

## КОРОТКОЕ СООБЩЕНИЕ

### АЛГОРИТМ ЮСТИРОВКИ СОСТАВНЫХ ЗЕРКАЛ

А.В. Демин<sup>1</sup>, П.В. Ростокин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

#### Аннотация

Предложен алгоритм юстировки составных зеркал телескопов. На основе введённого понятия разностной поверхности и компараторного принципа получены соотношения для оценки точности юстировки составных зеркал как реализация этапов геометрического и оптотехнического позиционирования зеркальных сегментов.

**Ключевые слова:** зеркало, юстировка, крупногабаритная оптика.

**Цитирование:** Демин, А.В. Алгоритм юстировки составных зеркал / А.В. Демин, П.В. Ростокин // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 291-294. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-291-294.

#### Введение

Современное развитие технологий по созданию телескопов направлено на создание крупногабаритных зеркально-линзовых телескопов (КЗСТ). Проблемами создания КЗСТ является уменьшение поверхностной плотности главного зеркала как основного массогабаритного компонента оптической системы телескопа и массогабаритные ограничения, накладываемые как технологическими трудностями, так и системой доставки КЗСТ в космос. Учитывая, что, как правило, отражающая поверхность зеркал КЗСТ – это обычные поверхности второго порядка (1), обладающие симметрией вращения относительно оси, проходящей через его вершину, то решение этих проблем достигается, в частности, применением технологии облегчённых зеркал, позволяющей создавать главные зеркала телескопов с приемлемым значением поверхностной плотности отражающей поверхности.

В формуле (1) в соответствии с рис. 1 приняты следующие обозначения:  $x$  и  $y$  – текущие координаты в системе координат  $XYZ$ ;  $R_x$  и  $R_y$  – радиусы кривизны в плоскостях  $XOZ$  и  $YOZ$ ;  $C_x$  и  $C_y$  – константы [ISO10110-12:1996(E)].

$$Z(x, y) = \left\{ \frac{x^2/R_x + y^2/R_y}{1 + \sqrt{1 - (1 + K_x) \times \left(\frac{x}{R_x}\right)^2 - (1 + K_y) \times \left(\frac{y}{R_y}\right)^2}} \right\}, \quad (1)$$

$$K_x = R_x/C_x - 1; K_y = R_y/C_y - 1.$$

В силу технологических и массогабаритных ограничений для создания зеркал для крупногабаритных телескопов в последнее время применяют технологию составных отражающих поверхностей [1–5]. Однако даже в случае изготовления зеркальных сегментов составного зеркала (СЗ) с идеальной поверхностью всё равно остаётся проблема оптической синхронизации сегментов с целью, чтобы СЗ было эквивалентно несоставному [6]. Для решения проблемы

оптической синхронизации следует выполнять двухэтапную процедуру геометрического и оптотехнического позиционирования зеркальных сегментов СЗ относительно расчётной базовой поверхности (БП).

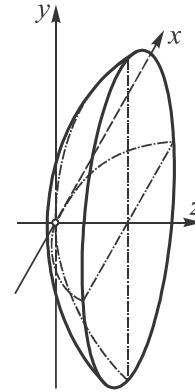


Рис. 1. Профиль отражающей поверхности зеркала

#### 1. Теоретические основы

Современные информационные технологии, а также технические достижения существующих актуаторов (например, пьезопривод) позволяют выполнить процесс двухэтапной юстировки методом компарирования. При этом пространственное положение сегментов СЗ относительно БП определяется касательной плоскостью к вершине отражающей поверхности сегмента и нормалью к ней, которые пересекаются в идеальном случае в одной точке на оптической оси СЗ (ось  $OZ$ ). Уравнение касательной плоскости к точке  $O_i$  (вершина поверхности  $i$ -го зеркального сегмента) и уравнение нормали к ней представлены формулами (2) и (3)

$$(z - z_{cni}) = (\partial z / \partial x_{cni}) \times (x - x_{cni}) + (\partial z / \partial y_{cni}) \times (y - y_{cni}), \quad (2)$$

$$\frac{(z - z_{cni})}{-1} = \frac{(x - x_{cni})}{(\partial z / \partial x_{cni})} = \frac{(y - y_{cni})}{(\partial z / \partial y_{cni})}, \quad (3)$$

$$\left[ \overline{O_{cni} X_{cni}} \times \overline{O_{cni} Y_{cni}} \right]_{i=1}^N \times \left[ \overline{O_{bni} X_{bni}} \times \overline{O_{bni} Y_{bni}} \right]_{i=1}^N = 0. \quad (4)$$

$$\Delta_x = \{x_{БПi} - x_{СПi}\}_1^m; \Delta_y = \{y_{БПi} - y_{СПi}\}_1^m, \quad (5)$$

$$\Delta_z = (Z_{РОБП} - Z_{СП}).$$

Условием правильного геометрического позиционирования зеркального сегмента является то, что вектора  $\overline{O_{СП}Z_{СП}}$  и  $\overline{O_{БП}Z_{БП}}$  должны быть коллинеарны и пересекаться в одной расчётной точке на оси OZ (для сферической БП это центр её кривизны), а соответственно, и касательные плоскости  $X_{СП}Y_{СП}$  и  $X_{БП}Y_{БП}$  также коллинеарны. Таким образом, математическая модель, отражающая условие (5), может быть представлена в виде векторного произведения (4), а оценка точности геометрического позиционирования – соотношением (5).

**2. Алгоритмы позиционирования  
Геометрическое позиционирование**

В основе геометрического позиционирования зеркальных сегментов относительно расчётной базовой поверхности лежит алгоритм последовательной технической и метрологической реализации модели 4:

- 1) начало геометрического позиционирования;
- 2) исходные данные от ЭВМ: уравнение расчётной поверхности (РП). Разбиение РП на сегменты  $\{ZC_{РПi}\}_1^m$ . Координаты вершин, уравнения касательных плоскостей и нормалей для  $\{ZC_{РПi}\}_1^m$  относительно БП. Последовательность позиционирования реальных зеркальных сегментов  $\{PZC_i\}_1^m$  (траектория обхода);
- 3) задают  $i = 1$ ;
- 4) устанавливают  $PZC_1$  в 1-ю ячейку БП, соответствующую параметрам  $ZC_{РП1}$ ;
- 5) определяют с помощью датчиков координаты вершины, параметры касательной плоскости и нормали  $PZC_1$  относительно БП;
- 6) вычисляют невязку параметров позиционирования  $PZC_1$  относительно параметров  $ZC_{РП1}$ ;
- 7) если величина координатной невязки  $PZC_1$  не превышает допустимых величин  $\Delta_{x1}, \Delta_{y1}$  и  $\Delta_{z1}$ , то задаются  $i = 2$ . Если величина невязки превышает допустимую величину, то возвращаются в п. 4 и корректируют параметры позиционирования  $PZC_1$  на величину превышения допуска с помощью актуаторов этого сегмента;
- 8) устанавливают  $PZC_2$  во 2-ю ячейку БП, соответствующую параметрам  $ZC_{РП2}$ ;
- 9) определяют с помощью датчиков координаты вершины, параметры касательной плоскости и нормали  $\Delta_{x1}, \Delta_{y1}$  и  $\Delta_{z1}$  относительно БП;
- 10) вычисляют невязку параметров позиционирования  $PZC_2$  относительно параметров  $ZC_{РП2}$ ;
- 11) если величина координатной невязки  $PZC_2$  не превышает  $\Delta_{x1}, \Delta_{y1}$  и  $\Delta_{z1}$ , то задают  $i = 2$ . Если величина невязки  $PZC_2$  превышает допустимую величину, то возвращаются в п. 8 и корректируют параметры её позиционирования на величину превышения допуска с помощью актуаторов этого сегмента;

- 12) выполняют операции для  $PZC_3$  вплоть до  $PZC_m$ ;
- 13) переходят к выполнению алгоритма оптотехнического позиционирования  $\{PZC_i\}_1^m$  на БП.

Если выполняется условие обеспечения допуска на разность координат (5), то переходят к выполнению алгоритма оптотехнического позиционирования зеркальных сегментов относительно расчётной базовой поверхности.

Известно, что при падении на зеркало плоской волны профиль отражённой волны повторяет профиль его отражающей поверхности, тем самым условием правильного оптотехнического позиционирования зеркального сегмента относительно БП является минимизация разности волновых фронтов (6), т.е.

$$(W_{БПРО} - W_{СПРО}) \xrightarrow{\delta g'_{СПРОi} \rightarrow \delta g'_{БПРОi}} 0. \quad (6)$$

В этой связи уравнение разностной поверхности  $Z_{\delta}^{(m)}(x, y)$  относительно сферы сравнения радиусом  $R_{СФ}$ , являющееся математической моделью оптотехнического позиционирования, примет вид [7]:

$$Z_{\delta}^{(m)}(x, y) = \left\{ \frac{x_{БП}^2 + y_{БП}^2}{R_{СФ} \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{x_{БП}^2 + y_{БП}^2}{R_{СФ} \cdot c} \right)^2} \right)} - \frac{x_{СП}^2/R_{xi} + y_{СП}^2/R_{yi}}{1 + \sqrt{1 - (1 + K_{СПxi}) \times \left( \frac{x_{СП}}{R_{СПxi}} \right)^2 - (1 + K_{СПyi}) \times \left( \frac{y_{СП}}{R_{СПyi}} \right)^2}} \right\}_1^N \quad (7)$$

Учитывая, что волновая aberrация отсчитывается относительно сферы сравнения радиусом  $R_{СФ}$ , то можно считать, что модель 10 является обобщённым уравнением волновой aberrации, но от БП. В этой связи условие оптотехнического позиционирования б эквивалентно

$$\left\{ n' \int_{\sin u'_{РОi}}^{\sin u'_{Оi}} \delta g'_{БПРОi} d(\sin u'_{БПРОi}) \right\}_{i=1}^N \cap \left\{ n' \int_{\sin u'_{РОi}}^{\sin u'_{Оi}} \delta g'_{СПРОi} d(\sin u'_{СПРОi}) \right\}_{i=1}^N = \max, \quad (8)$$

где  $\{u'_{БПРОi}\}_{i=1}^N$  и  $\{u'_{СПРОi}\}_{i=1}^N$  – апертурные углы  $i_{БП}$ -го и  $i_{СП}$ -го зеркального сегмента соответственно для БП и СП (количество сегментов – N); индекс «0» обозначает принадлежность к сфере сравнения радиусом  $R_{СФ}$ ;  $\{g'_{СПРОi}\}_1^N$  и  $\{g'_{БПРОi}\}_1^N$  – поперечные aberrации  $i_{СП}$ -го и  $i_{БП}$ -го ЗС;  $n'$  – показатель преломления (штрих обозначает принадлежность символов к пространству изображения).

**Оптотехническое позиционирование**

В основе оптотехнического позиционирования зеркальных сегментов относительно БП лежит алгоритм последовательной технической и метрологической реализации решения уравнения (7), а соответственно, и (8).

Технологическая карта, являющаяся технической реализацией (4), определяется технологическим и метрологическим обеспечением процесса в соответствии с алгоритмом оптоотехнического позиционирования:

- 1) начало оптоотехнического позиционирования;
- 2) исходные данные от ЭВМ: расчетные значения волновых aberrаций  $\{\delta_{x_i}\}_1^m$  и  $\{\delta_{y_i}\}_1^m$  для  $\{ЗС_{P_{Pi}}\}_1^m$ . Уравнение поверхности волновых aberrаций для  $\{ЗС_{P_{Pi}}\}_1^m$ ;
- 3) задают  $i = 1$ ;
- 4) определяют значения волновой aberrации  $\delta_{x_1}(PЗC_1)$  и  $\delta_{y_1}(PЗC_1)$ ;
- 5) вычисляют невязку  $[\delta_{x_1} - \delta_{x_1}(PЗC_1)]$  и  $[\delta_{y_1} - \delta_{y_1}(PЗC_1)]$ ;
- 6) если  $[\delta_{x_1} - \delta_{x_1}(PЗC_1)] \leq \Delta\delta_{x_1}$  и  $[\delta_{y_1} - \delta_{y_1}(PЗC_1)] \leq \Delta\delta_{y_1}$ , то переходят к  $i = 2$ . Если  $[\delta_{x_1} - \delta_{x_1}(PЗC_1)] > \Delta\delta_{x_1}$  и  $[\delta_{y_1} - \delta_{y_1}(PЗC_1)] > \Delta\delta_{y_1}$ , то возвращают в п.4 и корректируются параметры позиционирования  $PЗC_1$  на величину превышения допуска с помощью актуаторов этого сегмента;
- 7) определяют значение волновой aberrации  $\delta_{x_2}(PЗC_2)$  и  $\delta_{y_2}(PЗC_2)$ ;
- 8) вычисляют невязку  $[\delta_{x_2} - \delta_{x_2}(PЗC_2)]$  и  $[\delta_{y_2} - \delta_{y_2}(PЗC_2)]$ ;
- 9) если  $[\delta_{x_2} - \delta_{x_2}(PЗC_2)] \leq \Delta\delta_{x_2}$  и  $[\delta_{y_2} - \delta_{y_2}(PЗC_2)] \leq \Delta\delta_{y_2}$ , то переходят к  $I = 2$ . Если  $[\delta_{x_2} - \delta_{x_2}(PЗC_2)] > \Delta\delta_{x_2}$  и  $[\delta_{y_2} - \delta_{y_2}(PЗC_2)] > \Delta\delta_{y_2}$ , то возвращаются в п.4 и корректируют параметры позиционирования  $PЗC_2$  на величину превышения допуска с помощью актуаторов сегмента  $PЗC_2$ ;
- 10) выполняют операции для  $PЗC_3$  вплоть до  $PЗC_m$ .

На рис. 2 представлены интерференционные картины поверхности сегментированного зеркала, при этом на рис. 2а – в результате выполнения алгоритма геометрического позиционирования, а на рис. 2б – в результате выполнения оптоотехнического позиционирования (один сегмент оставлен для сравнения).

#### Заключение

Таким образом, разработан алгоритм геометрического и оптоотехнического позиционирования зеркальных сегментов составного зеркала относительно базовой (расчетной) поверхности, отличающийся более корректной формой, чем в [8, 9].

Этот алгоритм позволяет выполнять юстировку методом виртуального компарирования, что особенно важно для режима эксплуатации высокоапертурных телескопов, работающих в автономном режиме.

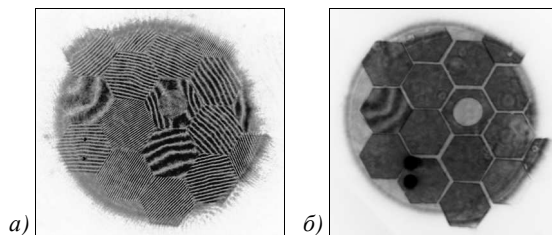


Рис. 2. Интерференционные картины поверхности сегментированного зеркала (негатив): в результате выполнения алгоритма геометрического позиционирования (а), в результате выполнения оптоотехнического позиционирования (б) (один сегмент оставлен для сравнения)

#### Литература

1. **Sabelhaus, P.A.** An overview of the James Webb Space Telescope (JWST) project / P.A. Sabelhaus, J.E. Decker // Proceeding of SPIE. – 2004. – Vol. 5487. – DOI: 10.1117/12.549895.
2. **Olczak, G.** Wavefront calibration testing of the James Webb Space Telescope primary mirror center of curvature optical assembly / G. Olczak, C. Wells, D.J. Fischer, M.T. Connolly // Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8450. – 84500R. – DOI: 10.1117/12.927003.
3. **Goodman, J.W.** Introduction to Fourier Optics / J.W. Goodman. – 2<sup>nd</sup> ed. – New York: McGraw-Hill, 1996.
4. **Дёмин, А.В.** Алгоритм управления составным зеркалом в режиме эксплуатации / А.В. Дёмин, И.А. Ковалев // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2014. – № 2. – С. 88-93.
5. **Демин, А.В.** The mathematical model and the simulation modelling algorithm of the multitiered mechanical system / A.V. Demin, I.A. Kovalev // ABC Journal of Advanced Research. – 2013. – Vol. 2(1), Issue 3. – P. 44-48. – DOI: 10.18034/abcjar.v2i1.427.
6. **Полецук, А.Г.** Дифракционные оптические элементы для управления параметрами лазерного излучения и прецизионного контроля формы асферических поверхностей / А.Г. Полецук, В.П. Корольков, Р.К. Насыров // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 5, № 2. – С. 232-238.
7. **Демин, А.В.** Математическая модель процесса юстировки составных зеркал / А.В. Дёмин // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 11. – С. 901-907. – DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-11-901-907.
8. **Демин, А.В.** Алгоритм юстировки составных зеркал высокоапертурных телескопов / А.В. Демин, Л.М. Менделеева // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2014. – Т. 57, № 1. – С. 51-56.
9. **Демин, А.В.** Алгоритм компоновки составных зеркал / А.В. Демин, А.Ю. Рабыш // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 58. – С. 31-36.
10. **Александров, П.С.** Курс аналитической геометрии и нелинейной алгебры / П.С. Александров. – М.: Наука, 1979. – 512 с. – ISBN: 978-5-8114-0908-2.

#### Сведения об авторах

**Демин Анатолий Владимирович**, 1945 года рождения, в 1969 году окончил Ленинградский институт точной механики и оптики (ЛИТМО). Доктор технических наук, профессор. С 2009 года является заведующим кафедрой оптико-цифровых систем и технологий (базовая кафедра на ОАО «ЛОМО»). Специалист в области математического моделирования оптико-цифровых систем и комплексов. E-mail: [dav\\_60@mail.ru](mailto:dav_60@mail.ru).

**Ростокин Павел Владимирович**, 1993 года рождения, в 2015 году окончил Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики по направлению «Оптотехника». Магистрант второго года обучения магистерской программы «Оптико-цифровые информационно-измерительные и управляющие системы». E-mail: [rostokinpavel@mail.ru](mailto:rostokinpavel@mail.ru).

ГРНТИ: 29.31.29.

Поступила в редакцию 30 января 2017 г. Окончательный вариант – 9 февраля 2017 г.

**ALIGNMENT ALGORITHM FOR COMPOSITE MIRRORS**A.V. Demin<sup>1</sup>, P.V. Rostokin<sup>1</sup><sup>1</sup>St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint-Petersburg, Russia**Abstract**

This paper presents an alignment algorithm for composite telescope mirrors. Introducing the concept of a differential surface and a comparator principle we deduce relationships for evaluating the alignment accuracy for composite mirrors. This algorithm assumes the implementation of the geometrical and optical positioning of mirror segments.

**Keywords:** mirror, alignment, oversized optics.

**Citation:** Demin AV, Rostokin PV. Alignment algorithm for composite mirrors. Computer Optics. 2017; 41(2): 291-294. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-291-294.

**References**

- [1] Sabelhaus PA, Decker JE. An overview of the James Webb Space Telescope (JWST) project. Proc SPIE 2004; 5487: DOI: 10.1117/12.549895.
- [2] Olczak G, Wells C, Fischer DJ, Connolly MT. Wavefront calibration testing of the James Webb Space Telescope primary mirror center of curvature optical assembly. Proc SPIE 2012; 8450: DOI: 10.1117/12.927003.
- [3] Goodman JW. Introduction to Fourier Optics. 2nd ed. New York: McGraw-Hill; 1996.
- [4] Demin AV, Kovalev IA. The control algorithm of the composite mirror in operation mode [In Russian]. Questions of electronics. A series of television engineering 2014; 2: 88-93.
- [5] Demin AV, Kovalev IA. The mathematical model and the simulation modelling algorithm of the multitiered mechanical system. ABC Journal of Advanced Research 2013; 2(1): 44-48. DOI: 10.18034/abcjar.v2i1.427.
- [6] Poleshchuk AG, Korolkov VP, Nasyrov RK. Diffractive optical elements for controlling the parameters of laser radiation and the precise testing the aspheric surfaces [In Russian]. Intrexp Geo-Sibirj 2015; 5(2): 232-238.
- [7] Demin AV. Mathematical model of composite mirror adjustment process [In Russian]. Proceedings of the Universities. Instrumentation 2015; 58(11): 901-907. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-11-901-907.
- [8] Demin AV, Mendeleva LM. The alignment algorithm of composite mirrors of telescopes [In Russian]. Proceedings of the universities. Instrumentation. 2014; 57(1): 51-56.
- [9] Demin AV, Rabysh YU. Layout algorithm of composite mirrors [In Russian]. Scientific and Technical Gazette ITMO. 2008; 58: 31-36.
- [10] Aleksandrov PS. Course of analytical geometry and non-linear algebra [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1979. ISBN: 978-5-8114-0908-2.

**Author's information**

**Anatoliy Vladimirovich Demin** (b. 1945), graduated from Leningrad Institute of Accurate Mechanics and Optics in 1969. Doctor of Technical Sciences, Professor. Since 2009 is the head of Optical Digital Systems and Technology department (basic department at JSC "LOMO"). Specialist in the field of mathematical modeling of opto-digital systems and complexes. E-mail: [dav\\_60@mail.ru](mailto:dav_60@mail.ru).

**Pavel Vladimirovich Rostokin** (b. 1993), graduated from the St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics in "Optotekhnika". Master of the second year master's program "Opto-Digital Informational-Measuring and Operating Systems". E-mail: [rostokinpavel@mail.ru](mailto:rostokinpavel@mail.ru).

Received January 30, 2017. The final version – February 9, 2017.

Дизайн: Я.Е. Тахтаров. Оформление и вёрстка: М.А. Вахе, Е.В. Семиколенных, С.В. Смагин и Я.Е. Тахтаров.  
Лит. редактор и корректор Ю.Н. Литвинова. Консультант по оформлению англоязычного блока М.И. Котляр.  
E-mail: [ko@smr.ru](mailto:ko@smr.ru), <http://www.computeroptics.smr.ru>

Подписано в печать 13.4.2017 г. Усл. печ. л. 17,56.  
Заказ № 11/2. Тираж 216 экз. Печать офсетная. Формат 62x84 1/8.  
Цена: 550 рублей / Price of 550 rubles (6+)

Редакция: Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, (443010, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 151)  
Соучредители: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (443086, г. Самара, Московское шоссе, д.34),  
Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (117342, г. Москва, ул. Бултерова, д.17А)  
Отпечатано в типографии ООО «Предприятие «Новая техника» (443013 г. Самара, пр-кт. Карла Маркса, 24-76)