  — параметры входного излучения;  $E_x, E_y, S_{вых}$  — параметры выходного излучения.

2. Антенна изменяет состояние поляризации принимаемого излучения, причем характер этого изменения зависит от ее поляризационных характеристик. Антенну можно рассматривать как прибор, изменяющий поляризацию излучения, — поляризатор. По аналогии с оптикой связь между параметрами Стокса на входе и выходе антенны (рис. 1) представим в таком виде [3]

$$S_{вых} = MS_0,$$

или в развернутой форме

$$\begin{pmatrix} I_{вых} \\ Q_{вых} \\ U_{вых} \\ V_{вых} \end{pmatrix} = a_0^2 \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $M$  — приборный оператор или матрица Мюллера,  $a_0^2$  — величина, пропорциональная коэффициенту усиления антенны в главном направлении. Элементы матрицы  $M$  зависят от диаграмм направленности антенны для основной и кросс-поляризационной составляющих.

При изучении поляризационных характеристик поле в дальней зоне удобно записывать в таких координатах, чтобы в главном направлении орты, по которым раскладывается выходное поле, совпадали с ортами входного поля. Для остронаправленных радиотелескопов в этом случае с достаточной точностью можно считать, что орты выходного излучения совпадают с ортами входного излучения в пределах интересующей нас области диаграммы направленности (главный лепесток и ближайшие боковые лепестки). При таком выборе координат матрица  $M$  определяет изменение поляризации, связанное только с паразитной поляризацией в антенне.

Будем считать, что антенна принимает или излучает вертикально поляризованную ( $E_x$ ) и горизонтально поляризованную ( $E_y$ ) составляющие поля одновременно. При этом антенна характеризуется четырьмя диаграммами

направленности  $f_x$ ,  $f_{xy}$  и  $f_y$ ,  $f_{yx}$ , которые в общем случае являются комплексными величинами. Причем  $f_x$  и  $f_{xy}$  определяют диаграммы направленности по полю для основной поляризации и кросс-поляризации, когда основная поляризация направлена по оси  $x$ , а  $f_y$  и  $f_{yx}$  определяют те же величины, когда основная поляризация направлена по оси  $y$ .

Выражения для элементов матрицы  $M$  приведены в работе [4], и мы здесь их полностью приводить не будем, а запишем только элементы 1-го столбца, которые определяют состояние поляризации выходного излучения при неполяризованном входном излучении:

$$\begin{aligned} M_{11} &= [(f_x f_x^* + f_{yx} f_{yx}^*) + (f_{xy} f_{xy}^* + f_y f_y^*)]/2, \\ M_{21} &= [(f_x f_x^* + f_{yx} f_{yx}^*) - (f_{xy} f_{xy}^* + f_y f_y^*)]/2, \\ M_{31} &= [(f_x^* f_{xy} + f_x f_{xy}^*) + (f_{yx}^* f_y + f_{yx} f_y^*)]/2, \\ M_{41} &= [j(f_x^* f_{xy} - f_x f_{xy}^*) + j(f_{yx}^* f_y - f_{yx} f_y^*)]/2. \end{aligned} \quad (2)$$

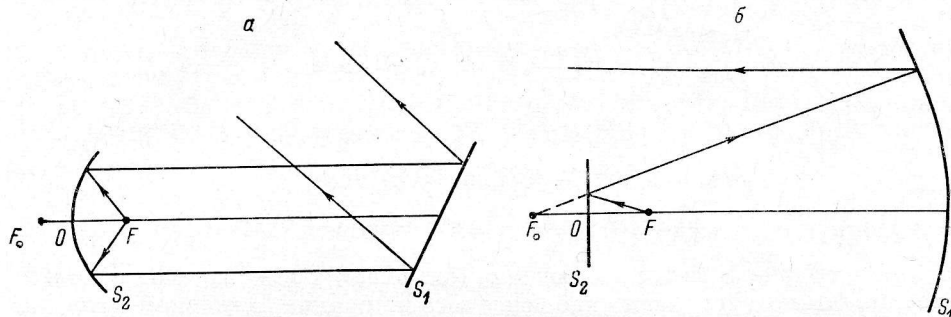


Рис. 2. Сечение антенной системы вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостями.  $F_0$  — фокус основного зеркала,  $F=OF$  — фокусное расстояние вспомогательного зеркала.

Элементы  $M_{21}$ ,  $M_{31}$  и  $M_{41}$  определяют паразитную поляризацию, возникающую в антенне. Элемент  $M_{41}$  характеризует величину круговой паразитной поляризации, а  $M_{21}$  и  $M_{31}$  — величину линейной паразитной поляризации, связанной как с кросс-поляризацией  $f_{xy}$  и  $f_{yx}$  в антенне, так и с диаграммной модуляцией [5], которая определяется различием диаграмм направленности  $f_x$  и  $f_y$  для двух основных составляющих. Величина элементов матрицы зависит от направления наблюдения, т. е. от углов  $\theta_0$ ,  $\theta$ ,  $\phi$ .

Таким образом, для нахождения элементов матрицы  $M$  необходимо определить диаграммы направленности антенны  $f_x$ ,  $f_y$ ,  $f_{xy}$ ,  $f_{yx}$ .

Перейдем к определению диаграмм направленности АПП.

3. Диаграммы направленности АПП рассмотрены в работе [6]. Однако там предполагалось, что АПП является однозеркальной системой и облучается линейным облучателем, создающим цилиндрическую волну и имеющим одинаковые диаграммы при вертикальной и горизонтальной поляризации, т. е. предполагалось, что  $f_x=f_y$ . На самом деле в АПП вместо линейного обычно используется зеркальный облучатель [7]. В этом случае АПП является двухзеркальной системой (рис. 2). Основное зеркало  $S_1$  (коническая поверхность) преобразует плоскую волну, падающую на антенну, в сходящуюся цилиндрическую волну. Вспомогательное зеркало  $S_2$  преобразует цилиндрический фронт в сферический с центром, расположенным в фокусе вспомогательного зеркала, где помещается первичный точечный облучатель. Для преобразования цилиндрического фронта в сферический пригодны зеркала различной формы, однако для радио-

астрономии наиболее удобным является вспомогательное зеркало в виде параболического цилиндра, которое обычно и используется. Поэтому здесь мы определим диаграммы направленности АПП с зеркальным облучателем в виде параболического цилиндра с горизонтальной образующей. В качестве первичного облучателя используется волновод, работающий на низшем типе. В рассматриваемом случае, так же как и в работе [7], диаграммы определялись апертурным методом, при этом учитывалась кросс-поляризация как на основном зеркале  $S_1$ , так и на вспомогательном  $S_2$ .

При вертикальной поляризации, т. е. в случае, когда основная поляризация направлена по оси  $x$ , выражения для диаграмм направленности имеют вид

$$f_x = I_x(\theta, \psi)/I_x(0,0); \quad f_{xy} = I_{xy}(\theta, \psi)/I_x(0,0),$$

где

$$I_x(\theta, \psi) = C \int_{-\varepsilon_0}^{\varepsilon_0} \int_{-h \cos(\theta_0/2)/2}^{h \cos(\theta_0/2)/2} [(E_{x\pi}^x \cos \varepsilon - E_{\varphi}^x \sin \varepsilon) \cos \varphi / \sqrt{(1 + u^2/2F^2)}] \times \\ \times \exp[-j\zeta(\theta, \psi, \varepsilon, u)] dud\varepsilon;$$

$$I_{xy}(\theta, \psi) = C \int [(E_{x\pi}^x \sin \varepsilon + E_{\varphi}^x \cos \varepsilon) \cos \varphi / \sqrt{(1 + u^2/2F^2)}] \times \\ \times \exp[-j\zeta(\theta, \psi, \varepsilon, u)] dud\varepsilon;$$

$$\zeta = 2\pi(R/\sin \theta_0 + u) \sin \theta \cos(\varepsilon - \psi)/\lambda;$$

$\theta, \psi$  — координаты точки наблюдения (см. рис. 3);  $\theta_0$  — главное направление антенны или угол места наблюдаемого источника (в главном направлении  $\theta=0$ );  $R$  — радиус исходной окружности;  $\varepsilon, u$  — координаты точки в раскрытии антенны,  $u$  изменяется от  $-h \cos(\theta_0/2)/2$  до  $h \cos(\theta_0/2)/2$  ( $h$  — высота отражающего элемента антенны),  $\varepsilon$  изменяется от  $-\varepsilon_0$  до  $\varepsilon_0$ ;  $\varphi$  определяет азимут отражающего элемента из фокуса антенны и изменяется от  $-\varphi_0$  до  $\varphi_0$ , причем  $\varphi_0$  может зависеть от угла места  $\theta_0$ ;  $F$  — фокус параболического цилиндра;  $E_{x\pi}^x$  и  $E_{\varphi}^x$  — составляющие поля в цилиндрическом фронте, равные

$$E_{x\pi}^x = -(\alpha \cos^2 \Phi + \beta \sin^2 \Phi \cos \omega) / \sqrt{(1 - \sin^2 \omega \sin^2 \Phi)},$$

$$E_{\varphi}^x = \sin \Phi \cos \Phi (\beta - \alpha \cos \omega) / \sqrt{(1 - \sin^2 \omega \sin^2 \Phi)}.$$

$\alpha$  и  $\beta$  характеризуют сферические составляющие поля первичного облучателя  $E_{\varphi}^x, E_{\omega}^x$ ; для облучателя в виде круглого волновода радиуса  $a$  они равны

$$\alpha = (1 + \sqrt{(1 - [\lambda/3.41a]^2)} \cos \omega) I_1(2\pi a \sin \omega/\lambda) / (2\pi a \sin \omega/\lambda),$$

$$\beta = (\sqrt{(1 - [\lambda/3.41a]^2)} + \cos \omega) I_1'(2\pi a \sin \omega/\lambda) / (1 - [3.41a \sin \omega/\lambda]^2),$$

$$E_{\omega}^x = \alpha \cos \Phi, \quad E_{\varphi}^x = -\beta \sin \Phi.$$

Углы  $\omega$  и  $\Phi$  являются функциями  $\varphi$  и  $u$ . И наконец, углы  $\varepsilon$  и  $\varphi$  связаны следующей зависимостью:

$$\sin \varepsilon = \sin \varphi \sin \theta_0 / (\cos \varphi + \cos \theta_0).$$

При горизонтальной поляризации, т. е. в случае, когда основная поляризация направлена по оси  $y$ , выражения для диаграмм направленности имеют вид

$$f_y = I_y(\theta, \psi)/I_y(0,0), \quad f_{yx} = I_{yx}(\theta, \psi)/I_y(0,0),$$

где

$$I_y(\theta, \psi) = C \int \int [(E_{x_n}^y \sin \varepsilon + E_\varphi^y \cos \varepsilon) \cos \varphi / \sqrt{(1 + u^2/2F^2)}] \times \\ \times \exp[-j\zeta(\theta, \psi, \varepsilon, u)] dud\varepsilon, \\ I_{yx}(\theta, \psi) = C \int \int [(E_{x_n}^y \cos \varepsilon - E_\varphi^y \sin \varepsilon) \cos \varphi / \sqrt{(1 + u^2/2F^2)}] \times \\ \times \exp[-j\zeta(\theta, \psi, \varepsilon, u)] dud\varepsilon, \\ E_{x_n}^y = \sin \Phi \cos \Phi (\beta \cos \omega - \alpha) / \sqrt{(1 - \sin^2 \omega \sin^2 \Phi)}, \\ E_\varphi^y = -(\alpha \sin^2 \Phi \cos \omega + \beta \cos^2 \Phi) / \sqrt{(1 - \sin^2 \omega \sin^2 \Phi)}, \\ E_\omega^y = \alpha \sin \Phi, \quad E_\Phi^y = -\beta \cos \Phi.$$

Остальные величины имеют те же значения, что и для случая вертикальной поляризации.

Интегралы  $I_x, I_{xy}, I_y, I_{yx}$ , диаграммы направленности  $f_x, f_{xy}, f_y, f_{yx}$  и матричные элементы  $M_{ij}^{*}$  рассчитывались на БЭСМ-6 в вычислительном центре МГУ.

Относительно переменной  $\varepsilon$  подынтегральные функции рассматриваемых интегралов имеют вид

$$f(\varepsilon) \exp[j\Omega\chi(\varepsilon)],$$

где  $f(\varepsilon)$  — гладкая функция, а  $\exp[j\Omega\chi(\varepsilon)]$  — быстро осциллирующая функция ( $\Omega = R/\lambda > 10^3$ ).

Отрезок интегрирования разбивался на  $n$  частичных отрезков  $[\varepsilon_k, \varepsilon_{k+1}]$  ( $k=1, 2, 3, \dots$ ), на каждом из которых подынтегральная функция представлялась в виде

$$f(\varepsilon) \exp[j\Omega\chi(\varepsilon)] = \exp(j\rho\varepsilon) P(\varepsilon),$$

где

$$\rho = \Omega\chi'(\bar{\varepsilon}), \quad P(\varepsilon) = \exp(j\Omega[\chi(\varepsilon) - \varepsilon\chi'(\bar{\varepsilon})]) f(\varepsilon);$$

$\bar{\varepsilon}$  — середина частичного отрезка  $[\varepsilon_k, \varepsilon_{k+1}]$ ,  $\bar{\varepsilon} = (\varepsilon_k + \varepsilon_{k+1})/2$ .

Интегралы

$$\int_{\varepsilon_k}^{\varepsilon_{k+1}} \exp(j\rho\varepsilon) P(\varepsilon) d\varepsilon$$

заменялись квадратурами

$$\int_{\varepsilon_k}^{\varepsilon_{k+1}} \exp(j\rho\varepsilon) P(\varepsilon) d\varepsilon = [(\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k)/2] \times \\ \times \exp(j\rho\bar{\varepsilon}) \sum_{i=0}^4 C_i(\rho, \varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k) P[\varepsilon_k + i/4 \cdot (\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k)],$$

точными, когда  $P(x)$  — многочлен четвертой степени.

Подынтегральные функции рассматриваемых интегралов имеют вид

$$K(\psi, u, \varepsilon) G(u, \varepsilon, \theta, \psi),$$

причем вычисление значений функции  $K$  существенно сложнее, чем вычисление значений функции  $G$ . В связи с этим интегралы считались при

\* Матрица  $M$  определяет поляризационные характеристики антенны для точечного источника.

фиксированном  $\psi$  одновременно для всех значений  $\theta$ . Это позволило существенно сократить объем вычислений.

4. Диаграммы  $f_x, f_y, f_{xy}, f_{yx}$  и матричные элементы рассчитывались для Большого пулковского радиотелескопа (БПР) при следующих исходных данных: радиус исходной окружности  $R=100$  м, длина волны  $\lambda=4$  см\*, высота щита  $h=3$  м,  $\varphi_0=60^\circ$  для углов места  $\theta_0=10, 20, 30, 45, 50, 60^\circ$  и  $\varphi_0=45^\circ$  для  $\theta_0=80, 85^\circ$ ; диаметр волновода  $2a=3$  см.

При рассмотрении вычисленных элементов матрицы оказалось, что существенно отличными от нуля являются только диагональные элементы  $M_{ii}$ , а также элементы, характеризующие переход друг в друга параметров  $I$  и  $V$  ( $M_{41}, M_{14}$ ) и  $Q$  и  $U$  ( $M_{32}, M_{23}$ ). Это означает, что после прохождения неполяризованного излучения через антенный фильтр появляется паразитная

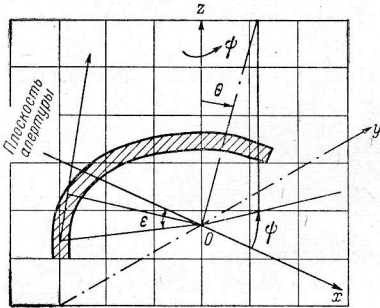


Рис. 3. Форма раскрыва антенны.

круговая поляризация, а для тех значений  $\psi$  и  $\theta$ , при которых отличны от нуля  $M_{32}$  и  $M_{23}$ , происходит изменение позиционного угла линейно поляризованного излучения. При этом процент линейной поляризации не меняется. Так как элементы  $M_{21}$  и  $M_{31}$  близки к нулю, то при наблюдениях с помощью БПР не возникает паразитного линейно поляризованного сигнала. Как и следовало ожидать, величина  $M_{11}$  совпадает с  $M_{44}$ , а  $M_{22}$  с  $M_{33}$ .

Отличительным свойством матричных элементов АПП является то, что все они сильно меняются с углом места наблюдения. На рис. 4 и 5 приведены значения элемента  $M_{11}$  в зависимости от углового расстояния  $\theta$  от электрической оси радиотелескопа для горизонтального ( $\psi=90^\circ$ ) и вертикального ( $\psi=0^\circ$ ) сечений, проходящих через эту ось. Как видно из формулы (2), элемент  $M_{11}$  является диаграммой направленности по мощности для неполяризованного источника радиоизлучения,  $M_{22}$  — диаграммой направленности по мощности для линейно поляризованного источника (процент поляризации 100). На рис. 6 представлены зависимости полуширины горизонтальной и вертикальной диаграмм  $M_{11}$  и  $M_{22}$  от угла места. Как видно из этих рисунков, при изменении угла места  $\theta_0$  от  $10^\circ$  до  $60^\circ$  полуширина вертикальной диаграммы направленности уменьшается более, чем в четыре раза. Полуширина горизонтальной диаграммы с углом

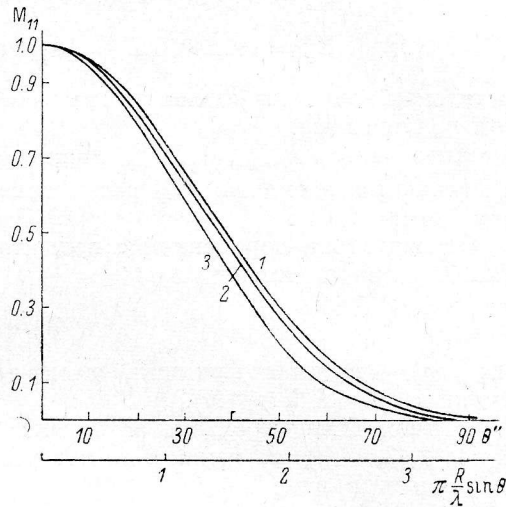


Рис. 4. Горизонтальные ( $\psi=90^\circ$ ) диаграммы направленности по мощности для неполяризованного источника для БПР при различных углах места.

1 — при  $\theta_0=10^\circ$ ; 2 — при  $\theta_0=30^\circ$ ; 3 — при  $\theta_0=60^\circ$ .

\*. Полученные результаты легко пересчитать на другие длины волн.

места меняется мало. Следует заметить, что сужение вертикальной диаграммы не приводит к увеличению усиления антенны [6], так как уменьшение ширины диаграммы компенсируется увеличением уровня бокового излучения.

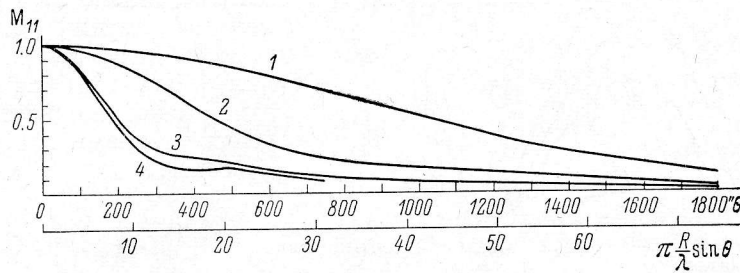


Рис. 5. Вертикальные ( $\psi=0^\circ$ ) диаграммы направленности по мощности для неполяризованного источника для БПР при различных углах места.

1 — при  $\theta_0=10^\circ$ ; 2 — при  $\theta_0=30^\circ$ ; 3 — при  $\theta_0=60^\circ$ ; 4 — при  $\theta_0=80^\circ$ .

На рис. 7 приведены значения элемента матрицы  $M_{41}$  в зависимости от углового расстояния  $\theta$  от электрической оси радиотелескопа для горизонтального сечения. На рис. 8 показано изменение максимальных

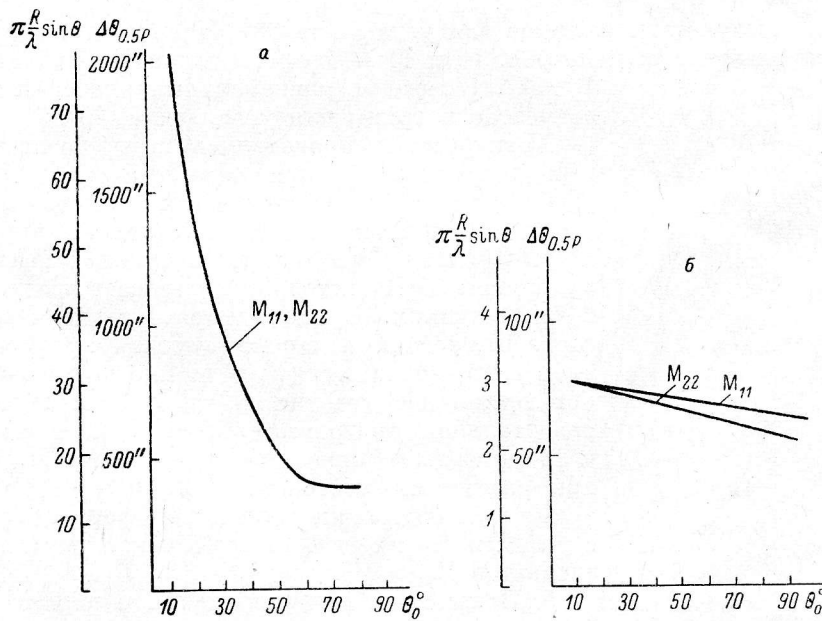


Рис. 6. Зависимость полуширины горизонтальной (а — для  $\psi=90^\circ$ ) и вертикальной (б — для  $\psi=0^\circ$ ) диаграммы  $M_{11}$  (неполяризованного источника) и  $M_{22}$  (линейно поляризованного источника) от угла места.

значений элемента  $M_{41}$  с углом места. Как видно из формулы (2), элемент  $M_{41}$  является диаграммой паразитной круговой поляризации для неполяризованного источника. Из рис. 7 и 8 следует, что 1) величина паразитного кругового сигнала увеличивается с углом места и при  $\theta_0=60^\circ$  достигает 29% от интенсивности точечного неполяризованного источника в главном

направлении, 2) максимальная величина паразитного кругового сигнала достигается на таком угловом расстоянии от оси, при котором  $M_{11}$  имеет значение  $\sim 0.6$ .

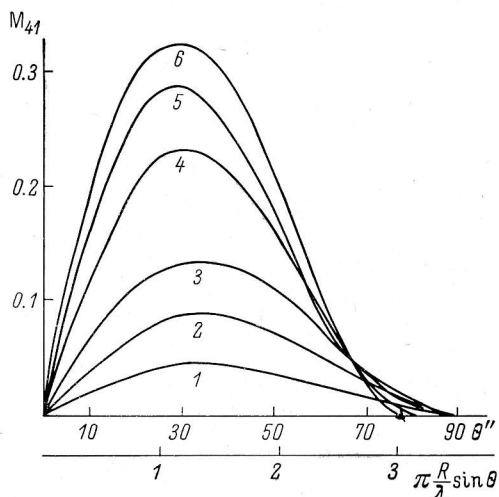


Рис. 7. Зависимость  $M_{41}$  от  $\theta$  для  $\psi=90^\circ$ .  
1 — при  $\theta_0=10^\circ$ ; 2 — при  $\theta_0=20^\circ$ ; 3 — при  $\theta_0=30^\circ$ ; 4 — при  $\theta_0=50^\circ$ ; 5 — при  $\theta_0=60^\circ$ ; 6 — при  $\theta_0=80^\circ$ .

При всех углах места для всех отличных от нуля элементов матрицы были построены изофоты (т. е. сечения диаграммы по уровню одинаковой мощности) и сечения диаграмм плоскостями  $\psi=\text{const}$ . В качестве примера

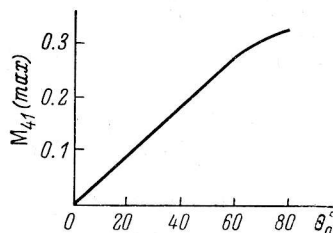
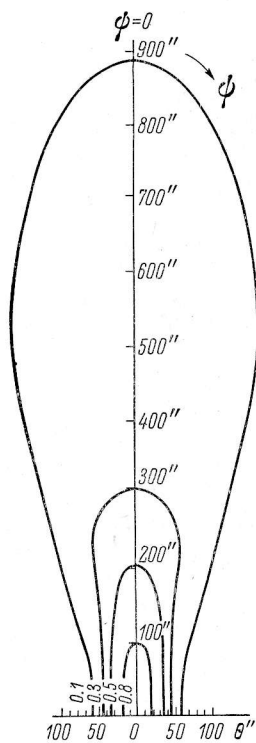


Рис. 8. Изменения максимальных значений  $M_{41}$  в зависимости от угла места для  $\psi=90^\circ$ .

приведем результаты расчетов для угла места  $60^\circ$ . На рис. 9 построены изофоты элемента  $M_{11}$ , на рис. 10 и 11 — изофоты элементов  $M_{41}$  и  $M_{32}$ . В табл. 1 сведены максимальные значения всех элементов матрицы для угла места  $60^\circ$ .



Хотя расчеты проводились при фиксированных значениях  $\psi$ , при обработке наблюдений удобнее пользоваться сечениями диаграммы направленности плоскостями, параллельными плоскости  $\psi=\pi/2$ . Дело в том, что при наблюдениях с помощью БПР источник пересекает диаграмму в этих сечениях. Будем называть такие сечения горизонтальными и характеризовать их расстоянием  $\Delta\theta$  по вертикали ( $\psi=0$ ) от плоскости  $\psi=\pi/2$ . Горизонтальное сечение  $\Delta\theta=0$  соответствует горизонтальной диаграмме антенны. На рис. 12 и 13 приведены горизонтальные сечения  $M_{11}$ ,  $M_{41}$  при различных значениях  $\Delta\theta$ .

Для иллюстрации изменения формы изофот с углом места на рис. 14 и 15 нанесены изофоты элементов  $M_{11}$  и  $M_{41}$  для  $\theta_0=10^\circ$ .

5. Попытки наблюдения радиационной круговой поляризации (параметра  $V$ ) радиоизлучения с помощью БПР были предприняты еще в конце 1958—начале 1959 г. Проводился эксперимент по определению процента круговой поляризации локальных источ-

Рис. 9. Изофоты элемента  $M_{11}$  для  $\theta_0=60^\circ$  на  $\lambda=4$  см.

ников на Солнце на волне 10 см. Эти наблюдения были первоначально неправильно интерпретированы [8]. В дальнейшем оказалось, что пара-



ТАБЛИЦА 1

Максимальные значения элементов матрицы Мюллера при  $\theta_0 = 60^\circ$ 

Параметры	Максимальные значения	Параметры	Максимальные значения
$M_{11}, M_{22}, M_{33}, M_{44}$	1.0	$M_{24}$	-0.00489
$M_{12}$	-0.00652	$M_{31}$	0.00234
$M_{13}$	0.00479	$M_{34}$	-0.00926
$M_{14}$	0.285	$M_{41}$	0.285
$M_{21}$	-0.0067	$M_{42}$	0.00280
$M_{23} = -M_{32}$	-0.166	$M_{43}$	0.00926

метр  $V_{\text{вых}}$  в основном является паразитным сигналом, связанным с кросс-поляризацией в АПП [9]. Наблюдения по ряду дискретных источников, в излучении которых (по данным других наблюдателей) отсутствует параметр  $V$ , показали, что процент паразитной круговой поляризации увеличивается с углом места и достигает десятков процентов на  $\theta_0 = 60-70^\circ$ .

В 1968 г. в [10, 11] был предложен способ устранения кросс-поляризации на антеннах переменного профиля с помощью сетки из искривленных проводов. Этот метод, позволяющий практически полностью устранить паразит-

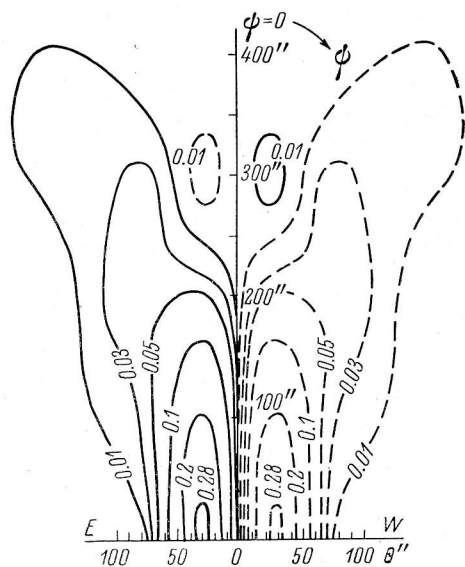


Рис. 10. Изофоты элемента  $M_{41}$  для  $\theta_0 = 60^\circ$  на  $\lambda = 4$  см.

Сплошная линия — правая поляризация, штриховая линия — левая поляризация. Максимальное значение  $M_{41}$  равно 0.285.

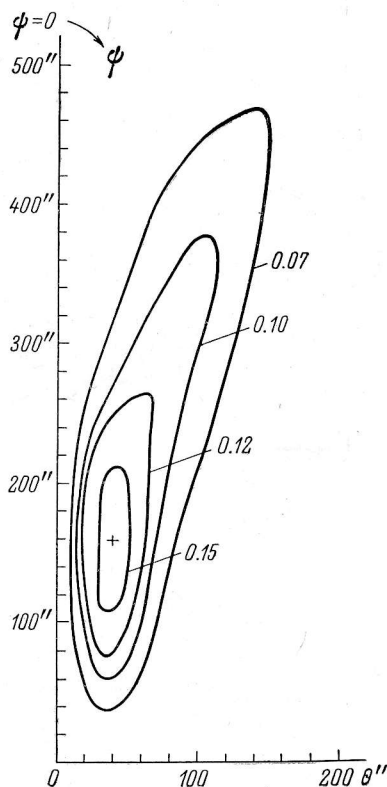


Рис. 11. Изофоты элемента  $M_{32}$  для  $\theta_0 = 60^\circ$  на  $\lambda = 4$  см.

ный круговой сигнал ( $M_{41} < 0.1\%$ ), был успешно применен на БПР при наблюдениях Солнца [12, 13]. На рис. 16 приведены кривые прохождения локальных источников на Солнце 18 июля 1968 г. (параметры  $I_{\text{вых}}$  и  $V_{\text{вых}}$ , причем последний записан как с компенсацией, так и без компенсации паразитной круговой поляризации). Однако при одновременных наблюдениях круговой поляризации на пяти и более волнах (спектральные

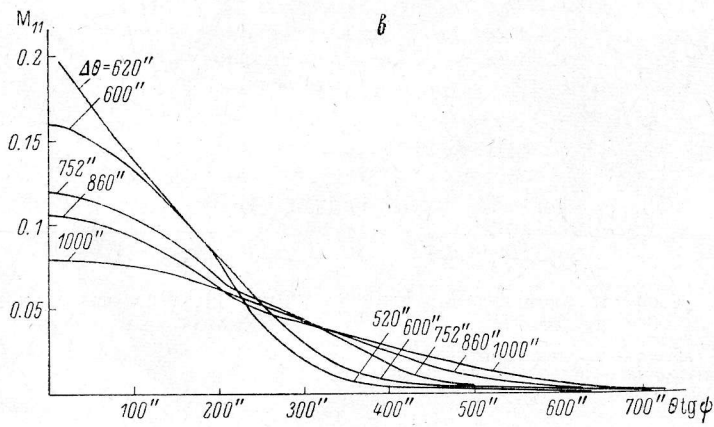
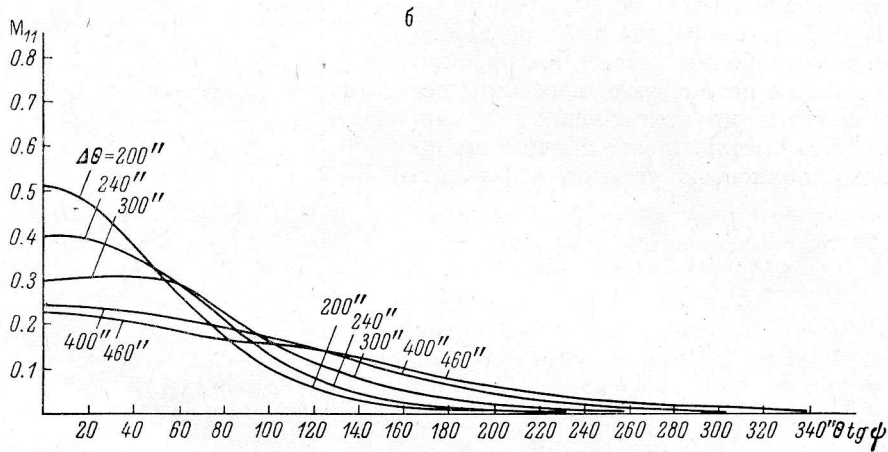
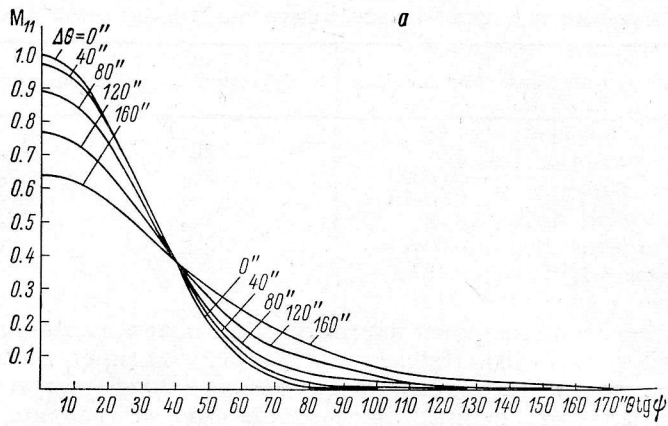


Рис. 12. Горизонтальные сечения диаграммы направленности по мощности для неполяризованного источника ( $M_{11}$ ) для  $\theta_0 = 60^\circ$  при различных значениях  $\Delta \theta$ .

наблюдения необходимы для исследования механизма радиоизлучения локальных источников) из-за трудности совмещения большого количества облучателей в фокусе пока еще не удается применить сеточный метод устранения кросс-поляризации. В этом случае для обработки результатов наблюдений кроме распределения радиояркости по источнику необхо-

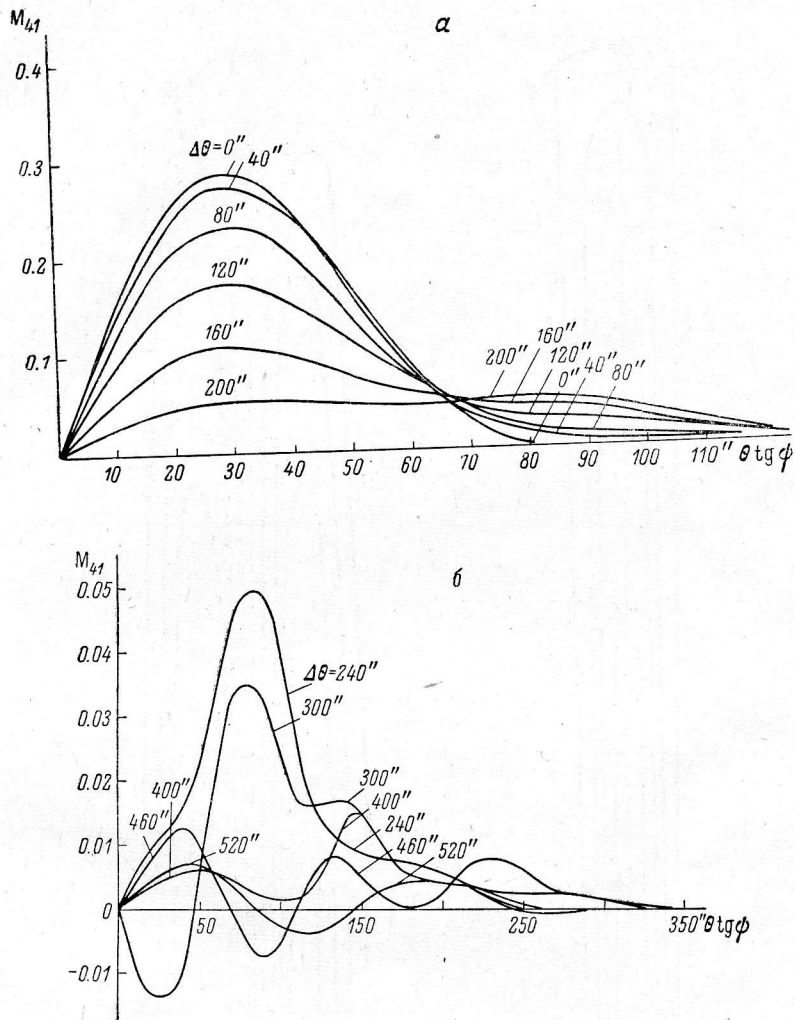


Рис. 13. Горизонтальные сечения диаграммы направленности паразитной круговой поляризации для неполяризованного источника ( $M_{41}$ ) для  $\theta_0 = 60^\circ$  при различных значениях  $\Delta\theta$ .

димо знание некоторых элементов матрицы  $M$ . В частности, при солнечных наблюдениях важно знать  $M_{11}$  и  $M_{41}$ , так как параметры  $Q$  и  $U$  в излучении локальных источников равны нулю (отсутствует линейная поляризация).

Величины  $M_{41}$  для различных углов места были проверены экспериментально.

Как известно, при наблюдениях источника радиоизлучения с произвольным распределением радиояркости антенная температура  $T_a$  без учета поляризационных эффектов является сверткой диаграммы направлен-

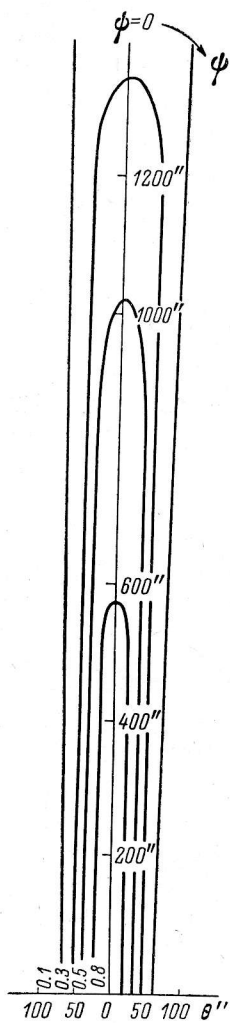


Рис. 14. Изофоты элемента  $M_{11}$  для  $\theta_0=10^\circ$  на  $\lambda=4$  см.

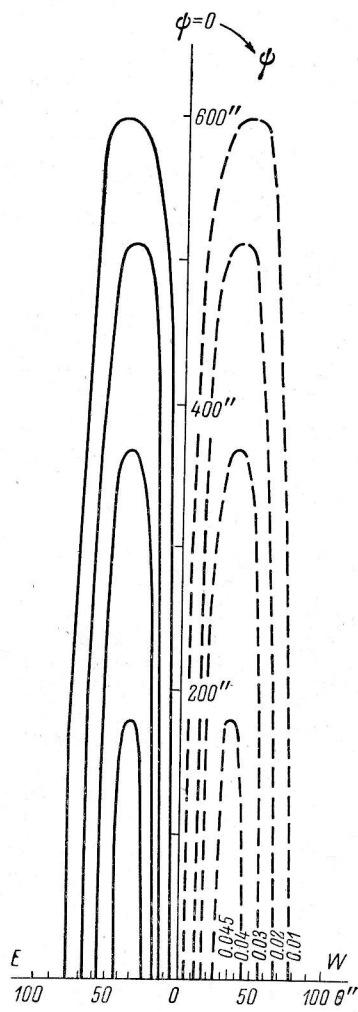


Рис. 15. Изофоты элемента  $M_{41}$  для  $\theta_0=10^\circ$  на  $\lambda=4$  см.

Сплошная линия — правая поляризация, штриховая линия — левая поляризация.

ности радиотелескопа по мощности  $A(\xi, \eta)$  с распределением радиояркости по источнику  $T_b(\xi, \eta)$ :

$$T_a(\xi, \eta) \propto \iint_{-\infty}^{\infty} T_b(\xi, \eta) A(\xi - \xi', \eta - \eta') d\xi' d\eta'.$$

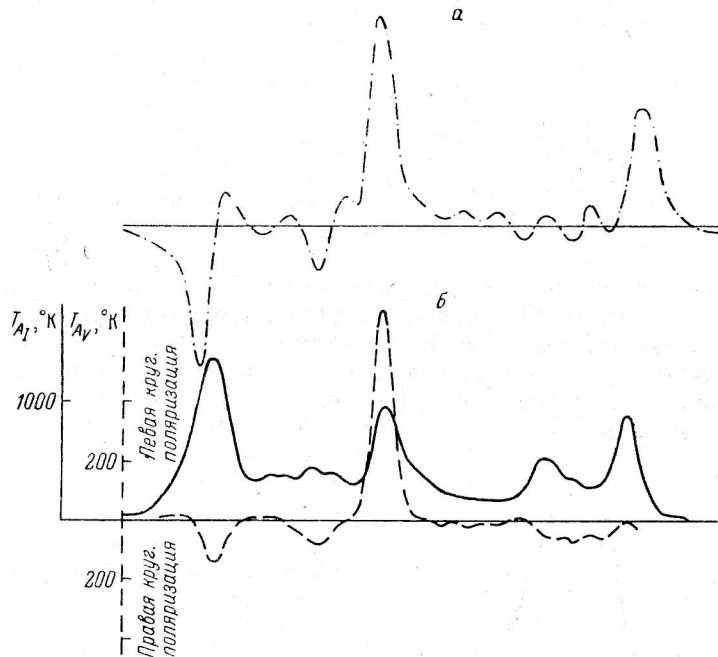


Рис. 16. Кривые прохождения локальных источников на Солнце 18 VII 1968 при  $h=51^{\circ}13'$ .

$a$  — параметр  $V$  при наблюдениях без сетки,  $b$  — параметры  $V$  (штриховая кривая) и  $I$  (сплошная кривая) при наблюдениях с сеткой.

В нашем случае, учитывая (1), аналогичные выражения можно написать для выходных параметров Стокса через свертку элементов матрицы Мюллера с входными параметрами Стокса [14]. Например:

$$\begin{aligned} V_{\text{вых}}(\xi, \eta) = & \iint I_0(\xi, \eta) M_{41}(\xi - \xi', \eta - \eta') d\xi' d\eta' + \\ & + \iint Q_0(\xi, \eta) M_{42}(\xi - \xi', \eta - \eta') d\xi' d\eta' + \\ & + \iint U_0(\xi, \eta) M_{43}(\xi - \xi', \eta - \eta') d\xi' d\eta' + \\ & + \iint V_0(\xi, \eta) M_{44}(\xi - \xi', \eta - \eta') d\xi' d\eta'. \end{aligned}$$

Для неполяризованного источника имеем

$$V_{\text{вых}}(\xi, \eta) = \iint I_0(\xi, \eta) M_{41}(\xi - \xi', \eta - \eta') d\xi' d\eta'.$$

Данные наблюдений  $M_{41}$  сведены в табл. 2. В 1-м столбце таблицы дан угол места, во 2-м — описание источника, в 3-м — длина волны наблюдений, в 4-м — максимальное расчетное значение элемента  $M_{41}$  и в 5-м — максимальное значение  $M_{41}$ , полученное из наблюдений. Как видно из

ТАБЛИЦА 2

$\theta_0$	Источник	Длина волны, $\lambda$ , см	Отношение максимальных значений $M_{41}$ и $M_{11}$ , %	
			расчет	наблюдения
7°	Локальные источники на Солнце	10	2.5	2.9
	Постоянная составляющая радиоизлучения Солнца	10	2.5	2.7
14°	Омега; 4' по уровню половинной мощности	9.6	6.0	15.0
52°	Телец-А; 3/5 по уровню половинной мощности, 6/8 по нулевому уровню	3.95	24.5	18.9—29.0
71°	Лебедь-А; двойной, расстояние между компонентами 109'', размер компонент 15''	9.6	24.5	26.4—34.5
		9.6	31.0	28.2—38.8

этой таблицы, расчетные величины достаточно хорошо согласуются с наблюдательными данными. На рис. 17 приведена кривая прохождения  $V_{\text{вых}}$  Крабовидной туманности на волне 3.95 см (для Крабовидной туманности  $V_0$  меньше сотых долей процента  $I_0$ ). Там же показана расчетная кривая прохождения. Для расчета последней одномерное распределение радиояркости, полученное из наблюдений на волне 3.02 см (после учета постоянной времени и диаграммы направленности), было сглажено функцией  $M_{41}(\theta)$  для угла места 52°.

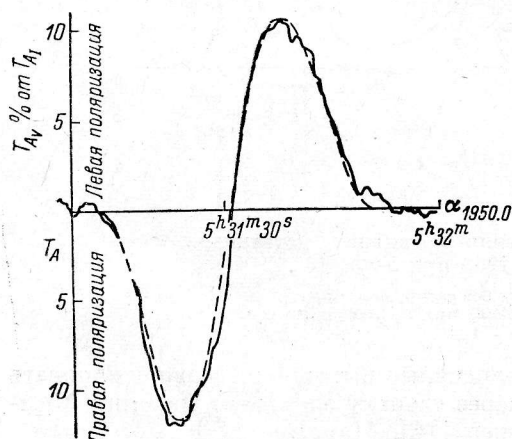


Рис. 17. Кривая прохождения Крабовидной туманности при  $\theta_0=52^\circ$ .

Сплошная линия — экспериментальная кривая, штриховая линия — расчетная кривая.

поляризации в параболах разработан ряд методов [17, 18]. Что касается БПР, то величина  $M_{31}$  и  $M_{21}$ , определенная уже по первым поляризационным наблюдениям, меньше 1% (предел этот ограничивался чувствительностью приемной аппаратуры), что подтверждается результатами расчета.

Величина линейной паразитной поляризации определялась, кроме того, по двум источникам: Орион-А ( $\lambda=6$  см) и Дева-А ( $\lambda=4$  см), у которых параметры  $Q_0$  и  $U_0 \leq 1\%$ . Верхний предел этой величины составляет 1%. Наблюдения линейной паразитной поляризации по локальным источникам на Солнце с использованием вращающегося прямоугольного рупора на  $\lambda=8.7$  см показали, что величина паразитной линейной поляризации составляет около 0.2% от интенсивности и сигнал имеет разные знаки к  $E$  и  $W$  от оси диаграммы.

При наблюдениях линейной поляризации источников на больших углах места экспериментально подтверждается также и тот факт, что полуширина кривых  $M_{22}(\theta)$  и  $M_{33}(\theta)$  несколько уже, чем  $M_{11}(\theta)$ . Так, например,  $Q_{\text{вых}}$  одной из точечных деталей радиисточника Лебедь-А на волне 3.02 см ( $\theta_0 \approx 71^\circ$ ) после учета постоянной времени имеет полуширину 0.7—0.75. Согласно приведенным выше расчетным значениям для точечного источника, полуширина кривой  $Q_{\text{вых}}$  равна 0.765, а  $I_{\text{вых}}$  равна 0.84.

6. Из всего сказанного можно сделать следующие выводы:

1) Экспериментальные данные хорошо совпадают с вычислениями.  
2) Как показали расчеты и наблюдения, в АПП практически отсутствует линейная паразитная поляризация. В этом отношении эти антенны имеют большое преимущество перед параболоидами вращения. При наблюдениях линейной поляризации источников с помощью АПП приходится учитывать только небольшой разворот вектора поляризации, в то время как на других инструментах для устранения паразитного линейного сигнала необходимо применение сложных облучателей.

3) Антенны переменного профиля имеют паразитную круговую поляризацию. Однако предложенный способ [10, 11] устранения паразитного сигнала позволяет уменьшить величину  $M_{11}$  более чем в 15 раз.

В заключение авторы выражают благодарность Н. Ф. Корнеевой, Г. Н. Соломатиной и Н. Е. Гольневой за помощь в графическом построении расчетного материала.

#### Литература

1. Э. О'Нейл. Статистическая оптика. Изд-во «Мир», М., 1966.
2. Г. Б. Гельфрейх, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 172, 203, 1964.
3. Н. А. Есепкина, Изв. вузов. Радиофизика, 14, № 5, 673, 1971.
4. Н. А. Есепкина, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 4, 157, 1972.
5. Э. Г. Мирзабекян, Сообщ. Бюраканск. obs., 23, 3, 1957.
6. Н. А. Есепкина и др., Радиотехника и электроника, № 12, 1947, 1961.
7. С. Э. Хайкини др., Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 164, 3, 1960.
8. Д. В. Корольков, Н. С. Соболева, Г. Б. Гельфрейх, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 164, 81, 1960.
9. Г. В. Кузнецова, Н. С. Соболева, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 172, 122, 1964.
10. Н. А. Есепкина и др., Радиотехника и электроника, 14, № 10, 1870, 1969.
11. Н. А. Есепкина и др., Изв. вузов. Радиофизика, 14, № 8, 1149, 1971.
12. Н. А. Есепкина, Н. С. Соболева, Г. М. Тимофеева, Солн. данные, № 8, 86, 1968.
13. Н. Г. Петерова, А. В. Темирова, Солн. данные, № 7, 103, 1970.
14. Г. В. Кузнецова, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 182, 245, 1967.
15. Н. С. Соболева, В. А. Прозоров, Ю. Н. Парийский, Астрон. ж., 39, вып. 1, 3, 1962.
16. Н. С. Соболева, Астрон. ж., 39, вып. 6, 1124, 1962.
17. Н. С. Minnet, Trans. IEEE, AP-14, No. 5, 654, 1966.
18. Н. А. Есепкина, Д. В. Корольков, Научно-технич. информ. бюлл. ЛПИ им. М. И. Калинина, № 10, 19, 1957.

Декабрь 1971 г.