

УДК 523.164

АНАЛИЗ РАДИОИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ РАССЕЯНИЯ НА ОКОЛОСОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЕ

П. Б. Казимирский, Н. А. Лотова

В обработке измерений видимых угловых размеров квазаров при сближении их с Солнцем предложены метод коррекции за фазовый сдвиг в интерферометре и независимый от затменных наблюдений метод определения основной калибровочной постоянной — амплитуды интерференционной картины, не измененной рассеянием. Эти изменения позволили повысить надежность измерений и распространить результаты на более удаленные области межпланетной среды.

1. Введение. В исследованиях близких к Солнцу областей межпланетной среды, $R \leq 50R_{\odot}$, одной из наиболее эффективных является модификация метода просвечивания, основанная на измерении видимых угловых размеров источника при сближении его с Солнцем [1-4]. Наблюдения проводятся в диапазоне метровых или декаметровых волн в режиме сильного рассеяния волн в среде (рис. 1). Именно этим методом были получены первые результаты на ранних этапах исследования межпланетной среды [1-6]. В последние годы в связи с развитием исследований переходной области солнечного ветра [7-9] метод вновь оказался эффективным средством изучения структуры межпланетной среды на малых расстояниях от Солнца. Измерения видимых размеров источника выполняются на радиотелескопе, используемом как интерферометр. Непосредственно измеряемой величиной является амплитуда интерференционной картины, возникающей при прохождении источника через диаграмму антенны (рис. 1). Угол рассеяния связан с измеряемой амплитудой M соотношением [1-3]

$$M = M_0 \exp [-(\pi d/\lambda)^2 \theta^2], \quad (1)$$

где M_0 — амплитуда модуляции во внезатменные дни, когда эффектом рассеяния можно пренебречь, d — расстояние между двумя секциями антенны, образующими интерферометр, λ — используемая длина волн.

2. Основные соотношения. Диаграмма направленности двухэлементного интерферометра имеет вид [10]

$$D(\psi) = \cos(2x + \varphi) (\sin y/y)^2, \quad (2)$$

где $x = (\pi d/\lambda)\psi$, $y = (\pi a/\lambda)\psi$, a — линейный размер каждого из двух элементов интерферометра, $\psi \ll 1$ — угол между направлением на источник и плоскостью симметрии антенны, φ — фазовый сдвиг, который зависит от различия электрических длин кабелей в двух плечах интерферометра. Отличный от нуля фазовый сдвиг вносит асимметрию в интерференционную картину (рис. 1) и существенно затрудняет измерение искомой величины — амплитуды огибающей интерференционной картины M (рис. 2). Поправки за электрическую асимметрию антенны велики только в случае $a/d \ll 1$. В наших наблюдениях использовались два примыкающие одно к другому полотна антенны ($a/d = 1$). В этом случае коррекция за фазовый сдвиг φ оказывается особенно существенной. На начальном этапе наблюдений использовалась упрощенная

процедура коррекции за фазовый сдвиг, основанная на сопоставлении амплитуд трех центральных экстремумов интерференционной картины [2, 3, 8]. Проведенные оценки показали, что изменение методики обработки результатов наблюдений позволит значительно более полно использовать полученные данные.

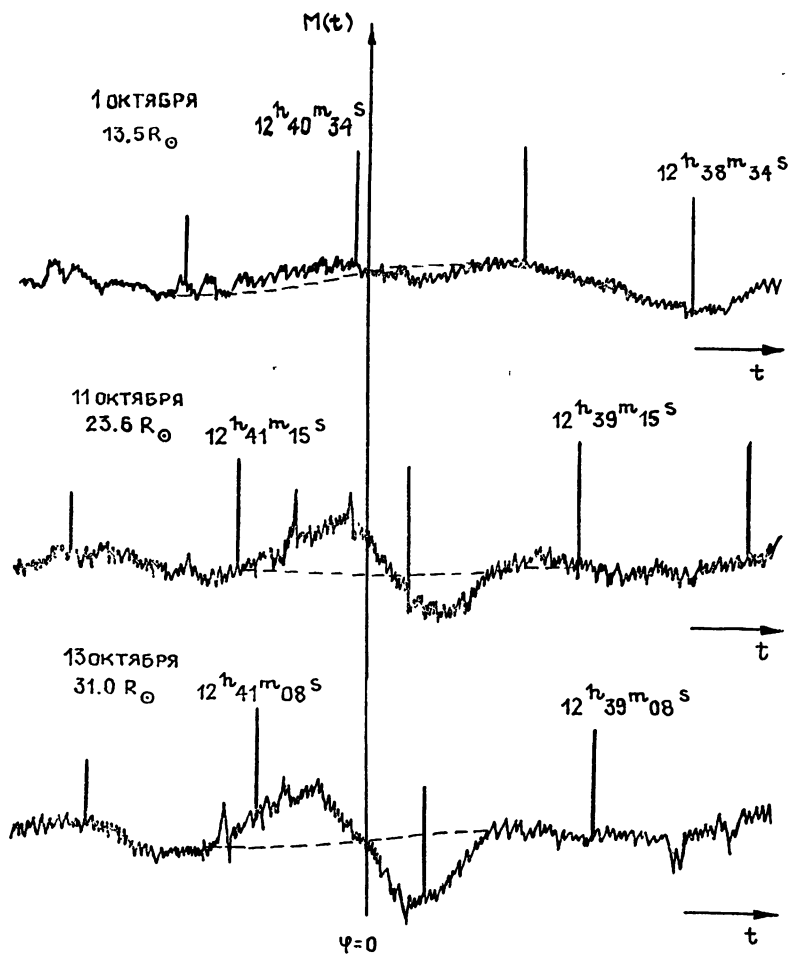


Рис. 1. Записи источника 3C275 в октябре 1986 г. Измерения проводились на частоте $\nu=102,5$ МГц.

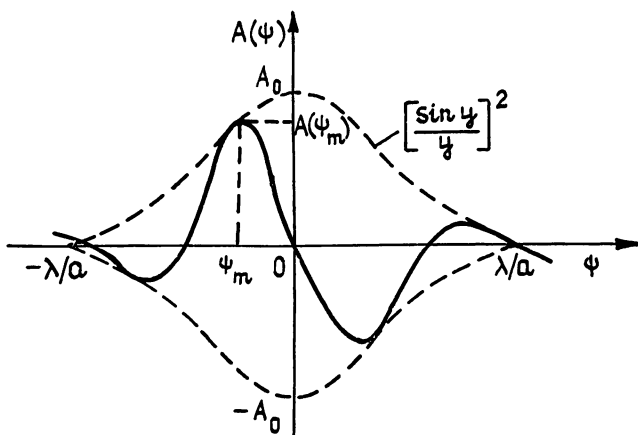


Рис. 2. Взаимосвязь симметричной интерференционной картины с наблюдаемой, содержащей фазовый сдвиг (формула (3)).

3. Методика коррекции за фазовый сдвиг. Временная зависимость регистрируемых на выходе корреляционного радиометра сигналов воспроизводит в определенном масштабе диаграмму направленности (рис. 2)

$$A = A_0 \cos(2x + \varphi) (\sin y/y)^2. \quad (3)$$

Задача обработки результатов наблюдений сводится, таким образом, к сопоставлению формулы (3) с записью сигнала и определению постоянных φ и A_0 . Известный из астрономических данных момент прохождения источника через плоскость симметрии антенны позволяет непосредственно связать временную шкалу записи сигналов со значениями угла φ , что существенно облегчает выявление асимметрии интерференционной картины.

Для определения постоянных A_0 , φ использовались координаты ψ_m , A_m двух (реже — трех) центральных экстремумов записи сигнала (рис. 1). Дифференцирование соотношения (3) дает

$$\frac{d}{a} \operatorname{tg}(2x_m + \varphi) = \operatorname{ctg} y_m - \frac{1}{y_m},$$

откуда

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left[\frac{a}{d} \left(\operatorname{ctg} y_m - \frac{1}{y_m} \right) \right] - 2x_m,$$

где

$$A_0 = |A(\psi_m) K|, \quad K = \sec(2x_m + \varphi) (y_m / \sin y_m)^2.$$

Каждая пара значений ψ_m , A_m дает соответствующие значения φ , A_0 . Если различие определенных таким образом значений не превышает ошибки измерений, окончательный результат определяется простым усреднением. Расхождение этих значений является следствием непостоянства нулевой линии радиointерферометра. Помимо радиопомех здесь сказывается попадание радиоизлучения Солнца в боковые лепестки диаграммы антенны. Для восстановления нулевой линии используется специфическая форма огибающей интерференционной картины — широкие минимумы $A=0$ при $y = \pm\pi$. Основным критерием правильности восстановления является совпадение значений φ , A_0 , определенных по координатам нескольких экстремумов. Использование процедуры обработки, учитывающей в явной форме зависимость интерференционной картины от фазового сдвига φ , существенно повышает надежность определения искомых значений амплитуд A_0 .

4. Восстановление амплитуды интерференционной картины, не измененной рассеянием. При определении угла рассеяния радиоволн θ

по формуле (1) особенно важно надежное определение внезапного значения амплитуды M_0 , значения, не измененного рассеянием. В ранних работах [3, 5, 6, 8] эта величина, как и все остальные значения M , определялась по результатам наблюдений одного источника, проходящего вблизи Солнца. Для определения M_0 использовались данные, относящиеся к наибольшим в серии наблюдений радиальным расстояниям R . Так, для наблюдений на длине волны $\lambda = 2,92$ м принималось, что эффекты рассеяния пренебрежимы на радиальных расстояниях $R \geq 30R_\odot$. Принимая во внимание новые данные о значительных изменениях состояния околосолнечной среды во времени [8, 9],

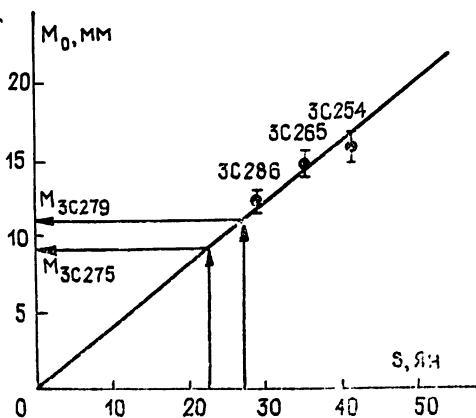


Рис. 3. Характеристическая зависимость глубины модуляции M_0 от величины потока S , построенная по наблюдениям калибровочных источников на частоте $\nu = 102,5$ МГц.

402

можно считать весьма желательным использование метода определения величины M_0 , свободного от каких-либо гипотез о геометрии солнечного ветра в момент проведения наблюдений. В настоящей работе применен иной метод определения величины M_0 . Параллельно с проведением затменных наблюдений в те же дни проводятся дополнительно наблюдения нескольких калибровочных источников, однотипных с основным по величине потока и угловым размерам и удаленных от Солнца на достаточно большие расстояния, исключающие влияния эффектов рассеяния. По результатам этих наблюдений строится калибровочная кривая рис. 3, на которой по оси абсцисс откладываются значения потока источников, взятые из каталога и соответствующие частоте, на которой проводятся наблюдения, а по оси ординат — наблюдаемые значения амплитуды интерференционной картины. По этой кривой и по данным о потоке основного источника, используемого в затменных наблюдениях, определяется величина M_0 . Как показали проведенные с использованием этого метода наблюдения, независимое от затменных наблюдений определение калибровочной величины M_0 исключает появление несовместимых с теорией метода значений $M > M_0$ и позволяет полностью использовать серию затменных наблюдений для определения параметров рассеивающей среды на предельно больших угловых расстояниях от Солнца.

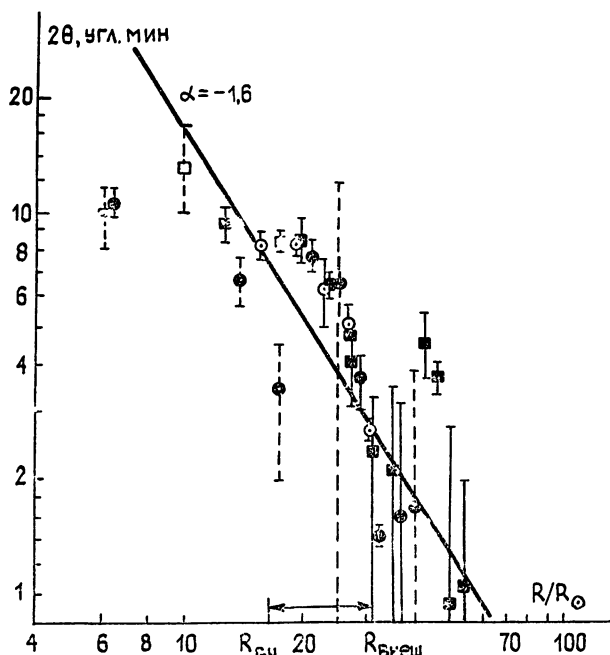


Рис. 4. Радиальная зависимость угла рассеяния волн $\theta(R)$ по наблюдениям источников 3C275 (\square , \blacksquare) и 3C279 (\odot , \bullet) в октябре 1986 г. на длине волны $\lambda = 2,92$ м. Незаполненные символы относятся к фазе сближения источников с Солнцем, заполненные — к фазе удаления.

Измененная процедура обработки результатов наблюдений была использована в наблюдении источников 3C275 и 3C279 в октябре 1986 г., когда расстояние между источниками и Солнцем уменьшалось до $2R_{\odot}$ и $1R_{\odot}$. Наблюдения проводились на крестообразной антенне радиотелескопа ДКР-1000. Интерферометр был образован двумя половинами полотна восток—запад антенны с параметрами $a=d=500$ м, $a/d=1$. Рис. 4 показывает, что новая методика обработки результатов наблюдений позволила получить значения угла рассеяния $\theta(R)$ вплоть до радиальных расстояний $\geq 50R_{\odot}$. Широкий диапазон радиальных

расстояний, охваченных в этих измерениях, позволил определить локализацию переходной области солнечного ветра, проявляющейся как эффект повышенного рассеяния на фоне монотонного спада, характеризуемого показателем $\alpha = -1,6$. Данные рис. 4 позволяют определить внутреннюю и внешнюю границы переходной области, соответственно, как $R_{\text{вн}} \sim 16R_{\odot}$, $R_{\text{внешн}} \sim 30R_{\odot}$.

Помимо этого рис. 4 содержит указание на существование интересного «эффекта предвестника». При увеличении радиального расстояния обнаруживается резкий спад угла рассеяния при радиальных расстояниях $R \sim 17R_{\odot}$, за которым, при дальнейшем увеличении радиального расстояния, наблюдается протяженная область повышенного рассеяния — отмеченная выше переходная область. Существование такой резко немонотонной радиальной зависимости рассеяния можно связать с известным из литературы [11] резким нарастанием скорости солнечного ветра в этой же области радиальных расстояний. Существование «предвестника» переходной области находит подтверждение в опубликованных ранее результатах измерения времени запаздывания пульсаров [12] и в наблюдениях, проводившихся с использованием искусственных источников, расположенных на борту космических аппаратов [13].

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Виткевич В. В. // Астрон журн. 1952. Т. 29 № 4 С. 450
- 2 Арискин В. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1963. Т. 6 № 3. С. 637.
- 3 Бабий В. И., Виткевич В. В., Власов В. И., Горелова М. И., Суховой А. Г. // Астрон. журн. 1965. Т. 42. № 1. С. 107.
- 4 Абанин Э. П., Базелян Л. Л. // Астрометрия и астрофизика. 1983. № 49. С. 41.
- 5 Blesing R. G., Dennison P. A. // Proc. Astron. Soc. Austral. 1972. V. 2. № 2 P. 84.
- 6 Виткевич В. В. // Астрон. журн. 1960. Т. 37 № 1. С. 32
- 7 Лотова Н. А. // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26 № 3. С. 369.
- 8 Лотова Н. А., Алексеев Ю. И., Нагелис Я. В. // Кинематика и физика небесных тел. 1987. Т. 3, № 4.
- 9 Lotova N. A., Blums D. F., Vladymirskij K. V. // Astron. Astrophys. 1985. V. 150. № 2. P. 266.
- 10 Краус Дж. Д. Радиоастрономия. — М.: Сов. радио, 1973.
- 11 Яковлев О. И., Ефимов А. И., Рубцов С. Н. // Космич. исслед. 1987. Т. 25 Вып. 2. С. 251.
- 12 Weisberg J. M., Rankin J. M., Payne R. R., Counselman C. C. // Astrophys. Journ. 1976. V. 209. P. 252.
- 13 Edenhofer P., Esposito P. B., Hansen R. T. et al. // Journ. Geophys. Res 1977. V. 42. P. 673.

Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн АН СССР

Поступила в редакцию
12 мая 1987 г.

THE ANALYSIS OF WAVE SCATTERING IN THE SOLAR ENVIRONMENT PLASMA FROM RADIOINTERFEROMETER DATA

P. B. Kazimirskij, N. A. Lotova

The method of correction for the phase shift in the interferometer and the method independent of occultation for determining the main calibration constant which is the amplitude of the interference pattern unchanged by wave scattering have been suggested to process the measurements of the apparent angular dimensions of quasars as they approach the sun. This allowed us to raise the reliability of measurements and to extend our results to more distant regions of the interplanetary plasma.