

Ф.Ю. Канев, В.П. Лукин, Н.А. Макенова

Фазирование сегментированного зеркала телескопа

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 28.07.2003 г.

Рассматривается проблема формирования заданной поверхности составным зеркалом телескопа. Для фазирования сегментов разработан итерационный алгоритм, основанный на анализе интерференционной картины излучения, отраженного от зеркала. На каждом шаге итераций текущая интерферограмма сравнивается с эталонной, полученной для поверхности заданной формы. Значение целевой функции управления, минимум которой определяется в алгоритме, снижается с уменьшением различия между интерферограммами. Использование метода обеспечивает формирование плоской отражающей поверхности зеркала, если относительное смещение сегментов не превышает половину длины волны излучения. Показано, что для увеличения диапазона допустимых смещений необходимо введение дополнительных источников излучения со специально подобранными длинами волн. В этом случае динамический диапазон алгоритма может быть увеличен до 30 мкм.

Введение

Фазирование сегментов составного зеркала телескопа — это одна из актуальных проблем современной оптики, возможность решения которой широко обсуждалась в течение последних 10–15 лет. Хотя алгоритмы формирования отражающей поверхности разработаны и описаны в литературных источниках, информации для практической реализации фазирования и построения экспериментального стенда явно не достаточно. Поэтому нами была построена модель оптической системы, позволявшая исследовать особенности процесса компенсации случайных смещений элементов зеркала и сформулировать основные требования к параметрам экспериментальной установки. Еще одной проблемой, решение которой представлено в настоящей статье, является расширение динамического диапазона системы, т.е. увеличение относительного начального смещения, при котором достигается выравнивание сегментов.

1. Алгоритмы фазирования. Краткий обзор литературных источников

Отражающая поверхность первичного зеркала введенных в эксплуатацию наземных телескопов класса 8–10 м (Субару, Кекк, Джемини, ВЛТ) формируется из набора сегментов диаметром около 1 м. По-видимому, это единственно возможная современная технология создания крупногабаритного рефлектора, которая также используется в проектах, находящихся на стадии разработки, например в проектах Большого калифорнийского телескопа класса 30 м, Шведского чрезвычайно большого телескопа (Swedish Extremely Large Telescope) класса 50 м и телескопа ОВЛ (Overwhelmingly Large) класса 100 м.

В качестве примера подобного рефлектора можно привести первичное зеркало телескопа Кекк (Keck) (рис. 1) [1]. Его отражающая поверхность сформирована 36 сегментами, полный диаметр апертуры составляет 10 м, а размер одного элемента 0,9 м. Каждый из сегментов управляется по наклону в двух перпендикулярных плоскостях и смещению.

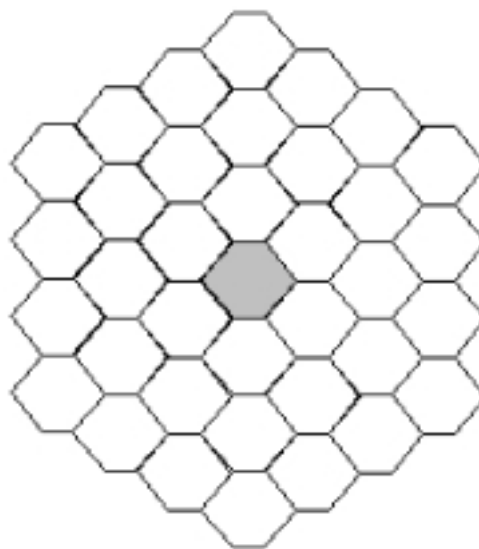


Рис. 1. Сегментированное зеркало телескопа Кекк

При начальной сборке телескопа требуется выполнить последовательность специальных операций, целью которых является точное задание формы поверхности зеркала. В дальнейшем необходимы контроль за поверхностью и в случаях изменения формы — компенсация отклонений.

Анализ проекта ПАМЕЛА (PAMELA — Phase Array Mirror, Extendible Large Aperture), выпол-

ненный авторами [2], показал, что наиболее точно можно компенсировать случайные наклоны сегментов, тогда как при компенсации случайных смещений необходимо обеспечить динамический диапазон в несколько десятков длин волн и точность до десятых долей длины волны, однако это задача, решить которую достаточно сложно.

Один из вариантов фазирования предложен авторами работы [3]. Для получения плоской поверхности зеркала ими использовался рекурсивный алгоритм, целевой функцией которого был контраст интерференционной картины частично когерентного излучения. На основе численного моделирования в статье показано, что в результате использования фазирования удастся скомпенсировать начальные отклонения элементов зеркала около 1 мкм. Дальнейшее увеличение динамического диапазона в данном методе невозможно из-за полной потери контраста интерференции.

Более совершенные методы фазирования предложены и, как отмечают авторы публикаций, внедрены практически в проекте телескопа Кекк [1, 4–6]. Контроль за поверхностью в этом случае выполняется с использованием интерферометрических методов, датчика Гартмана и специальных «краевых» датчиков смещения. В результате достигается компенсация начального смещения сегментов при использовании когерентных источников до половины длины волны и при переходе к некогерентному освещению приблизительно до 300 нм.

В заключение отметим, что в литературных источниках невозможно найти описание метода, применяя которое можно было бы обеспечить реализацию фазирования на практике, сформулировать требования к используемому оборудованию и опираясь на которое с уверенностью можно было бы приступить к проектированию эксперимента и практическому внедрению метода.

2. Предлагаемый алгоритм фазирования. 2π -проблема

В настоящем разделе выполнен теоретический анализ задачи фазирования. Исследование проводилось с целью расширения динамического диапазона возможных смещений. Предполагается, что в Лаборатории когерентной и адаптивной оптики ИОА будет осуществлена экспериментальная проверка предложенного алгоритма, для чего планируется использовать два сегментированных зеркала. Одно из них имеет 4 сегмента, второе – 18.

Для проведения теоретических исследований использовалась модель распространения излучения в линейной среде (вакуум). Когерентные пучки, генерируемые лазерными источниками, отражались от двух соседних элементов и сводились в одну точку с помощью отклоняющих зеркал. Интерфейс программы, написанной для численного моделирования, приводится на рис. 2, где наглядно показан ход лучей и геометрия экспериментальной установки. Моделирование выполнялось для зеркала только с двумя сегментами, так как полагалось, что

увеличение числа элементов отражающей поверхности не внесет принципиальных изменений в процесс фазирования.

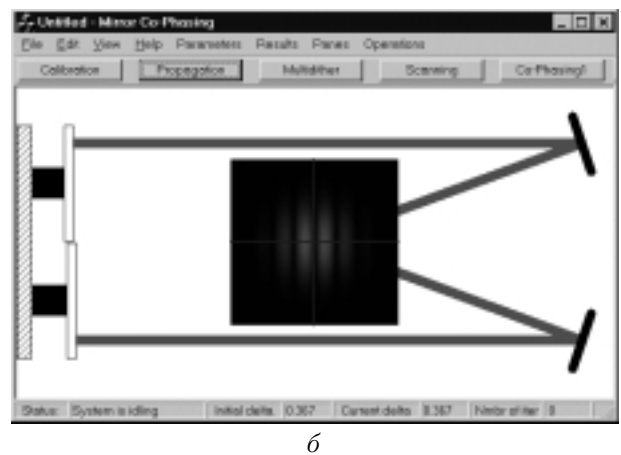
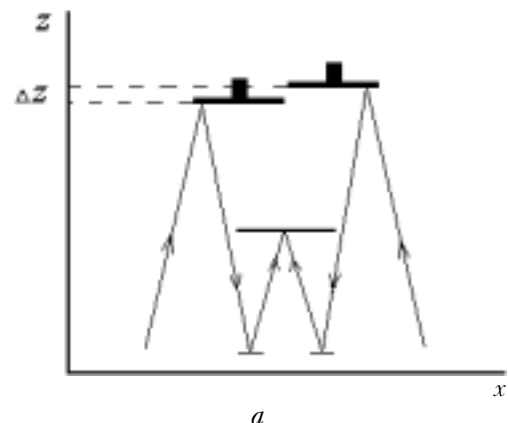


Рис. 2. Фазирование элементов сегментированного зеркала. На рисунке показаны ход лучей в моделируемой оптической схеме (а) и интерфейс программы, используемой для выполнения исследований (б)

В плоскости наблюдения регистрировалась интерференционная картина, интенсивность максимумов и минимумов которой для плоских волн определяется известными выражениями [7]:

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi),$$

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi).$$

Здесь I_1 , I_2 – интенсивности интерферирующих волн; $\Delta\phi$ – фазовый сдвиг, обусловленный разностью хода. Условия максимума интерференционной картины

$$|\Delta\phi| = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$$

и минимума

$$|\Delta\phi| = \pi, 3\pi, \dots$$

Для оптической схемы, представленной на рис. 2,а, сдвиг $\Delta\phi$ может быть определен как

$$\Delta\phi = 2\pi\Delta z/\lambda, \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения; Δz – относительное смещение сегментов. Это означает, что положения

максимумов и минимумов интерференции зависят от относительного смещения сегментов Δz , т.е. полосы сдвигаются при изменении Δz . Поэтому для фазирования использовался алгоритм, в котором по отклонению полос интерферограммы, полученной для смещенных сегментов, от интерферограммы плоской поверхности находился минимум Δz .

Минимум Δz определялся на основе алгоритма апертурного зондирования [8], в котором управление пучками выполнялось только по одной координате:

$$z_{n+1} = z_n + \alpha \frac{dJ(z)}{dz}, \quad (2)$$

где z_{n+1} , z_n — смещение одного из сегментов на итерациях $n+1$ и n ; α — величина итерационного шага; $J(z)$ — целевая функция управления. Полагалось, что второй сегмент неподвижен и для него $z = 0$.

В настоящей задаче в качестве целевой функции управления был выбран критерий

$$J_{\text{cor}}(z) = \frac{\langle I_1(x,y)I_2(x,y) \rangle}{\langle I_1(x,y)I_1(x,y) \rangle}, \quad (3)$$

значение которого определяется корреляцией между интерферограммой на текущем шаге итерационного процесса и эталоном, полученным при нулевом относительном сдвиге элементов. В формуле (3) $I_1(x,y)$ — распределение интенсивности светового поля в эталоне; $I_2(x,y)$ — распределение интенсивности для интерферограммы зеркала со смещенными сегментами. Значение критерия (3) тем больше, чем точнее совпадает с заданной n -я интерференционная картина. При полном совпадении значение $J_{\text{cor}}(z) = 1$ и уменьшается при увеличении различий между картинками.

Для реализации апертурного зондирования возможно также использование энергетического критерия, значение которого пропорционально энергии излучения, попадающего в пределы узкой полосы в центре плоскости наблюдения. Проведенные нами численные эксперименты показали, что введение подобного критерия не изменяет радикально точность и быстродействие разработанного алгоритма и не приводит к решению 2π -проблемы.

На начальном этапе исследований фазирование сегментов осуществлялось на длине волны $\lambda = 0,8$ мкм, т.е. приблизительно равной длине волны красного света.

Проведенные численные эксперименты показали, что сходимость алгоритма фазирования определяется начальным Δz , а именно: при $\Delta z < \lambda/2$ полученная в результате управления поверхность зеркала является плоской ($\Delta z = 0$), при $\Delta z > \lambda/2$ апертурное зондирование приводит к увеличению относительного смещения сегментов.

Данные, с большей детализацией характеризующие компенсацию начального смещения элементов зеркала, представлены на рис. 3 и 4, где показано изменение критерия $J_{\text{cor}}(z)$ и относительного

смещения сегментов Δz в процессе апертурного зондирования. Можем видеть, что в обеих рассматриваемых ситуациях критерий $J_{\text{cor}}(z)$ возрастает по совершенно идентичным кривым, тогда как смещение элементов в одном случае увеличивается, в другом — уменьшается.

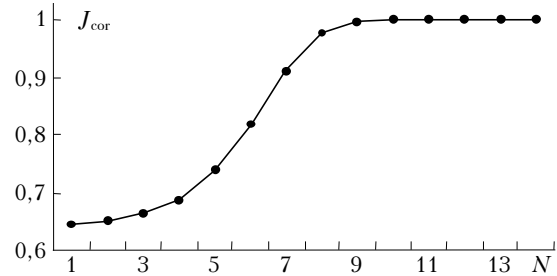


Рис. 3. Изменение корреляционного критерия фокусировки J_{cor} при апертурном зондировании (начальные сдвиги сегментов задавались равными $\Delta z = 0,367$ и $0,433$ мкм; длина волны $\lambda = 0,8$ мкм, в обоих случаях кривые совпали). N — номер итерационного шага

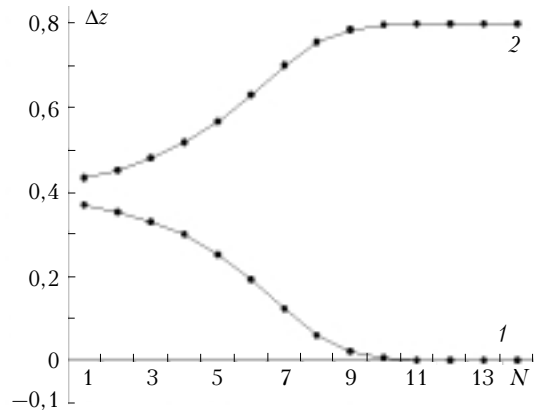


Рис. 4. Изменение относительного смещения сегментов зеркала Δz в процессе апертурного зондирования (длина волны $\lambda = 0,8$ мкм): кривая 1 — начальный сдвиг $\Delta z = 0,367$ мкм; кривая 2 — $0,433$ мкм. N — номер итерационного шага

Объяснить рис. 3, 4 возможно с использованием уравнения (1), согласно которому относительный сдвиг сегментов на одну длину волны приводит к фазовому сдвигу пучков на 2π . Известно [7], что при таком фазовом набеге интерферограмма не изменяется, т.е. текущее распределение светового поля будет равно эталонному, а критерий (3) — единице. Минимум критерия соответствует сдвигу $\lambda/2$, справа и слева от этой точки расположены два совершенно одинаковых максимума. Алгоритм апертурного зондирования смещает сегменты в сторону левого максимума ($\Delta z \rightarrow 0$), если начальный сдвиг меньше $\lambda/2$, и в сторону правого ($\Delta z \rightarrow \lambda$), если начальное $\Delta z > \lambda/2$. Поэтому на рис. 4 результирующее смещение в первом случае равно нулю, во втором — $0,8$ мкм.

Приведенное выше описание процесса управления показывает, что в данной задаче возникает так называемая 2π -проблема, которая ограничивает максимально допустимый начальный сдвиг сегмен-

тов до значения $\lambda/2$, а реально до еще меньших значений, так как измерения критерия имеют конечную точность, и при $\Delta z \approx \lambda/2$ появляется область неопределенности, попадая в которую алгоритм с одинаковой вероятностью дает результирующие значения смещений ноль или λ .

3. Расширение динамического диапазона алгоритма

Расширение допустимого диапазона начальных смещений возможно при введении дополнительной длины волны в алгоритм управления. Так, значения критерия J_{cor} , задаваемого уравнением (3), вычисленные при изменении относительно сдвига сегментов для длин волн $\lambda = 0,6$ и $0,8$ мкм, приводятся на рис. 5.

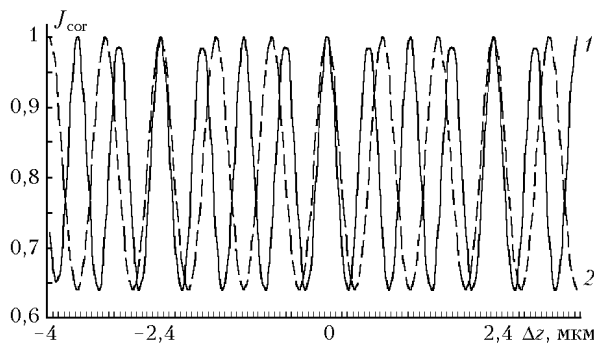


Рис. 5. Зависимости корреляционного критерия J_{cor} от относительного смещения сегментов зеркала Δz : кривая 1 — $\lambda = 0,6$, кривая 2 — $0,8$ мкм

Кривые 1, 2 получены следующим образом: задавалось малое смещение сегмента, регистрировались интерферограммы на двух длинах волн, сравнивались текущие интерферограммы с эталоном, вычислялись два значения критерия J_{cor} , затем снова задавалось малое смещение, процесс выполнялся для всего заданного интервала изменений координаты z .

Рис. 5 показывает, что физический сдвиг сегментов на одинаковую величину дает для различных длин волн различный фазовый сдвиг, поэтому максимумы критериев совпадают только при $\Delta z = 0$ и $\Delta z = 2,4$ ($-2,4$) мкм. Заметим, что $2,4$ — это наименьшее число, делящееся без остатка на $0,6$ и на $0,8$, фазовые сдвиги в этом случае будут соответственно 8π и 6π . Для этих точек интерферограммы совпадают с эталонными. В остальных точках максимумы J_{cor} на двух длинах волн отличны. Например, для $\Delta z = 0,8$ мкм $J_{\text{cor}} = 1$ для красного цвета, тогда как для $\lambda = 0,6$ мкм $J_{\text{cor}} < 1$ и интерферограммы различны.

Данная особенность позволяет построить следующий итерационный алгоритм фазирования. В начальный момент апертурное зондирование отключено, выполняется изменение относительного положения сегментов в пределах допустимого диапазона смещений. На каждом шаге регистрируется интер-

ференционная картина для двух длин волн излучения, и вычисляются критерии J_{cor1} и J_{cor2} по каждой из картин. Приблизительное равенство J_{cor1} и J_{cor2} означает, что алгоритм находится в области глобального максимума, здесь сканирование прекращается. Конечная величина шага смещения не позволяет точно найти положение экстремума, поэтому в точке прекращения сканирования целесообразно включить алгоритм апертурного зондирования, который с высокой точностью обеспечивает определение максимума. Применение алгоритма иллюстрируется на рис. 6 и 7.

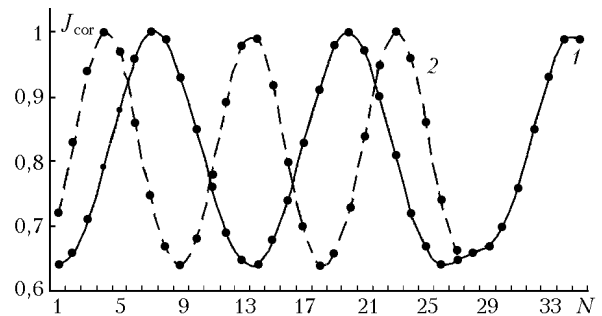


Рис. 6. Изменение корреляционного критерия J_{cor} в алгоритме фазирования сегментов зеркала: кривая 1 — $\lambda = 0,8$, кривая 2 — $0,6$ мкм

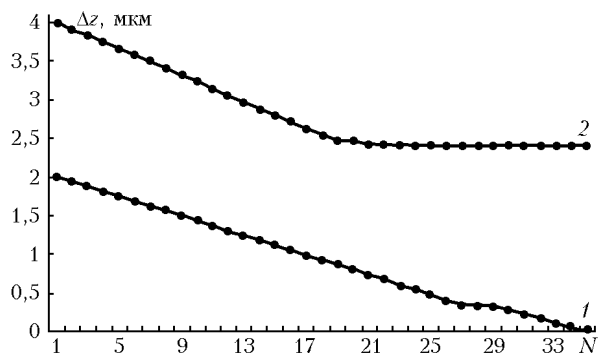


Рис. 7. Изменение относительного смещения сегментов зеркала в алгоритме фазирования: кривая 1 — начальное смещение сегментов $2,0$ мкм, кривая 2 — $4,0$ мкм

Сканирование выполняется на двух длинах волн, на 27-й итерации отличие критериев становится достаточно малым (см. рис. 6), сканирование завершается, и включается алгоритм апертурного зондирования, выполняемый на длине волны $0,8$ мкм. Полностью управление прекращается в максимуме целевой функции. Соответствующее изменение относительного смещения сегментов Δz приводится на рис. 7, кривая 1. Начальное смещение было 2 мкм, в результате управления получено смещение, приблизительно равное нулю. Максимально допустимое отклонение, при котором достигается фазирование, составило в этом алгоритме $2,34$ мкм. При большем начальном смещении (4 мкм, кривая 2 на рис. 7) результирующий сдвиг сегментов равен $2,4$ мкм, что соответствует точке совпадения критериев. Таким образом, введение второй длины волны в алгоритм позволило существенно увеличить

диапазон отклонений, в котором осуществляется фазирование зеркала (от 0,36 до 2,34 мкм).

Дополнительное расширение диапазона достигается подбором длин волн интерферирующих пучков и введением третьей длины волны. Данные, характеризующие допустимые интервалы отклонений, помещены в таблице.

Допустимые интервалы отклонений			
λ_1 , мкм	λ_2 , мкм	λ_3 , мкм	Δz , мкм
0,8	—	—	0,36
0,6	—	—	0,26
0,6	0,8	—	2,34
0,7	0,8	—	5,55
0,6	0,7	0,8	33,4

Примечание. Δz — максимально допустимое смещение, при котором возможно фазирование поверхности зеркала; λ_i — длины волн, на которых выполняется управление.

Так, при $\lambda_1 = 0,7$ и $\lambda_2 = 0,8$ мкм наименьшее число, делящееся без остатка на эти длины волн, равно 5,6, и максимальное компенсируемое смещение сегментов 5,55 мкм.

Наконец, радикальное увеличение диапазона возможно с введением третьей длины волны. Численные эксперименты показали, что при $\lambda_1 = 0,6$, $\lambda_2 = 0,7$ и $\lambda_3 = 0,8$ мкм фазирование осуществляется при начальном отклонении $\Delta z = 33,4$ мкм.

F. Yu. Kanev, V. P. Lukin, N. A. Makenova. Phasing algorithm for segmented mirrors.

This paper considers the problem of forming a preset surface by a segmented mirror in a telescope. An iteration algorithm based on analysis of the interference pattern of the radiation reflected from the mirror is used for phasing of mirror segments. At every iteration step, the current interferogram is compared with the reference one obtained for the surface of the preset shape. The value of the goal control function, whose minimum is determined in the algorithm, decreases with the decreasing discrepancy between the interferograms. This technique provides for formation of the plane reflecting surface of the mirror, if the relative displacement of the segments does not exceed the half wavelength. It is shown that to extend the range of acceptable displacements, it is necessary to introduce additional sources of radiation with the specially chosen wavelengths. In such a case, the dynamic range of the algorithm can be increased up to 30 μm .

В целом представленные результаты позволяют заключить, что разработанный алгоритм фазирования поверхности сегментированного зеркала имеет удовлетворительную точность и широкий динамический диапазон.

1. Chanan G.A., Nelson J.E., and Mast T.S. Segment alignment for Keck telescope primary mirror // Proc. SPIE. 1986. V. 628. P. 466–470.
2. Becher J.M., Ker-Li Shu, and Shaklan S. Planning the National New Technology Telescope (NNTT). IV. Coalignment/cophasing system // Proc. SPIE. 1986. V. 628. P. 102–106.
3. Shrader K.N., Fetner R.H., Balas M.J., and Erwin R.S. Sparse-array phasing algorithm based on recursive estimation of fringe contrast // Proc. SPIE. 2002. V. 4849. P. 146–157.
4. Chanan G.A., Nelson J.E., Mast T.S., Wizinovich P., and Schaefer B. The W.M. Keck telescope phasing camera systems // Proc. SPIE. 1994. V. 2198. P. 1139–1150.
5. Geary J.M. Introduction to wavefront sensors // SPIE Press. 1995. V. TT18. 215 p.
6. Gleckler A.D., Ulich B.L., Sheppard C., and Conklin E.K. Surface control techniques for large segmented mirrors // Greenbank telescope project. Related experience and capabilities: Report of Kaman Aerospace Corporation. 1990. P. 98–108.
7. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 555 с.
8. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 335 с.