

МЕТОД АДАПТАЦИИ СОСТАВНОГО ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА ТЕЛЕСКОПА

Е. Н. СЕЧАК^{1*}, Н. Ф. ЕРХОВА², А. О. КОЛЕСНИКОВ²

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
* evgenysechak@gmail.com

² Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Аннотация. Теоретически исследованы вопросы позиционирования зеркальных элементов составного главного зеркала телескопа. Рассмотрены критерии качества составного зеркала в зависимости от формы поверхности. Представлен алгоритм адаптации поверхности зеркала (позиционирования сегментов составного зеркала). Предложенная система контроля составного зеркала позволяет контролировать пространственное положение сегментов зеркала и позиционировать их.

Ключевые слова: составное зеркало, сегмент зеркала, адаптивная оптика, критерий качества, оптическая передаточная функция

Ссылка для цитирования: Сечак Е. Н., Ерхова Н. Ф., Колесников А. О. Метод адаптации составного главного зеркала телескопа // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 2. С. 87—100. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-87-100.

METHOD FOR ADAPTATION OF SEGMENTED PRIMARY TELESCOPE MIRROR

E. N. Sechak¹, N. F. Erkhova², A. O. Kolesnikov²

¹ ITMO University, St. Petersburg, Russia
* evgenysechak@gmail.com

² P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

Abstract. Several issues of positioning of mirror elements of segmented primary telescope mirror are theoretically investigated. Criteria for the quality of segmented mirror depending on its surface shape are considered. An algorithm for mirror surface adaptation (positioning of composite mirror segments) is presented. The proposed control system for composite mirror makes it possible to control the spatial position of the mirror segments and position them.

Keywords: segmented mirror, mirror segment, adaptive optics, quality criteria, modulation transfer function

For citation: Sechak E. N., Erkhova N. F., Kolesnikov A. O. Method for adaptation of segmented primary telescope mirror. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 2. P. 87—100 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-87-100.

Космические наблюдательные комплексы в основном базируются на оптических системах, что обусловлено возможностью решения многих научно-технических задач при лучших выходных характеристиках оптико-механических устройств. К этим характеристикам относятся, прежде всего, разрешение и массогабаритные параметры аппаратуры. Однако постепенное повышение требований научной и прикладной практики к разрешению, а также проница-

тельной способности (проницающей силе) привело к тому, что оптические системы, изготавливаемые по классическим схемам с использованием современных технологий, подходят к пределу по массогабаритным параметрам. Особенно это относится к наземным астрономическим инструментам [1—4].

В связи с этим в странах, имеющих научные программы, связанные с телескопостроением, ведутся интенсивные поиски путей увеличения входных зрачков объективов телескопов при минимизации увеличения их массы. Первое и очевидное направление поиска — применение новых материалов для корпусов зеркал с высокими механическими характеристиками (металлы, сплавы, композиты) и обеспечение высоких прочностных характеристик конструкций при максимально возможном облегчении. Второе направление — переход к использованию зеркально облегченной оптики с управляемой поверхностью, причем в этой области работы ведутся и над созданием сверхтонких зеркальных элементов, локально изгибаемых с помощью множества приводов, размещаемых с тыльной стороны, и над созданием зеркал, состоящих из относительно небольших жестких элементов, управляемых по положению с помощью приводов для получения и удержания единой оптической поверхности. Наконец, третье направление — переход к нетрадиционным оптическим схемам, основанным на принципах апертурного синтеза, когда общее изображение получается как сумма сфазированных изображений, формируемых несколькими телескопами умеренного размера с жесткими зеркалами.

В настоящей работе представлены исследования в области позиционирования зеркальных сегментов телескопа с составным главным зеркалом.

Существующий уровень развития техники позволяет вывести на орбиту телескопы с диаметром зеркала до 3 м в собранном виде с учетом габаритов конструкции космического аппарата и реализовать теоретическое разрешение, определяемое только диаметром апертуры и рабочей длиной волны (0,05" для телескопа, предназначенного для исследований в видимой части спектра) [5]. Из вышесказанного возникают требования по температурной стабильности и достаточной механической жесткости для обеспечения заданных показателей критерия качества: в частности, среднеквадратичное отклонение волнового фронта, отраженного от зеркала, должно быть менее $0,03\lambda$ (при $\lambda=633,2$ нм) [5].

Оценка прогиба сплошных зеркал, изготовленных из одного и того же материала, показывает, что при единых конструктивных подходах величина деформации прямо пропорциональна четвертой степени их наружного диаметра и обратно пропорциональна второй степени их толщины (если удвоить диаметр зеркала, то для получения той же деформации под действием сил собственного веса необходимо в четыре раза увеличить его толщину, а масса зеркала при этом увеличится в шестнадцать раз [3—5]). Из этого примера ясно, что увеличение диаметра зеркала сопряжено со значительным увеличением его массы, и следовательно, массы всего телескопа. Для космического телескопа такой подход неприемлем. Нужно суметь облегчить конструкцию главного зеркала и при этом получить высокое качество его поверхности при изготовлении на Земле и сохранении его в условиях невесомости.

Использование составных сегментированных зеркал позволяет удовлетворить все основные требования, предъявляемые к конструкции крупногабаритного зеркала как космического, так и наземного базирования. Во-первых, открывается возможность дальнейшего снижения веса зеркала за счет структуры облегчения сегментов. С увеличением размеров при таком отношении диаметра зеркала к толщине вес его будет уменьшаться пропорционально корню квадратному из числа сегментов зеркала. Во-вторых, обеспечивается требуемая жесткость зеркала (так как жесткость одного элемента будет эквивалентна жесткости всех элементов составного зеркала). В-третьих, температурная стабильность составного зеркала по площади всех сегментов становится выше. В-четвертых, достигается необходимое качество изображения телескопической системы в целом за счет коррекции формы поверхности зеркала с допусками, обеспечивающими дифракционный предел оптической системы. В этом слу-

чае требования высокой точности обработки предъявляются к отдельным элементам зеркала сравнительно небольшого размера, а точность установки достигается за счет применения алгоритма адаптации. Возможный вариант построения алгоритма позиционирования сегментов составного зеркала представлен в настоящей работе.

Выбор формы зеркальных сегментов составного зеркала. При выборе формы элементов в случае применения составных зеркал целесообразно исследовать варианты, представленные на рис. 1. В частности, с точки зрения заполнения полной апертуры зеркала большой интерес представляют зеркала с шестиугольной формой сегмента [6].

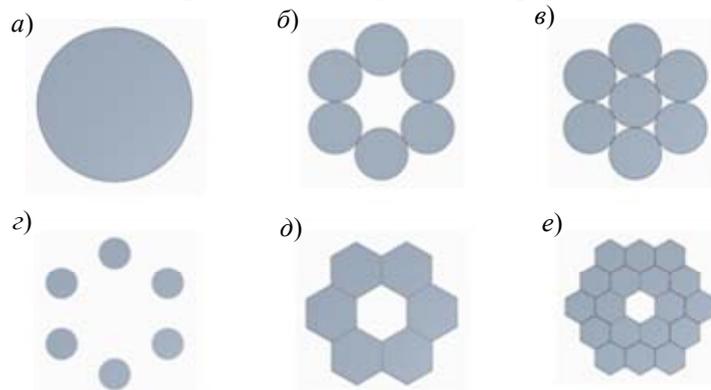


Рис. 1

Количество элементов, и следовательно их размеры, в основном ограничиваются допустимым числом каналов системы управления, определяющих ее сложность, массу, стабильность, надежность и другие свойства [7].

Была исследована зависимость контрастности от среднеквадратического отклонения формы зеркал $W_{\text{скв}}$ для мало- и многоэлементных составных зеркал (см. таблицу). Также были оценены поперечное смещение центра изображения a_{yz} и максимальный угол наклона сегмента при заданном максимальном отклонении формы зеркала ΔW_{max} [8].

Многоэлементное составное зеркало (рис. 1, e) в исследуемом случае имеет два кольца сегментов зеркал, в отличие от малоэлементных (рис. 1, a—d), имеющих только одно кольцо, что приводит к изменению поперечного смещения центра изображения.

Зависимость контрастности от среднеквадратического отклонения формы зеркал

$W_{\text{скв}}$	Малоэлементные		Многоэлементные		Угол наклона сегмента, °	Контраст
	ΔW_{max}	a_{yz} , %	ΔW_{max}	a_{yz} , %		
0	0	0	0	0	0	1
$\lambda/50$	$\lambda/25$	1,6	$\lambda/10$	4,1	$1,96 \cdot 10^{-5}$	0,98
$\lambda/20$	$\lambda/10$	4,1	$\lambda/4$	10,2	$2,87 \cdot 10^{-5}$	0,9
$\lambda/14$	$\lambda/7$	5,8	$\lambda/2,8$	14,6	$6,86 \cdot 10^{-5}$	0,8
$\lambda/10$	$\lambda/5$	8,2	$\lambda/2$	20,5	$9,77 \cdot 10^{-5}$	0,6
$\lambda/8$	$\lambda/4$	10,2	$\lambda/1,6$	25,6	$1,22 \cdot 10^{-4}$	0,4

Форма и количество сегментов зеркала оказывают существенное влияние на качество изображения, в том числе на частотно-контрастную характеристику (ЧКХ), графики которой приведены на рис. 2 (части a—e рисунка соответствуют частям рис. 1, где 1 — меридиональное сечение, 2 — сагиттальное сечение). В случае малоэлементных зеркал с круглой формой сегмента происходит быстрое падение ЧКХ в сагиттальном сечении. В случае малоэлементного зеркала с шестиугольной формой сегмента нет существенной разницы между ЧКХ для сагиттального и меридионального сечений, однако происходит быстрое падение контраста для обоих сечений. Таким образом, было выбрано многоэлементное зеркало с гексагональной формой сегмента. Во избежание влияния зазоров между элементами составного зеркала на качество изображения величина зазора не должна превышать 1 % от общей площади зеркала [9].

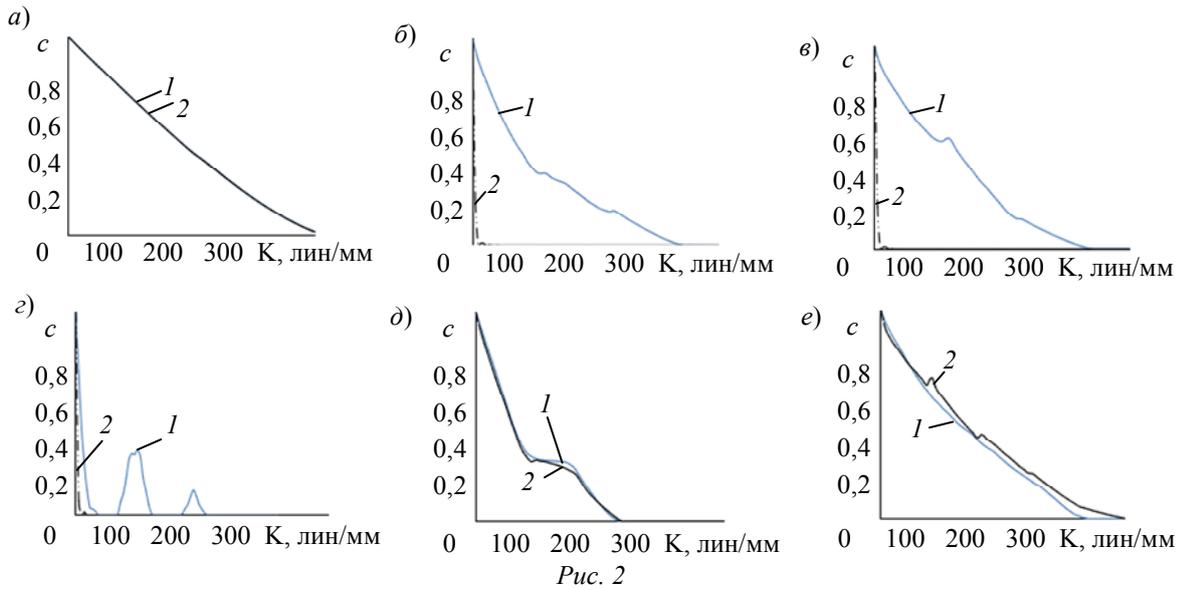


Рис. 2

Для дальнейшего исследования были выбраны сегменты составного зеркала шестиугольной формы, так как потеря энергии излучения из-за зазоров не превышает 1 % по отношению к цельному зеркалу и не вызывает существенной разницы для разрешающей способности в меридиональном и сагиттальном сечениях. Далее для составления алгоритма позиционирования составного зеркала рассчитаем координаты центров сегментов составного зеркала.

Примем сторону составного гексагонального зеркала для расчета равной a_6 (рис. 3, а) и введем радиус описанной R_6 и вписанной окружностей r_6 (рис. 3, б).

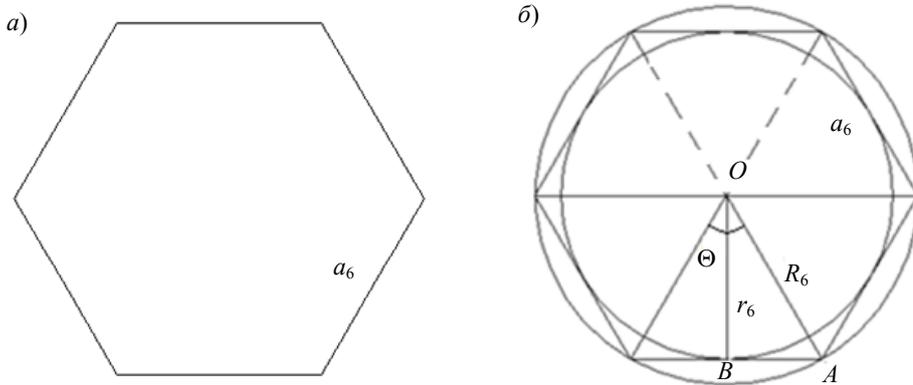


Рис. 3

Угол при вершине каждого из шести равнобедренных треугольников (рис. 3, б) равен $\Theta = \frac{360^\circ}{6} = 60^\circ$.

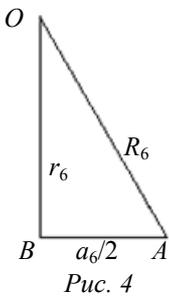


Рис. 4

Выделим из равнобедренного треугольника прямоугольный треугольник OAB (рис. 4).

Угол AOB равен $\alpha = \frac{60^\circ}{2} = 30^\circ$, катет OB является высотой равностороннего треугольника, вписанного в шестиугольник в соответствии с рис. 3, б, поэтому угол OBA равен 90° , тогда угол BAO : $\beta = 180^\circ - (90^\circ + 30^\circ) = 60^\circ$. По теореме Пифагора найдем радиус вписанной окружности:

$$r_6 = \sqrt{R_6^2 - \left(\frac{a_6}{2}\right)^2}.$$

Вычислим радиус описанной окружности:

$$\frac{a_6}{2} = R_6 \cdot \sin \alpha \Rightarrow R_6 = \frac{a_6}{2 \sin \alpha} = \frac{a_6}{2 \sin 30^\circ} = \frac{a_6}{2(1/2)} = a_6, \quad (2)$$

зависимость между радиусами описанной и вписанной окружностей имеет вид:

$$r_6 = R_6 \cdot \cos \alpha \Rightarrow r_6 = R_6 \cos 30^\circ = R_6 \frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (3)$$

Для того чтобы иметь возможность управлять каждым сегментом зеркала, необходимо знать координаты центров этих сегментов, поэтому введем три concentric окружности (рис. 5), что позволит вычислить координаты центров каждого из сегментов в заданном секторе составного зеркала в трехмерном пространстве [10, 11].

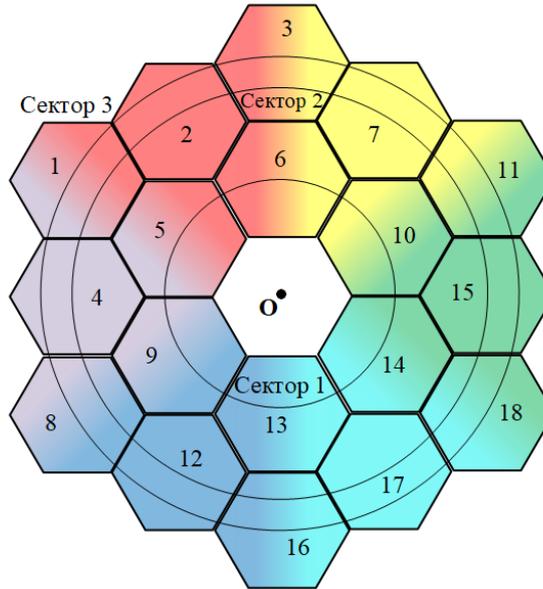


Рис. 5

На рис. 6, а приведены сегменты зеркала, находящиеся в первом круговом секторе (5, 6, 9, 10, 13, 14).

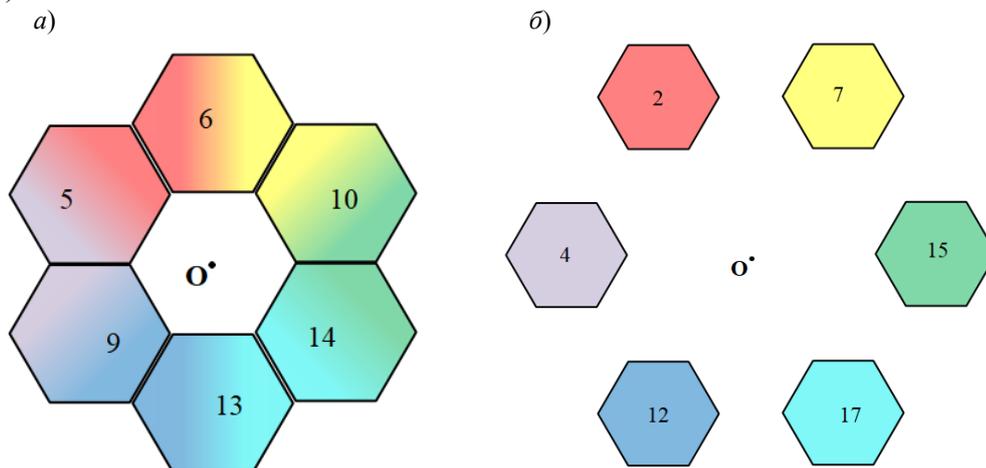


Рис. 6

Используем выражение для нахождения центров сегментов [12]:

$$\begin{cases} x = 2g \cos \alpha \cos \phi, \\ y = 2g \cos \alpha \sin \phi, \\ z = 2g \sin \alpha. \end{cases} \quad (4)$$

Исходя из значений параметров, полученных в соответствии с рис. 3, б и 4, вычислим координаты центров сегментов согласно выражению (4):

$$\begin{cases} x = 2R \left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right) \cos \left(\arcsin \left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right) \right) \cos \phi, \\ y = 2R \left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right) \cos \left(\arcsin \left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right) \right) \sin \phi, \\ z = \sqrt{\left(2R \frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right)^2 \left(1 - \cos^2 \left(\arcsin \left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}} \right) \right) \right)}. \end{cases} \quad (5)$$

Рассмотрим круг № 2 (рис. 6, б), в который укладываются сегменты 2, 4, 7, 12, 15, 17. Углы между центрами сегментов также составляют $\alpha = 60^\circ$, т.е. (120, 60, 0, 300, 240, 180°).

Для отыскания координат сегмента, расположенного во втором секторе, покажем проекцию на плоскость XOZ (рис. 7, а) и вычислим угол отклонения центра сегмента № 2 от вертикали в соответствии с рис. 7, б. Тогда координаты центров сегментов во втором секторе будут находиться из следующего выражения:

$$\begin{cases} x = 2d \cos \rho \cos \phi, \\ y = 2d \cos \rho \sin \phi, \\ z = 2d \sin \rho. \end{cases} \quad (6)$$

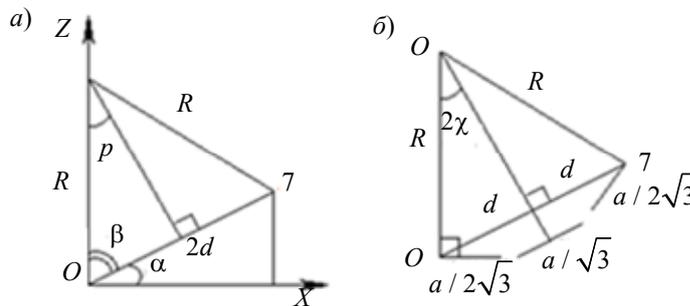


Рис. 7

Из рис. 7, а сторона $d = R \cdot \sin \rho$ и угол $\alpha = 90^\circ - \beta = 90^\circ - (180^\circ - 90^\circ - \rho) = \rho$, а из 7, б

сторона $d = R \sin(1,5\chi)$, угол $\chi = \arcsin \left(\frac{a/\sqrt{3}}{\sqrt{R^2 + (a/\sqrt{3})^2}} \right)$. ϕ — угол до центра каждого из

сегментов в плоскости XOY , т.е. $\phi_8 = 120^\circ$, $\phi_{10} = 60^\circ$, $\phi_{12} = 0$, $\phi_{14} = 300^\circ$, $\phi_{16} = 240^\circ$, $\phi_{18} = 180^\circ$. Из приведенных на рисунках треугольников выведем соотношение для ρ :

$$\begin{cases} \rho = (1,5\chi) \\ d = R \sin \rho \end{cases} \Rightarrow \rho = 2 \arcsin \left(\frac{a/\sqrt{3}}{\sqrt{R^2 + (a/\sqrt{3})^2}} \right). \quad (7)$$

Введем выражение для нахождения координат центров сегментов:

$$\begin{cases} x = 2d \cos \rho \cos \phi = 2R \sin(1,5\chi) \cos \rho \cos \phi, \\ y = 2d \cos \rho \sin \phi = 2R \sin(1,5\chi) \cos \rho \sin \phi, \\ z = 2d \sin \rho = 2R \sin(1,5\chi) \sin \rho. \end{cases} \quad (8)$$

Используя значения параметров, полученных в соответствии с рис. 7, вычислим координаты центров сегментов в соответствии с выражением (8):

$$\begin{cases} x = 2R \sin \left(1,5 \arcsin \left(\frac{a/\sqrt{3}}{\sqrt{R^2 + (a/\sqrt{3})^2}} \right) \right) \cos \left(1,5 \arcsin \left(\frac{a/\sqrt{3}}{\sqrt{R^2 + (a/\sqrt{3})^2}} \right) \right) \cos \phi, \\ y = 2R \sin \left(1,5 \arcsin \left(\frac{a/\sqrt{3}}{\sqrt{R^2 + (a/\sqrt{3})^2}} \right) \right) \cos \left(1,5 \arcsin \left(\frac{a/\sqrt{3}}{\sqrt{R^2 + (a/\sqrt{3})^2}} \right) \right) \sin \phi, \\ z = 2R \sin \left(1,5 \arcsin \left(\frac{a/\sqrt{3}}{\sqrt{R^2 + (a/\sqrt{3})^2}} \right) \right) \sin \left(1,5 \arcsin \left(\frac{a/\sqrt{3}}{\sqrt{R^2 + (a/\sqrt{3})^2}} \right) \right). \end{cases} \quad (9)$$

Рассмотрим круг № 3 (рис. 8), в который укладываются сегменты 1, 3, 8, 11, 16, 18. Углы между центрами сегментов также составляют $\alpha = 60^\circ$, т.е. (90, 30, 330, 270, 210, 150°).

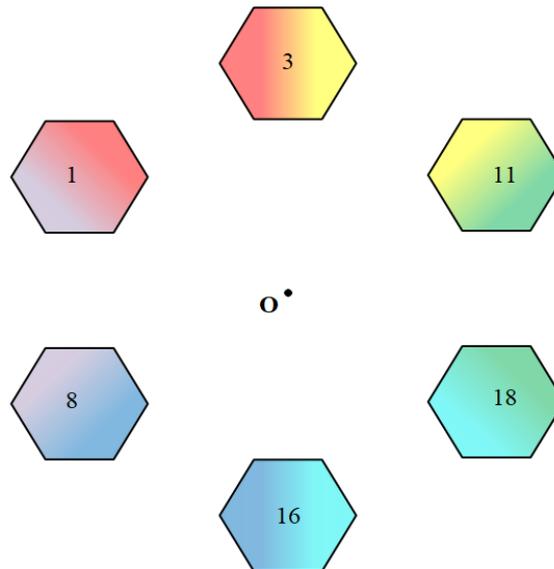


Рис. 8

Для отыскания координат каждого сегмента в трехмерной декартовой системе необходимо рассмотреть рис. 9, а; из рис. 9, б можно определить угол отклонения центра сегмента № 3 от вертикали. В результате расчетов будем иметь следующие выражения для нахождения координат центров сегментов третьего круга.

Для отыскания координат сегмента, расположенного в третьем секторе, покажем проекцию на плоскость XOZ (рис. 9, а) и вычислим угол отклонения центра сегмента № 2 от вертикали в соответствии с рис. 9, б. Тогда координаты центров сегментов во втором секторе будут находиться из следующего выражения:

$$\begin{cases} x = 2f \cos(2\gamma) \cos \phi, \\ y = 2f \cos(2\gamma) \sin \phi, \\ z = 2f \sin(2\gamma). \end{cases} \quad (10)$$

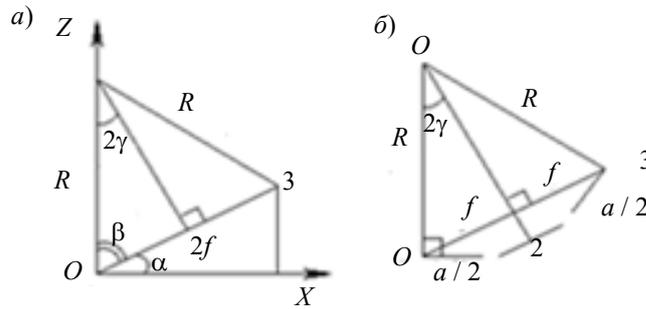


Рис. 9

Согласно рис. 9, а, проекция на горизонтальную плоскость выражается соотношением $2f \cos(2\gamma)$ и угол $\alpha = 90^\circ - \beta = 90^\circ - (180^\circ - 90^\circ - 2\gamma) = 2\gamma$, а из рис. 9, б сторона $f = R \sin(2\gamma)$,

угол $\gamma = \arcsin\left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}}\right)$. ϕ — угол до центра каждого из сегментов в плоскости XOY ,

т.е. $\phi_9 = 90^\circ$, $\phi_{11} = 30^\circ$, $\phi_{13} = 330^\circ$, $\phi_{15} = 270^\circ$, $\phi_{17} = 210^\circ$, $\phi_{19} = 150^\circ$. Из приведенных на рисунках треугольников выведем соотношение для угла 2γ :

$$2\gamma = 2 \arcsin\left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}}\right). \quad (11)$$

Используя значения параметров, полученных согласно рис. 9, вычислим координаты центров сегментов в соответствии с выражением (10):

$$\begin{cases} x = 2R \sin(2\gamma) \cos(2\gamma) \cos \phi = 2R \sin\left(2 \arcsin\left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}}\right)\right) \cos\left(2 \arcsin\left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}}\right)\right) \cos \phi, \\ y = 2R \sin(2\gamma) \cos(2\gamma) \sin \phi = 2R \sin\left(2 \arcsin\left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}}\right)\right) \cos\left(2 \arcsin\left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}}\right)\right) \sin \phi, \\ z = 2R \sin(2\gamma) \sin(2\gamma) = 2R \sin^2\left(2 \arcsin\left(\frac{a/2}{\sqrt{R^2 + (a/2)^2}}\right)\right). \end{cases} \quad (12)$$

Зная координаты центров сегментов, диаметр и фокусное расстояние составного зеркала, можно составить алгоритм позиционирования сегментов составного зеркала.

Способ контроля оптической поверхности составного зеркала. В поле зрения приемника неотъюстированного составного зеркала будет находиться множество изображений точечного источника, создаваемых каждым сегментом зеркала по отдельности. Некоторые сегменты могут строить изображение вне поля зрения камеры. На первом этапе юстировки системы сопоставляются сегменты и изображения источника излучения на детекторе. По очереди (или по нескольку одновременно, но по разным шаблонам) все зеркала „шевелятся“ актуаторами. Зафиксированное изображение приводится к центру поля зрения. Если зафиксировать перемещение ни одного из изображений не удастся, значит, изображение сегмента находится вне поля зрения детектора. Для поиска актуаторы наклоняют сегмент таким образом, чтобы изо-

бражение начало двигаться по расширяющейся спирали. Сканирование продолжается, пока изображение не будет найдено, после чего оно также перемещается в центр поля зрения.

Оптимизация положения сегментов. После того как положения пятен от каждого сегмента зеркала по отдельности совпадут с требуемыми координатами на детекторе, необходимо произвести окончательную юстировку сегментов. Для этого апертура зеркала разбивается на круглые сектора, каждый из которых включает в себя пять примыкающих друг к другу сегментов (рис. 10). Сегменты зеркала, находящиеся на пересечении соседних секторов, принадлежат каждому из этих секторов. Далее открывается один сектор и вычисляются функция рассеяния точки (ФРТ) и оптическая передаточная функция (ОПФ) для идеально отъюстированных сегментов данного сектора и текущего их положения. В качестве минимизируемого при оптимизации функционала рассматривается следующая величина:

$$F = \sum_{i,j} \left| \text{ОПФ}_{i,j\Gamma} - \text{ОПФ}_{i,jЦ} \right|^2, \quad (13)$$

где $\text{ОПФ}_{i,j\Gamma}$ — текущее, а $\text{ОПФ}_{i,jЦ}$ — целевое значение комплексной амплитуды i,j -й пространственной частоты.

При оптимизации следует пользоваться перестраиваемым источником излучения со спектральным диапазоном шириной не менее октавы. Сначала функционал минимизируется для наибольшей длины волны, затем длина волны постепенно уменьшается, что позволяет выявить смещения сегментов вдоль оптической оси, кратные половине длины волны, и компенсировать их. Пусть, для примера, есть два сегмента, смещенные друг относительно друга на расстояние $m\lambda_0/2$ вдоль оптической оси. Тогда в фокусе будет происходить интерференция полей, отраженных от этих двух сегментов пучков, которая в зависимости от длины волны λ перестраиваемого лазера будет приводить то к максимуму, то к минимуму в фокальном пятне:

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 \approx E_1 \left(\exp\left(\frac{2\pi i l}{\lambda}\right) + \exp\left(\frac{2\pi i (l + m\lambda_0)}{\lambda}\right) \right) = \\ &= E_1 \exp\left(\frac{2\pi i \left(l + m\frac{\lambda_0}{2}\right)}{\lambda}\right) \left(\exp\left(-\frac{\pi m i \lambda_0}{\lambda}\right) + \exp\left(\frac{\pi m i \lambda_0}{\lambda}\right) \right) \sim \cos\left(\frac{\pi m \lambda_0}{\lambda}\right). \end{aligned} \quad (14)$$

Поэтому, если сегменты смещены вдоль оптической оси, при перестройке длины волны интенсивность в фокусе будет осциллировать как сумма по сегментам k от $\cos(\text{const}_k/\lambda + \varphi_k)$, и внешний вид ФРТ и ОПФ будет качественно меняться при перестроении длины волны. Когда все сегменты формируют единую поверхность, ФРТ и ОПФ будут сохранять свою форму, изменяя лишь свои размеры, интенсивность в фокусе при этом будет изменяться, без осцилляций [13—15].

После того как длина волны уменьшилась до минимального значения, ее увеличивают чуть более чем в два раза, после чего снова плавно уменьшают до минимума, производя на каждом промежуточном значении оптимизацию положения сегментов. При более чем двукратном увеличении длины волны смещение сегмента вдоль оптической оси в терминах числа полуволн уменьшится вдвое. Оптимизация положения сегментов проводится методом координатного спуска или симплекс-методом и завершается, если функционал не превосходит заданное значение ε . После того как функционал текущего сектора приведен к минимуму, сегменты данного сектора закрываются диафрагмой и открываются сегменты следующего сектора. Два из этих сегментов (входящие в состав предыдущего сектора) уже были выставлены с необходимой точностью, поэтому оптимизация будет затрагивать только положение трех других сегментов сектора. При открытии последнего сектора все сегменты в нем, кроме одного, уже должны формировать единую поверхность зеркала. С выставлением этого сегмента процесс оптимизации завершается [14, 15].

Для примера была произведена численная оптимизация сегментов сектора 1 для сферического зеркала с радиусом кривизны 20 м со стороны шестиугольного сегмента 1 м. Начальные углы отклонения зеркал были такими, чтобы центр светового пятна каждого из сегментов попадал в первый дифракционный максимум первого сектора. Относительный сдвиг сегментов вдоль оптической оси был задан в пределах 5 мкм.

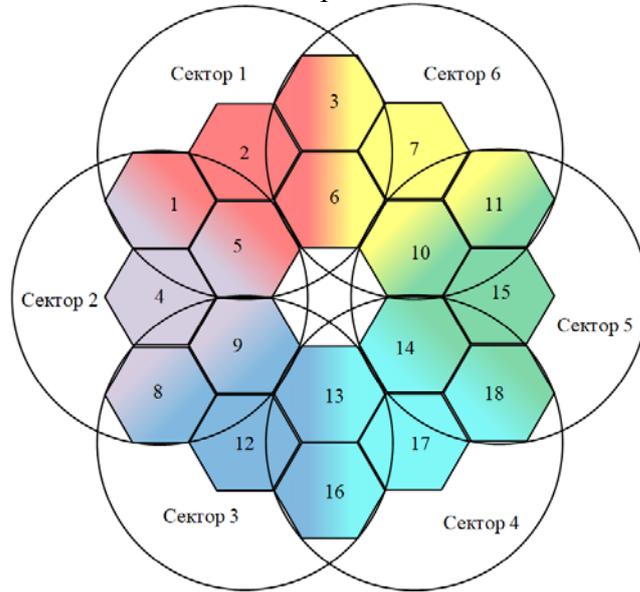


Рис. 10

На рис. 11 приведены ФРТ и ОПФ для случая, когда все сегменты первого сектора этого зеркала находятся в идеальном положении. Левый столбец — ФРТ, сверху линейный, снизу — логарифмический масштаб); в среднем столбце — амплитуда ОПФ–ЧКХ (сверху линейный, снизу — логарифмический масштаб); в правом столбце — фаза ОПФ–ЧКХ. На рис. 12 построены ФРТ и ОПФ для начального (до оптимизации) положения сегментов составного зеркала (обозначения соответствуют рис. 11), а на рис. 13 — разности для начального и идеального положения сегментов первого сектора. Левый столбец — разность ФРТ (сверху в линейном, снизу — в логарифмическом масштабе); средний столбец — модуль разности ОПФ (сверху в линейном, снизу — в логарифмическом масштабе); правый столбец — фаза разности ОПФ. Все графики на рис. 11—13 рассчитаны для длины волны $\lambda = 532$ нм.

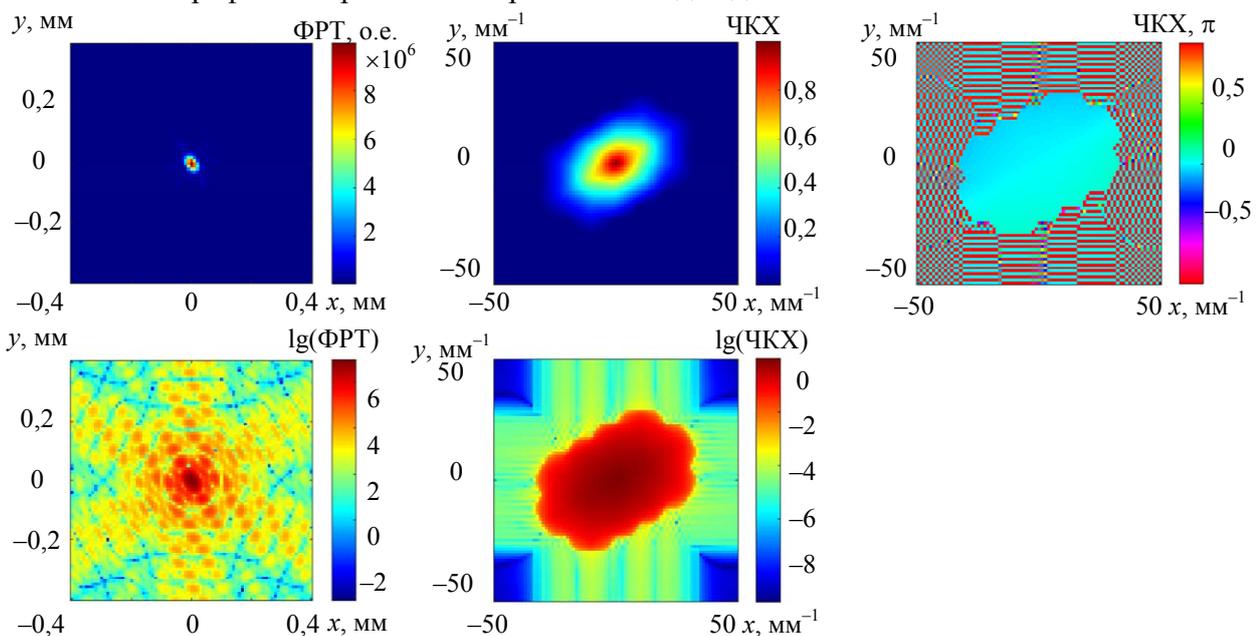


Рис. 11

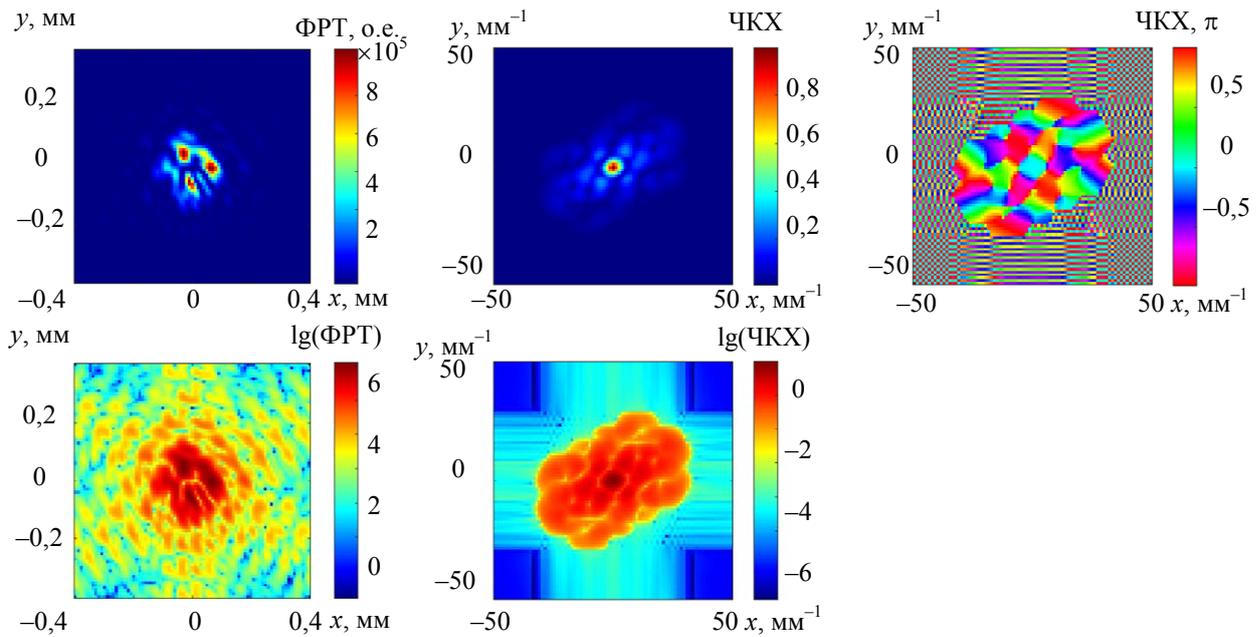


Рис. 12

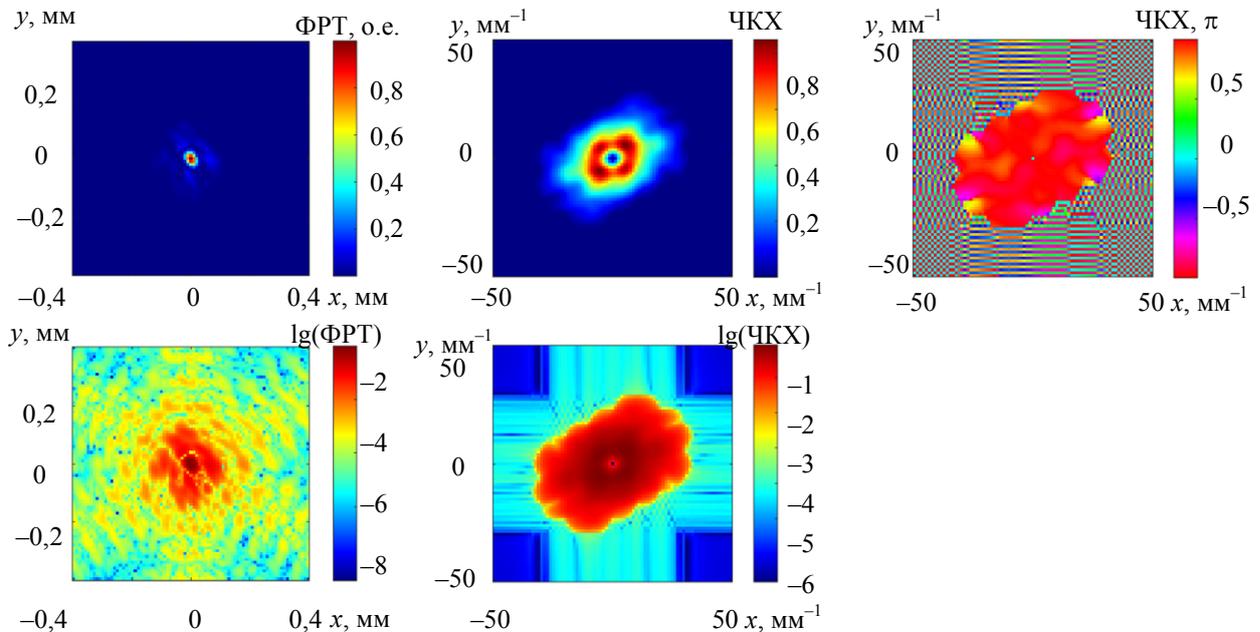


Рис. 13

В начале оптимизации была взята длина волны 1100 нм. Углы поворота сегментов зеркала были зафиксированы, менялись только смещения сегментов 1, 2, 3 и 5 вдоль оптической оси зеркала. Поскольку фокальная перетяжка зеркала достаточно велика по сравнению с длиной волны, смещение шестого сегмента вдоль оптической оси можно считать идеальным, а все остальные сегменты выставить относительно него так, чтобы в итоге все они формировали единую сферическую поверхность. При первых итерациях оптимизации сегменты 1, 2, 3, 5 и 6 выстроились так, что разность их положения вдоль оптической оси относительно идеального с большой точностью составила целое число полуволн. После этого была произведена оптимизация углов наклона всех этих сегментов, пока функционал не составил менее $5 \cdot 10^{-3}$. Углы были зафиксированы и не изменялись. Была взята меньшая длина волны $\lambda = 1060$ нм, и на ней оптимизирован сдвиг сегментов вдоль оптической оси. Далее длина волны в процессе оптимизации постепенно уменьшалась до 532 нм, смещения сегментов вдоль оптической оси при этом составляли одно и то же число полуволн и тоже уменьшались в абсолютном значении.

После оптимизации на 532 нм длина волны снова принимала значение 1100 нм. При этом смещение сегментов вдоль оси зеркала в абсолютном значении практически не менялось, но в два раза уменьшалось число полуволн, соответствующее ему. Таким образом, повторение оптимизации с постепенным уменьшением длины, за которым следует возвращение длины волны в максимальное положение, позволяет сгруппировать сегменты зеркала так, чтобы их смещения вдоль оптической оси отличались от идеального на величину много меньшую, чем половина длины волны. При таком расположении сегментов зеркала ОПФ и ФРТ при перестройке длины волны будут сохранять свою форму. После этого на длине волны 532 нм была произведена финальная оптимизация углов наклона сегментов первого сектора зеркала. Алгоритм позиционирования сегментов зеркала представлен на рис. 14.

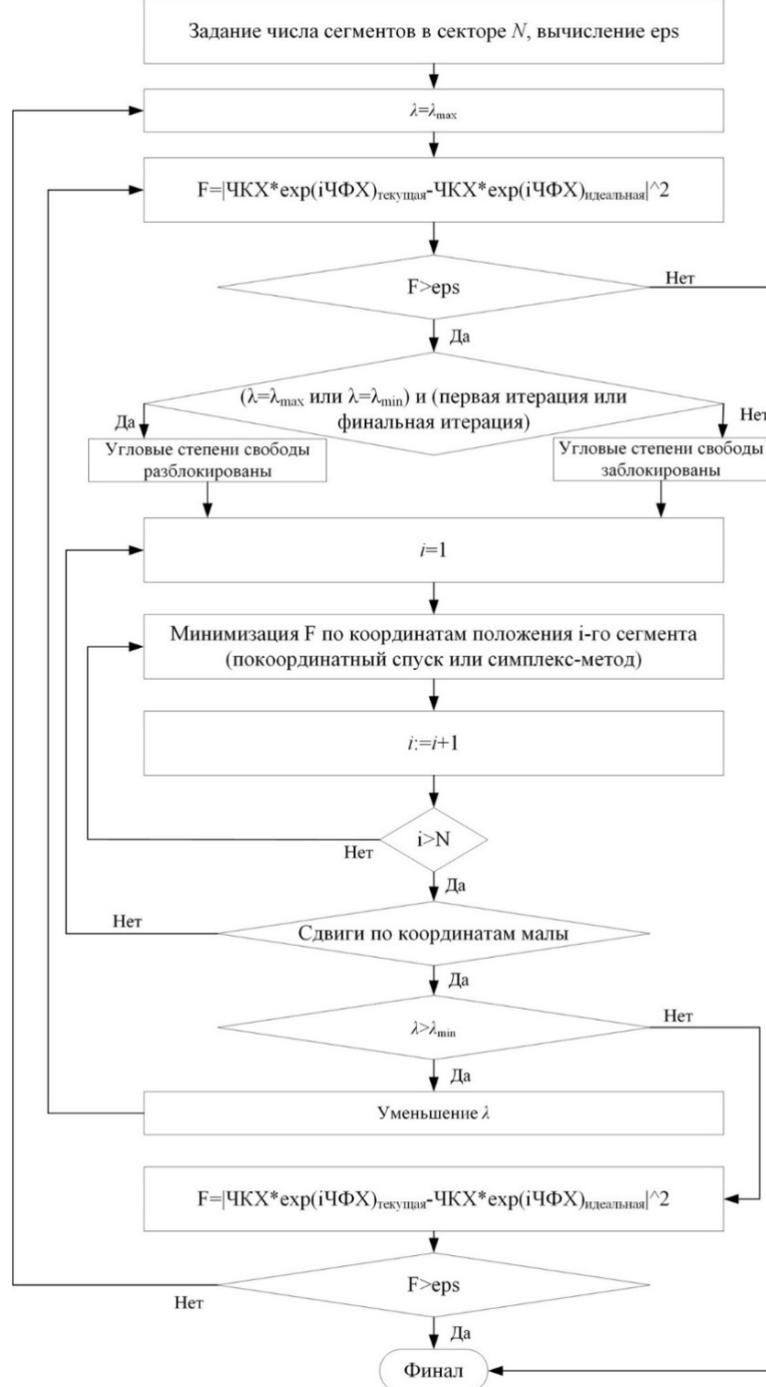


Рис. 14

Вид разностей ФРТ и ОПФ после оптимизации, а также зависимость функционала от номера итерации оптимизации приведены на рис. 15 (правый нижний график отражает поведение функционала в процессе оптимизации. Участки, на которых график убывает, соответствуют оптимизации на фиксированной длине волны, а резкие скачки функционала вверх — изменению длины волны).

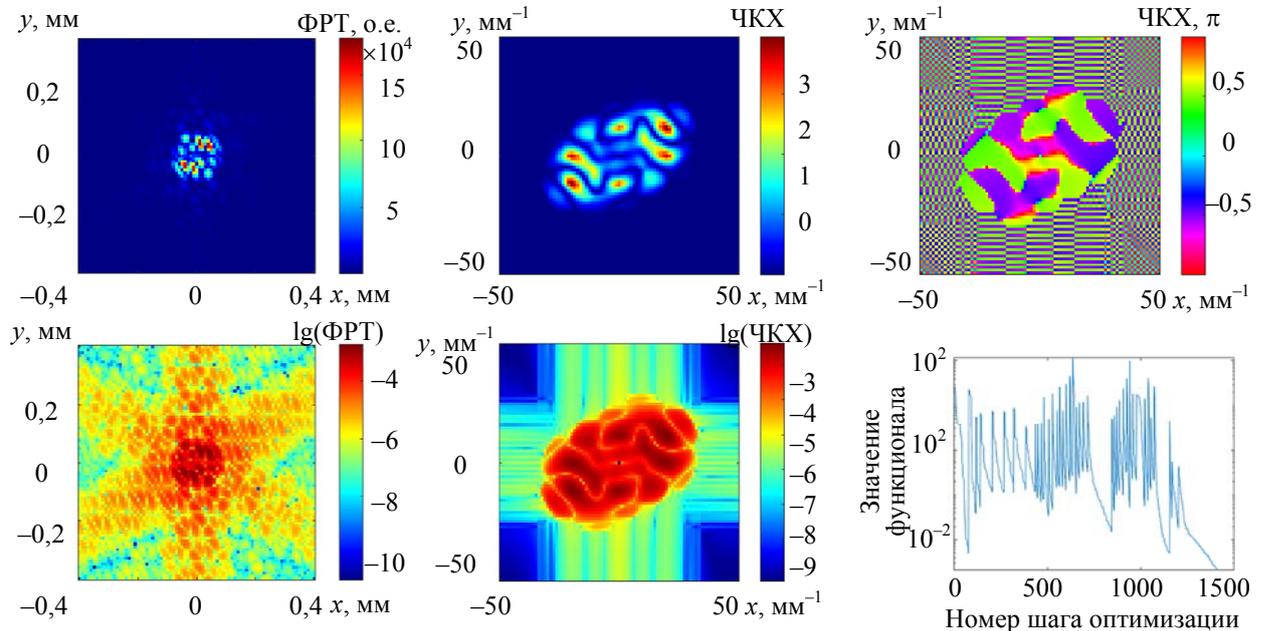


Рис. 15

Заключение. Предложенная система контроля составного зеркала позволяет контролировать пространственное положение сегментов зеркала и позиционировать их. Аналитические расчеты показывают, что функционал выражения (13) позволяет обнаруживать сдвиг сегмента зеркала вдоль оптической оси (на 532 нм) с точностью до $\lambda/25$ и его угловое отклонение — с погрешностью до 10^{-5° (определены из условия, что максимум — по частотам — разности ОПФ_ц и ОПФ_т составляет не более 1 % от максимума ОПФ_ц), что и определяет точность данного метода. Проведение оптимизации показало, что разброс сдвигов сегментов вдоль оптической оси составил 20 нм при диапазоне перестройки λ от 1100 до 532 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолаева Е. В., Зверев В. А., Филатов А. А. Адаптивная оптика. СПб: НИУ ИТМО, 2012. 297 с.
2. Дворкин Б. А., Дудкин С. А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли // Геоматика. 2013. № 2. С. 16—38.
3. Сычев В. В. К вопросу об эффективности крупногабаритных оптических телескопов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 1. С. 101—113.
4. Бакланов А. И. Анализ состояния и тенденции развития систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2010. № 2. С. 80—91.
5. Маламед Е. Р. Конструирование оптических приборов космического базирования. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002. 291 с.
6. Шанин О. И. Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. Резонансная адаптивная оптика. М.: Техносфера, 2013. 296 с.
7. Тербиж В. Ю. Современные оптические телескопы. М.: Физматлит, 2005. 65 с.
8. Аванесов Г. А. Исследование и компенсация измерения координат звезд датчиков ориентации при летной эксплуатации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 1. С. 68—79.

9. Лукин В. П. Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики // УФН. 2014. Т. 184, № 6. С. 599—640.
10. Александров П. С. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. М.: Наука, 2009. 512 с.
11. Беклемисhev Д. В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. М.: Наука, 2015. 445 с.
12. Рабыш А. Ю., Демин А. В. Алгоритм компоновки составных объектов (на примере зеркала) // Научно-технический вестник СПб НИУ ИТМО. 2008. № 58. С. 31—36.
13. Абрамочкин Е. Г., Волостников В. Г. Современная оптика гауссовых пучков. М.: Физматлит, 2010. С. 180—184.
14. Иванова А. В. Компьютерные методы оптимизации оптических систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. 114 с.
15. Иванова Т. В., Вознесенская А. О. Введение в прикладную и компьютерную оптику. Конспект лекций. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 99 с.

Сведения об авторах

- Евгений Николаевич Сечак** — аспирант; Университет ИТМО, Инженерно-исследовательский факультет; E-mail: evgenysechak@gmail.com
- Наталья Феликсовна Ерхова** — Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, лаборатория „Астрофизика высокого разрешения“; мл. научный сотрудник; E-mail: erhovanf@lebedev.ru
- Алексей Олегович Колесников** — Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Отдел спектроскопии отделения оптики; мл. научный сотрудник; E-mail: kolesnikovao@lebedev.ru

Поступила в редакцию 24.09.2021; одобрена после рецензирования 26.10.2021; принята к публикации 30.12.2021.

REFERENCES

1. Ermolaeva E.V., Zverev V.A., Filatov A.A. *Adaptivnaya optika* (Adaptive Optics), St. Petersburg, 2012, 297 p. (in Russ.)
2. Dvorkin B.A., Dudkin S.A. *Geomatics*, 2013, no. 2, pp. 16–38. (in Russ.)
3. Sychev V.V. *Science and Education of Bauman MSTU*, 2015, no. 1, pp. 101–113. (in Russ.)
4. Baklanov A.I. *Vestnik of the Samara State Aerospace University (Vestnik SSAU)*, 2010, no. 2, pp. 80–91. (in Russ.)
5. Malamed E.R. *Konstruirovaniye opticheskikh priborov kosmicheskogo bazirovaniya* (Design of Space-Based Optical Instruments), St. Petersburg, 2002, 291 p. (in Russ.)
6. Shanin O.I. *Adaptivnyye opticheskiye sistemy korrektsii naklonov. Rezonansnaya adaptivnaya optika* (Adaptive Optical Systems for Tilt Correction. Resonance Adaptive Optics), Moscow, 2013, 296 p. (in Russ.)
7. Terebizh V.Yu. *Sovremennyye opticheskiye teleskopy* (Modern Optical Telescopes), Moscow, 2005, 65 p. (in Russ.)
8. Avanesov G.A. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, no. 1(17), pp. 68–79.
9. Lukin V.P. *Physics-USpekhi*, 2014, no. 6(57), pp. 556–592.
10. Aleksandrov P.S. *Kurs analiticheskoy geometrii i lineynoy algebry* (Course in Analytic Geometry and Linear Algebra), Moscow, 2009, 512 p. (in Russ.)
11. Beklemishev D.V. *Kurs analiticheskoy geometrii i lineynoy algebry* (Course in Analytic Geometry and Linear Algebra), Moscow, 2015, 445 p. (in Russ.)
12. Rabysh A.Yu., Demin A.V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2008, no. 58, pp. 31–36. (in Russ.)
13. Abramochkin E.G., Volostnikov V.G. *Sovremennaya optika gaussovykh puchkov* (Modern Gaussian Beam Optics), Moscow, 2010, pp. 180–184. (in Russ.)
14. Ivanova A.V. *Komp'yuternyye metody optimizatsii opticheskikh sistem* (Computer Methods for Optimizing Optical Systems), St. Petersburg, 2010, 114 p. (in Russ.)
15. Ivanova T.V., Voznesenskaya A.O. *Vvedeniye v prikladnuyu i komp'yuternuyu optiku* (Introduction to Applied and Computer Optics), St. Petersburg, 2013, 99 p. (in Russ.)

Data on authors

- Evgeny N. Sechak** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Engineering Research; E-mail: evgenysechak@gmail.com
- Nataliya F. Erkhova** — P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Astro Space Center, Laboratory of High-Resolution Astrophysics; Junior Researcher; E-mail: erhovanf@lebedev.ru
- Aleksey O. Kolesnikov** — P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Spectroscopy Department of Optics Division; Junior Researcher; E-mail: kolesnikovao@lebedev.ru

The article was submitted 24.09.2021; approved after reviewing 26.10.2021; accepted for publication 30.12.2021.