

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ СОСТАВНЫХ ЗЕРКАЛ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ТАЛЬБОТА

А.С. Коряковский, В.М. Марченко, А.М. Прохоров

УДК 535.417

Численно и экспериментально исследовано поведение картины воспроизведения при введении искажения волнового фронта типа фазового скачка. Определены критерии сфазированности составного зеркала, описана последовательность его юстировки.

Предельно малые расходимости лазерного излучения и углы разрешения при наблюдении астрономических объектов в заданном спектральном диапазоне могут быть реализованы только за счет увеличения апертуры соответствующих телескопических устройств. Одним из способов достижения этой цели является изготовление широкоапертурных зеркал, составленных из отражателей, в том числе адаптивных, меньшего размера.

В связи с этим встает задача юстировки и контроля формы поверхности таких составных зеркал. Основную трудность здесь представляет осуществление когерентного сложения излучения, отраженного отдельными элементами, поскольку это требует высокой точности соблюдения их взаиморасположения (доли длины волны).

Для решения этой задачи, наряду с известными методами /1, 2/, может быть использован метод тальбот-интерферометрии (ТИ) /3, 4/, позволяющий юстировать составляющие отражатели по углу, определять форму их поверхности и регистрировать искажения типа разрыва волнового фронта (скачок фазы), которые эквивалентны смещению отдельных составляющих зеркал относительно друг друга вдоль оптической оси.

Когерентное монохроматическое излучение, сформированное в параллельный пучок, направлялось через двумерную периодическую решетку на исследуемое зеркало, установленное в плоскости воспроизведения, и регистрировалось в следующей за зеркалом плоскости воспроизведения. Границы зеркал располагались коллинеарно рядам световых квадратов интерферограммы и не засвечивались.

Распределение интенсивности в плоскости регистрации вычислялось по формуле $I(x) = u(x)u^*(x)$, где звездочка обозначает комплексное сопряже-

ние, а распределение поля в плоскости регистрации $u(x)$ рассчитывалось по формуле Френеля – Кирхгофа [5]:

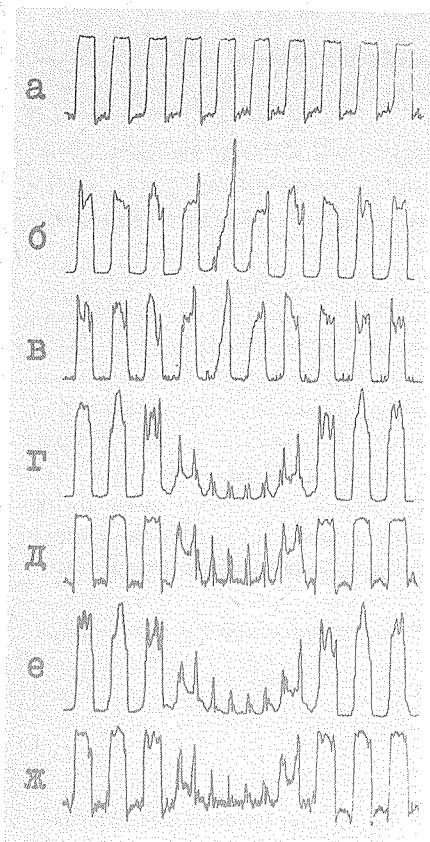
$$u(x) = \frac{e^{i\pi/2}}{\sqrt{\lambda^2 Z_1 Z_2}} \exp\left[\frac{2i\pi}{\lambda} (Z_1 + Z_2)\right] \int_{-\infty-a}^{\infty} \int_a^a u(x_0) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda Z_1} (x_1 - x_0)^2\right] \times \\ \times \exp[i\Delta(x_1)] \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda Z_2} (x - x_1)^2\right] dx_0 dx_1,$$

где $u(x_0)$ – распределение поля на решетке; $2a$ – апертура зеркала; $\Delta(x_1)$ – величина фазового скачка, вносимого зеркалом; λ – длина волны; Z_1 – расстояние от решетки до зеркала; Z_2 – расстояние от зеркала до плоскости регистрации. В расчете использовались значения параметров $\lambda = 0,63 \cdot 10^{-4}$ см, $2a = 20$ см, $Z_1 = Z_2 = p^2/\lambda$, где $p = 0,1$ см – период решетки.

На рис. 1 приведены рассчитанные распределения интенсивности и плотности почернений, полученные в той же геометрии. При этом наличие фазового скачка, вводимого с помощью плоского алюминированного зеркала с напыленной ступенькой высотой $5 \cdot 10^{-6}$ см, искажает картину воспроизведения.

На рис. 1б, в представлены рассчитанное и экспериментальное распределения интенсивности и почернения на фотопленке, демонстрирующие влияние фазового скачка на картину воспроизведения. Скачок был локализован в центре апертуры. Когда зеркала расположены вплотную, признаком сфазированности будет достижение неискаженного распределения интенсивности в плоскости регистрации (рис. 1а). Когда составляющие зеркала расположены на некотором расстоянии друг от друга и часть зондирующего излучения попадает между зеркалами, распределение интенсивности в плоскости воспроизведения даже при сфазированных зеркалах довольно сложное (рис. 1г – расчетное, рис. 1д – экспериментальное распределения при расстоянии между зеркалами $d=3$ мм). На рис. 1е, ж представлены распределения интенсивности и почернения (расчетное и экспериментальное) при том же расстоянии между зеркалами и наличии фазового скачка. Сравнивая рис. 1г, д и 1е, ж, можно убедиться, что признаком сфазированности является симметричность распределений относительно места расположения скачка.

Следовательно, юстировка составного зеркала ТИ методом может производиться следующим образом. Наклонами отражателей и изменением формы их поверхности можно получить такое распределение интенсивности в



Р и с. 1: а - распределение плотности почернений в плоскости воспроизведения в отсутствие фазового скачка; б - распределение интенсивности, рассчитанное для фазового скачка $\Delta = 0,33\pi$; в - распределение плотности почернений, соответствующее рис. 1б; г - распределение интенсивности, рассчитанное для случая, когда зеркала разнесены на расстояние $d = 3\text{ мм}$ ($\Delta = 0$); д - распределение плотности почернений, соответствующее рис. 1г; е - распределение интенсивности, рассчитанное для случая $d = 3\text{ мм}$, $\Delta = 0,43\pi$; ж - распределение плотности почернений, соответствующее рис. 1е.

плоскости воспроизведения, чтобы картины воспроизведения от отдельных отражателей сложились в единую периодическую картину. При этом более точное угловое совпадение достигается при совмещении в соответствующих рядах световых пятен узких дифракционных кантов, образованных в результате интерференции гармоник высших порядков между краями соседних отражателей.

Установку отражателей по углу и юстировку формы их поверхности можно автоматизировать, устанавливая в плоскости воспроизведения матрицу из периодически расположенных квадрантных фотоприемников так, чтобы все контрастные световые пятна (или часть их) попадали на приемники. Наличие наклонов отдельных областей или всего отражателя вызовет смещение соответствующих световых пятен в плоскости воспроизведения и, следовательно, разностные сигналы с фотоприемников, расположенных в этой обла-

ти. Усиливая эти сигналы и подавая их на соответствующие приводы составного зеркала, можно образовать петлю обратной связи, которая позволит привести разностные сигналы к минимуму.

Перемещением отражателей вдоль оптической оси достигается неискаженная или симметричная картина воспроизведения (рис. 1а или г, д), свидетельствующая о сфазированности составного зеркала. Юстировка неплоских зеркал производится аналогично.

В заключение отметим, что для работы с монохроматическим излучением или с излучением на длине волны, отличной от длины волны излучения, в котором юстировалось зеркало, требуется абсолютная фазировка, а не с точностью до целого числа длин волн. Проводя юстировку на двух близких длинах волн λ_1 и λ_2 , можно расширить динамический диапазон абсолютной фазировки составного зеркала, который составит $\Delta = (\lambda_1 \lambda_2) / (\lambda_2 - \lambda_1)$. Например, для $\lambda_1 = 0,63 \cdot 10^{-4}$ см, $\lambda_2 = 0,69 \cdot 10^{-4}$ см, $\Delta = 7,2 \cdot 10^{-4}$ см $\approx 10\lambda$, т.е. при начальном расстоянии между поверхностями зеркал вдоль оптической оси меньше Δ юстировка описанным способом на двух длинах волн в плоскостях воспроизведения с одинаковым номером должна приводить к абсолютной фазировке поверхностей.

Поступила в редакцию 13 июля 1984 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рябова Н.В. ОМП, № 11, 58 (1975).
2. Сгапе R. Appl. Opt. 8, 538 (1969).
3. Коряковский А.С., Марченко В.М. Квантовая электроника, 7, 1048 (1980).
4. Коряковский А.С., Марченко В.М. ЖТФ, 51, 1432 (1981).
5. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику, М., Мир, 1970.
6. Н а г д у J.W. Proc. IEEE, 66, 651 (1978); перевод см. Труды ИИЭР, 66, № 6, 31 (1978).