

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-334-341

УДК 535.317

## Анализ методов определения центра пятна рассеяния в присутствии аберраций

Татьяна Владимировна Иванова<sup>1</sup>, Елизавета Юрьевна Летова<sup>2</sup>,  
Ольга Сергеевна Калинкина<sup>3</sup>, Дарья Владимировна Никифорова<sup>4</sup>,  
Владимир Евгеньевич Стригалеv<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>1</sup> [tvivanova@itmo.ru](mailto:tvivanova@itmo.ru), <http://orcid.org/0000-0001-8564-243X>

<sup>2</sup> [letova@niuitmo.ru](mailto:letova@niuitmo.ru), <http://orcid.org/0000-0001-7818-0062>

<sup>3</sup> [oskalinkina@itmo.ru](mailto:oskalinkina@itmo.ru), <http://orcid.org/0000-0002-2522-8496>

<sup>4</sup> [dnikiforova@niuitmo.ru](mailto:dnikiforova@niuitmo.ru), <http://orcid.org/0000-0002-6163-2090>

<sup>5</sup> [vestrigalev@itmo.ru](mailto:vestrigalev@itmo.ru), <http://orcid.org/0000-0002-7151-9235>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Рассмотрены методы определения центра пятна рассеяния и их погрешность в зависимости от типа и величины аберраций. Разработан модифицированный метод центра масс, позволяющий увеличить точность при наличии комы. **Методы.** Для оценки погрешности определения центра пятна рассеяния различными методами смоделированы пятна рассеяния с отдельными видами симметричных и несимметричных аберраций 3-го и 5-го порядков, а также их сочетаний. Проанализирована погрешность определения центра пятна рассеяния методом максимальной интенсивности и методом центра масс. Предложен модифицированный метод центра масс, в котором значения пикселей с большей интенсивностью имеют повышенный вес, что усиливает чувствительность метода. Выполнено сравнение модифицированного метода центра масс с другими методами. **Основные результаты.** Анализ погрешности методов определения центра пятна рассеяния показал, что метод центра масс дает точное положение центра пятна только в отсутствии комы. Метод максимальной интенсивности также не может быть применим при наличии комы, но и в отсутствие комы дает менее стабильный результат, чем метод центра масс. Модифицированный метод центра масс дает более стабильные и точные результаты при наличии комы, в том числе в сочетании с другими аберрациями. **Практическая значимость.** Предложенный метод увеличивает точность определения центра для пятен рассеяния с аберрациями, а следовательно, и точность определения функции передачи модуляции по изображению точечного тест-объекта. Точность определения центра пятна рассеяния также увеличивает сходимость метода восстановления фазы по пятну рассеяния методом параметрической оптимизации.

### Ключевые слова

пятно рассеяния, аберрации, определение центра, функция передачи модуляции, методы восстановления фазы

**Ссылка для цитирования:** Иванова Т.В., Летова Е.Ю., Калинкина О.С., Никифорова Д.В., Стригалеv В.Е. Анализ методов определения центра пятна рассеяния в присутствии аберраций // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 3. С. 334–341. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-334-341

## An analysis of methods for aberrated spot diagram center evaluation

Tatiana V. Ivanova<sup>1</sup>, Elizaveta Yu. Letova<sup>2</sup>, Olga S. Kalinkina<sup>3</sup>, Darya V. Nikiforova<sup>4</sup>,  
Vladimir E. Strigalev<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>1</sup> [tvivanova@itmo.ru](mailto:tvivanova@itmo.ru), <http://orcid.org/0000-0001-8564-243X>

<sup>2</sup> [letova@niuitmo.ru](mailto:letova@niuitmo.ru), <http://orcid.org/0000-0001-7818-0062>

<sup>3</sup> [oskalinkina@itmo.ru](mailto:oskalinkina@itmo.ru), <http://orcid.org/0000-0002-2522-8496>

<sup>4</sup> [dnikiforova@niuitmo.ru](mailto:dnikiforova@niuitmo.ru), <http://orcid.org/0000-0002-6163-2090>

<sup>5</sup> [vestrigalev@itmo.ru](mailto:vestrigalev@itmo.ru), <http://orcid.org/0000-0002-7151-9235>

© Иванова Т.В., Летова Е.Ю., Калинкина О.С., Никифорова Д.В., Стригалеv В.Е., 2021

**Abstract**

The paper considers spot diagram center evaluation methods and errors depending on aberration type and value. The authors present the modified center of mass method which provides higher accuracy of center evaluation for spot diagram with coma. Error estimation methods involved using simulated spot diagram with symmetrical and non-symmetrical aberrations of the third and fifth order and their combinations. The error of center evaluation by the maximum value method and center of mass method is analyzed. The proposed modified center of mass method gives higher weight for pixels with higher intensity that leads to better sensitivity of the method and it is compared with other methods. The center of mass method can evaluate accurate center position only for coma-free spot diagram. The maximum value method cannot evaluate accurate center position for spot diagram with coma either and for coma-free spot diagram it can also produce larger errors than the center of mass method. The modified center of mass method is more robust and evaluates center for spot diagram with coma and other aberrations more accurately. The modified center of mass method shows higher accuracy while evaluating center of spot diagram with aberration, and hence higher accuracy of modulation transfer function evaluation by spot diagram. The precise evaluation of spot diagram center will also increase the convergence of the phase retrieval method with parametric optimization techniques.

**Keywords**

spot diagram, aberration, center evaluation, modulation transfer function, phase retrieval methods

**For citation:** Ivanova T.V., Letova E.Yu., Kalinkina O.S., Nikiforova D.V., Strigalev V.E. An analysis of methods for aberrated spot diagram center evaluation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 334–341 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-334-341

**Введение**

Определение центра зарегистрированного пятна рассеяния (изображения точечного тест-объекта) весьма распространенная задача при обработке различных изображений. Повышение точности определения центра пятна позволяет повысить точность методов контроля качества оптических систем. Для решения данной задачи разработано множество способов, каждый из которых имеет свои особенности. В большинстве способов оптическая система является дифракционно-ограниченной, а пятно рассеяния близко к идеальному. Однако в ряде случаев функция рассеяния точки не идеальная, и не обладает осевой симметрией, и тогда не все известные методы позволяют точно определить центр пятна рассеяния. Существуют две задачи, чувствительные к положению центра пятна рассеяния — вычисление функции передачи модуляции (ФПМ) по изображению точечного тест-объекта и восстановление фазы [1–8] по одному или нескольким пятнам рассеяния.

Самый простой и распространенный метод определения центра изображения точечного источника — метод максимальной интенсивности, согласно которому пиксел изображения пятна рассеяния с максимальной интенсивностью принимается за центр [9, 10]. Под интенсивностью пиксела понимается его значение в растровом изображении, зарегистрированное и пропорциональное интенсивности на элементе ПЗС-матрицы. В данном методе предполагается незначительное влияние aberrаций на формирование изображения точечного тест-объекта, т. е. предполагается оптическая система дифракционного качества. Кроме того, обязательное условие корректной работы метода — наличие только одного пиксела с максимальной интенсивностью. Если пятно рассеяния занимает значительную часть матрицы (например, с дополнительным использованием оптической системы, увеличивающей пятно рассеяния на матрице), таких пикселов может быть несколько, что затрудняет определение центра.

Другой распространенный метод — поиск координат центра пятна рассеяния методом центра масс. Метод часто используется для определения центра пятна при решении различных задач [11, 12]. Он дает более точное определение центра, чем метод максимальной интенсивности, в том числе при наличии aberrаций, но в некоторых случаях, например при наличии комы, дает погрешность, что будет подробно показано далее.

Еще один распространенный метод определения центра пятна рассеяния — метод минимума оценочной функции [4, 13–16]. Общий принцип поиска центра изображения точки состоит в нахождении координат центра, при которых значение оценочной функции (разности между реальным и идеальным распределениями освещенности) является минимальным. Для дифракционно-ограниченной оптической системы в качестве такой функции обычно выбирается функция Гаусса [14, 15]. Метод часто используется как уточняющий, т. е. вначале центр пятна определяется по методу центра масс, а затем более точное значение вычисляется методом оценочной функции. Метод применим и для вычисления концентрации энергии, в этом случае оценочной функцией является максимально возможное количество энергии, попавшее в круг или квадрат с заданным размером [16]. В случае, если оценочная функция известна, метод оценочной функции более точен, чем метод максимальной интенсивности и метод центра масс. Однако в общем случае, если вид пятна рассеяния не известен, данный метод применить невозможно.

В настоящей работе приведены примеры задач, использующих для последующей обработки aberrационные пятна рассеяния, и показана их чувствительность к положению центра пятна. Выполнен анализ погрешности определения центра пятна рассеяния известными методами определения центра (центра масс и максимальной интенсивности) в зависимости от величины присутствующих aberrаций. Предложена модификация метода центра масс, позволяющая вычислять центр пятна рассеяния в присутствии aberrаций с большей точностью.

**Чувствительность к погрешности определения центра пятна рассеяния**

Среди задач, использующих для последующей обработки aberrационное пятно рассеяния с заранее неизвестными aberrациями, можно отметить ФПМ по изображению точечного тест-объекта, а также метод восстановления фазы по одному или нескольким пятнам рассеяния.

Контроль качества оптической системы по ФПМ является одним из широко распространенных методов контроля. Действующий государственный стандарт<sup>1</sup> методов испытаний объективов для оптико-электронных систем устанавливает методику определения ФПМ исследуемого объектива на основе зарегистрированной интенсивности изображения точечного тест-объекта (пятна рассеяния). ФПМ в таком случае может быть вычислена как модуль преобразования Фурье от пятна рассеяния.

Одно из свойств преобразования Фурье [17] — свойство смещения, смысл которого в том, что смещение функции в пространственной области вызывает линейный фазовый сдвиг в области частот, т. е. приводит к умножению спектра функции на сдвиговую экспоненту:

$$F[f(x - a, y - b)] = \tilde{f}(v_x, v_y)e^{-2\pi i(v_x a + v_y b)},$$

где  $f(x, y)$  — исходная функция;  $x, y$  — координаты исходной функции;  $\tilde{f}(v_x, v_y)$  — фурье-образ (спектр) исходной функции;  $v_x, v_y$  — координаты спектра;  $a, b$  — сдвиг функции.

Благодаря данному свойству фурье-образ чувствителен к смещениям исходной функции, что необходимо учитывать при расчетах и обработке экспериментальных данных.

На рис. 1 показан пример ФПМ для идеальной (безaberrационной) оптической системы, вычисленной при помощи преобразования Фурье по сгенерированному пятну рассеяния (диаметр пятна рассеяния безaberrационной системы составляет 36 пикселов). Каноническая пространственная частота рассчитывается по формуле:

$$\omega = v\lambda/A',$$

где  $v$  — пространственная частота;  $\lambda$  — длина волны;  $A'$  — задняя апертура.

Из графика видно, что смещение центра даже на 1 пиксел дает отличие вычисленной ФПМ от «истинной». При увеличении смещения отличия становятся еще более существенны, так что вычисленная ФПМ становится полностью недостоверной.

Еще одной задачей, в которой необходимо определять центр зарегистрированного пятна рассеяния, с высокой чувствительностью к сдвигу — задача восстановления фазы по пятну рассеяния [1–7]. При этом одно или несколько пятен рассеяния с известной расфокусировкой используются для восстановления фазы, т. е. волнового фронта. Существуют различные алго-

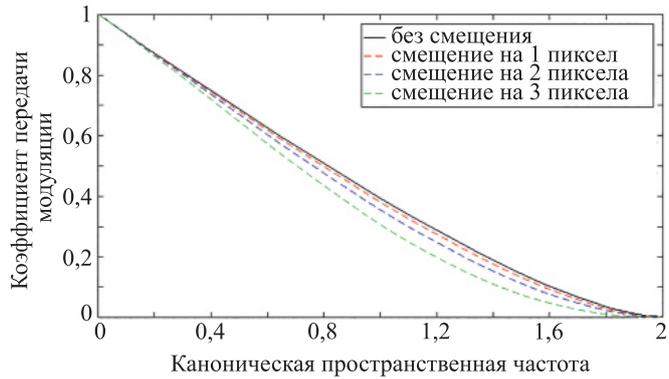


Рис. 1. Функция передачи модуляции для пятна рассеяния безaberrационной оптической системы со смещением и без смещения

Fig. 1. Modulation transfer function for spot diagram of the aberration-free optical system with and without shift

ритмы для решения данной задачи, некоторые из них восстанавливают распределение волнового фронта в виде выборки значений, в то время как другие восстанавливают описывающие его параметры (например, коэффициенты при полиномах Цернике). В работе [7] подробно рассмотрен один из таких методов, а именно, восстановление коэффициентов полиномов Цернике, описывающих волновой фронт, по известному распределению интенсивности в пятне рассеяния при помощи параметрической оптимизации. При среднеквадратическом отклонении волнового фронта до  $0,2\lambda$  и погрешности в определении центра до 2 пикселов метод успешно сходится. Для большего среднеквадратического отклонения волнового фронта метод становится более чувствительным к сдвигу пятна, и даже при погрешности в 1 пиксел в некоторых случаях расходится.

**Анализ погрешности методов определения центра пятна рассеяния**

Для проверки погрешности определения центра методами максимальной интенсивности и центра масс при наличии aberrаций, смоделировано влияние отдельных видов симметричных и несимметричных aberrаций 3-го и 5-го порядков на пятно рассеяния. Aberrации задавались при помощи коэффициентов при полиномах Цернике [18]. Порядок aberrации определялся степенью при зрачковой координате в разложении по полиномам Цернике:

$$W(\rho, \varphi) = \sum_{n=0}^p \sum_{m=0}^n c_{nm} R_n^m(\rho) \cos(m\varphi) + \sum_{n=1}^p \sum_{m=1}^n s_{nm} R_n^m(\rho) \sin(m\varphi),$$

где  $\rho, \varphi$  — полярные координаты;  $m + n$  — четное число, причем  $n \geq m$ ;  $R_n^m(\rho)$  — радиальные полиномы Цернике;  $c_{nm}$  и  $s_{nm}$  — коэффициенты разложения, которые служат общим численным представлением aberrаций оптической системы.

В методе поиска центра по максимальной интенсивности определение координат пиксела, соответствующего

<sup>1</sup> ГОСТ Р 58566-2019 Оптика и фотоника. Объективы для оптико-электронных систем. Методы испытаний. Введен 01.09.2020. М.: Стандартинформ, 2019. 31 с.

щего центру пятна рассеяния, осуществлен последовательным перебором всех пикселей.

В методе центра масс поиск пиксела, находящегося в центре пятна рассеяния, выполнен по формуле:

$$X_c = \frac{\sum_i \sum_j I_{i,j} j}{\sum_i \sum_j I_{i,j}}, Y_c = \frac{\sum_i \sum_j I_{i,j} i}{\sum_i \sum_j I_{i,j}}, \quad (1)$$

где  $X_c, Y_c$  — координаты центра масс пятна рассеяния;  $I_{i,j}$  — значение сигнала в пикселе с координатами  $i, j$ .

В ходе вычислений центра масс координаты центра пятна рассеяния  $X_c, Y_c$  — вещественные числа, которые затем округлены до ближайших целых, поскольку для

вычисления ФПМ через преобразование Фурье необходимо, чтобы центр пятна находился в центре пиксела.

Результаты анализа погрешности методов максимальной интенсивности и центра масс показаны на рис. 2. Цветом на графиках обозначены области значений коэффициентов, при которых погрешность не превышает 1 пиксел (для aberrаций 5-го порядка — серый цвет, для 3-го порядка — розовый цвет). Размер выборки при анализе составлял 512 пикселей, а диаметр безаберрационного пятна 36 пикселей.

Погрешность метода определения центра пятна рассеяния по максимальной интенсивности (рис. 2, *a, b*) в присутствии сферической aberrации и астигматизма 3-го и 5-го порядков не превышает 1 пиксел в тех

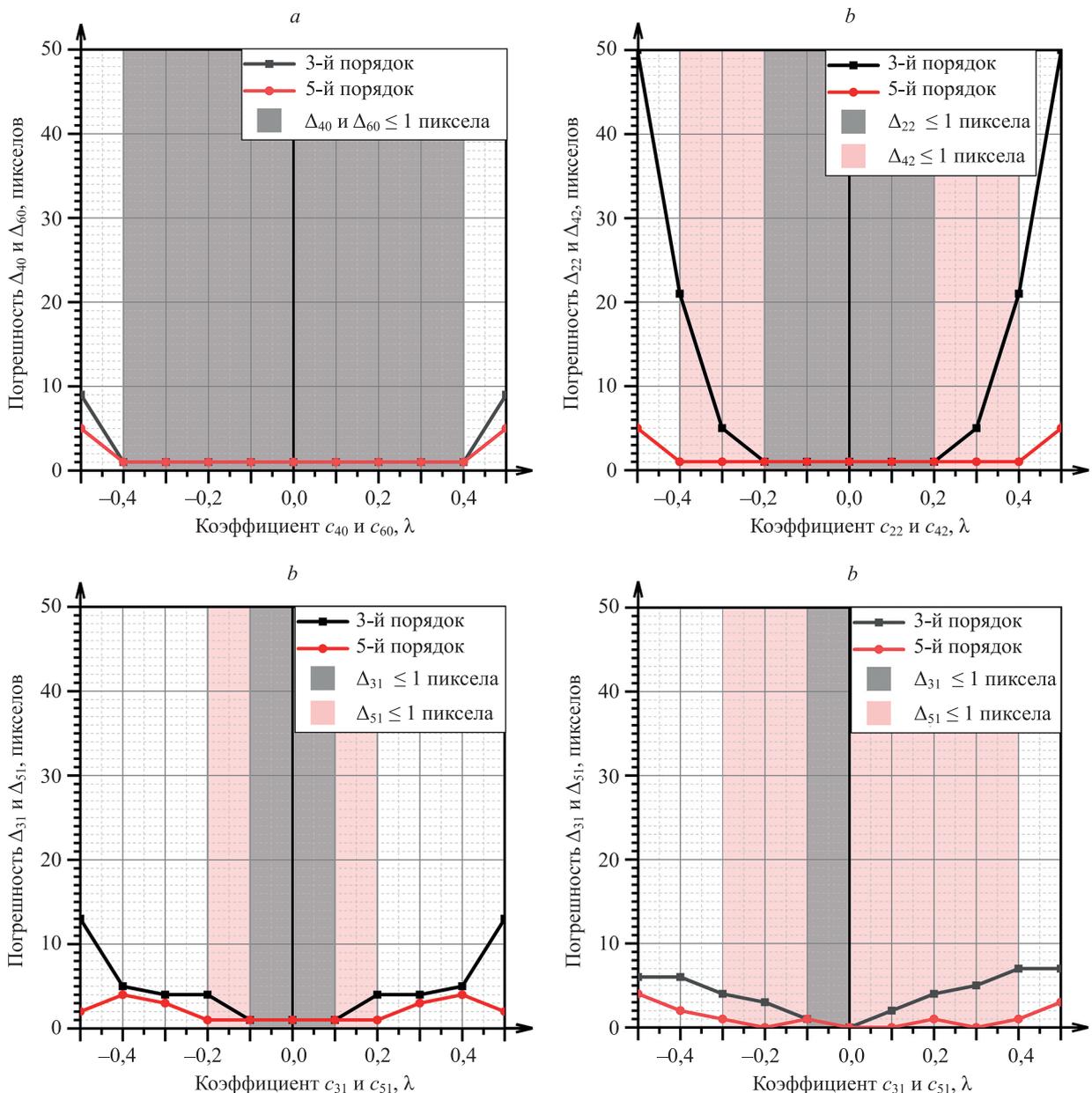


Рис. 2. Погрешность вычисления центра функции рассеяния точки aberrаций 3-го и 5-го порядков для метода максимальной интенсивности при наличии сферической aberrации (*a*), астигматизма (*b*), комы (*c*) и метода центра масс при наличии комы (*d*)

Fig. 2. Spot diagram center evaluation error for the third- and fifth-order aberrations using the following methods: the maximum value method for spherical aberration (*a*), the maximum value method for astigmatism (*b*), the maximum value method for coma (*c*), the center of mass method for coma (*d*)

случаях, когда в выборке существует только 1 пиксел с максимальной интенсивностью. При наличии нескольких пикселов с максимальной интенсивностью результаты метода не являются однозначными и могут отличаться при разных реализациях алгоритма поиска пиксела с максимальной интенсивностью. Количество пикселов с одинаковой интенсивностью возрастает с увеличением аберраций, а также с увеличением общего количества пикселов, занимаемых безаберрационным пятном рассеяния. Метод определения центра пятна рассеяния методом центра масс дает стабильно верный результат без погрешности для сферической аберрации и астигматизма (на рисунке не приводятся).

Для комы 3-го и 5-го порядков оба метода (максимальной интенсивности и центра масс) дают результаты с погрешностью (рис. 2, *c, d*). Погрешность метода центра масс при увеличении аберраций меньше, чем метода максимальной интенсивности. Однако, даже при небольших значениях комы 3-го порядка, метод центра масс может давать погрешность в несколько пикселов. Несимметрия погрешности для метода центра масс возникает из-за того, что при вычислении по формуле (1) результатом будет вещественное число. После округления до целого пиксела может возникнуть дополнительная погрешность в 0,5 пиксела.

Таким образом, можно сказать, что для всех аберраций, кроме комы, метод центра масс дает корректный результат. Для комы ни один из методов нельзя считать достоверным, поэтому необходимо модифицировать один из них.

### Модификация метода центра масс

Рассмотрим подробнее вид пятна рассеяния при наличии комы (рис. 3). На рисунке отмечен истинный центр (перекрестие 1), а также положение центров, вычисленных методами максимальной интенсивности (перекрестие 2) и методом центра масс (перекрестие 3). Под истинным центром понимается положение центра, которое было бы в случае отсутствия аберраций. Положение центра, вычисленное методом максимальной интенсивности, смещено в сторону более яркой части пятна, а положение центра, вычисленное методом центра масс, смещено в сторону вторичных колец.

Для того чтобы вычисление центра масс давало более точный результат, модификация метода для комы должна быть сделана таким образом, чтобы уменьшить влияние вторичных колец (пикселов с небольшой интенсивностью). В настоящей работе предложено в качестве такой модификации вычисление квадратичного центра масс, т. е. суммирование не самих значений интенсивности, а их квадратов:

$$X_c = \frac{\sum_i \sum_j I_{i,j}^2 j}{\sum_i \sum_j I_{i,j}^2}, Y_c = \frac{\sum_i \sum_j I_{i,j}^2 i}{\sum_i \sum_j I_{i,j}^2}. \quad (2)$$

В этом случае, чем больше интенсивность пиксела, тем больший вклад в суммирование он оказывает.

На рис. 4 показана погрешность вычисления центра пятна рассеяния в присутствии комы 3-го и 5-го порядков. Видно, что погрешность меньше, чем при

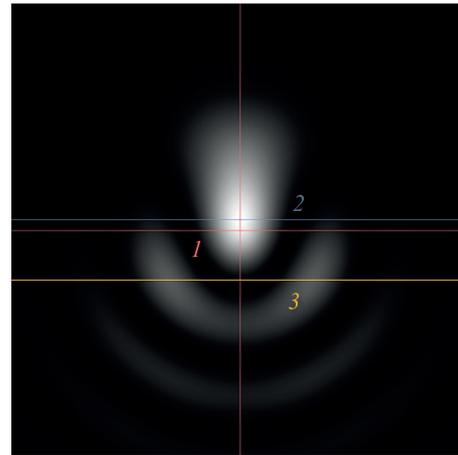


Рис. 3. Вид пятна рассеяния и положения центра пятна, вычисленные разными способами в случае комы 3-го порядка.

Истинный центр (1) и центры, вычисленные методами максимальной интенсивности (2) и центром масс (3) (128 × 128 пикселов)

Fig. 3. Spot diagram and center position evaluated by various methods for the third-order coma. The true center (1), the maximum value method center (2), the center of mass center (3) (128 × 128 pixels)

вычислении обычным методом центра масс (рис. 2, *d*). Если при вычислении методом центра масс для комы 3-го порядка погрешность может составлять два и более пиксела, начиная от величины  $c_{nm} = 0,1\lambda$ , то в модифицированном методе погрешность — 2 пиксела от величины комы  $c_{nm} = 0,35\lambda$ . Несимметрия графиков так же, как и для метода центра масс, объясняется тем, что в результате вычисления по формуле (2) получается вещественное число, которое затем округляется до целого количества пикселов.

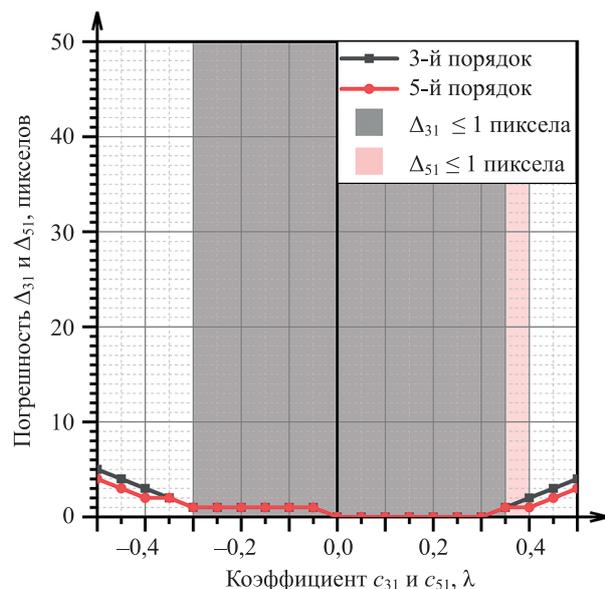


Рис. 4. Погрешность вычисления центра пятна рассеяния методом модифицированного центра масс для комы

Fig. 4. Spot diagram center evaluation error for coma by the modified center of mass method

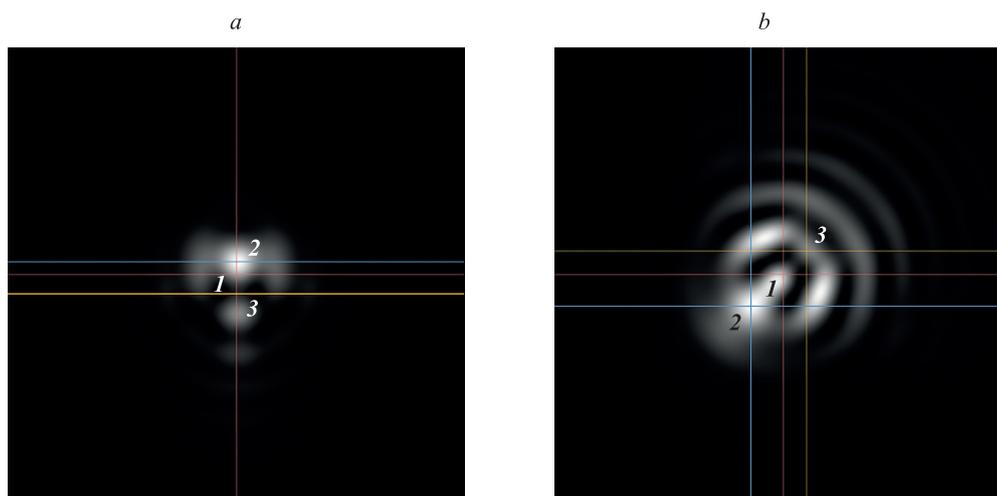


Рис. 5. Примеры вида пятен рассеяния и положений центра пятна при наличии: комы  $c_{31} = 0,4\lambda$ , астигматизма  $c_{22} = 0,4\lambda$  и сферической aberrации  $c_{40} = 0,1\lambda$  (a); комы  $c_{31} = 0,5\lambda$ ,  $s_{31} = 0,5\lambda$  и сферической aberrации  $c_{40} = 0,3\lambda$  (b).

Центры пятен вычислены разными способами: истинный центр и центр, вычисленный методом модифицированного центра масс (1), и центры, вычисленные методами максимальной интенсивности (2) и центра масс (3) ( $256 \times 256$  пикселей)

Fig. 5. Spot diagram and center position evaluated by various methods: coma  $c_{31} = 0.4\lambda$  astigmatism  $c_{22} = 0.4\lambda$ , spherical aberration  $c_{40} = 0.1\lambda$  (a); coma  $c_{31} = 0.5\lambda$ ,  $s_{31} = 0.5\lambda$ , spherical aberration  $c_{40} = 0.3\lambda$  (b).

Spot diagram centers are evaluated by various methods: the true center and modified center of mass (1) and the maximum value method center (2) and the center of mass center (3) ( $256 \times 256$  pixels)

Выполнен анализ сочетаний комы с другими aberrациями 3-го и 5-го порядков и погрешность вычисления центра пятна рассеяния разными способами. Анализ результатов показал, что при среднеквадратическом отклонении волнового фронта до  $0,2\lambda$  метод квадратичного центра масс дает погрешность не более 1 пикселя. При увеличении величины aberrаций погрешность определения центра у всех методов возрастает, но погрешность определения центра методом квадратичного центра масс остается наименьшей из рассматриваемых методов.

На рис. 5 показан пример двух пятен рассеяния с различными aberrациями. Перекрестиями показаны положения центра пятна, определяемого разными методами. Центр, определяемый методом квадратичного центра масс, совпадает с истинным центром с точностью до 1 пикселя. Центр, определяемый по методу максимальной интенсивности и по методу центра масс, существенно отличается от истинного центра.

Таким образом, можно сделать вывод, что модифицированный метод центра масс дает существенно меньшую погрешность при вычислении центра пятна рассеяния в присутствии комы, в том числе при сочетании комы с другими aberrациями. При среднеквадратическом отклонении волнового фронта до  $0,2\lambda$  метод квадратичного центра масс дает погрешность не более 1 пикселя, что позволяет его использовать при анализе aberrационного пятна рассеяния в задачах, чувствительных к сдвигу центр пятна.

### Заключение

Выполнен анализ методов определения центра пятна рассеяния для случая различных aberrаций. Для оценки погрешности рассмотренных методов смоделированы

пятна рассеяния в присутствии симметричных и несимметричных aberrаций 3-го и 5-го порядков, а также их сочетаний. Анализ точности метода максимальной интенсивности показал, что метод обладает достаточной точностью для сферической aberrации и астигматизма до тех пор, пока пятно рассеяния содержит не более 1 пикселя с максимальной интенсивностью. Количество таких пикселей может возрастать с увеличением величины aberrаций, а также с увеличением размера безaberrационного (дифракционного) пятна рассеяния. Метод центра масс стабильно работает практически без погрешности для сферической aberrации и астигматизма. Для комы методы максимальной интенсивности и центра масс дают существенную погрешность.

Для уменьшения погрешности при определении центра пятна рассеяния в присутствии комы разработан модифицированный метод центра масс — квадратичный центр масс. Метод усиливает влияние пикселей с большой интенсивностью, добавляя дополнительный весовой коэффициент, равный значению интенсивности в данном пикселе. Анализ погрешности определения центра для модифицированного метода показал, что погрешность для комы 3-го и 5-го порядков существенно меньше, чем в методах центра масс и максимальной интенсивности. Анализ результатов определения центра для сочетаний различных aberrаций 3-го и 5-го порядков с комой показал, что при среднеквадратическом отклонении волнового фронта до  $0,2\lambda$  метод квадратичного центра масс дает погрешность не более 1 пикселя. При увеличении величины aberrаций погрешность всех методов возрастает, но погрешность метода квадратичного центра масс остается наименьшей из рассматриваемых методов.

Разработанный модифицированный метод центра масс позволяет увеличить точность определения центра

для пятен рассеяния с аберрациями, а следовательно, увеличить точность определения функции передачи модуляции по изображению точечного тест-объекта. Точность определения центра пятна рассеяния также

увеличивает сходимость метода восстановления фазы по пятну рассеяния методом параметрической оптимизации.

### Литература

- Krist J.E., Burrows C.J. Phase-retrieval analysis of pre- and post-repair Hubble Space Telescope images // *Applied Optics*. 1995. V. 34. N 22. P. 4951–4964. doi: 10.1364/AO.34.004951
- Wesner J., Heil J., Sure T. Reconstructing the pupil function of microscope objectives from the intensity PSF // *Proceedings of SPIE*. 2002. V. 4767. P. 32–43. doi: 10.1117/12.451320
- Gladysz S. Adaptive optics point spread function reconstruction directly from target data // *Proc. Imaging and Applied Optics*. 2016. P. AOT2C.1. doi: 10.1364/AOMS.2016.AOT2C.1
- Клебанов Я.М., Карсаков А.В., Хонина С.Н., Давыдов А.Н., Поляков К.А. Компенсация аберраций волнового фронта в телескопах космических аппаратов с регулировкой температурного поля телескопа // *Компьютерная оптика*. 2017. Т. 41. № 1. С. 30–36. doi: 10.18287/0134-2452-2017-41-1-30-36
- Gerchberg R.W., Saxton W.O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures // *Optik*. 1972. V. 35. N 2. P. 237–246.
- Kalinkina O., Ivanova T., Kushtyeva J. Wavefront parameters recovering by using point spread function // *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. V. 2744.
- Иванова Т.В., Калинкина О.С., Куштысева Ю.О., Завгородний Д.С. Анализ влияния расфокусировки на определение параметров волнового фронта телескопа по пятну рассеяния методом параметрической оптимизации // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021. Т. 21. № 1. С. 65–72. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-65-72
- Сизиков В.С. Спектральный способ оценки функции рассеяния точки в задаче устранения искажений изображений // *Оптический журнал*. 2017. Т. 84. № 2. С. 36–44.
- Пальчикова И.Г., Смирнов Е.С. Экспериментальное определение функции рассеяния точки в установках компьютерной цитометрии // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. 2014. № 4(25). С. 104–114. doi: 10.17212/1727-2769-2014-4-104-114
- Liang L., Zhang P., Ding H., Wang G. An improved method of calculating MTF from PSF based on CT phantom images // *Proc. 2<sup>nd</sup> IET International Conference on Biomedical Image and Signal Processing (ICBISP)*. 2017. doi: 10.1049/cp.2017.0098
- Ягнятинский Д.А., Ляхов Д.М., Боршевников А.Н., Федосеев В.Н. Алгоритм управления адаптивной оптической системой на основе минимизации радиуса фокального пятна // *Оптика атмосферы и океана*. 2016. Т. 29. № 11. С. 949–953. doi: 10.15372/AOO20161108
- Шилин А.Н., Дементьев С.С. Оптический метод регистрации пробегов линейной опоры для диагностики состояния ЛЭП // *Известия вузов. Приборостроение*. 2018. Т. 61. № 6. С. 490–497. doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-6-490-497
- Мишин С.В., Кулакова Н.Н., Тарасишин А.В. Адаптация алгоритма поиска координат энергетического центра изображения автоколлимационной точки для работы с цифровым автоколлиматором // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2016. № 2. С. 117–124. doi: 10.18698/0236-3933-2016-2-117-124
- Tolstoba N.D. Gram-Schmidt technique for aberration analysis in telescope mirror testing // *Proceedings of SPIE*. 1999. V. 3785. P. 140–151. doi: 10.1117/12.367612
- Tolstoba N. Analysis of Hartmann testing techniques for large-sized optics // *Proceedings of SPIE*. 2001. V. 4451. P. 406–413. doi: 10.1117/12.453650
- Дрыгин Д.А., Острун А.Б. Разработка алгоритма расчета концентрации энергии инфракрасных оптических систем с учетом влияния эффекта перетекания зарядов на матричном фотоприемном устройстве // *Оптический журнал*. 2020. Т. 87. № 9. С. 3–11. doi: 10.17586/1023-5086-2020-87-09-03-11
- Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 364 с.

### References

- Krist J.E., Burrows C.J. Phase-retrieval analysis of pre- and post-repair Hubble Space Telescope images. *Applied Optics*, 1995, vol. 34, no. 22, pp. 4951–4964. doi: 10.1364/AO.34.004951
- Wesner J., Heil J., Sure T. Reconstructing the pupil function of microscope objectives from the intensity PSF. *Proceedings of SPIE*, 2002, vol. 4767, pp. 32–43. doi: 10.1117/12.451320
- Gladysz S. Adaptive optics point spread function reconstruction directly from target data. *Proc. Imaging and Applied Optics*, 2016, pp. AOT2C.1. doi: 10.1364/AOMS.2016.AOT2C.1
- Klebanov J.M., Karsakov A.V., Khonina C.N., Davydov A.N., Polyakov K.A. Wave front aberration compensation of space telescopes with telescope temperature field adjustment. *Computer Optics*, 2017, vol. 41, no. 1, pp. 30–36. (in Russian). doi: 10.18287/0134-2452-2017-41-1-30-36
- Gerchberg R.W., Saxton W.O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures. *Optik*, 1972, vol. 35, no. 2, pp. 237–246.
- Kalinkina O., Ivanova T., Kushtyeva J. Wavefront parameters recovering by using point spread function. *CEUR Workshop Proceedings*, 2020, vol. 2744.
- Ivanova T.V., Kalinkina O.S., Kushtyeva J.O., Zavgorodniy D.S. Defocus impact analysis on telescope wavefront reconstruction by scattering spot with parametric optimization technique. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 65–72. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-65-72
- Sizikov V.S. Spectral method for estimating the point-spread function in the task of eliminating image distortions. *Journal of Optical Technology*, 2017, vol. 84, no. 2, pp. 95–101. doi: 10.1364/JOT.84.000095
- Palchikova I.G., Smirnov E.S. Point spread function definition for digital cytophotometric devices. *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2014, no. 4(25), pp. 104–114. (in Russian). doi: 10.17212/1727-2769-2014-4-104-114
- Liang L., Zhang P., Ding H., Wang G. An improved method of calculating MTF from PSF based on CT phantom images. *Proc. 2<sup>nd</sup> IET International Conference on Biomedical Image and Signal Processing (ICBISP)*, 2017. doi: 10.1049/cp.2017.0098
- Yagnyatinskiy D.A., Lyakhov D.M., Borshevnikov A.N., Fedoseyev V.N. A control algorithm for an adaptive optics system based on the focal spot radius minimization. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2017, vol. 30, no. 2, pp. 198–202. doi: 10.1134/S1024856017020154
- Shilin A.N., Dementyev S.S. An optical method of registration of line tower deflection for diagnosis of OHL state. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, vol. 61, no. 6, pp. 490–497. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-6-490-497
- Mishin S.V., Kulakova N.N., Tarasishin A.V. Adaptation of the algorithm for searching the coordinates of the energy centre in the image of an autocollimating point for working with digital autocollimator. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2016, no. 2, pp. 117–124. (in Russian). doi: 10.18698/0236-3933-2016-2-117-124
- Tolstoba N.D. Gram-Schmidt technique for aberration analysis in telescope mirror testing. *Proceedings of SPIE*, 1999, vol. 3785, pp. 140–151. doi: 10.1117/12.367612
- Tolstoba N. Analysis of Hartmann testing techniques for large-sized optics. *Proceedings of SPIE*, 2001, vol. 4451, pp. 406–413. doi: 10.1117/12.453650
- Drygin D.A., Ostrun A.B. Development of an algorithm for calculating the energy concentration of infrared optical systems taking into account the charge flow effect in a photodetector array. *Journal of Optical Technology*, 2020, vol. 87, no. 9, pp. 506–512. doi: 10.1364/JOT.87.000506
- Goodman J.W. *Introduction to Fourier Optics*. McGraw-Hill, 1968, 287 p.

18. Bezdidko S.N. Theory of orthogonal aberrations and its use in lens design // *Optical Review*. 2014. V. 21. N 5. P. 632–638. doi: 10.1007/s10043-014-0101-2

18. Bezdidko S.N. Theory of orthogonal aberrations and its use in lens design. *Optical Review*, 2014, vol. 21, no. 5, pp. 632–638. doi: 10.1007/s10043-014-0101-2

#### Авторы

**Иванова Татьяна Владимировна** — кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация,  7202117384, <http://orcid.org/0000-0001-8564-243X>, [tvivanova@itmo.ru](mailto:tvivanova@itmo.ru)

**Летова Елизавета Юрьевна** — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <http://orcid.org/0000-0001-7818-0062>, [letova@niuitmo.ru](mailto:letova@niuitmo.ru)

**Калинкина Ольга Сергеевна** — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <http://orcid.org/0000-0002-2522-8496>, [oskalinkina@itmo.ru](mailto:oskalinkina@itmo.ru)

**Никифорова Дарья Владимировна** — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <http://orcid.org/0000-0002-6163-2090>, [dnikiforova@niuitmo.ru](mailto:dnikiforova@niuitmo.ru)

**Стригалев Владимир Евгеньевич** — кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация,  6603225596, <http://orcid.org/0000-0002-7151-9235>, [vestrigalev@itmo.ru](mailto:vestrigalev@itmo.ru)

#### Authors

**Tatiana V. Ivanova** — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation,  7202117384, <http://orcid.org/0000-0001-8564-243X>, [tvivanova@itmo.ru](mailto:tvivanova@itmo.ru)

**Elizaveta Yu. Letova** — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0001-7818-0062>, [letova@niuitmo.ru](mailto:letova@niuitmo.ru)

**Olga S. Kalinkina** — Postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0002-2522-8496>, [oskalinkina@itmo.ru](mailto:oskalinkina@itmo.ru)

**Darya V. Nikiforova** — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0002-6163-2090>, [dnikiforova@niuitmo.ru](mailto:dnikiforova@niuitmo.ru)

**Vladimir E. Strigalev** — PhD, Associate Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation,  6603225596, <http://orcid.org/0000-0002-7151-9235>, [vestrigalev@itmo.ru](mailto:vestrigalev@itmo.ru)

*Статья поступила в редакцию 24.02.2021*  
*Одобрена после рецензирования 31.03.2021*  
*Принята к печати 13.05.2021*

*Received 24.02.2021*  
*Approved after reviewing 31.03.2021*  
*Accepted 13.05.2021*



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»