

## АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

И.Г. Половцев, Г.В. Симонова

УДК 681.7.784

### О ВЛИЯНИИ ОСТАТОЧНЫХ АБЕРРАЦИЙ ПРИБОРА НА КАЧЕСТВО КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

При изготовлении оптических антенн для задач атмосферной оптики большое значение имеет качество изготовления оптических деталей. В работе рассмотрены контрольно-измерительные приборы (теневого и интерферометр), в которых устранено влияние остаточных aberrаций на качество контроля. Эти устройства применяются для контроля поверхностей оптических антенн с большим относительным отверстием.

В ряде задач оптического зондирования атмосферы необходимо использовать высококачественные оптические антенны, так как качество оптики определяет погрешность измерения параметров. Это касается приборов, работающих в режиме как интегральных измерений, например, в условиях малой освещенности фотодетектора, так и дифференциальных, анализирующих структуру фокального пятна [1]. Погрешность измерения соответствующих параметров атмосферы, обусловленная остаточными aberrациями оптической системы, носит случайный характер и не может быть устранена предварительной калибровкой [1]. Наиболее конструктивный выход из этого положения — изготовление высококачественной оптики.

Неотъемлемой частью технологического процесса изготовления оптических деталей является тщательный контроль качества изготовления. При разработке схемы контроля, а именно контрольно-измерительной аппаратуры, следует особое внимание уделять влиянию остаточных aberrаций контрольного прибора на результаты измерений. Данное положение касается всех оптических измерений, а в особенности контроля деталей для задач атмосферной оптики.

Дело в том, что лидарные антенны, достаточно крупногабаритны (150—600 мм) и используются только в стационарных условиях, поэтому перед конструкторами стоит задача — уменьшить их массогабаритные характеристики. Эту задачу решают путем применения в лидарах светосильных оптических деталей с относительным отверстием от 1:1 до 1:4. В процессе контроля такой оптики приходится иметь дело с большими апертурными углами анализируемых волновых фронтов. Естественно, что влияние остаточных aberrаций контрольно-измерительного прибора в этом случае особенно велико [2].

В данной работе представлены результаты анализа известных оптических схем для контроля вогнутых сфер.

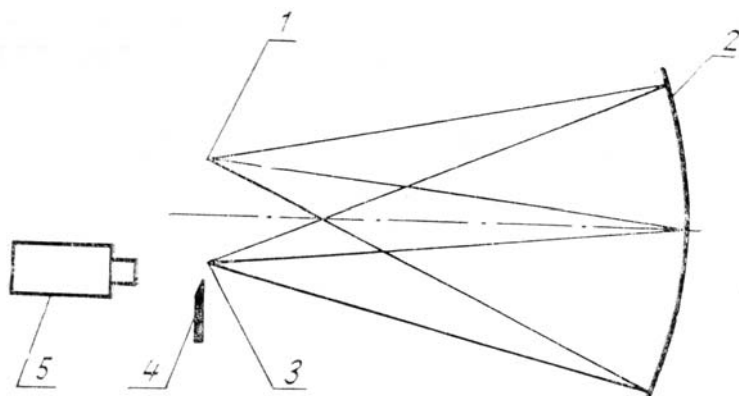


Рис. 1. Схема Фую для исследования вогнутых сфер: 1 — точечный источник света; 2 — контролируемая сфера; 3 — изображение источника света; 4 — пространственный фильтр — нож Фую; 5 — TV-камера

#### 1. Теневой прибор

Схема Фую для исследования вогнутых сфер приведена на рис. 1. Точечный источник света 1 освещает контролируемую деталь — сферу 2, которая формирует изображение источника 3. Вблизи изображения 3 устанавливается пространственный фильтр 4. При введении фильтра 4 в пучок лучей вблизи фокуса 3 фильтр вносит такие изменения в пространственно-частотный спектр волнового фронта, сформированного деталью 2, что aberrации волнового фронта визуализируются в виде плутонового рельефа — теневой картины 3. Чаще всего в качестве пространственного фильтра используется экран с заточенным краем — нож Фую. В этом случае фотометрический профиль теневой кар-

тины, проходящий через оптическую ось в направлении, перпендикулярном лезвию ножа, с точностью до постоянного множителя равен поперечной aberrации волнового фронта (так называемый метод Филбера [3]). Д.Д. Максудовым [4] показано, что с целью повышения освещенности теневой картины вместо точечного может быть использован линейчатый источник, параллельный лезвию ножа.

В теневом приборе Фуко-Филбера источник света и его изображение разделены с целью смещения анализируемого пучка относительно освещающего. Это разделение и является источником остаточных aberrаций теневое прибора. Различают несколько вариантов исполнения узла развязки (рис. 2).

Понятно, что внеосевые схемы вносят в контролируемый волновой фронт aberrацию, обусловленную внеосевым падением освещающего пучка на сферическое зеркало [2], а схемы со светоделительной пластиной — aberrацию, обусловленную прохождением пучка в наклонной плоскопараллельной пластине [2]. Численный анализ вышеприведенных схем с точки зрения остаточных aberrаций может быть легко выполнен путем расчета волновых aberrаций для точечного источника. Так, в табл. 1 приведены результаты вычислений по программе STRAHLE на ЕС=1055 для вогнутого сферического зеркала с параметрами  $D/f' = 1/1$ , где  $D$  — диаметр контролируемой сферы,  $f'$  — фокусное расстояние.

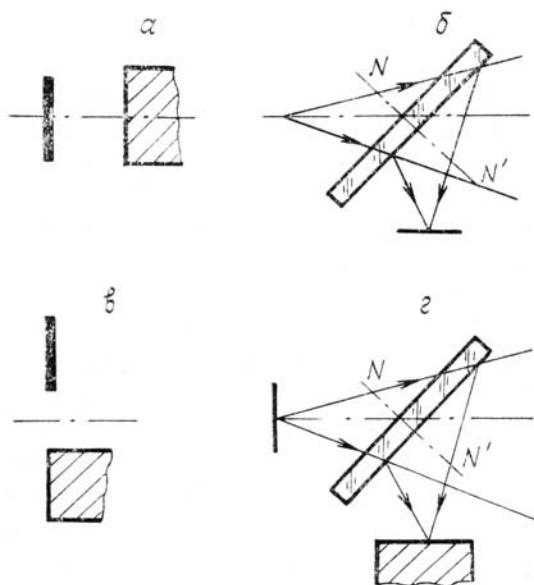


Рис. 2. Варианты исполнения узла развязки: внеосевые схемы:  $a$  — фотометрирование производится в меридиональном сечении,  $b$  — фотометрирование — в сагитальном сечении; схема со светоделительной пластиной:  $c$  — фотометрирование в меридиональном сечении,  $d$  — фотометрирование в сагитальном сечении

Таблица 1

Зависимость остаточной волновой aberrации теневое прибора от его оптической схемы

Внеосевой вариант	Максимальная волновая aberrация в сагитальном сечении (мкм)	Максимальная волновая aberrация в меридиональном сечении (мкм)	
		в правой полуплоскости	в левой полуплоскости
0,5	$-0,1 \cdot 10^{-9}$	$-0,2 \cdot 10^{-3}$	$-0,19 \cdot 10^{-3}$
1	$-0,3 \cdot 10^{-8}$	$-0,8 \cdot 10^{-3}$	$-0,76 \cdot 10^{-3}$
2,5	$-0,1 \cdot 10^{-6}$	$-5,24 \cdot 10^{-2}$	$-4,6 \cdot 10^{-2}$
5	$-0,2 \cdot 10^{-5}$	-0,022	-0,017
10	$-0,3 \cdot 10^{-4}$	-0,099	-0,059
Полупрозрачная пластина $d = 2,5$ мм $L = 30$ мм	-0,095	1,917	-2,192

Анализ табл. 1 показывает, что наименее приемлемой является схема со светоделительным зеркалом. При одной и той же остаточной aberrации конструктивно более выгодной является схема рис. 2, в, поскольку позволяет значительно разнести щель и нож. Следует отметить, что малая aberrация в каком-то сечении не исключает плохой теневой картины в целом. При больших относительных отверстиях контролируемой детали будет наблюдаться «поворот ножа», размытие теневой картины на краю детали и т.д. Тем не менее сечение, перпендикулярное плоскости ножа и проходящее через центр детали, будет давать верную картину. Следовательно, метод Филбера более эффективен.

## 2. Неравноплечий интерферометр

Схема неравноплечевого интерферометра для контроля вогнутых сфер приведена на рис. 3.

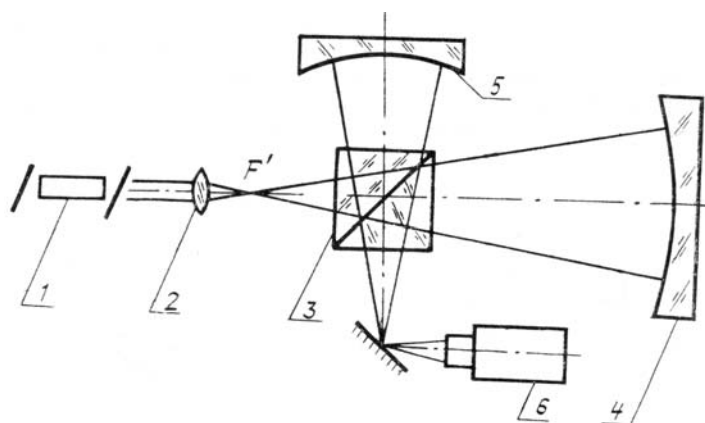


Рис. 3. Оптическая схема неравноплечевого интерферометра: 1 — лазер; 2 — микрообъектив; 3 — светоделительный кубик; 4 — контролируемое зеркало; 5 — эталонное зеркало; 6 — TV-камера

Лазер 1 и микрообъектив 2 формируют точечный источник света таким образом, что контролируемое 4 и эталонное 5 зеркала освещаются из центра кривизны. В качестве светоделителя в схеме используется кубик 3, с помощью которого производится разделение и совмещение волновых фронтов для образования интерференционной картины. Уравнение интерференционной картины имеет вид [5]

$$I(x,y) = a_s^2(x,y) + a_p^2(x,y) - 2a_s^{(x,y)}a_p^{(x,y)} \cos(\varphi_s^{(x,y)} - \varphi_p^{(x,y)}), \quad (1)$$

где  $I$  — интенсивность света в плоскости интерференционной картины;  $a_s$ ,  $a_p$  — амплитуды эталонного и рабочего волновых фронтов;  $\varphi_s$ ;  $\varphi_p$  — их фазы.

Наличие плоскопараллельной пластины-кубика в гомоцентрическом пучке лучей вносит в волновые фронты эталонной и рабочей ветвей сферическую aberrацию, величина которой существенно возрастет при увеличении апертуры контролируемого зеркала. При одинаковой остаточной aberrации в обеих ветвях ее величина не имеет значения, поскольку в уравнение (1) входит разность фаз интерферирующих пучков.

Таблица 2

Влияние длины рабочей ветви на разность волновых aberrаций

$R_{p.з}$ , мм	—60	—80	—1500	—3000	—10000
$W(R_{p.з})$ , мкм	—7,459	—7,508	—7,65	—7,654	—7,657
$\Delta W = W(R_{p.з}) - W(80)$	0,079	0	—0,142	—0,146	—0,149

Такая ситуация наблюдается при одинаковых длинах плечей интерферометра. При сильно различающихся длинах ветвей ситуация меняется. В табл. 2 приведены результаты расчета величины волновой aberrации в рабочей ветви  $W(R_{p.з})$  при изменении ее длины и разницы волновых aberrаций  $\Delta W$  рабочей и эталонной ветви. Ниже даны размеры оптических элементов интерферометра:

размер грани кубика из стекла К8,  $c$  — 30 мм;  
 расстояние от точки  $F$  до кубика  $d$  — 35,2 мм;  
 радиус кривизны эталонной поверхности  $R_s$  — 80 мм;  
 апертура контролируемой детали  $A$  — 1.

Существенная величина остаточной aberrации, которая может быть отнесена к детали, не позволяет считать данную схему пригодной для контроля высокоапертурных зеркал. Для устранения этого недостатка необходимо изменить оптическую схему таким образом, чтобы в ветвях интерферометра распространялись сферические пучки. Такого эффекта можно достичь введением в оптическую систему компенсатора, имеющего значение сферической aberrации, по величине равное значению сферической aberrации кубика, но с обратным знаком. В качестве такого компенсатора предложена плоско-выпуклая линза 1, приклеенная к светоделительному кубику 2 (рис. 4). Конструктивные параметры компенсатора при толщине кубика 30 мм, изготовленного из стекла К8:  $R_1 = 295,8$ ;  $R_2 = 0$ ;  $d = 7$ .

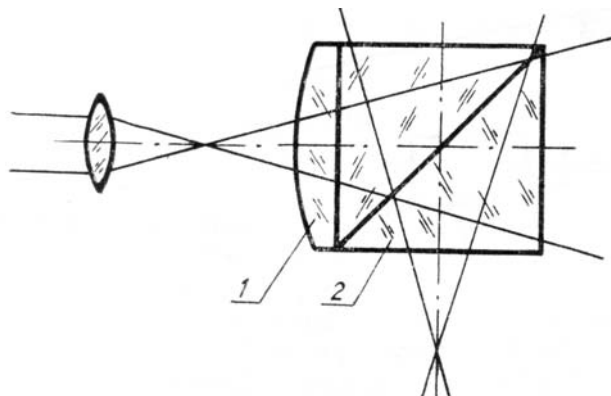


Рис. 4. Оптическая схема светоделительного устройства интерферометра: 1 — компенсатор (плосковыпуклая линза); 2 — светоделительный кубик

В табл. 3 приведены результаты расчета величины волновой aberrации в рабочей ветви  $W(R_{p.э})$  при изменении ее длины и разница волновых aberrаций  $\Delta W$  рабочей и эталонной ветви.

$R_{p.э}, \text{мм}$	-60	-80	-100	-10000
$W(R_{p.э}), \text{мкм}$	-2,870	-2,872	-2,873	-2,879
$\Delta W = W(R_{p.э}) - W(80)$	0,002	0	-0,001	-0,007

Полученные величины  $\Delta W$  дают возможность проконтролировать высокоапертурные сферы с гораздо большей достоверностью. Следует отметить, что схема, приведенная на рис. 4, существенно проще схем, в которых используются специальные микрообъективы, рассчитанные с учетом сферической aberrации кубика [6], или кубик со сферическими гранями [6].

1. Барышников В.Ф., Шапиро И.Я. // III Всес. совещание по атмосферной оптике и актинометрии. (Тезисы докл.). Томск: ТФ СО АН СССР, 1983. Т. II. С. 215.
2. Вычислительная оптика (Справочник)/Под общ. ред. М.М. Русинова. Л.: Машиностроение, 1984. 424 с.
3. Витриченко Э.А. Методы исследования астрономической оптики. М.: Наука, 1980. 352 с.
4. Максудов Д.Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. М.: Наука, 1984. 272 с.
5. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 686 с.
6. Духопел И.И., Феина Л.Г. // ОМП. 1973. № 8. С. 50—58.

СКВ научного приборостроения «Оптика»  
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию  
9 ноября 1988 г.

I. G. Polovtsev, G. V. Simonova. **The Influence of Residual Aberrations of an Instrument on the Quality of Optical Components Control.**

In manufacturing such optical devices as antennas of optical instruments for atmospheric optics research great attention is paid to the quality of optical components. This paper analyzes the use of measuring devices used in optical control (shadow and interferometer) in which the influence of residual aberrations on the control quality is avoided. These instruments are being used in the control of antenna surfaces with large aperture ratio.