

К ВЫБОРУ ПОЛЯРИМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ С РАДИОТЕЛЕСКОПОМ РАТАН-600

В. И. Абрамов, Д. В. Корольков

Радиотелескоп РАТАН-600 обладает большой инструментальной круговой поляризацией. Вследствие неидеальности поляриметра круговая поляризация может трансформироваться в линейную, что приводит к ограничению точности измерения линейной поляризации. В статье рассмотрены три схемы поляриметров (поляриметр сравнения, корреляционный и с вращающейся фазовой пластинкой) и определены требования к точности изготовления основных элементов поляризационного тракта с точки зрения уменьшения инструментальной линейной поляризации. Показано, что в схеме с вращающейся пластинкой конструктивные требования наименее жесткие.

The radiotelescope RATAN-600 has large instrumental circular polarization. Since the polarimeter is not ideal the circular polarization can transform into the linear one that restricts the accuracy of the linear polarization measurements. Three schemes of polarimeters are considered (a comparison polarimeter, a correlation one, and one with a rotating phase plate); the demands to the construction accuracy of the main elements of the polarization tract from the view point of the instrumental linear polarization decrease are defined. It is shown that the constructive demands are the least strict in the scheme with the rotating plate.

Как известно, точность поляризационных измерений существенно ограничивается наличием в радиотелескопе инструментальной поляризации, обусловленной переходом неполяризованного радиоизлучения в поляризованное. Величина инструментальной поляризации определяется поляризационными характеристиками как антенны, так и поляриметра. Поэтому требования к поляриметру зависят от используемой антенны и становятся более высокими для антенн, обладающих сложными поляризационными характеристиками. Это относится, в частности, к радиотелескопу РАТАН-600, который является антенной переменного профиля (АПП). Особенность АПП состоит прежде всего в довольно большой величине инструментальной круговой поляризации, которая для РАТАН-600 на высоких углах места достигает 40 % от интенсивности [1, 2]. Вследствие этого в радиотелескопе РАТАН-600 возможен дополнительный механизм возникновения инструментальной линейной поляризации, связанный с трансформацией в поляриметре круговой поляризации в линейную [3]. Эффективность такого механизма зависит от характеристик поляриметра и при описании их матрицей Мюллера* [4, 5] определяется величиной элементов M_{24} , M_{34} для поляриметра (далее все элементы M_{ij} относятся к поляриметру). Поэтому при выборе поляриметра для измерения линейной поляризации слабополяризованного излучения с радиотелескопом РАТАН-600 (а также с некоторыми другими типами несимметричных антенн [6]) определенный интерес представляет сравнение различных типов поляриметров не только с точки зрения величины инструментальной линейной поляризации M_{21} , M_{31} , но и возможности достижения достаточно малых величин M_{24} , M_{34} . Например, для обеспечения на РАТАН-600 инструментальной линейной поляризации менее 0.1 % требуется, чтобы M_{24} , $M_{34} < 0.25\%$. Отсюда, в частности, следует, что эллиптичность $e = d_{\max} - d_{\min}$ волноводов поляризационного тракта поляриметров должна

* В приближении, когда радиотелескоп можно представить в виде последовательного соединения независимых поляризационных систем — антенны и поляриметра, т. е. когда $M^{PT} = M^a M^n$ [7].

удовлетворять условию $\varepsilon/d < 4 \cdot 10^{-4} \lambda/L$ (d — диаметр волновода, λ — длина волны в вакууме, L — длина волновода).

Заметим, что при использовании осесимметричной антенны требования к элементам M_{24} , M_{34} матрицы Мюллера на 1—2 порядка ниже.

Другая особенность РАТАН-600, осложняющая проведение измерений линейной поляризации, заключается в отсутствии возможности достаточно длительного сопровождения источника. Поэтому для достижения более высокой точности измерений необходимо, чтобы поляриметр обеспечивал параллельное измерение параметров I , Q , U за довольно короткое время (~ 1 с).

В радиоастрономических поляризационных измерениях обычно используются три типа квазиуловых поляриметров: поляриметр сравнения интенсивностей ортогональных компонент, корреляционный поляриметр и поляриметр

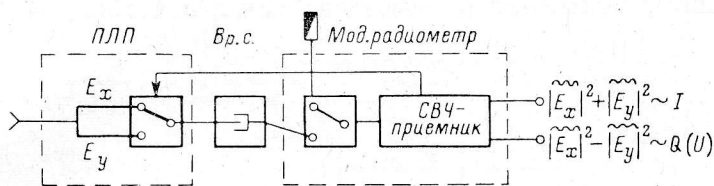


Рис. 1.

с гармонической модуляцией параметров Стокса излучения. Рассмотрим матрицы Мюллера этих поляриметров.

Блок-схема поляриметра сравнения изображена на рис. 1. Поляриметр представляет собой модуляционный радиометр с переключателем линейных поляризаций и вращающимся сочленением на входе. Такой поляриметр при неподвижном поляризационном СВЧ-тракте позволяет измерять параллельно два параметра Стокса I , Q или I , U в зависимости от позиционного угла χ_0 тракта. Выражения для матрицы Мюллера поляриметра сравнения имеют вид:

$$M\left(\chi_0 = \begin{cases} 0, \pi \\ \pi/2, 3/2\pi \end{cases}\right) = \begin{bmatrix} M_{11} \pm M_{12} \pm M_{13} & M_{14} \\ \pm M_{21} & M_{22} & M_{23} \pm M_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$M\left(\chi = \begin{cases} \pi/4, & 5/4\pi \\ -\pi/4, & 3/4\pi \end{cases}\right) = \begin{bmatrix} M_{11} \mp M_{13} \pm M_{12} & M_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \pm M_{21} & M_{23} & M_{22} \pm M_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Элементы матрицы (1) выражаются через характеристики переключателя поляризации:

$$M_{11} \approx M_{22} \approx 1; \quad M_{12} = \frac{1}{2}(x - 2\xi); \quad M_{13} = 2\chi; \quad M_{14} = -(r_1 + r_2);$$

$$M_{21} = \frac{1}{2}x; \quad M_{23} = 0; \quad M_{24} = (r_2 - r_1), \quad (2)$$

где x , ξ — разность потерь и кроссполяризаций каналов переключателя; r , χ — коэффициент эллиптичности и позиционный угол эллипсов поляризации излучения переключателя при его работе «на передачу». Поскольку обычно $r_1 \approx -r_2 = r$, то для обеспечения условия M_{24} , $M_{34} < 0.25\%$ необходимо, чтобы $|r| < 0.001$, т. е. требования к чистоте линейной поляризации очень высокие.

Блок-схема корреляционного поляриметра изображена на рис. 2. Поляриметр состоит из корреляционного (балансного) радиометра и разделителя ортогональных поляризаций. Такой поляриметр при неподвижном СВЧ-тракте измеряет все четыре параметра Стокса параллельно, причем два параметра измеряются корреляционным методом, а два других — компенсационным.

В случае разделителя круговых поляризаций (РКП) корреляционным методом измеряются параметры Q и U . Выражения для соответствующих элементов матрицы Мюллера балансного поляриметра с симметричным РКП, полученные методом Джонса, имеют вид:

$$M_{22} \approx M_{33} \approx 1; \quad \begin{cases} M_{21} \approx \alpha_{21} + (1 - |r| \cos 2\chi); \\ M_{31} \approx \alpha_{31}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} M_{24} \approx \alpha_{24}; \\ M_{34} \approx \alpha_{34} + (1 - |r| \sin 2\chi); \end{cases} \quad \begin{cases} M_{23} = 0; \\ M_{32} = \delta. \end{cases} \quad (3)$$

где r, χ — коэффициент эллиптичности и позиционный угол эллипсов поляризации излучения разделителя поляризаций при работе «на передачу»; α_{ij} — малые величины, учитывающие разбаланс каналов балансного радиометра;

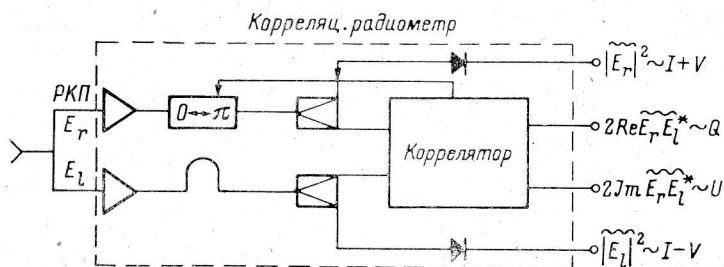


Рис 2.

δ — разность фаз, характеризующая отклонение от квадратурности между «синусным» и «косинусным» каналами радиометра.

Применение фазовой модуляции позволяет уменьшить α_{ij} до пренебрежимо малых величин. Однако для подавления элементов M_{21} и M_{34} требуется еще очень высокая чистота круговых поляризаций РКП ($|r| > 0.9975$). При использовании РКП, содержащего четвертьволновую пластинку, для этого не только необходимы хорошие развязка и согласование выходов РКП (< -33 дБ), но и предъявляются очень высокие требования к фазовой погрешности пластинки ($|\Delta\alpha| < 0^\circ 15$) и точности установки ее ориентации ($|\Delta\alpha| < 0^\circ 075$). Причем два последних требования необходимы для обеспечения условия $M_{34}, M_{24} < 0.25\%$.

В случае разделителя линейных поляризаций корреляционным методом измеряются параметры Q (или U — в зависимости от позиционного угла тракта) и V . Можно показать, что

$$M_{24}, M_{34} \approx \sin \varnothing, \quad (4)$$

где \varnothing — отклонение фазовых характеристик между каналами ортогональных компонент поляриметра. Из (4) видно, что для подавления элементов M_{24}, M_{34} требуется очень высокая идентичность и стабильность фазовых характеристик каналов. Заметим также, что для измерения двух параметров Стокса линейной поляризации здесь требуется поворот СВЧ-тракта.

Эффективным методом подавления элементов $M_{21}, M_{31}, M_{24}, M_{34}$ матрицы Мюллера поляриметров может служить использование в них гармонической модуляции параметров Стокса Q, U . Этого можно достигнуть, например, за счет непрерывного вращения СВЧ-тракта поляриметра. Однако данный способ трудно реализовать на РАТАН-600, поскольку необходима довольно высокая скорость вращения (≥ 10 Гц). Поэтому представляет интерес исследовать матрицу Мюллера поляриметра, в котором обеспечено быстрое вращение малоинерционного элемента тракта (например, фазовой пластинки [8—10]).

Блок-схема такого поляриметра изображена на рис. 3. Он включает в себя обычный поляриметр, измеряющий либо отдельные параметры Стокса, либо их суперпозицию, на входе которого имеется вращающийся элемент тракта,

а на выходе — Фурье-анализатор выходного сигнала. При этом на различных гармониках частоты вращения Ω могут выделяться все четыре параметра Стокса:

$$\cos 2\Omega t - I; \quad \sin 2\Omega t - V; \quad \cos 4\Omega t - Q; \quad \sin 4\Omega t - U.$$

Анализ, основанный на предложенном Гельфрейхом [10] методе, показал, что при идеальных вращениях и Фурье-анализе зануления элементов M_{21} , M_{31} , M_{24} , M_{34} обеспечиваются при вращении произвольной системы. Однако более предпочтительной является система с линейными ортогональными собственными поляризациями, т. е. линейная пластинка.

Неидеальность вращения системы (например, из-за эллиптичности волновода, смещения оси вращения пластинки относительно оси волновода) приводит к эффектам, эквивалентным гармонической модуляции параметров пластинки.

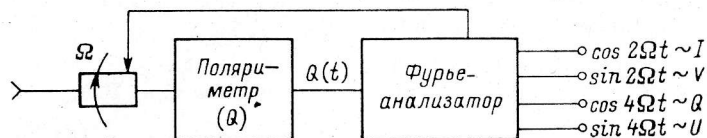


Рис. 3.

При достаточно хорошем согласовании пластинки происходит модуляция в основном дифференциального фазового сдвига ($\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi \sin(2\Omega t - \delta)$), в результате чего возникают отличные от нуля элементы M_{24} , M_{34} .

Если без вращающейся пластинки поляриметр измерял параметр Стокса Q и описывался матрицей Мюллера m , то в случае пластинки (при условии $\delta = 0$) матрица приобретает вид

$$M \approx e^{-x_{cp}} \begin{bmatrix} \text{sh } x & 0 & (m_{24} + \frac{1}{4} \Delta\varphi) \sin \varphi_0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} (\text{ch } x - \cos \varphi_0) & 0 & -\frac{1}{2} \Delta\varphi \cos \varphi_0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} (\text{ch } x - \cos \varphi_0) & 0 \\ 0 & -(\frac{3}{4} \Delta\varphi - m_{24}) \sin \varphi_0 & 0 & \sin \varphi_0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где x_{cp} — средние потери пластинки; x , φ_0 — дифференциальные потери и фазовый сдвиг пластинки, $\Delta\varphi$ — амплитуда модуляции дифференциального фазового сдвига.

Из (5) видно, что недиагональные элементы матрицы M , в частности элементы M_{21} , M_{31} , M_{24} , M_{34} , слабо зависят от характеристик пластинки, причем величина элемента M_{24} , обусловленного неидеальностью вращения, максимальна для полуволновой пластинки и равна нулю для четвертьволновой.

Оценки показали, что в случае полуволновой пластинки с параметрами $t \approx 0.2d$, $\varepsilon > 2$, $d/\lambda \approx 0.7$ для выполнения условия M_{24} , $M_{34} < 0.25\%$ необходимо, чтобы

$$e/d < 6 \cdot 10^{-4}; \quad \Delta/d < 0.01,$$

где e — эллиптичность волновода; Δ — смещение оси вращения относительно оси волновода; d — диаметр волновода; t , ε — толщина и диэлектрическая постоянная пластинки.

Таким образом, требования к фазовым характеристикам и к установке пластинки не являются высокими.

Сравнивая рассмотренные выше типы поляриметров, можно сделать вывод, что поляриметр с вращающейся пластинкой имеет определенные преимущества с точки зрения измерения линейной поляризации слабо поляризованного радиолучения с радиотелескопом РАТАН-600.

Литература

1. Поляризационные характеристики радиотелескопа РАТАН-600 / Н. А. Есепкина, Н. С. Бахвалов, Б. А. Васильев и др. — *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 1979, **11**, с. 172—197.
2. Исследование характеристик антенн с отражателем переменного профиля / Н. А. Есепкина, Н. Л. Кайдановский, Б. Г. Кузнецов, С. Э. Хайкин. — *Радиотехника и электроника*, 1961, **12**, с. 1947—1957.
3. Коржавин А. Н. К теории радиоастрономических поляризационных измерений. — *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 1979, **11**, с. 145—170.
4. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973.
5. Есепкина Н. А. Поляризационные характеристики радиотелескопов. — *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 1972, **4**, с. 157—168.
6. Chu T. S., Turrin R. H. Depolarization properties of offset reflectors. — *IEEE Trans.*, 1973, AP-21, p. 339—346.
7. Поляризационные характеристики антенн переменного профиля / Н. С. Бахвалов, Л. Г. Васильева, Н. А. Есепкина и др. — *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 1973, **5**, с. 135—148.
8. Корольков Д. В., Соболева Н. С., Гельфрейх Г. Б. Исследования радиоизлучения Солнца по поляризационным наблюдениям. — *Изв. ГАО*, 1960, № 164, с. 81—113.
9. Akabane R. Radiopolarimeter for solar observations. — *Proc. IRE*, 1958, **46**, No. 1, 194—205.
10. Гельфрейх Г. Б. К теории поляризационных модуляторов. — *Изв. ГАО*, 1964, № 172, с. 203—205.

Поступила в редакцию 5 ноября 1982 г.