

МИНИМАЛЬНО-ФАЗОВЫЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР

И.Ф. Малов, В.А. Фролов

УДК 520.27+520.84

Предлагается использовать разработанный авторами алгоритм вычисления профиля источника по модулю его Фурье-спектра в существующих схемах интерферометрических измерений с целью получения на выходе интерферометра распределения яркости по источнику.

Одной из важнейших задач оптики и астрономии является определение основных параметров источника по спектральным характеристикам его излучения в некоторой плоскости. При решении этой проблемы используется связь комплексной функции пространственно-временной когерентности $\Gamma(u, \tau)$ с пространственно-временным профилем источника излучения $E(x, \nu)$ через преобразования Фурье $/1/$. На практике, как правило, измеряют отдельно $\Gamma(u)$ и $\Gamma(\tau)$, а затем находят

$$\begin{aligned} E(x) &= \tilde{F}\{\Gamma(u)\}, \\ E(\nu) &= \tilde{F}\{\Gamma(\tau)\}. \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь рассматривается только случай одномерного пространственного профиля как наиболее исследованный, однако возможно его обобщение и для получения двумерного изображения источника $/2,3/$. Если известна функция $\Gamma(u) = |\Gamma(u)|e^{i\varphi(u)}$, то построение профиля $E(x)$ не представляет труда. Но измерить фазы функции $\Gamma(u)$ не всегда возможно. Например, в радиоастрономии при наблюдениях на интерферометре с базой D достаточно уверенно по интерференционной записи определяется величина $|\Gamma(u)|$, но из-за фазовых искажений на пути распространения сигнала редко удается получить значение $\varphi(u)$ с разумной точностью. (Если измерения проводятся на волне длиной λ , то пространственная частота $u = D/\lambda$.) При отсутствии информации о фазе возможны два пути решения проблемы: 1) поиск распределений $E(x)$,

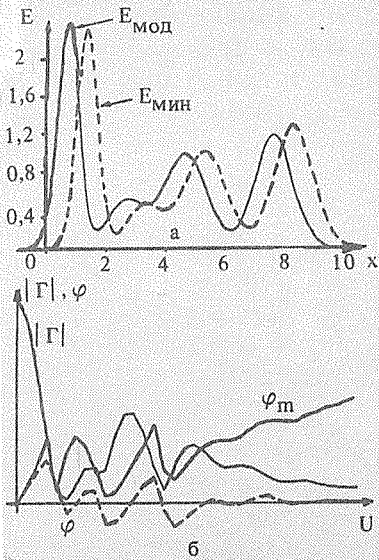
у которых модуль фурье-образа $|\Gamma(u)|$ близок к наблюдаемому (fitting); 2) вычисление фазы с использованием аналитичности функции $\Gamma(u)$. В ряде работ /4,5/ исследовались возможности второго метода. В этом случае модуль и фаза функции связаны преобразованиями Гильберта /5/:

$$\varphi_m(u) = -\frac{2u}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\ln |\Gamma(u')| - \ln |\Gamma(u)|}{u'^2 - u^2} du', \quad (2)$$

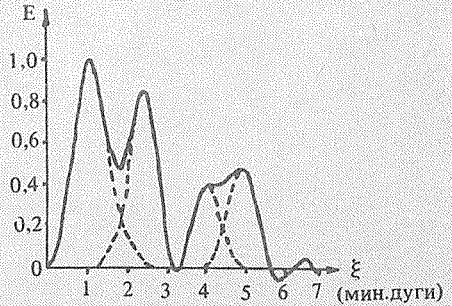
$$\ln \frac{|\Gamma(u)|}{|\Gamma(0)|} = \frac{2u}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{u\varphi(u') - u'\varphi(u)}{u'(u'^2 - u^2)} du'.$$

Зная модуль $|\Gamma(u)|$, можно при определенных условиях найти фазу $\varphi_m(u)$, т. е. получить всю функцию $\Gamma(u)$ и далее с помощью фурье-преобразования (1) – распределение яркости по источнику $E(x)$. Реальное значение фазы может отличаться от $\varphi_m(u)$, если у функции $\Gamma(u)$ существуют нули, лежащие вне вещественной оси. Поэтому $\varphi_m(u)$ называется минимальной фазой, и в общем случае к ней должна быть добавлена "фаза Блашке" φ_B .

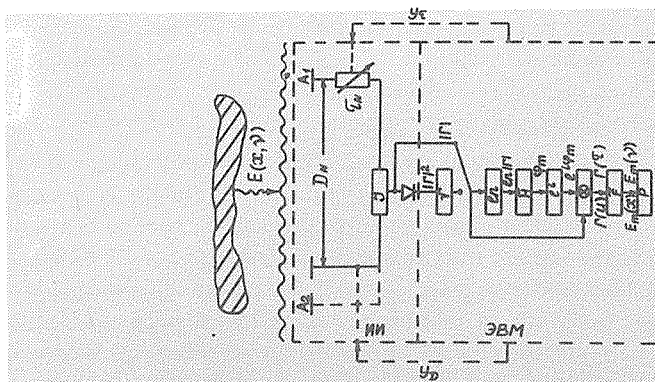
Были проведены минимально-фазовые восстановления распределения яркости (получены пространственные профили) как для целого ряда моделей, так и для реальных космических радиоисточников по данным о модуле их фурье-спектров $|\Gamma(u)|$. Проведенные исследования /4,5/ показали, что во многих случаях восстановленный профиль очень близок к модельному. На рис. 1а и 2 приведены примеры восстановления модельного профиля и распределения яркости по космическому радиоисточнику P 0349-27. На рис. 1б показана минимальная фаза, полученная с помощью преобразований Гильберта (2). Вопрос о роли комплексных нулей и фазы Блашке в настоящее время до конца не решен. Нами предложен модельный способ исследования фазы Блашке /4/. В результате было установлено, что для профилей, представимых суммой гауссиан, фаза Блашке приводит к смещению фазы функции $\Gamma(u)$, и в конечном итоге – к смещению профиля $E(x)$ вдоль оси ОХ при сохранении его основных информационных характеристик (рис. 1). Практически любой профиль, характерный для космических источников, может быть представлен суммой гауссиан (рис. 2). Поэтому минимально-фазовый метод можно использовать как общий метод восстановления структуры космических радиоисточников. Минимально-фазовые профили могут рассматриваться по крайней мере как нуле-



Р и с. 1. Пример восстановления минимально-фазового профиля $E_{\text{мин}}(x)$ (а) для модельного "источника", представляющего сумму четырех гауссиан, по модулю функции $\Gamma(u)$ (б).



Р и с. 2. Минимально-фазовое распределение яркости по источнику Р 0349-27.



Р и с. 3. Блок-схема минимально-фазового интерферометра.

вые приближения для $\varphi_{\text{в}}/\varphi$. Они могут быть хорошим приближением даже в том случае, когда значения модуля $|\Gamma(u)|$ известны только для ограниченного диапазона частот, а сам модуль измерен с ошибками $1/5$. Мы предлагаем ввести рассмотренный алгоритм вычисления $E_{\text{м}}(x)$ по $|\Gamma(u)|$ в существующие схемы интерферометрических измерений. В результате получится

измерительный комплекс, схематически представленный на рис. 3, где A_1 и A_2 — приемные апертуры; τ_N — переменная временная задержка; D_N — переменная база интерферометра; Y_τ — управление временной задержкой; Y_D — управление базой; \tilde{H} — преобразование Гильберта; $E_m(\nu)$ и $E_m(x)$ — минимально-фазовые временной и пространственный профили соответственно; P — регистрирующее устройство, фиксирующее в какой-либо форме минимально-фазовые профили $E_m(\nu)$ и $E_m(x)$. Представленная схема является, по-существу, совмещенным вариантом интерферометров Майкельсона и Юнга. Однако возможно ее использование и с интерферометром интенсивностей, на выходе которого регистрируется величина $|\Gamma(u)|^2$. В этом случае вводится дополнительная операция $\sqrt{|\Gamma(u)|^2}$, а затем вновь могут быть получены минимально-фазовые профили $/4/$.

Предложенный комплекс можно использовать при исследовании любых процессов, описываемых аналитическими функциями, которые связаны преобразованиями Фурье в пространственной и временной областях.

Поступила в редакцию 14 марта 1985 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. П е р и н а Я. Когерентность света. М, Мир, 1974.
2. Е в с и к о в Ю. А., Ч а п у р с к и й В. В. Преобразование случайных процессов в радиотехнических устройствах. М., Высшая школа, 1977.
3. А б л е к о в В. К. и др. ДАН, 261, 609 (1981).
4. Г а л ь ч е н к о А. А. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 2, 8; № 2, 24; № 9, 23 (1982); № 3, 11 (1984).
5. К о с а р е в И. Г., М а л о в И. Ф., Ф р о л о в В. А. Препринт ФИАН № 90, 1980; Краткие сообщения по физике ФИАН, № 7, 15 (1982).