

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-26-34

УДК 535.317, 53.088

Метод устранения влияния конечного диаметра диафрагмы при вычислении функции передачи модуляции и концентрации энергии объектива по функции рассеяния точки

Елизавета Юрьевна Летова¹✉, Татьяна Владимировна Иванова²^{1,2} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация¹ letova@niuitmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7818-0062>² tvivanova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8564-243X>

Аннотация

Введение. Одними из основных характеристик качества изображения, используемых в оптическом приборостроении при производственном контроле изготовленных устройств, являются функции передачи модуляции (ФПМ) и концентрации энергии (ФКЭ), которые вычисляются по зарегистрированным на установке контроля изображениям точечных тест-объектов, т. е. круглых диафрагм. Для каждого контролируемого объектива с учетом параметров установки контроля можно определить диаметр диафрагмы, при котором она считается бесконечно малой. Такие диафрагмы обладают свойствами своих идеальных теоретических моделей и не вносят дополнительные погрешности. Однако на практике чаще всего используются диафрагмы, диаметр которых превышает бесконечно малый. В работе предложен метод коррекции ФКЭ, а также способ увеличения максимальной вычисляемой пространственной частоты при коррекции ФПМ для учета влияния диаметра точечной диафрагмы при контроле объективов по ее зарегистрированному изображению. **Метод.** Для коррекции применяется инверсная фильтрация. В качестве фильтра используется Фурье-образ круглой диафрагмы заданного диаметра. Данный метод обладает ограничениями ввиду возможности возникновения неопределенных значений искомой функции при делении на близкие к нулю величины спектра тест-объекта. Для устранения этого явления применяется линейная интерполяция ФПМ на частотах, где функция спектра тест-объекта стремится к нулю. Такой подход необходим при коррекции диаметра диафрагмы для ФКЭ. В результате вычисляется скорректированная функция рассеяния точки, найденная как обратное преобразование Фурье от ФПМ, скорректированной на всем диапазоне частот. **Основные результаты.** Исследование предложенной методики проведено на сгенерированных изображениях тест-объекта различного размера. Подобрано пороговое значение функции-делителя для коррекции ФПМ, при котором не происходит резкого возрастания значений скорректированной ФПМ из-за деления на величины, близкие к нулю. Получено выражение, позволяющее определить максимальный диаметр тест-объекта, подходящий для коррекции предложенным методом. Показано, что интерполирование значений скорректированной ФПМ позволяет вычислять ФПМ и ФКЭ при использовании диафрагм в 2,5 раза большего диаметра, чем с использованием стандартного метода инверсной фильтрации, и в 8 раз больших, чем диаметр диафрагмы, который можно считать бесконечно малым. При этом максимальная абсолютная погрешность скорректированных ФПМ и ФКЭ не превышает 0,01 отн. ед. **Обсуждение.** Предложенный метод дает возможность сократить время процедуры контроля объективов за счет исключения этапа строгого подбора диаметра диафрагмы. Применение диафрагм, диаметр которых в 8 раз больше бесконечно малых, позволит увеличить световой поток при контроле по ФКЭ и ФПМ, что особенно актуально при аттестации объективов невысокой светосилы.

Ключевые слова

функция рассеяния точки, функция передачи модуляции, функция концентрации энергии, контроль оптических систем, инверсная фильтрация

Ссылка для цитирования: Летова Е.Ю., Иванова Т.В. Метод устранения влияния конечного диаметра диафрагмы при вычислении функции передачи модуляции и концентрации энергии объектива по функции рассеяния точки // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 1. С. 26–34. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-26-34

Correcting method of the finite pinhole diameter influence in calculating the modulation transfer function and energy concentration of a lens based on the point spread function

Elizaveta Yu. Letova¹✉, Tatiana V. Ivanova²

^{1,2} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ letova@niuitmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7818-0062>

² tvivanova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8564-243X>

Abstract

The main image quality characteristics used in optical system design and fabrication for testing produced devices are the Modulation Transfer Function (MTF) and the Encircled Energy Function (EEF) which are calculated based on pinhole test objects images captured by the testing equipment. For each inspected lens, taking into account the testing equipment parameters, the pinhole diameter, which can be considered infinitely small, can be determined. Such pinholes exhibit the properties of ideal theoretical models and do not cause additional errors. However, pinholes with a diameter greater than infinitely small are most often used in practice. The paper proposes pinhole diameter influence correction methods for EEF calculation and for increasing the maximum calculable spatial frequency in MTF calculation during lens testing based on the captured images. Inverse filtering is used for the correction. The Fourier image of a pinhole with a given diameter is used as a filter. This method has limitations due to the possibility of undefined values appearing in the corrected function when dividing by values close to zero in the pinhole spectrum. To eliminate this effect, the linear interpolation of the MTF is used at frequencies where the test object spectrum function is close to zero. This approach is necessary when correcting the pinhole diameter for EEF. For this purpose, the corrected point spread function, which is the inverse Fourier transform of the MTF corrected over the entire frequency range, is calculated. The proposed method was tested on various-sized test objects generated images. As a result of the research, a divisor function threshold value that does not cause a strong increase in the corrected MTF values due to division by values close to zero was selected for MTF correction. An expression that allows the determination of the maximum test object diameter suitable for correction using the proposed method was obtained. It is shown that the corrected MTF values interpolation allows calculating the MTF and EEF using apertures 2.5 times larger in diameter than with the standard inverse filtering method, and 8 times larger than the pinhole diameter, which can be considered infinitely small. At the same time, the maximum absolute error of the corrected MTF and EEF does not exceed 0.01 relative units. The proposed method reduces the lens testing time by eliminating the need for strict pinhole diameter selection. Furthermore, the use of pinholes with a diameter 8 times larger than infinitely small ones increases the light flow during EEF and MTF testing, which is particularly important when testing lenses with low optical efficiency (small apertures).

Keywords

point spread function, modulation transfer function, encircled energy function, optical systems testing, optical system quality characteristics, inverse filtering

For citation: Letova E.Yu., Ivanova T.V. Correcting method of the finite pinhole diameter influence in calculating the modulation transfer function and energy concentration of a lens based on the point spread function. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 1, pp. 26–34 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-26-34

Введение

В настоящее время современное оптическое производство обладает огромным ассортиментом продукции различного назначения и технической сложности. Одна из главных задач оптического приборостроения — быстрый и точный контроль произведенных устройств [1, 2]. Наиболее распространенными и часто встречающимися в технических заданиях на оптическую продукцию критериями качества объективов, в зависимости от их типа и назначения, являются коэффициент передачи модуляции на определенной пространственной частоте или коэффициент концентрации энергии в области заданного размера [3, 4]. Основным методом контроля этих критериев — вычисление функций передачи модуляции (ФПМ) [5–7] и концентрации энергии (ФКЭ) [8] путем численной обработки, зарегистрированного на матричное фотоприемное устройство, изображения тест-объекта.

Установка для контроля представляет из себя источник излучения широкого спектра с набором светофильтров, которые позволяют производить регистрацию для разных длин волн, и набора тест-объектов в виде то-

чных (круглых) диафрагм, изображение которых при помощи коллиматора проецируется во входной зрачок контролируемого объектива. Изображение тест-объекта после контролируемого объектива регистрируется на матрице, и является основой для вычисления ФПМ и ФКЭ. На погрешность вычисления критериев качества по зарегистрированному изображению тест-объекта влияют разные факторы и параметры установки контроля (например, фоновая засветка, шумы на приемнике и т. д.) [9, 10]. Одним из таких факторов является диаметр используемого тест-объекта, т. е. точечной диафрагмы. Диафрагмы, используемые при регистрации изображений для контроля объективов, как и любые предметы реального мира, имеют конечный диаметр и тем самым значительно отличаются от своих идеальных бесконечно малых математических моделей, при помощи которых описывается физический процесс формирования изображения [11, 12]. При контроле объективов можно определить диаметр тест-объекта, который возможно считать бесконечно малым и не влияющим на итоговый результат. Диаметр подбираемой таким образом диафрагмы будет зависеть в том числе и от параметров контролируемого объектива.

Кроме того, из-за ограниченной силы света источника освещения широкого спектра (особенно в случае применения светофильтров) на практике для увеличения светового потока часто необходимо использовать диафрагму диаметра, большего, чем бесконечно малый, поэтому актуальной является задача контроля объективов с дополнительной коррекцией диаметра диафрагмы методом инверсной фильтрации [13, 14].

Такая коррекция используется при вычислении ФПМ, но при этом ограничивает максимальную вычисляемую пространственную частоту. В настоящей работе предлагается применять при коррекции ФПМ методом инверсной фильтрации дополнительную интерполяцию ФПМ, что позволяет увеличить предельную частоту, для которой возможна коррекция. С увеличением предельной вычисляемой частоты становится возможным также и коррекция для ФКЭ, что также представляет собой актуальную задачу.

Целью работы является коррекция ФКЭ, а также увеличение максимальной вычисляемой пространственной частоты при коррекции ФПМ для учета влияния диаметра точечной диафрагмы при контроле объективов по ее зарегистрированному изображению методом инверсной фильтрации с использованием дополнительной интерполяции. Данный метод позволит расширить диапазон диаметров используемых точечных диафрагм при контроле объективов по их зарегистрированным изображениям.

Вычисление ФПМ и ФКЭ для бесконечно малых тест-объектов

ФПМ рассчитывается как преобразование Фурье зарегистрированной функции рассеяния точки (ФРТ), т. е. изображения круглой диафрагмы бесконечно малого диаметра [15]:

$$T(v_x, v_y) = |F[h(x, y)]|, \quad (1)$$

где $T(v_x, v_y)$ — ФПМ; v_x, v_y — пространственные частоты; $h(x, y)$ — ФРТ; x, y — пространственные координаты на матрице; F — оператор преобразования Фурье.

ФКЭ в круглой области вычисляется по данным о распределении относительной освещенности в ФРТ [16]:

$$E(r) = \frac{E^R(r)}{E^{all}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $E^R(r)$ — сумма значений сигнала пикселей изображения, находящихся в круглой области радиуса r ; E^{all} — сумма значений сигнала всех пикселей изображения.

При вычислении ФПМ и ФКЭ по выражениям (1) и (2), максимальный диаметр диафрагмы, который не влияет на вычисление ФПМ и не требует коррекции¹, не должен превышать десятую часть диаметра пятна рассеяния контролируемого объектива в пространстве

¹ ГОСТ Р58566-2019. Оптика и фотоника. Объективы для оптико-электронных систем. Методы испытаний. Введ. 27.09.2019. М.: Стандартинформ, 2019. 28 с.

изображений, пересчитанного на пространство диафрагмы:

$$d_0 \leq 0,1d_d, \quad (3)$$

где d_0 — диаметр диафрагмы, которую можно считать бесконечно малой при вычислении ФПМ; d_d — дифракционный диаметр пятна рассеяния контролируемого объектива в пространстве диафрагмы.

Дифракционный диаметр пятна рассеяния можно найти в пространстве диафрагмы с учетом всех масштабных преобразований, осуществляемых оптической схемой установки контроля, следующим образом:

$$d_d = 2,44 \frac{f_c' \lambda k}{f_i'}, \quad (4)$$

где f_c' и f_i' — задние фокусные расстояния коллиматора и контролируемого объектива; k — диафрагменное число контролируемого объектива, определяющее относительное отверстие $1:k$; λ — длина волны источника освещения.

При контроле разнообразных объективов в условиях реального производства не всегда можно подобрать достаточно маленький тест-объект, удовлетворяющий условию (3), который не будет вносить дополнительную погрешность в ФПМ и ФКЭ. В случае, если есть диафрагма, которую можно считать бесконечно малой для контролируемого объектива, высока вероятность, что из-за ограниченной яркости источника освещения, светового потока, проходящего через диафрагму, будет недостаточно для регистрации пятна рассеяния с достаточной освещенностью. По этой причине на практике часто используют диафрагмы большего диаметра, а для обеспечения низкой погрешности вычислений ФПМ и ФКЭ диаметр предмета корректируют методом инверсной фильтрации [14].

Коррекция диаметра тест-объекта методом инверсной фильтрации для ФПМ

Рассмотрим подробнее метод инверсной фильтрации и его использование для коррекции ФПМ. В соответствии с подходом к описанию формирования изображения, основанным на теории сигналов, эквивалентная ФПМ состоит из произведения ФПМ контролируемого объектива и других влияющих факторов, в данном случае спектра тест-объекта, который можно вычислить аналитически для круга [14, 17].

Таким образом, для точечной диафрагмы скорректировать влияние ее диаметра на итоговую ФПМ можно по следующей формуле [14]:

$$T_e(v_x, v_y) = \frac{T_e(v_x, v_y)}{|\text{Jinc}(v, d'/2)|}, \quad (5)$$

$$\text{Jinc}(v, d'/2) = \frac{2J_1(\pi v, d')}{\pi v, d'}$$

где T_e — эквивалентная ФПМ, вычисленная по формуле (1) по зарегистрированному изображению; v_x, v_y — пространственные частоты, лин/мм; $d' = df_i'/f_c'$ — диаметр

диафрагмы, приведенный в пространство изображений контролируемого объекта; J_1 — функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка; $v_r = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ — радиальная пространственная частота.

Важно отметить, что в знаменателе выражения (5) для учета диаметра находится функция, которая может пересекать ось абсцисс и на определенных участках принимать значения, близкие к нулю. При делении на ноль или близкие к нему величины значения скорректированной ФПМ стремятся к бесконечности, что противоречит ее физическому смыслу (рис. 1).

По этой причине при контроле объективов по ФПМ, во избежание деления на близкие к нулю значения, достоверной можно считать ФПМ на частоте в 1,5 раза меньше расчетной частоты обращения функции-делителя в ноль [18]:

$$v^0 = \frac{1,22f_c'}{df_i'}; v_t \leq \frac{v^0}{1,5}, \quad (6)$$

где d — диаметр точечной диафрагмы; v_t — максимальная контролируемая частота.

Следовательно, необходимо учитывать диаметр тест-объекта в зависимости от требуемой по техническому заданию контролируемой частоты. Диафрагму, подходящую для требуемой контролируемой частоты, подбирают так, чтобы ее диаметр удовлетворял следующему условию, полученному из выражения (6):

$$d \leq \frac{1,22f_c'}{1,5v_t f_i'} \quad (7)$$

В результате особенности метода инверсной фильтрации сокращают диапазон частот анализа ФПМ или накладывают ограничения на диаметр используемой диафрагмы.

Коррекция диаметра тест-объекта методом инверсной фильтрации для ФКЭ

Коррекция диаметра тест-объекта при вычислении ФКЭ также возможна, если вычислить ФРТ с учетом диаметра диафрагмы, и на ее основе рассчитать концентрацию энергии. Для этого необходимо вначале вычислить ФПМ как преобразование Фурье зарегистрированной ФРТ, затем при помощи метода инверсной фильтрации выполнить коррекцию диаметра тест-объекта на всем диапазоне частот ФПМ. Получение полного спектра пространственных частот ФПМ без пропусков и разрывов функции чрезвычайно важно, поскольку далее вычисляется обратное преобразование Фурье полностью скорректированной ФПМ. В случае, если какие-то области частот ФПМ будут вычислены с заметной погрешностью, то после обратного преобразования Фурье эта ошибка распространится во всей пространственной области измеренной ФРТ, что сделает невозможным правильное вычисление ФКЭ. В связи с этим необходимо восстановить ФПМ полностью на всем диапазоне частот от нуля до предельной пространственной частоты. В результате обратного преобразования Фурье полностью скорректированной ФПМ получается ФРТ с учетом диаметра предмета,

которая используется для последующего вычисления ФКЭ.

После коррекции диаметра предмета для ФРТ концентрацию энергии с учетом диаметра можно вычислить согласно выражению (2) по найденному изображению скорректированной ФРТ. Поскольку в распределении ФРТ искажения, обусловленные диаметром предмета, устранены, ФКЭ также не подвергается влиянию диаметра предмета.

Для вычисления ФКЭ с учетом диаметра предмета, диаметр точечной диафрагмы можно определить по формуле (7), подставив в качестве максимальной контролируемой частоты предельную пространственной частоту. После несложных математических преобразований выражение для оценки максимального диаметра диафрагмы, позволяющего контролировать весь диапазон пространственных частот, примет вид:

$$d \leq \frac{10}{3} d_0.$$

Таким образом, благодаря инверсной фильтрации возможно вычисление ФКЭ с использованием диафрагмы, диаметр которой в 3,3 раза больше, чем диаметр диафрагмы, который можно считать бесконечно малым.

Коррекция диаметра тест-объекта методом инверсной фильтрации с дополнительной интерполяцией

Как показано в разделе «Коррекция диаметра тест-объекта методом инверсной фильтрации для ФПМ», достоверно оценивать качество объектива по ФПМ при помощи метода инверсной фильтрации можно в диапазоне частот от нуля до частоты, которая в 1,5 раза меньше частоты, где функция-делитель обращается в ноль. При этом корректное вычисление ФПМ с учетом диаметра диафрагмы на всем диапазоне частот, что необходимо для вычисления ФКЭ с учетом диаметра диафрагмы, может быть обеспечено подбором диафрагмы с диаметром не более чем в 3,3 раза больше, чем бесконечно малый. Для того чтобы увеличить этот диаметр, в настоящей работе предлагается использовать линейную интерполяцию сечений ФПМ для тех частот, где функция J_1 стремится к нулю и в которых значения функции нельзя считать достоверными.

Для интерполяции в первую очередь необходимо определить такое пороговое значение делителя, что при делении на него или большие по модулю величины в скорректированной ФПМ не появляются резкие выбросы значений коэффициента передачи модуляции (рис. 1). Для определения порогового значения проведено численное моделирование ФПМ для объектов с различными параметрами. В ходе исследований эмпирическим путем подобрано пороговое значение $t = 0,075$, при котором не возникает резких выбросов значений на скорректированном графике ФПМ.

Как известно, функция J_1 обладает радиальной симметрией, а анализ двумерной ФПМ осуществляется при помощи построения сечений в области положительных пространственных частот с началом отсчета в центре выборки. Исходя из этого, предложено в

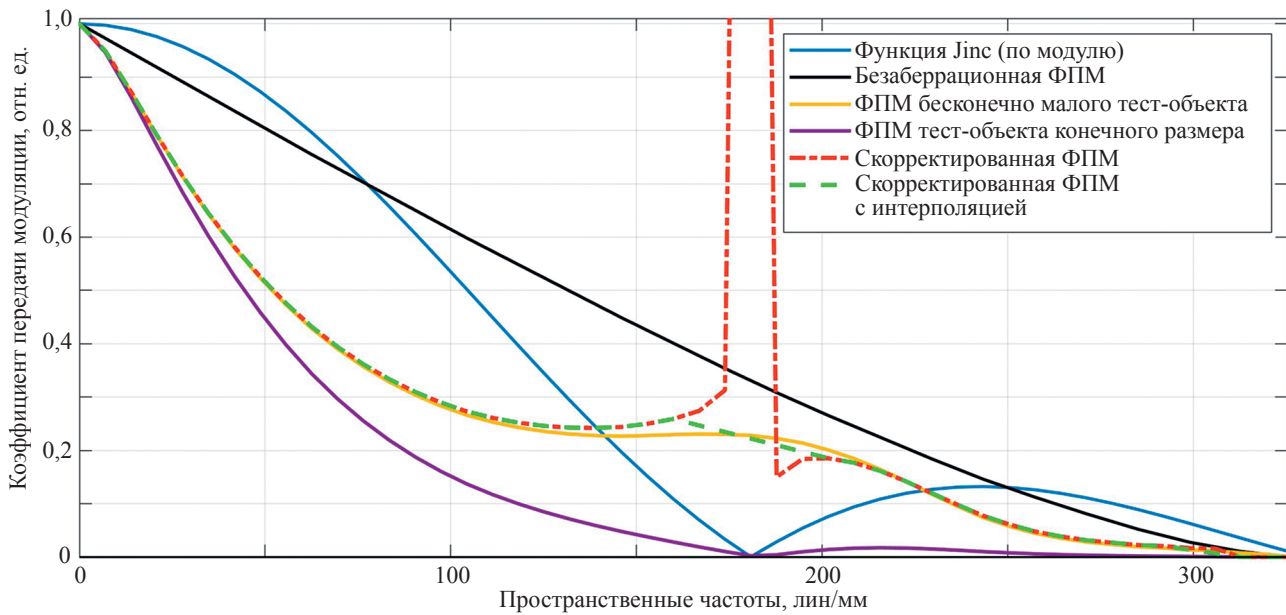


Рис. 1. Пример функции передачи модуляции (ФПМ) (для смоделированной функции рассеяния точки) при коррекции диаметра предмета с и без использования интерполяции

Fig. 1. An MTF (ФПМ) example (for simulated PSF) corrected for finite object size with and without interpolation

качестве метода интерполяции применять линейную одномерную интерполяцию и вычислять пропущенные значения для каждого сечения ФПМ, используя полярную систему координат с центром в точке с нулевой пространственной частотой. Таким образом осуществляется линейная интерполяция всех сечений ФПМ. Данный подход позволяет нивелировать погрешность стандартного метода, что показано на рис. 1.

Несмотря на то, что интерполяционный метод не позволяет добиться идеально точного восстановления, он существенно уменьшает погрешность вычисления ФПМ. Тем не менее, оставшаяся неустранимая по-

грешность может оказывать влияние на вычисление ФРТ с учетом диаметра предмета и проявляться в виде высокочастотного шума малой интенсивности, который можно эффективно устранить методами предварительной обработки изображений тест-объектов [10].

Метод инверсной фильтрации с использованием предложенной линейной интерполяции также имеет накладываемые на диаметр точечного тест-объекта ограничения, которые требуют оценки, чтобы определить пределы применимости рассматриваемого метода. Для этого можно рассмотреть график функции-делителя (рис. 2).

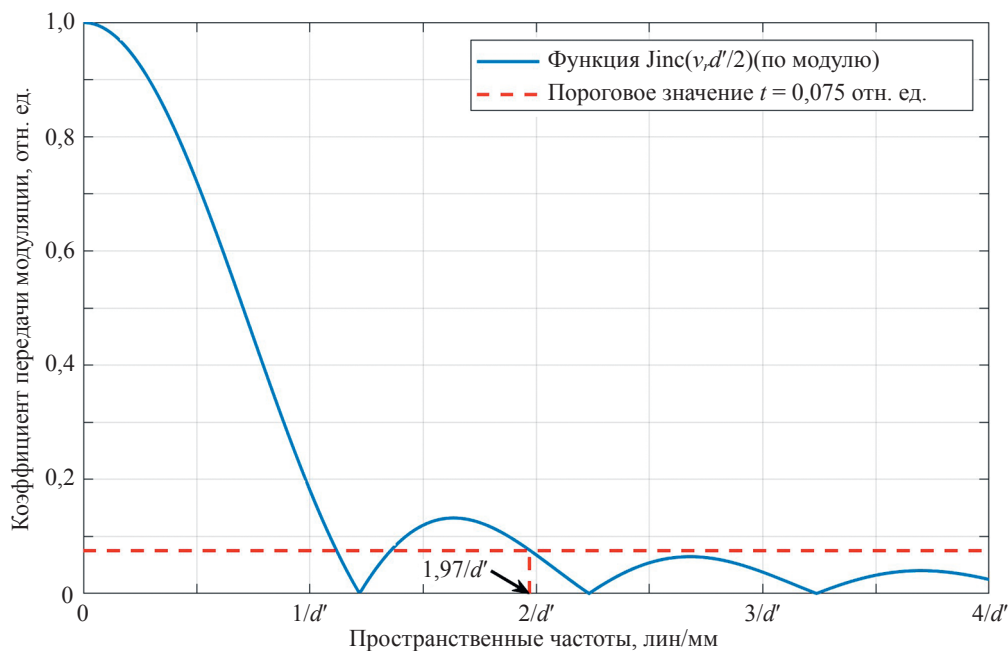


Рис. 2. Функция $Jinc(v, d'/2)$ (по модулю) и ее пороговое значение для деления

Fig. 2. $Jinc(v, d'/2)$ function (per module) and its threshold value for division

На рис. 2 видно, что при используемом пороговом значении $t = 0,075$ есть смысл проводить интерполяцию только одного первого минимума функции, поскольку в качестве делителей можно использовать только те значения, которые находятся выше пунктирной линии. Отметим, что в этом случае максимальная пространственная частота, для которой можно осуществлять коррекцию диаметра предмета равна $1,97/d'$. Подставив найденную частоту в выражение (7), и выделив для удобства диаметр диафрагмы, которую можно считать бесконечно малой, как отдельную переменную в соответствии с выражениями (3) и (4), получим выражение для оценки максимального диаметра предмета, при применении метода инверсной фильтрации с использованием интерполяции, когда необходимо корректировать весь спектр пространственных частот:

$$d \leq 8,1d_0. \quad (8)$$

Благодаря такому подходу возможно корректировать диаметры тест-объектов примерно в 8 раз больше бесконечно малого, при этом не увеличивая погрешность вычислений и не ограничивая область анализа ФПМ.

Рассмотрим в качестве примера, сравнительную таблицу (табл. 1) диаметров допустимых диафрагм для объектива с фокусным расстоянием $f'_l = 50$ мм, при использовании коллиматора с $f'_c = 2000$ мм, и длины волны $\lambda = 0,549$ мкм.

При контроле объективов особенно важна коррекция диаметра диафрагмы для объективов с большим относительным отверстием, например, 1:8. Во-первых, для не светосильных объективов наиболее важно иметь возможность увеличить световой поток за счет большего диаметра диафрагмы. Во-вторых, максимальный диаметр диафрагмы с учетом коррекции достаточно большой, что позволяет существенно увеличить диапазон диаметров диафрагм, подходящих для контроля.

Рассмотрим подробнее погрешность восстановления ФПМ и ФКЭ с учетом коррекции различных диаметров диафрагм для объектива с такими же $f'_l = 50$ мм,

$f'_c = 2000$ мм, $\lambda = 0,549$ мкм и относительным отверстием 1:8 (табл. 2). Погрешность вычислена как максимальное абсолютное отклонение всех точек графиков ФКЭ и ФПМ, полученных от диафрагмы конечного диаметра и от графиков, рассчитанных для бесконечно малой диафрагмы. Графики ФПМ и ФКЭ для тест-объекта 320 мкм приведены на рис. 3.

В табл. 2 показана погрешность для идеальной бесконечно малой диафрагмы (0 мкм) и для тест-объектов, которые можно считать бесконечно малыми (до 40 мкм). Видно, что даже для идеальной бесконечно малой диафрагмы присутствует небольшая погрешность, связанная с сохранением исследуемых изображений тест-объектов в формате PNG 16 бит, которая не превышает при этом 0,001 отн. ед. Когда диаметр тест-объекта начинает превышать бесконечно малый (40 мкм), а также при дальнейшем его увеличении, погрешность вычислений ФПМ и ФКЭ без коррекции диаметра диафрагмы начинает возрастать. Например, увеличение диаметра тест-объекта в два раза (80 мкм) приводит к росту погрешности в 3,5 раза, а при дальнейшем увеличении погрешность возрастает еще сильнее. При этом погрешность с применением коррекции в большинстве случаев не превышает погрешность вычислений без коррекции (0,006 отн. ед.) для бесконечно-малого тест-объекта (40 мкм), хотя в отдельных случаях может увеличиваться до 0,01 отн. ед.

При этом диаметр диафрагмы, при котором еще возможна коррекция, в соответствии с выражением (8) зависит от длины волны контроля, фокусного расстояния и относительного отверстия контролируемого объектива, а также фокусного расстояния коллиматора. В то же время погрешность вычислений скорректированных ФПМ и ФКЭ зависит только от аберраций контролируемого объектива, которые определяют форму кривых ФКЭ и ФПМ. Во всех рассмотренных случаях, независимо от величин аберраций, погрешность при компенсации ФКЭ не превышала 0,01 отн. ед., а для ФПМ при некотором сочетании аберраций может увеличиваться до 0,02 отн. ед., что при этом в 5–10 раз меньше, чем погрешность без компенсации.

Таблица 1. Сравнительная таблица с примером допустимого диаметра тест-объекта
Table 1. Comparative table with example of valid test object

Диаметр диафрагмы	Соотношение диаметра диафрагмы и дифракционного диаметра	Диаметр диафрагмы для разных относительных отверстий, мкм		
		1:4	1:5,6	1:8
Дифракционный диаметр пятна рассеяния в пространстве диафрагмы	d_d	214	300	429
Бесконечно малый	$d_0 \leq 0,1d_d$	21	30	43
Допустимый с учетом коррекции	$d \leq 0,33d_d$	71	99	141
Допустимый с учетом коррекции с интерполяцией	$d \leq 0,81d_d$	174	243	347
Допустимый с учетом коррекции для контролируемой частоты 50 лин/мм (применимо только для ФПМ)	не зависит	650	650	650

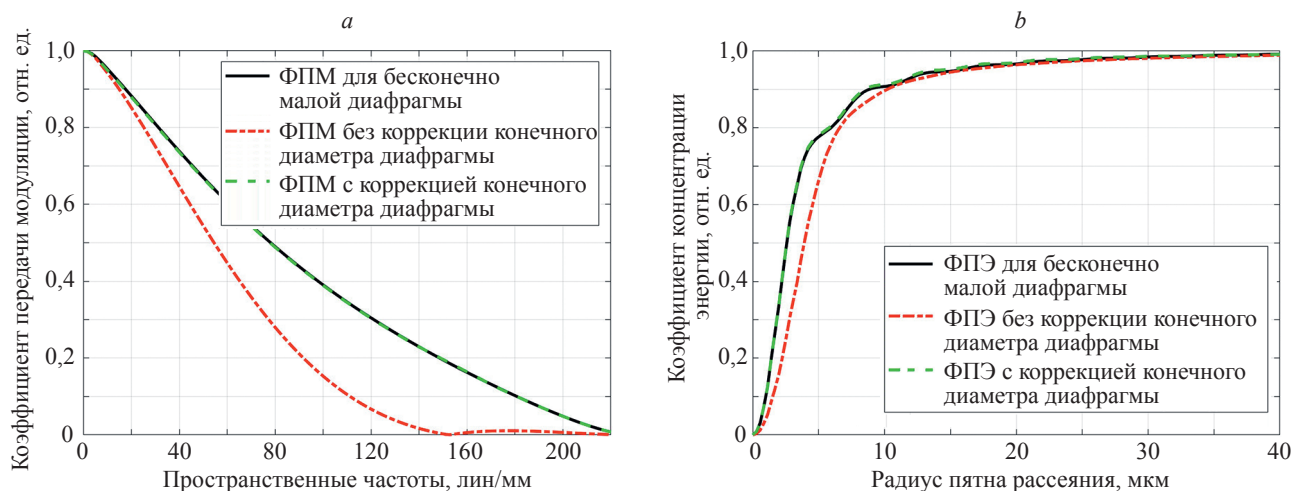


Рис. 3. Функции передачи модуляции (ФПМ) (a) и концентрации энергии (ФКЭ) (b) для тест-объекта диаметром 320 мкм без коррекции, с коррекцией конечного диаметра диафрагмы, и для бесконечно малой диафрагмы

Fig. 3. MTF (ФПМ) (a) and EEF (ФКЭ) (b) for test object with a diameter of 320 μm not corrected and corrected for finite object size and reference data

Таблица 2. Погрешность вычисления ФПМ и ФКЭ для разных диаметров тест-объектов с коррекцией и без коррекции
Table 2. MTF and EEF calculation error for different test object diameters with and without correction for finite object size

Диаметр тест-объекта, мкм	Погрешность вычисления ФПМ, отн. ед.		Погрешность вычисления ФКЭ, отн. ед.	
	без коррекции	с коррекцией	без коррекции	с коррекцией
0	0,001	0,001	0,001	0,001
20	0,002	0,001	0,002	0,001
40	0,006	0,001	0,006	0,001
60	0,013	0,001	0,013	0,001
80	0,022	0,001	0,022	0,001
110	0,040	0,001	0,041	0,001
140	0,063	0,001	0,065	0,001
170	0,089	0,001	0,092	0,001
200	0,117	0,001	0,122	0,001
230	0,148	0,009	0,154	0,005
260	0,179	0,005	0,188	0,005
290	0,210	0,003	0,222	0,003
320	0,241	0,004	0,255	0,006
350	0,272	0,005	0,287	0,003

Заклучение

Представленный метод инверсной фильтрации с дополнительной линейной интерполяцией сечений функции передачи модуляции для коррекции конечного диаметра тест-объекта при вычислении функций передачи модуляции и концентрации энергии позволяет корректировать диаметр тест-объектов на всей области функции передачи модуляции. Метод открывает перспективу оценки функции концентрации энергии без влияния диаметра диафрагмы. Благодаря такому подходу удается корректировать диаметры тест-объектов примерно в 8 раз больше бесконечно малого, и в 2,5 раза больше, чем позволяет стандартный метод

инверсной фильтрации, без существенного увеличения погрешности вычисления.

Разработанный метод инверсной фильтрации с применением интерполяции может быть использован в процессе производственного контроля объективов в составе методики вычисления характеристик качества объективов. Применение данного метода позволяет проводить количественную оценку функции передачи модуляции и функции концентрации энергии по изображениям точечных тест-объектов с расширенным диапазоном диаметров диафрагм. Метод дает возможность уменьшить или полностью нивелировать погрешность вычислений, обусловленную диаметром тест-объекта, и сократить время процедуры контроля

за счет исключения этапа строгого подбора диаметра диафрагмы. Кроме того, расширение диапазона размеров используемых при контроле диафрагм за счет кор-

рекции диаметра тест-объекта способствует снижению требований к параметрам источника освещения.

Литература

- Jia H., Lu L., Cao Y. Modulation transfer function of a fish-eye lens based on the sixth-order wave aberration theory // *Applied Optics*. 2018. V. 57. N 2. P. 314–321. <https://doi.org/10.1364/AO.57.000314>
- Иванова Т.В., Калинин О.С., Летова Е.Ю. Алгоритм восстановления фазы для определения волнового фронта по четырем функциям рассеяния точки // *Оптический журнал*. 2023. Т. 90. № 8. С. 77–86. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-08-77-86>
- 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. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-09-03-11>
- Pu D., Pan X., Tao H., Liu C., Zhu J. Iterative reconstruction method for the accurate measurement of optical transfer function // *Applied Optics*. 2021. V. 60. N 26. P. 8164–8173. <https://doi.org/10.1364/AO.434744>
- Xie X., Fan H., Wang H., Wang Z., Zou N. Error of the slanted edge method for measuring the modulation transfer function of imaging systems // *Applied Optics*. 2018. V. 57. N 7. P. B83–B91. <https://doi.org/10.1364/AO.57.000B83>
- Schenker M., Stavridis M., Schulz M., Tutsch R. Effects of misalignments on the modulation transfer function measurement of camera lenses analyzed in optomechanical simulations // *Optical Engineering*. 2020. V. 59. N 3. P. 034101. <https://doi.org/10.1117/1.OE.59.3.034101>
- Li L., Cao J., Wei S., Jiang Y., Shen X. Improved On-Orbit MTF measurement method based on point source arrays // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. N 16. P. 4028. <https://doi.org/10.3390/rs15164028>
- Andersen T.B. Accurate calculation of diffraction-limited encircled and ensquared energy // *Applied Optics*. 2015. V. 54. N 25. P. 7525–7533. <https://doi.org/10.1364/AO.54.007525>
- Леонов М.Б. Особенности разработки установок для измерения характеристик качества оптических систем видимого диапазона спектра // *Оптический журнал*. 2019. Т. 86. № 5. С. 11–16. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-05-11-16>
- Летова Е.Ю., Иванова Т.В., Загородный Д.С. Предварительная обработка изображений тест-объектов для вычисления функции передачи модуляции при контроле оптических систем // *Оптический журнал*. 2025. Т. 92. № 6. С. 97–107. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2025-92-06-97-107>
- Perezyabov O.A., Baranov A.N., Maltseva N.K., Ilinski A.V. Application for determining the modulation transfer function of the smartphone built-in camera // *Proc. of the 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS)*. 2017. P. 3804–3808. <https://doi.org/10.1109/PIERS.2017.8262421>
- Miora R.H.D., Senftleben M., Abrahamsson S., Rohwer E., Heintzmann R., Bosman G. Experimental validation of numerical point spread function calculation including aberration estimation // *Optics Express*. 2024. V. 32. N 12. P. 21887–21908. <https://doi.org/10.1364/OE.520400>
- Villafana T. Effect of finite exposure slits in determination of the line spread function and modulation transfer function // *Acta Radiologica: Therapy, Physics, Biology*. 1977. V. 16. N 3. P. 281–288. <https://doi.org/10.3109/02841867709133948>
- Boreman G.D. *Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems*. SPIE Press, 2021. 158 p.
- Goodman J.W. *Introduction to Fourier Optics*. W. H. Freeman, 2017. 491 p.
- Gross H., Zügge H., Peschka M., Blechinger F. *Handbook of Optical Systems, Aberration Theory and Correction of Optical Systems*. Wiley, 2007. 780 p.
- Gross H. *Handbook of Optical Systems, Volume 1: Fundamentals of Technical Optics*. Wiley, 2005. 848 p.
- Dorband B., Muller H., Gross H. *Handbook of Optical Systems, Volume 5: Metrology of Optical Components and Systems*. John Wiley & Sons, 2012. 1004 p.

References

- Jia H., Lu L., Cao Y. Modulation transfer function of a fish-eye lens based on the sixth-order wave aberration theory. *Applied Optics*, 2018, vol. 57, no. 2, pp. 314–321. <https://doi.org/10.1364/AO.57.000314>
- Ivanova T.V., Kalinkina O.S., Letova E.Y. Phase retrieval algorithm for wavefront reconstruction using four scattering spots. *Journal of Optical Technology*, 2023, vol. 90, no. 8, pp. 464–469. <https://doi.org/10.1364/JOT.90.000464>
- 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. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000506>
- Pu D., Pan X., Tao H., Liu C., Zhu J. Iterative reconstruction method for the accurate measurement of optical transfer function. *Applied Optics*, 2021, vol. 60, no. 26, pp. 8164–8173. <https://doi.org/10.1364/AO.434744>
- Xie X., Fan H., Wang H., Wang Z., Zou N. Error of the slanted edge method for measuring the modulation transfer function of imaging systems. *Applied Optics*, 2018, vol. 57, no. 7, pp. B83–B91. <https://doi.org/10.1364/AO.57.000B83>
- Schenker M., Stavridis M., Schulz M., Tutsch R. Effects of misalignments on the modulation transfer function measurement of camera lenses analyzed in optomechanical simulations. *Optical Engineering*, 2020, vol. 59, no. 3, pp. 034101. <https://doi.org/10.1117/1.OE.59.3.034101>
- Li L., Cao J., Wei S., Jiang Y., Shen X. Improved On-Orbit MTF measurement method based on point source arrays. *Remote Sensing*, 2023, vol. 15, no. 16, pp. 4028. <https://doi.org/10.3390/rs15164028>
- Andersen T.B. Accurate calculation of diffraction-limited encircled and ensquared energy. *Applied Optics*, 2015, vol. 54, no. 25, pp. 7525–7533. <https://doi.org/10.1364/AO.54.007525>
- Leonov M.B. Features of the development of systems for measuring the quality characteristics of optical systems of the visible spectrum. *Journal of Optical Technology*, 2019, vol. 86, no. 5, pp. 268–272. <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000268>
- Letova E.Yu., Ivanova T.V., Zavgorodny D.S. Test object image preprocessing for modulation transfer function calculation in the testing of optical systems. *Opticheskiy Zhurnal*, 2025, vol. 92, no. 6, pp. 97–107. (in Russian). <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2025-92-06-97-107>
- Perezyabov O.A., Baranov A.N., Maltseva N.K., Ilinski A.V. Application for determining the modulation transfer function of the smartphone built-in camera. *Proc. of the 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS)*, 2017, pp. 3804–3808. <https://doi.org/10.1109/PIERS.2017.8262421>
- Miora R.H.D., Senftleben M., Abrahamsson S., Rohwer E., Heintzmann R., Bosman G. Experimental validation of numerical point spread function calculation including aberration estimation. *Optics Express*, 2024, vol. 32, no. 12, pp. 21887–21908. <https://doi.org/10.1364/OE.520400>
- Villafana T. Effect of finite exposure slits in determination of the line spread function and modulation transfer function. *Acta Radiologica: Therapy, Physics, Biology*, 1977, vol. 16, no. 3, pp. 281–288. <https://doi.org/10.3109/02841867709133948>
- Boreman G.D. *Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems*. SPIE Press, 2021, 158 p.
- Goodman J.W. *Introduction to Fourier Optics*. W. H. Freeman, 2017. 491 p.
- Gross H., Zügge H., Peschka M., Blechinger F. *Handbook of Optical Systems, Aberration Theory and Correction of Optical Systems*. Wiley, 2007, 780 p.
- Gross H. *Handbook of Optical Systems, Volume 1: Fundamentals of Technical Optics*. Wiley, 2005, 848 p.
- Dorband B., Muller H., Gross H. *Handbook of Optical Systems, Volume 5: Metrology of Optical Components and Systems*. John Wiley & Sons, 2012, 1004 p.

Авторы

Летова Елизавета Юрьевна — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-7818-0062>, letova@niuitmo.ru

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

Authors

Elizaveta Yu. Letova — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7818-0062>, letova@niuitmo.ru

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

Статья поступила в редакцию 27.06.2025

Одобрена после рецензирования 28.11.2025

Принята к печати 19.01.2026

Received 27.06.2025

Approved after reviewing 28.11.2025

Accepted 19.01.2026



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»