

УДК 523.164

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНН РАДИОТЕЛЕСКОПОВ

Н. А. Есепкина

Исследуются поляризационные характеристики антенн радиотелескопов при приеме частично поляризованного излучения с учетом паразитной поляризации, возникающей в самой антенной системе. Поляризационные характеристики антенны представляются в виде (4×4) -матрицы, связывающей параметры Стокса излучения на входе и выходе антенны.

При проведении поляризационных наблюдений необходимо иметь в виду, что антенное устройство, являясь входным устройством всякого радиотелескопа, влияет на результаты поляризационных измерений. Антенна изменяет состояние поляризации принимаемого излучения, причем это изменение зависит от поляризационных характеристик антенны. В радиоастрономии имеют дело с частично поляризованным излучением: исследуемый поляризованный сигнал наблюдают на фоне сильного неполяризованного излучения. Неполяризованный фон частично поляризуется в антенной системе, при этом величина сигнала паразитной поляризации, возникающей в антенне, может превосходить величину исследуемого поляризованного сигнала.

Изучению поляризационных свойств антенны посвящен ряд работ [1-9]. В этих работах определение поляризационных свойств различных антенн проводится разными методами и сводится, в основном, к определению составляющей кросс-поляризации в диаграмме направленности антенны для полностью поляризованного излучения.

В настоящей работе сделана попытка рассмотрения поляризационных свойств различных радиотелескопов с учетом паразитной поляризации, возникающей в антенне, с единой точки зрения, при этом поляризационная характеристика антенны представляется в виде матрицы, связывающей параметры Стокса [10, 14] излучения на входе и выходе антенны. Такой подход был впервые использован Мюллером [14-16] при исследовании поляризационных оптических устройств и успешно применяется в оптике. При использовании метода Мюллера параметры выходного излучения определяются следующим образом: прибор (в нашем случае антенна) представляется действительной (4×4) -матрицей (матрицей Мюллера), которая действует на четыре параметра Стокса входного излучения, представленные в виде четырехэлементного столбца-вектора Стокса, и дает вектор Стокса выходного излучения. Такой способ представления поляризационных характеристик радиотелескопа пригоден для изучения полностью поляризованного, частично поляризованного и неполяризованного излучения.

Для описания состояния поляризации излучения вместо параметров Стокса можно использовать и «когерентные матрицы» [12-14].

В этом случае поляризационные характеристики антенны можно определить методом «когерентных матриц»*.

1. МАТРИЦА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТОКСА (МАТРИЦА МЮЛЛЕРА) ДЛЯ АНТЕННЫ

За счет наличия в диаграмме направленности (составляющей кросс-поляризации) состояние поляризации выходного излучения антенны (поля в дальней зоне) отличается от состояния поляризации входного излучения (поля на выходе волноводно-фидерного тракта облучателя или поля в фокальной плоскости)**.

Антенну можно рассматривать как прибор, изменяющий поляризацию излучения, — поляризатор. По аналогии с оптикой связь между параметрами Стокса излучения на входе и выходе антенны (см. рис. 1) представим в виде [14]

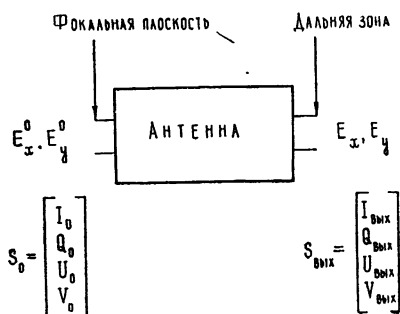


Рис. 1. E_x^0, E_y^0, S_0 — параметры входного излучения; $E_x, E_y, S_{\text{вых}}$ — параметры выходного излучения.

$$S_{\text{вых}} = MS_0 \quad (1)$$

или в развернутой форме

$$\begin{bmatrix} I_{\text{вых}} \\ Q_{\text{вых}} \\ U_{\text{вых}} \\ V_{\text{вых}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{bmatrix},$$

где S_0 и $S_{\text{вых}}$ — вектор-параметр Стокса входного и выходного излучения; M — приборный оператор, или матрица Мюллера; 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; I определяет интенсивность излучения, а Q, U, V — полностью поляризованную составляющую, т. е. коэффициент эллиптичности (α) и угол ориентации эллипса поляризации, равные [13]

$$\alpha = \frac{1}{2} \arcsin \frac{V}{I_0} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{V}{\sqrt{V^2 + Q^2 + U^2}},$$

$$\beta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{V}{Q}$$

($I_0 = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}$ — интенсивность полностью поляризованной составляющей).

Поле излучения антенны может быть записано в различных поляризационных базисах, поэтому матрица M в общем случае учитывает

* Параметры Стокса и «когерентные матрицы» были использованы в работах Ко [17] для определения характеристик радиотелескопа при приеме частично поляризованного излучения. Однако в этих работах не учитывалась паразитная поляризация, возникающая в самой антенне.

** Если рассматривать антенну как приемную, то входным излучением будет плоская волна, приходящая от внешнего источника, а выходным — поле в фокальной плоскости антенны.

не только искажение поляризации поля антенной, но и изменение составляющих, связанное с преобразованием базиса. 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 всей интересующей нас области диаграммы направленности, расположенной вблизи оси зеркала (главный лепесток и ближайшие боковые лепестки)*. При таком выборе координат матрица M определяет только изменение поляризации, связанное с паразитной поляризацией в антенне.

Перейдем к определению элементов матрицы M , считая, что антенна работает в режиме передачи. Положим, что входное поле имеет вид

$$E_{\text{вх}} = E_x^0 + E_y^0 = xE_x^0 + yE_y^0,$$

где x и y — орты осей x и y , E_x^0 и E_y^0 — комплексные амплитуды, не зависящие от времени для полностью поляризованного излучения и слабо зависящие от времени для неполяризованного и частично поляризованного излучения; E_x^0 и E_y^0 определяют величину ортогональных составляющих входного поля.

Суммарное выходное поле антенны (поле в дальней зоне) можно представить в виде

$$\begin{aligned} E_{\text{вых}} = E &= (xa_x + ya_{xy})E_x^0 + (ya_y + xa_{yx})E_y^0 = \\ &= x(a_xE_x^0 + a_{yx}E_y^0) + y(a_yE_y^0 + a_{xy}E_x^0) = xE_x + yE_y, \end{aligned} \quad (2)$$

откуда следует, что ортогональные составляющие E_x , E_y выходного излучения связаны с ортогональными составляющими E_x^0 , E_y^0 входного излучения следующей зависимостью:

$$\begin{aligned} E_x &= a_xE_x^0 + a_{yx}E_y^0 = (f_xE_x^0 + f_{yx}E_y^0)a_0, \\ E_y &= a_yE_y^0 + a_{xy}E_x^0 = (f_yE_y^0 + f_{xy}E_x^0)a_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Все коэффициенты a_{mn} и f_{mn} являются функциями углов, определяющих направление наблюдения; a_x , a_y соответствуют коэффициентам передачи для каждой составляющей, а a_{xy} и a_{yx} определяют перекрестную связь между ортогональными составляющими или кросс-поляризацию, $a_0 = a_x(0, 0) = a_y(0, 0)$ — коэффициент передачи в главном направлении; величина a_0^2 пропорциональна коэффициенту усиления антенны

в главном направлении; $f_x = \frac{a_x}{a_0}$, $f_y = \frac{a_y}{a_0}$, $f_{xy} = \frac{a_{xy}}{a_0}$, $f_{yx} = \frac{a_{yx}}{a_0}$ — диа-

граммы направленности для основной поляризации и кросс-поляризации соответственно для ортогональных составляющих входного поля, причем $|f_x(0, 0)| = |f_y(0, 0)| = 1$, а $f_{xy}(0, 0) = f_{yx}(0, 0) = 0$.

Учитывая, что антенна осуществляет линейное преобразование вектора электрического поля (3), и используя соотношения, определяющие связь между параметрами Стокса и ортогональными составляющими электрического поля [3, 14]**:

* Такая система координат и такое приближение используются, например, в работе [4] при исследовании поляризации излучения осесимметричных зеркальных антенн.

** Черта обозначает операцию усреднения по времени, т. е.

$$\overline{E_x E_x^*} = \frac{1}{T} \int_0^T E_x E_x^* dt.$$

$$\begin{aligned}
 I_{\text{вых}} &= \overline{E_x E_x^*} + \overline{E_y E_y^*}, & U_{\text{вых}} &= \overline{E_x E_y^*} + \overline{E_y E_x^*}, \\
 Q_{\text{вых}} &= \overline{E_x E_x^*} - \overline{E_y E_y^*}, & V_{\text{вых}} &= -j \overline{E_x E_y^*} + j \overline{E_y E_x^*}, \\
 \overline{E_x^0 E_x^{0*}} &= \frac{I_0 + Q_0}{2}, & \overline{E_x^0 E_y^{0*}} &= \frac{U_0 + jV_0}{2}, \\
 \overline{E_y^0 E_y^{0*}} &= \frac{I_0 - Q_0}{2}, & \overline{E_x^0 E_y^{0*}} &= \frac{U_0 - jV_0}{2},
 \end{aligned} \tag{4}$$

из формулы (1) легко найти выражение для элементов матрицы Мюллера.

В общем случае, когда все диаграммы направленности f_x, f_y, f_{xy} и f_{yx} являются комплексными величинами, эти выражения весьма громоздки, поэтому мы их здесь приводить не будем*. Для антенн, имеющих фазовый центр, выражения для элементов матрицы Мюллера упрощаются. Для таких антенн, учитывая, что f_x и f_y вещественные, и представляя f_{xy} и f_{yx} в виде

$$f_{xy} = \Phi_{xy} + j\psi_{xy}, \quad f_{yx} = \Phi_{yx} + j\psi_{yx}, \tag{5}$$

где Φ_{xy}, Φ_{yx} и ψ_{xy}, ψ_{yx} — вещественные и мнимые части диаграммы направленности для составляющих кросс-поляризации, из формул (1), (4), (5) получим следующие соотношения, определяющие связь между параметрами Стокса на входе и выходе антенны:

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{a_0^2} I_{\text{вых}} &= \frac{f_x^2 + f_y^2 + |f_{xy}|^2 + |f_{yx}|^2}{2} I_0 + \frac{f_x^2 - f_y^2 + |f_{xy}|^2 - |f_{yx}|^2}{2} Q_0 + \\
 &\quad + (f_x \Phi_{yx} + f_y \Phi_{xy}) U_0 + (f_x \psi_{yx} - f_y \psi_{xy}) V_0, \\
 \frac{1}{a_0^2} Q_{\text{вых}} &= \frac{f_x^2 - f_y^2 + |f_{yx}|^2 - |f_{xy}|^2}{2} I_0 + \frac{f_x^2 + f_y^2 - |f_{xy}|^2 - |f_{yx}|^2}{2} Q_0 + \\
 &\quad + (f_x \Phi_{yx} - f_y \Phi_{xy}) U_0 + (f_x \psi_{yx} + f_y \psi_{xy}) V_0, \\
 \frac{1}{a_0^2} U_{\text{вых}} &= (f_x \Phi_{xy} + f_y \Phi_{yx}) I_0 + (f_x \Phi_{xy} - f_y \Phi_{yx}) Q_0 + \\
 &\quad + (\Phi_{xy} \Phi_{yx} + \psi_{xy} \psi_{yx} + f_x f_y) U_0 + (\Phi_{xy} \psi_{yx} - \Phi_{yx} \psi_{xy}) V_0, \\
 \frac{1}{a_0^2} V_{\text{вых}} &= (f_y \psi_{yx} - f_x \psi_{xy}) I_0 - (f_x \psi_{xy} + f_y \psi_{yx}) Q_0 + (\Phi_{xy} \psi_{yx} - \\
 &\quad - \Phi_{yx} \psi_{xy}) U_0 + (f_x f_y - \Phi_{xy} \Phi_{yx} - \psi_{xy} \psi_{yx}) V_0.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Величина элементов матрицы M зависит от направления наблюдения. В главном направлении на оси антенны, где $f_x = f_y = 1$, $\Phi_{xy} = \Phi_{yx} = 0$, $\psi_{xy} = \psi_{yx} = 0$, $f_{xy} = f_{yx} = 0$, имеем (см. (1) и (6))

$$M_0 = a_0^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{7}$$

* Выражения для элементов матрицы преобразования параметров Стокса, соответствующего линейному преобразованию вектора электрического поля, известны в оптике [16].

т. е. в этом случае матрица Мюллера превращается в единичную матрицу и антенна не изменяет поляризацию излучения. Во всех других направлениях, где $f_x \neq f_y$, а f_{xy} и f_{yx} отличны от нуля, матрица не единичная, и поэтому антенна изменяет соотношение поляризации.

Из выражения для элементов матрицы M непосредственно следует, какой характер имеет паразитная поляризация, возникающая в антенне, чем определяется ее величина, в каких направлениях имеется паразитная поляризация и т. д.

Поляризация выходного излучения зависит от поляризации входного излучения (I_0, Q_0, U_0, V_0) и параметров антенны. Если входное излучение неполяризовано ($I_0=I, Q_0=U_0=V_0=0$), то из (6) получим

$$\begin{aligned} I_{\text{вых}} &= \frac{1}{2} I [f_x^2 + f_y^2 + |f_{xy}|^2 + |f_{yx}|^2] a_0^2, \\ Q_{\text{вых}} &= \frac{1}{2} I [f_x^2 - f_y^2 + |f_{yx}|^2 - |f_{xy}|^2] a_0^2, \\ U_{\text{вых}} &= \frac{1}{2} I [f_x \Phi_{xy} + f_y \Phi_{yx}] a_0^2, \\ V_{\text{вых}} &= \frac{1}{2} I (f_y \psi_{yx} - f_x \psi_{xy}) a_0^2, \end{aligned} \quad (8)$$

откуда видно, что при неполяризованном входном излучении выходное излучение поляризовано. Степень паразитной поляризации равна

$$P = \frac{\sqrt{Q_{\text{вых}}^2 + U_{\text{вых}}^2 + V_{\text{вых}}^2}}{I_{\text{вых}}}. \quad (9)$$

Из выражений (6) и (8) следует, что паразитная эллиптическая или круговая поляризация ($V_{\text{вых}} \neq 0$ при $V_0 = 0$) возникает в антенне только тогда, когда мнимые части кросс-поляризационных диаграмм отличны от нуля ($\psi_{xy} \neq 0$ и $\psi_{yx} \neq 0$). Рассмотрение показывает, что такое условие выполняется в несимметричных антеннах типа антенны переменного профиля [6, 8] и рупорно-параболической антенны [7], причем для этих антенн $\psi_{xy} = -\psi_{yx}$. Видно, что величина паразитной круговой поляризации при неполяризованном входном излучении, например, пропорциональна удвоенной амплитуде кросс-поляризационных лепестков ψ_{xy} ($|\psi_{xy}| = |\psi_{yx}|$). Поэтому степень паразитной поляризации велика даже при сравнительно небольших кросс-поляризационных лепестках. Это подтверждает и эксперимент [6].

Для антенн, у которых $\psi_{xy} = \psi_{yx} = 0$, паразитная поляризация линейная, а матрица M имеет вид

$$M_{\psi=0} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & 0 \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & 0 \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{44} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Можно показать, что такой случай соответствует осесимметричным антеннам типа параболоида вращения. Для таких антенн величины матричных элементов $M_{12}, M_{13}, M_{21}, M_{23}, M_{31}, M_{33}$ пропорциональны разности диаграмм направленности антенны в E - и H -плоскостях или величине кросс-поляризационных лепестков [3-5]. Паразитную поляризацию в таких антеннах можно устранить, выровняв диаграммы на-

правленности антенны в E - и H -плоскостях [2, 3, 5, 18], при этом перечисленные выше матричные коэффициенты становятся равными нулю и матрица M превращается в единичную матрицу.

Для идеальной антенны, у которой отсутствуют кросс-поляризационные лепестки ($\psi_{xy} = \psi_{yx} = \psi_{xz} = \psi_{zx} = 0$) и диаграммы направленности для ортогональных составляющих одинаковые ($f_x = f_y = f$), имеем

$$M^0 = a_0^2 f^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

и $I_{\text{вых}} = a_0^2 f^2 I_0$, $Q_{\text{вых}} = a_0^2 f^2 Q_0$, $U_{\text{вых}} = a_0^2 f^2 U_0$, $V_{\text{вых}} = a_0^2 f^2 V_0$, т. е. для такой антенны для всех направлений наблюдения матрица M единичная и антенна ни в каких направлениях не искажает поляризацию излучения.

Если известна матрица M , то, измерив параметры Стокса на выходе антенны ($S_{\text{вых}}$), можно определить параметры Стокса входного излучения (S_0), воспользовавшись соотношением, которое следует из (1):

$$S_0 = M^{-1} S_{\text{вых}},$$

где M^{-1} — обратная матрица.

Аналогичные результаты можно получить и с помощью метода когерентных матриц. Однако в радиоастрономии при поляризационных исследованиях обычно измеряют параметры Стокса принимаемого излучения, поэтому антенну радиотелескопа удобно характеризовать матрицей Мюллера. Кроме того, метод Мюллера, на наш взгляд, физически более наглядный, чем метод когерентных матриц.

В заключение отметим, что так как согласно принципу взаимности [10] диаграмма направленности приемной антенны совпадает с диаграммой направленности антенны при использовании ее в режиме передачи, то связь между параметрами Стокса на входе и выходе антенны при работе на прием также определяется матрицей M (см. (6)).

Автор выражает благодарность Ю. Н. Парийскому за полезные обсуждения и интерес к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Г. Мирзабекян, Сообщение Бюраканской обсерватории, 23, 3 (1957)
2. E. M. T. Jones, Trans. IRE, AP-2, № 3, 119 (1954).
3. Н. А. Есепкина, Д. В. Корольков, Научно-технический бюллетень ЛПИ, Радиофизика, 10 (1957).
4. Б. Е. Кринбер, Радиотехника и электроника, 5, № 2, 212 (1960).
5. Д. В. Корольков, Н. С. Соболев, Г. Б. Гельфрейх, Изв. ГАО АН СССР, 21, № 164, 5 (1960).
6. Г. В. Кузнецова, Н. С. Соболева, Изв. ГАО АН СССР, 23, № 1, 3 (1964)
7. J. N. Hines, R. N. Tuggin, BSTJ, 42, № 4, 1187 (1963).
8. Н. А. Есепкина, С. Э. Хайкин и др., Радиотехника и электроника, 6, 3, 172 (1961).
9. Ю. П. Дьяков, И. Ф. Шишкин, Радиотехника, 23, № 3, 98 (1968).
10. G. G. Stokes, Trans. Camb., Phil. Soc., 9, 339, 1852.
11. С. Чандрасекар, Перенос лучистой энергии, ИЛ, М., 1953
12. M. Born, E. Wolf, Principles of Optics, 1964.
13. Д. Б. Канарейкин, Н. Ф. Павлов, В. А. Потехин, Поляризация радиолокационных сигналов, изд. Сов радио, М., 1966
14. Э. О'Нейл, Статистическая оптика, изд. Мир, М., 1966.
15. H. Muller, JOSA, 38, 666 (A) (1948).
16. Г. В. Розенберг, УФН, 56, 77 (1955).

17. H. C. Co, IRE Trans., AP-9, № 11, 294 (1961); IEEE Trans., MIL-8, № 3-4, 225 (1964); Proc. IRE, 50, 9 (1962).
18. H. C. Minnet, Trans. IEEE, AP-14, 5, 654 (1966).
19. А. А. Пистолькорс, Антенны, изд. Связь, М., 1948

Ленинградский политехнический институт

Поступила в редакцию
21 апреля 1970 г.

POLARIZATION CHARACTERISTICS OF RADIO-TELESCOPE ANTENNAS

N. A. Esepkina

The author investigates the polarization characteristics of radio-telescopes antennas in receiving the partially polarized radiation taking into account the spurious polarization occurring in the antenna system. The polarization characteristics of the antenna are represented as (4×4) matrix connecting the input and output Stokes parameters of the antenna.
