

## КОМПЕНСАЦИЯ АБЕРРАЦИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА В ТЕЛЕСКОПАХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С РЕГУЛИРОВКОЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ТЕЛЕСКОПА

Я.М. Клебанов<sup>1</sup>, А.В. Карсаков<sup>2</sup>, С.Н. Хонина<sup>2,3</sup>, А.Н. Давыдов<sup>1</sup>, К.А. Поляков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет, Самара, Россия,

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия,

<sup>3</sup> Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

### Аннотация

В статье рассматривается методика компенсаций аберраций волнового фронта в телескопе космического аппарата. В соответствии с предлагаемой методикой сначала выполняется расчет функции рассеяния точки для диапазона параметров температурного поля и положений зеркал. Затем выбирается наиболее близкое к измеренному расчетное значение функции рассеяния точки, которое принимается за исходное для процедуры оптимизации, в соответствии с которой определяется набор параметров, наиболее точно аппроксимирующих измеренную функцию рассеяния точки.

**Ключевые слова:** управляемое зеркало, активная оптика, оптико-механический анализ, аберрации, космический телескоп, разрешение, метод конечных элементов, передача изображения, система управления, волновой фронт.

**Цитирование:** Клебанов, Я.М. Компенсация аберраций волнового фронта в телескопах космических аппаратов с регулировкой температурного поля телескопа / Я.М. Клебанов, А.В. Карсаков, С.Н. Хонина, А.Н. Давыдов, К.А. Поляков // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 1. – С. 30-36. – DOI: 10.18287/0134-2452-2017-41-1-30-36.

### Введение

Компенсация аберраций волнового фронта телескопа, генерируемых оптикой самого телескопа, часто выполняется на основе экспериментально определённой функции рассеяния точки без применения специально предназначенного для измерения аберраций оборудования, каким, например, является датчик Шака–Хартмана.

С этой целью по полученной функции рассеяния точки (ФРТ) рассчитывают аберрации волнового фронта оптической системы. Для оптических систем, находящихся вблизи дифракционного предела, для этого был предложен метод фазового разнесения, предполагающий использование двух изображений не обязательно точечного источника с известной разностью аберраций [1]. Этот метод неприменим для изображений, получаемых в обычных телескопах, размер пикселя в которых соизмерим с изображением точечного объекта. Другой метод – метод обработки изображений точечных источников с помощью нейронных сетей [2] – в настоящее время применяют для систем адаптивной оптики, имеющей дело с изображениями, также полученными вблизи дифракционного предела. Здесь используется два изображения: одно фокальное и одно внефокальное.

Связь между распределением интенсивности в расфокусированном изображении и локальной кривизной волнового фронта описывается уравнением переноса излучения. Использование этого уравнения для восстановления аберраций, рассмотренное в [3], ограничено тем, что необходимо располагать двумя изображениями с относительно большими и равными дефокусами противоположных знаков.

В работе [4] было показано, что одного внефокального изображения точечного источника, полученного с помощью ПЗС-матрицы, достаточно для восстановления явных аберраций, если лучи от разных точек апертуры не пересекают друг друга.

В работе [5] представлен метод количественного определения оптических аберраций по одному расфокусированному изображению, основанный на использовании модели, представляющей аберрации с помощью разложения в ряд полиномов Цернике. Начальное приближение получается по результатам вычисления вторых моментов распределения интенсивности изображения точечного источника относительно геометрического центра изображения. Затем с помощью итерационной процедуры находят более высокие аберрации. Основанная на данном подходе компьютерная программа DONUT нашла применение на практике [5, 6].

В работе [7] указывается, что для корректировки заданного числа аберраций необходимо выполнить больше измерений интенсивности как минимум на одно.

Ещё одним способом измерения коэффициентов разложения волнового фронта по полиномам Цернике является использование многоканальных дифракционных оптических элементов, согласованных с набором базисных функций Цернике [8, 9], однако такой подход применим только для небольших аберраций [10].

После того, как аберрации оптической системы определены, выбор процедуры компенсации существующих аберраций зависит от оптической схемы и доступных для управления степеней свободы. Наиболее распространённым является управление перемещениями зеркал системы, за исключением главного. Применяется также смещение ПЗС-матрицы. Управляемые перемещения включают смещения в направлении оптической оси, смещения и наклоны в направлении перпендикулярных ей осей. Некоторые системы имеют способность упруго деформировать форму зеркала и компенсировать таким образом аберрации высокого порядка.

Для определения необходимых для компенсации аберраций смещений оптических поверхностей при-

менительно к двухзеркальным телескопам существуют хорошо разработанные методы [11–15]. В работах [6, 16, 17] рассмотрены трёхзеркальные телескопы. В [18] обсуждаются вопросы aberrаций и юстировки телескопов с произвольным числом зеркал.

В последнее время получили распространение методы управления положением и изменением формы оптической поверхности зеркал, основанные на компьютерном инженерном анализе. К ним относятся метод, основанный на построении матрицы чувствительности [19], и метод минимизации оценочной функции [20].

В данной статье рассматривается возможность управления не только перемещениями зеркал, но и температурным полем телескопа космического базирования. В соответствии с предлагаемой методикой выполняется расчёт ФРТ по интенсивности для набора параметров температурного поля и управляемых положений зеркал. При этом с помощью процедуры оптимизации определяется набор параметров, для которого среднеквадратическое отклонение расчётной ФРТ от измеренной минимально.

Определение расчётной ФРТ для каждого набора параметров температурного поля и положения зеркал включает в себя следующие этапы:

- расчёт линейных и угловых перемещений зеркал, вызванных изменением температурного поля;
- добавление к температурным перемещениям регулируемых перемещений;
- расчёт aberrаций оптической системы, соответствующих суммарным смещениям зеркал;
- расчёт ФРТ в соответствии с полученными aberrациями.

### 1. Вычисление температурных перемещений элементов оптического тракта

Рассмотрим сначала аппроксимацию приращений температурного поля конструкции телескопа в декартовой системе координат линейной функцией

$$T - T_{00} = T_0 + T_i x_i; \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где  $x_i$  – координаты декартовой системы,  $T_{00}$  – текущее температурное поле телескопа,  $T_0, T_i$  – константы. По повторяющимся индексам здесь осуществляется суммирование.

В [21] показано, что постановка задачи термоупругости в перемещениях сводится как при статически определяемых, так и при статически неопределяемых условиях закрепления конструкции к постановке задачи изотермической теории упругости, если рассматривать в качестве дополнительного вектора объёмной силы величину  $(3\lambda + 2\mu)\alpha(T - T_{00})_{,i}$ , а к заданным внешним поверхностным силам добавить  $(3\lambda + 2\mu)\alpha(T - T_{00})_{,i} v_i$ , где  $\lambda, \mu$  – коэффициенты Ламе,  $v_i$  – компоненты единичного вектора-нормали к поверхности,  $\alpha$  – коэффициент температурного линейного расширения.

Поскольку в данной статье рассматриваются условия, в которых поверхностные и объёмные силовые воздействия на конструкцию телескопа отсутствуют,

то с учётом (1) разности перемещений и поворотов любых рассматриваемых точек конструкции представляют собой линейные функции от четырёх констант:  $T_r$  ( $r = 0, 1, 2, 3$ ). Для конструкций сложной формы эти функции могут быть получены только численно.

Изложенное позволяет записать

$$\tilde{u}_s = M_{rs} T_r, \quad r = 0, 1, 2, 3; \quad s = 1, \dots, N, \quad (2)$$

где  $\tilde{u}_s$  – линейные и угловые перемещения точек конструкции, вызванные температурным полем;  $N$  – общее количество рассматриваемых перемещений,  $M_{rs}$  – матрица влияния параметров  $T_r$  на перемещения.

В качестве примера рассматривался внеосевой четырёхзеркальный объект. Моделирование выполнялось для 80 расчётных случаев, охватывающих различные сочетания температурных констант. Все перемещения рассматривались по отношению к положению центра ПЗС-матрицы. Поворот вокруг оптической оси не учитывался в силу осевой симметрии оптических поверхностей. Для решения использовалась программа ANSYS.

Полученная в результате аппроксимации результатов моделирования матрица является матрицей перехода от четырёх параметров температурного поля  $T_0, T_1, T_2, T_3$  к перемещениям зеркал.

### 2. Вычисление aberrаций оптической системы, вызванных перемещениями элементов оптического тракта

Определение искажений волнового фронта в оптической системе и оценка качества изображения при проектировании выполняются с помощью программных пакетов Zemax, CodeV, OSLO, TracePro и других. Однако в случае, когда необходимо выполнить вычисления для очень большого числа вариантов смещений оптических элементов, как это требуется в соответствии с рассматриваемой здесь методикой, целесообразно использовать приближённые вычисления. Использовался приближённый метод расчёта искажений волнового фронта в оптической системе, вызванных смещением поверхностей оптических элементов как жёсткого целого, основанный на создании матрицы чувствительности волнового фронта.

Кроме перемещений, вызванных температурным полем, на оптические характеристики влияют управляемые перемещения зеркал. Представим их в виде вектора  $\bar{u}_s$ ,  $s = 1, \dots, N$ , где все неуправляемые компоненты равны нулю. Полные перемещения оптических поверхностей можно записать в виде

$$u_s = \tilde{u}_s + \bar{u}_s. \quad (3)$$

В соответствии с изложенным представим коэффициенты полиномов Цернике оптической системы в виде

$$Z_k = N_{ks} u_s + Z_k^0, \quad k = 1, \dots, L; \quad s = 1, \dots, N, \quad (4)$$

где  $Z_k^0$  – коэффициенты полиномов Цернике оптической системы для недеформированной конструкции,

$L$  – общее число рассматриваемых полиномов,  $N_{ks}$  – матрица чувствительности.

Для определения компонент матрицы чувствительности сначала выполняли серию расчётов в пакете Zemax. В них задавали смещения поверхностей зеркал и определяли коэффициенты полиномов Цернике, описывающих искажения волнового фронта оптической системы для отдельных комбинаций смещений. Полученные результаты аппроксимировали линейной зависимостью по методу наименьших квадратов. Таким образом, принимается, что аберрации волнового фронта могут быть описаны полиномами Цернике и что поведение системы в рассматриваемом диапазоне смещений зеркал линейно. Такой метод тем более точен, чем ближе оптическая система приближается к дифракционному пределу.

Рассматривались смещения оптической поверхности зеркал как жёсткого целого в предположении, что эксцентриситеты отсутствуют. Для описания этих смещений достаточно использовать первые три полинома стандартного ряда Цернике: константа и два наклона. Поскольку в рассматриваемой оптической системе четыре зеркала, то в (4)  $N=12$ . Матрицы чувствительности  $N_{ks}$  были получены для семи точек фокальной плоскости.

Погрешность линейной аппроксимации оценивали отношением среднеквадратического отклонения значений коэффициентов полиномов Цернике оптической системы, полученных линейной аппроксимацией, от их значений, полученных оптическим моделированием в Zemax, к среднеквадратическому значению коэффициентов, посчитанных в Zemax. Соответствующие результаты для комы  $X$  в качестве примера приводятся на рис. 1. Для аберраций третьего порядка погрешность аппроксимации не превысила 0,09.

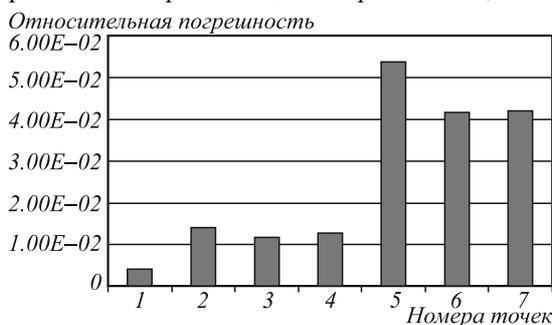


Рис. 1. Погрешность аппроксимации комы  $X$  для семи точек фокальной плоскости. Номер центральной точки – 2

### 3. Численное определение функции рассеяния точки по аберрациям выходного пучка света

Интенсивность спектра вычислялась как преобразование Фурье от аберрированной функции зрачка  $g(x,y)$ . Характеристики функции зрачка, значения аберраций и параметры оптической системы были взяты для указанной выше оптической системы, реализованной в Zemax. Преобразование Фурье имеет вид:

$$G(u, v) = \frac{k}{2\pi f} \iint_{\Omega} g(x, y) \exp\left[-\frac{ik}{f}(xu + yv)\right] dx dy, \quad (5)$$

где  $f$  – фокусное расстояние,  $k=2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны (0,00061 мм),  $\Omega$  – область задания поля.

### 4. Примеры определения характеристик температурного поля ОЭТК и управляемого перемещения вторичного зеркала, соответствующих вариации измеренной функции рассеяния точки

Изложенный выше алгоритм был реализован в программе Tabulator, предназначенной для определения управляющих параметров:  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  и управляемого осевого перемещения вторичного зеркала по заданной ФРТ. Иллюстрация результатов расчётов ФРТ при  $T_1=T_2=0$  и разных значениях  $T_0$ ,  $T_3$  и осевых положений вторичного зеркала приводится в табл. 1.

На рис. 2 приводится сравнение двух разных экспериментальных ФРТ (дифракционный предел ориентировочно равен 9 мкм) с полученным расчётом по принятому алгоритму. В соответствии с ним сначала ФРТ вычислялись для наборов дискретных значений управляющих параметров – выбиралось по 10 значений каждого параметра с равномерным шагом в пределах заданных диапазонов их изменения и перебирались все возможные сочетания. Такой большой объём вычислений был реализован с привлечением кластера «Келдыш» (МГУ). Затем выбиралось наиболее близкое к измеренному расчётное значение ФРТ. Соответствующие параметры принимаются за исходные для процедуры оптимизации, в соответствии с которой определяется окончательный набор параметров, наиболее точно аппроксимирующих измеренную ФРТ. Сопоставление измеренных и расчётных ФРТ выполняется по величине среднеквадратического отклонения по всем пикселям (размером 6 мкм, рис. 2).

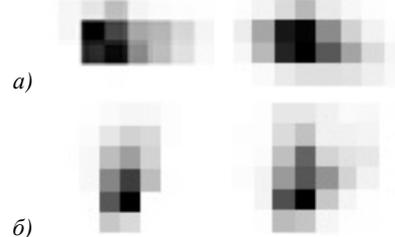


Рис. 2. Сопоставление экспериментально замеренных (слева) и расчётных (справа) ФРТ для двух рассмотренных случаев: (а) и (б). Размер пикселя – 6 мкм

### 5. Минимизация температурных градиентов

Непосредственное влияние на аберрации оптической системы оказывают полные смещения оптических поверхностей зеркал. Поэтому после того, как определены полные смещения, дающие наиболее близкие к замеренным значения функции рассеяния, может быть рассмотрен вопрос о возможном уменьшении величин температурных градиентов. С этой целью при неизменных величинах полных смещений можно изменить составляющие их в соответствии с равенством (3) слагаемые. Из (3) и (4) можно получить

$$T_r = M_{rs}^* (u_s - \bar{u}_s), \quad (6)$$

где  $M_{rs}^*$  – матрица, полученная обращением или псевдообращением матрицы  $M_{rs}$ .

Определим  $\bar{u}_s$  так, чтобы компоненты вектора  $T_r$  были минимальны. Для этого введём квадратичную форму

$$\Psi = T_0^2 + T_1^2 + T_2^2 + T_3^2. \tag{7}$$

Подставляя в (7) равенства (6), нетрудно убедиться, что условия экстремума функции  $\Psi$

$$\partial\Psi/\partial\bar{u}_s = 0 \tag{8}$$

имеют вид

$$M_{rs}^* M_{rt}^* u_t = M_{rs}^* M_{rt}^* \bar{u}_t, \quad r = 0, 1, 2, 3; \quad s, t = 1, \dots, N. \tag{9}$$

Если регулируется только одно перемещение одного из зеркал, например, осевое перемещение вторичного зеркала  $\bar{u}_1$ , то из (9) получаем

$$\bar{u}_1 = M_{r1}^* M_{r1}^* u_t / M_{r1}^* M_{r1}^*. \tag{10}$$

Данный экстремум является минимумом, так как сумма квадратов  $M_{r1}^* M_{r1}^*$  положительна и

$$\partial^2\Psi/\partial\bar{u}_1^2 > 0. \tag{11}$$

Если регулируются два перемещения, например,  $\bar{u}_1$  и  $\bar{u}_2$ , то из (9) получаем следующие условия экстремума

$$M_{r1}^* M_{r1}^* u_t = M_{r1}^* (M_{r1}^* \bar{u}_1 + M_{r2}^* \bar{u}_2), \tag{12}$$

$$M_{r2}^* M_{r2}^* u_t = M_{r2}^* (M_{r1}^* \bar{u}_1 + M_{r2}^* \bar{u}_2).$$

Строгое условие того, что это минимум, имеет вид

$$(M_{r1}^* M_{r1}^*) (M_{r2}^* M_{r2}^*) - (M_{r1}^* M_{r2}^*)^2 > 0. \tag{13}$$

Используя условия минимума функции многих переменных, нетрудно получить соответствующие зависимости для трёх и более управляемых перемещений зеркал.

При наличии специальных требований к управлению температурным полем слагаемые в (7) могут быть введены с соответствующими весовыми коэффициентами.

Табл. 1. Примеры расчета ФРТ

Осевое смещение ВЗ	-0,2 мм	-0,1 мм	0	0,1 мм	0,2 мм
Центральная точка фокальной плоскости					
$T_0 = -8^\circ;$ $T_3 = -8^\circ$					
$T_0 = 8^\circ;$ $T_3 = 8^\circ$					
Точка 7 фокальной плоскости					
$T_0 = -8^\circ;$ $T_3 = -8^\circ$					
$T_0 = 8^\circ;$ $T_3 = 8^\circ$					

**Заключение**

Изложенная выше методика относится к технологии активной оптики, позволившей в течение последних двух десятилетий существенно повысить разрешающую способность наземных телескопов и телескопов космического базирования. В данной методике рассматривается возможность управления деформациями несущей конструкции наряду с управлением смещениями зеркал.

**Благодарности**

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Самарской области, Проект № 16-41-630542.

**Литература**

1. **Thelen, B.J.** Maximum a posteriori estimation of fixed aberrations, dynamic aberrations, and the object from phase-diverse speckle data / B.J. Thelen, R.G. Paxman, D.A. Carrara, J.H. Seldin // Journal of the Optical Society of America A. – 1999. – Vol. 16, Issue 5. – P. 1016-1025. – DOI: 10.1364/JOSAA.16.001016.
2. **Beckers, J.M.** Adaptive optics for astronomy: principles, performance, and applications / J.M. Beckers // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. – 1993. – Vol. 31(1). – P. 13-62. – DOI: 10.1146/annurev.aa.31.090193.000305.
3. **Roddier, F.** Adaptive optics in astronomy / F. Roddier. – Cambridge, U.K., New York, NY: Cambridge University Press, 1999. – 411 p. – ISBN: 052155375X.
4. **Hickson, P.** Wave-front curvature sensing from a single defocused image / P. Hickson // Journal of the Optical Society

- of America A – 1994. – Vol. 11, Issue 5. – P. 1667-1673. – DOI: 10.1364/JOSAA.11.001667.
5. **Tokovinin, A.** DONUT: measuring optical aberrations from a single extrafocal image / A. Tokovinin, S. Heathcote // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2006. – Vol. 118(846). – P. 1165-1175. – DOI: 10.1086/506972.
  6. **Woods, D.A.** The space surveillance telescope: focus and alignment of a three mirror telescope / D.F. Woods, R. Shah, J. Johnson, A. Szabo, E.C. Pearce, R. Lambour, W. Faccenda // Optical Engineering. – 2013. – Vol. 52(5). – 053604. – DOI: 10.1117/1.OE.52.5.053604.
  7. **Booth, M.J.** Wavefront sensorless adaptive optics for large aberrations / M.J. Booth // Optics Letters. – 2007. – Vol. 32(1). – P. 5-7. – DOI: 10.1364/OL.32.000005.
  8. **Ha, Y.** Diffractive optical element for Zernike decomposition / Y. Ha, D. Zhao, Y. Wang, V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // Proceedings of SPIE. – 1998. – Vol. 3557. – P. 191-197. – DOI: 10.1117/12.318300.
  9. **Porfirev, A.P.** Experimental investigation of multi-order diffractive optical elements matched with two types of Zernike functions / A.P. Porfirev, S.N. Khonina // Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 9807. – 98070E. – DOI: 10.1117/12.2231378.
  10. **Khonina, S.N.** Decomposition of a coherent light field using a phase Zernike filter / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, Y. Wang, D. Zhao // Proceedings of SPIE. – 1998. – Vol. 3573. – P. 550-553. – DOI: 10.1117/12.324588.
  11. **McLeod, B.** Collimation of fast wide-field telescopes / B.A. McLeod // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 1996. – Vol. 108(720). – P. 217-219.
  12. **Noethe, L.** Analytic expressions for field astigmatism in decentered two mirror telescopes and application to the collimation of the ESO VLT / L. Noethe, S. Guisard // Astronomy and Astrophysics Supplement Series. – 2000. – Vol. 144(1). – P. 157-167. – DOI: 10.1051/aas:2000201.
  13. **Terret, D.L.** The interaction between pointing and active optics on the VISTA telescope / D.L. Terret, W.J. Sutherland // Proceedings of SPIE: Software and Cyberinfrastructure for Astronomy. – 2010. – Vol. 7740. – 77403A – DOI: 10.1117/12.856365.
  14. **Rakich, A.** Use of field aberrations in the alignment of the Large Binocular Telescope optics / A. Rakich, J.M. Hill, C.J. Biddick, D.L. Miller, T. Leibold // Proceedings of SPIE: Ground-based and Airborne Telescopes II. – 2008. – Vol. 7012. – 70121L. – DOI: 10.1117/12.789902.
  15. **Blanco, D.R.** Near-perfect collimation of wide-field Cassegrain telescopes / D.R. Blanco // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2012. – Vol. 124(911). – P. 36-41. – DOI: 10.1086/663976.
  16. **Thompson, K.P.** The misalignment induced aberrations of TMA telescopes / K.P. Thompson, T. Schmid, J.P. Rolland // Optics Express. – 2008. – Vol. 16(25). – P. 20345-20353. – DOI: 10.1364/OE.16.020345.
  17. **Sebag, J.** LSST Telescope alignment plan based on nodal aberration theory / J. Sebag, W. Gressler, T. Schmid, J.P. Rolland, K.P. Thompson // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2012. – Vol. 124(914). – P. 380-390.
  18. **Schechter, P.L.** Generic misalignment aberration patterns in wide-field telescopes / P.L. Schechter, R.S. Levinson // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2011. – Vol. 123(905). – P. 812-832. – DOI: 10.1086/661111.
  19. **Сокольский, М.Н.** Допуски и качество оптического изображения / М.Н. Сокольский. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1989. – 221 с. – ISBN: 5-217-00547-5.
  20. **Kim, S.** Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems / S. Kim, H.-S. Yang, Y.-W. Lee, S.-W. Kim // Optics Express. – 2007. – Vol. 15(8). – P. 5059-5068. – DOI: 10.1364/OE.15.005059.
  21. **Коваленко, А.Д.** Основы термоупругости / А.Д. Коваленко. – Киев: Наукова думка, 1970. – 308 с.

### Сведения об авторах

**Клебанов Яков Мордухович**, 1949 года рождения, в 1971 году окончил Куйбышевский политехнический институт (ныне Самарский государственный технический университет) по специальности «Автоматизация и комплексная механизация в машиностроении», где в настоящее время занимает должность заведующего кафедрой механики. Область научных интересов: механика деформируемого твёрдого тела, прочность машин и конструкций, методы компьютерного моделирования. E-mail: [jklebanov@mail.ru](mailto:jklebanov@mail.ru).

**Карсаков Алексей Владиславович**, аспирант Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва (Самарский университет). Область научных интересов: дифракционная оптика. E-mail: [karsakov.aleksejj@rambler.ru](mailto:karsakov.aleksejj@rambler.ru).

**Хонина Светлана Николаевна**, доктор физико-математических наук, профессор Самарского университета; главный научный сотрудник ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: [khonina@smr.ru](mailto:khonina@smr.ru).

**Давыдов Андрей Николаевич**, 1965 года рождения, в 1988 году окончил Челябинский политехнический институт (в настоящее время Южно-Уральский университет) по специальности «Динамика и прочность машин». В настоящее время является доцентом кафедры механики Самарского государственного технического университета. Область научных интересов: механика деформируемого твёрдого тела, прочность машин и конструкций, методы компьютерного моделирования. E-mail: [davydov@samgtu.ru](mailto:davydov@samgtu.ru).

**Поляков Константин Анатольевич**, 1970 года рождения, в 1996 году окончил Самарский государственный университет (ныне Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королёва) по специальности «Механика жидкости газа и плазмы». В настоящее время является доцентом кафедры механики Са-

марского государственного технического университета. Область научных интересов: динамика многомассовых систем, моделирование процессов механики. E-mail: [plyakovka@gmail.com](mailto:plyakovka@gmail.com).

ГРТИ 29.31.29.

Поступила в редакцию 23 января 2017 г. Окончательный вариант – 8 февраля 2017 г.

## WAVE FRONT ABERRATION COMPENSATION OF SPACE TELESCOPES WITH TELESCOPE TEMPERATURE FIELD ADJUSTMENT

J.M. Klebanov<sup>1</sup>, A.V. Karsakov<sup>2</sup>, S.N. Khonina<sup>2,3</sup>, A.N. Davydov<sup>1</sup>, K.A. Polyakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Technical University, Samara, Russia,

<sup>2</sup>Samara National Research University, Samara, Russia,

<sup>3</sup>Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia

### Abstract

A technique of wave front aberration compensation for space telescopes is considered. According to the technique introduced, first, point spread functions (PSF) for the range of temperature field parameters and mirrors displacements are calculated. Then, the calculated PSF closest to the measured one is assumed as a base for the optimization procedure, according to which a set of the parameters most precisely approximating the measured PSF is obtained.

**Keywords:** controlled mirror, active optics, optical and mechanical analysis, aberrations, space telescope, optical resolution, finite elements method, control system, wave front.

**Citation:** Klebanov IM, Karsakov AV, Khonina SN, Davydov AN, Polyakov KA. Wave front aberration compensation of space telescopes with telescope temperature field adjustment. *Computer Optics* 2017; 41(1): 30-36. DOI: 10.18287/0134-2452-2017-41-1-30-36.

**Acknowledgements:** This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research and the government of the Samara Region (grant No. 16-41-630542).

### References

- [1] Thelen BJ, Paxman RG, Carrara DA, Seldin JH. Maximum a posteriori estimation of fixed aberrations, dynamic aberrations, and the object from phase-diverse speckle data. *Journal of the Optical Society of America A* 1999; 16(5): 1016-1025. DOI: 10.1364/JOSAA.16.001016.
- [2] Beckers JM. Adaptive optics for astronomy: principles, performance, and applications. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 1993; 31(1): 13-62. DOI: 10.1146/annurev.aa.31.090193.000305.
- [3] Roddier F. *Adaptive optics in astronomy*. Cambridge, U.K., New York, NY: Cambridge University Press; 1999. ISBN: 052155375X.
- [4] Hickson P. Wave-front curvature sensing from a single defocused image. *Journal of the Optical Society of America A* 1994; 11(5): 1667-1673. DOI: 10.1364/JOSAA.11.001667.
- [5] Tokovinin A, Heathcote S. DONUT: measuring optical aberrations from a single extrafocal image. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 2006; 118(846): 1165-1175. DOI: 10.1086/506972.
- [6] Woods DA, Shah R, Johnson J, Szabo A, Pearce EC, Lambour R, Faccenda W. The space surveillance telescope: focus and alignment of a three mirror telescope. *Optical Engineering* 2013; 52(5): 053604. DOI: 10.1117/1.OE.52.5.053604.
- [7] Booth MJ. Wavefront sensorless adaptive optics for large aberrations. *Optics Letters* 2007; 32(1): 5-7. DOI: 10.1364/OL.32.000005.
- [8] Ha Y, Zhao D, Wang Y, Kotlyar VV, Khonina SN, Soifer VA. Diffractive optical element for Zernike decomposition. *Proceedings of SPIE* 1998; 3557: 191-197. DOI: 10.1117/12.318300.
- [9] Porfirev AP, Khonina SN. Experimental investigation of multi-order diffractive optical elements matched with two types of Zernike functions. *Proceedings of SPIE* 2016; 9807: 98070E. DOI: 10.1117/12.2231378.
- [10] Khonina SN, Kotlyar VV, Soifer VA, Wang Y, Zhao D. Decomposition of a coherent light field using a phase Zernike filter. *Proceedings of SPIE* 1998; 3573: 550-553.
- [11] McLeod B. Collimation of fast wide-field telescopes. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 1996; 108(720): 217-219.
- [12] Noethe L, Guisard S. Analytic expressions for field astigmatism in decentered two mirror telescopes and application to the collimation of the ESO VLT. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* 2000; 144(1): 157-167. DOI: 10.1051/aas:2000201.
- [13] Terret DL, Sutherland WJ. The interaction between pointing and active optics on the VISTA telescope. *Proc SPIE: Software and Cyberinfrastructure for Astronomy* 2010; 7740: 77403A. DOI: 10.1117/12.856365.
- [14] Rakich A, Hill JM, Biddick CJ, Miller DL, Leibold T. Use of field aberrations in the alignment of the Large Binocular Telescope optics. *Proceedings of SPIE: Ground-based and Airborne Telescopes II* 2008; 7012: 70121L. DOI: 10.1117/12.789902.
- [15] Blanco DR. Near-perfect collimation of wide-field Cassegrain telescopes. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 2012; 124(911): 36-41. DOI: 10.1086/663976.
- [16] Thompson KP, Schmid T, Rolland JP. The misalignment induced aberrations of TMA telescopes. *Optics Express* 2008; 16(25): 20345-20353. DOI: 10.1364/OE.16.020345.
- [17] Sebag J, Gressler W, Schmid T, Rolland JP, Thompson KP. LSST Telescope alignment plan based on nodal aberration theory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 2012; 124(914): 380-390.
- [18] Schechter PL, Levinson RS. Generic misalignment aberration patterns in wide-field telescopes. *Publications of the*

- Astronomical Society of the Pacific 2011; 123(905): 812-832. DOI: 10.1086/661111.
- [19] Sokolsky MN. Admissions and quality of the optical image [In Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publisher; 1989. ISBN: 5-217-00547-5.
- [20] Kim S, Yang HS, Lee YW, Kim SW. Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems. Optics Express 2007; 15(8): 5059-5068. DOI: 10.1364/OE.15.005059.
- [21] Kovaleneko AD. Fundamentals of thermoelasticity [In Russian]. Kiev: "Naukova Dumka" Publisher; 1970.

---

#### Authors' information

**Iakov Mordukhovich Klebanov** (b.1949) graduated from Kuibyshev Polytechnical Institute in 1971, majoring in Automation and Complex Mechanization in Machine Building. Currently he works as the Head of Mechanics department of Samara State Technical University. Research interests are solid mechanics, strength of machines and structures, computer-modeling methods. E-mail: [jklebanov@mail.ru](mailto:jklebanov@mail.ru).

**Alexey Vladislavovich Karsakov**, a graduate student of Samara National Research University. Research interests: diffractive optics. E-mail: [karsakov.aleksej@rambler.ru](mailto:karsakov.aleksej@rambler.ru).

**Svetlana Nikolaevna Khonina**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara National Research University. Main researcher of the IPSI RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: [khonina@smr.ru](mailto:khonina@smr.ru).

**Andrey Nikolaevich Davydov** (b. 1965) graduated from Chelabinsk Polytechnical Institute in 1988 majoring in Dynamics and Strength of Mechanisms. Currently he works as works as the associate professor of Mechanics department. Research interests are solid mechanics, strength of machines and structures, methods of computer modeling. E-mail: [davydov@samgtu.ru](mailto:davydov@samgtu.ru).

**Konstatin Anatoljevich Polyakov** (b. 1970) graduated from Samara State University (presently, Samara National Research University, short – Samara University) majoring in Fluid Mechanics. Currently he works as associate professor of Mechanics department. Research interests are multibody dynamic, modeling of processes of mechanics. E-mail: [plyakovka@gmail.com](mailto:plyakovka@gmail.com).

---

*Received January 23, 2017. The final version – February 8, 2017.*

---