

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИКИ. III МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ФУКО—ФИЛБЕРТА

*Г. М. Бескин, А. М. Богудлов, Э. А. Витриченко,  
О. А. Евсеев, С. М. Солдатов*

Описывается усовершенствованная оптико-механическая схема метода Фуко—Филберта для исследования астрономической оптики. Применение узла вращения приемной части прибора позволяет строить точные карты поверхности исследуемого зеркала. Использование полупрозрачной пластинки в оптической схеме дает возможность производить измерения на оптической оси зеркала и тем самым повысить точность получаемых результатов.

An improved optico-mechanical Foucault—Philbert System for control of astronomical optics is described. The use of a unit of rotation for the television camera of the device makes it possible to construct accurate charts of the optics under investigation. A semi-transparent plate used in the system allows to make measurements on the optical axis of the device increasing hereby its accuracy and making it more convenient in use.

### Возможности метода Фуко—Филберта

Измерение аберраций оптических систем методом, описанным Филбертом [1], в основе которого лежит теневой метод Фуко, позволяет получить из фотоэлектрических измерений поперечные аберрации в кружке наименьшего рассеяния и отклонения волнового фронта от идеального.

Метод количественный, весьма оперативный, нагляден для оптика-технолога и свободен от субъективных ошибок измерителя. Результат анализа теневой картины в виде электрического сигнала-аналога поперечных аберраций лучей, отраженных от зеркала вдоль некоторой хорды, наблюдается на экране осциллографа. После обработки в блоке интегрирования сигнал преобразуется согласно соотношению

$$\Delta h(x) = \int_{x_0}^x \beta(x) dx, \quad (1)$$

где  $\beta(x)$  — поперечные аберрации в точке  $x$  на хорде,  $\Delta h(x)$  — нормальное отклонение истинной поверхности от идеальной с точностью до некоторого коэффициента.

Можно строго показать, что для получения основных характеристик качества зеркала — карты его поверхности и распределения энергии в кружке рассеяния — необходимо выполнить исследование теневой картины по двум взаимно пересекающимся системам хорд. При применении метода Фуко—Филберта это достигается путем поворота исследуемого зеркала на  $90^\circ$ . Однако при испытаниях крупногабаритных зеркал (диаметром свыше 1 м) их повороты вокруг оптической оси, как правило, невозможны,

что приводит к необходимости поиска других путей, позволяющих исследовать зеркало по двум взаимно перпендикулярным направлениям.

Предлагается усовершенствование метода Фуко—Филберта, состоящее в применении узла вращения для приемной части аппаратуры (видикона), а также в разработке методики построения карты поверхности зеркала и расчета распределения энергии в изображении точечного источника света.

### Узел вращения приемной части прибора

Для исследования зеркала по двум системам взаимно перпендикулярных хорд был разработан и испытан узел поворота видикона, на сигнальной пластине которого строится изображение теневой картины. Принцип работы поворотного устройства показан на рис. 1. Астрономическое сферическое зеркало (*г*) создает изображение (*а*) источника света в виде квадрат-

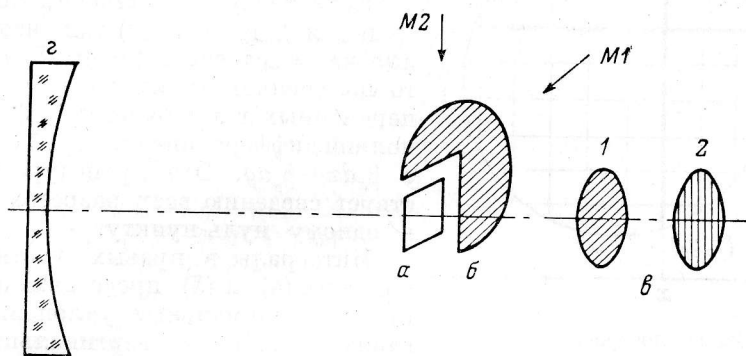


Рис. 1. Принцип работы узла вращения видикона.

ной щели. Если зеркало параболическое, то в оптической схеме используется нуль-корректор, преобразующий параболическую отраженную волну в сферическую. Нож Фуко (*б*) может перекрывать это изображение вплоть до получения теневой картины путем перемещения его двумя микрометрами *M1* или *M2*. При этом видикон (*в*) разворачивается так, чтобы строчная развертка *1* или *2* совпадала с направлением движения ножа. Видикон укрепляется в подшипнике, для чего телекамера разбирается, а ее электронная часть выносится в отдельный блок. Такая конструкция наиболее проста в изготовлении, удобна в обращении, позволяет легко менять видикон и не вносит никаких помех в электрический сигнал.

### Метод построения карты зеркала

Применение устройства, описанного выше, позволяет получить поперечные aberrации и нормальные отклонения вдоль двух взаимно перпендикулярных систем хорд на поверхности зеркала. На основе этих данных можно построить карту нормальных отклонений исследуемого зеркала от некоторого идеального.

Задача построения карты нормальных отклонений сводится к нахождению функции двух переменных  $h(x, y)$  — нормальное отклонение в точке  $(x, y)$  зеркала — по частным производным этой функции

$$\vartheta_x(x, y) = \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\beta_y(x, y) = \frac{\partial h}{\partial y}, \quad (3)$$

где  $\beta_x$  и  $\beta_y$  — поперечные аберрации в той же точке.

Интегрируя (2) по  $x$  и рассматривая  $y$  как параметр, получаем

$$h(x, y) = \int_{x_0}^x \beta_x(x, y) dx + f_x(y), \quad (4)$$

где  $f_x(y)$  не зависит от  $x$ , причем при  $x=x_0$  величину  $h$  полагаем равной нулю.

Далее, интегрируя (3) по  $y$  и рассматривая  $x$  как параметр, получаем

$$h(x, y) = \int_{y_0}^y \beta_y(x, y) dy + f_y(x). \quad (5)$$

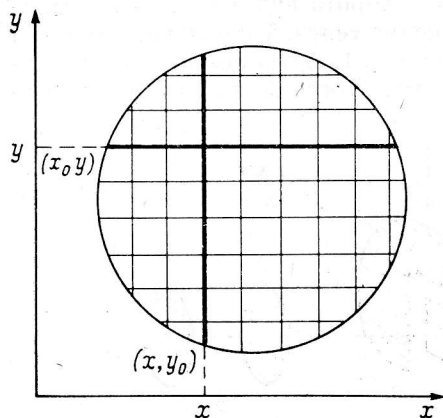


Рис. 2. Схема построения карты.

Если теперь мы сможем подобрать функции  $f_x(y)$  и  $f_y(x)$  так, чтобы правые части равенств (4) и (5) совпали, то полученная таким образом функция переменных  $x$  и  $y$  будет той функцией, полной дифференциал которой совпадает с  $\beta_x dx + \beta_y dy$ . Эта процедура соответствует сведению всех разрезов зеркала к одному нуль-пункту.

Интегралы в правых частях соотношений (4) и (5) представляют собой профили нормальных уклонов вдоль горизонтальных и вертикальных хорд с координатами  $x$  и  $y$  соответственно (рис. 2). Величины  $f_x(y)$  и  $f_y(x)$

определяются только положением хорд на поверхности зеркала и должны быть равны сдвигу нулевых уровней профилей при сведении всех профилей к общему нуль-пункту. При выполнении этого условия правые части выражений (4) и (5) становятся равными. Подбор значений  $f_x(y)$  и  $f_y(x)$  на практике осуществляется следующим образом. Для одного из профилей нормальных уклонов (опорный профиль) нулевой уровень проводится так, чтобы площади под уровнем и площади над уровнем были равны. Нулевые уровни всех профилей, пересекающихся с опорным профилем, выбираются так, чтобы нормальные уклоны в точках пересечения этих профилей с опорным совпадали с нормальными уклонами опорного профиля.

Построение карты зеркала завершается тем, что точки на хордах, имеющие одинаковые нормальные уклоны, выбранные с определенным шагом, соединяются плавными кривыми, образуя линии равных высот.

### Расчет распределения энергии в кружке рассеяния

Расчет распределения энергии в кружке наименьшего рассеяния производится с помощью метода элементарных площадок [2]. Каждая точка пересечения горизонтальной и вертикальной хорд предполагается окруженной элементом поверхности, площадь которого пропорциональна расстоянию  $R$  от центра зеркала. Считается, что весь свет, отраженный от этой площадки, попадает в одну точку в фокальной плоскости зеркала. Координаты этой точки есть поперечные аберрации  $\delta_{xi}$  и  $\delta_{yi}$ , измеренные по горизонтальному и вертикальному тангенциальным профилям, соответствующим пересекающимся хордам.

В этом случае искомая зависимость отношения светового потока, проходящего через круг радиуса  $r_k$ , к полному световому потоку имеет вид

$$\Phi(r_k) = \frac{\sum_{i=1}^k R_i}{\sum_{i=1}^N R_i}, \quad (6)$$

где  $R_i$  — расстояния от центра зеркала до точек пересечения хорд.  $N$  — число точек пересечения хорд.

Для точек пересечения хорд должно выполняться условие  $r_i = \sqrt{\delta_{xi}^2 + \delta_{yi}^2} \leq r_k$ .

### Принципиальная схема измерений

Принципиальная схема прибора показана на рис. 3. Протяженным источником света (1) служит лампа с ленточным телом канала или ртутная лампа с большим объемом светящейся дуги. Конденсорная система

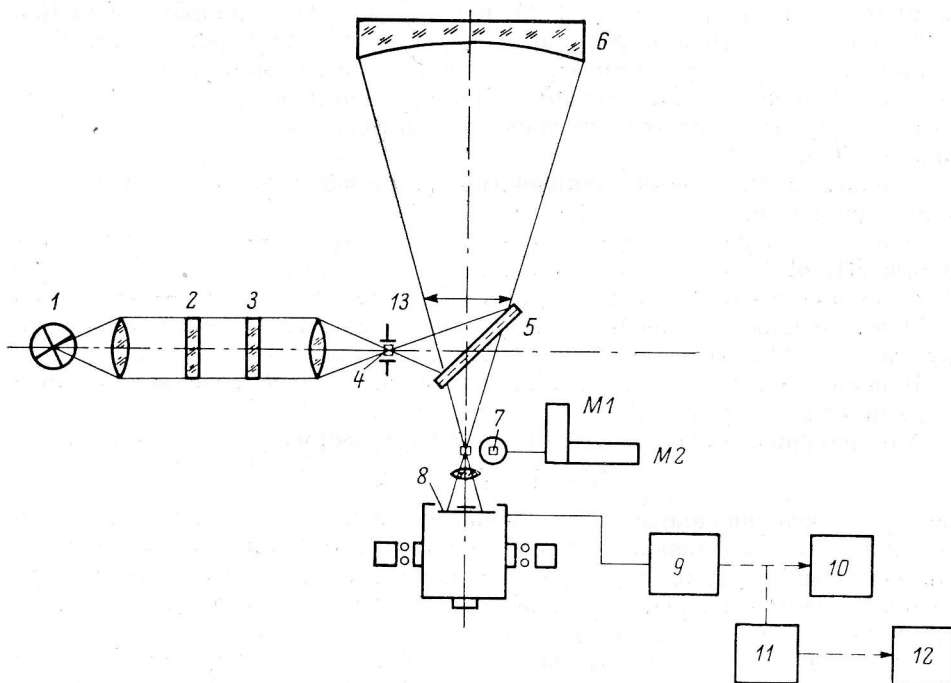


Рис. 3. Оптическая схема и блок-схема электронной части прибора.

фокусирует источник (1) на цель (4). С помощью нейтрального фильтра (2) можно регулировать величину светового потока. Если исследование ведется с линзовым нуль-корректором, рассчитанным на монохроматическое излучение, необходимо установить интерференционный фильтр (3). Полупрозрачная пластинка (5) направляет свет на исследуемое зеркало (6). Свет, отражаясь от зеркала в автоколлимации, проходит через полупрозрачную пластинку и объектив телекамеры и попадает на мишень (8) телевизионной трубки типа видикон. Нож-диафрагма (7) защищает видикон от рассеянного света и служит основной цели — получению теневой картины Фуко.

Прямое изображение теневой картины строится на мишени телевизионной трубки. Образовавшийся потенциальный рельеф сканируется электрон-

ным лучом, в результате чего получается электрический сигнал — аналог поперечных aberrаций. После усилителя (9) сигнал поступает на видео-контрольное устройство (10), на котором видна теневая картина, а также в блок обработки видеосигнала (11). Здесь происходит выделение одной из строк растра, вычитается постоянная составляющая, имитирующая сферу сравнения, происходит интегрирование сигнала и усиление его до необходимого уровня.

Профиль поперечных aberrаций и профиль нормальных уклонений относительно выбранной сферы сравнения вдоль некоторой хорды на зеркале поступают на осциллограф (12), который обеспечивает контроль за всеми измерениями профилей и калибровкой системы. Стрелкой (13) обозначен нуль-корректор.

### Оценка погрешностей прибора

Лабораторные и цеховые испытания зеркал с различными относительными отверстиями от 1/20 до 1/2.6 и с характерными ошибками от 10  $\lambda$  до 1  $\lambda$  показали, что аппаратные погрешности достаточно малы. Так, например, при исследовании зеркала диаметром 2.6 м [3] были обнаружены отклонения от ближайшей сферы сравнения в 1  $\mu$ . Исследование этого же зеркала интерферометрическим методом показало, что ошибка равна 0.95  $\mu$ .

Основными факторами, влияющими на точность получаемых результатов, являются:

- 1) неравномерность чувствительности видикона — около 10% для трубки ЛИ 422;
- 2) нелинейность амплитудной характеристики усилителя — около 2%;
- 3) нелинейность преобразования «свет—сигнал» — около 3% для трубки ЛИ 422 при работе в паспортном режиме;
- 4) погрешность измерения амплитуды сигнала, определяемая параметрами осциллографа С1-16, не более 10%.

Аппаратурная погрешность находилась по формуле

$$\Sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2,$$

где  $\sigma_1$  — среднеквадратичная ошибка неоднородности чувствительности видикона;  $\sigma_2$  — среднеквадратичная ошибка нелинейности амплитудной характеристики усилителя;  $\sigma_3$  — среднеквадратичная ошибка преобразования «свет—сигнал»;  $\sigma_4$  — среднеквадратичная ошибка измерения амплитуды сигнала на осциллографе.

Поскольку в основе метода Фуко—Филберта лежит исследование светового потока, отраженного от поверхности зеркала, то для повышения точности метода неоднородности освещения исследуемой поверхности источником света должны быть сведены до минимума. В случае применения ламп с ленточным телом накала (типа СИ-100-6, СИ-300-10) неоднородности потока составляют менее 1%, в случае использования ламп ДРШ-100 и ДРШ-250 неравномерности освещения поверхности устранялись путем применения молочных стекол МС-13 и МС-15, которые по своим характеристикам приближаются к ламбертовским рассеивателям.

Дополнительным источником погрешностей может быть различие коэффициентов отражения отдельных участков поверхности зеркала, вызванное ее загрязнением, поэтому перед исследованиями поверхность зеркала необходимо тщательно промывать спиртом-ректификатом.

С учетом всех названных факторов среднеквадратичные ошибки измерений составляют 15—20%.

## Выводы

Разработана усовершенствованная аппаратура для применения метода Фуко—Филберта при исследовании крупной астрономической оптики.

Оперативно и в количественной форме можно получать два вида информации об исследуемой оптической системе:

а) карту нормальных уклонений поверхности зеркала, с помощью которой можно немедленно вносить коррективы в технологический процесс;

б) распределение энергии в кружке рассеяния; эта величина является важнейшей характеристикой зеркала с точки зрения его использования при астрономических наблюдениях.

В заключение приносим глубокую благодарность Л. А. Арцимовичу, Е. В. Трушину, В. А. Минину, М. М. Богородскому, А. Н. Макарову, И. М. Копылову, Б. К. Иоаннисиани, Г. И. Амуру, В. А. Иванову, В. А. Шестакову, М. А. Уханову за помощь в организации работ и поддержку эксперимента, В. И. Синянскому, А. И. Самойлову, Н. Н. Усаченко, В. И. Токареву, Н. И. Бобкову — за изготовление отдельных узлов прибора, И. В. Ушмаевой, Е. И. Рыжиковой, Т. А. Сухаревой, В. П. Корниенко, Г. С. Шведовой, В. М. Чурбановой, Е. А. Садиной — за помощь в обработке и оформлении экспериментальных результатов.

## Литература

1. M. Philbert, *Optica Acta*, 14, No. 2, 169, 1967.
2. Г. Г. Слюсарев. *Геометрическая оптика*. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1946.
3. А. М. Богудлов, Э. А. Витриченко, Э. Б. Гажур, О. А. Евсеев, М. М. Кононов. Опыт исследования 2,6-метрового сферического зеркала модифицированным методом Фуко. М., 1973.