

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-07-68-75

УДК 681.7.013.8, 535.36

Влияние рассеянного излучения на характеристики качества оптических систем

Михаил Борисович Леонов^{1✉}, Анна Анатольевна Шульга²

Филиал Корпорации «Комета» — Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург, Россия

¹muxeu87@yandex.ru<https://orcid.org/0000-0001-8540-9312>²anya.shulga93@gmail.com<https://orcid.org/0000-0001-9712-2060>

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрена связь функции передачи модуляции, характеризующей качество оптических систем и оптико-электронных приборов, с коэффициентом рассеяния, характеризующим уровень рассеянного излучения в оптических системах. **Цель работы.** Нахождение зависимости между функцией передачи модуляции и коэффициентом рассеяния, позволяющей определять как снижение функции передачи модуляции по коэффициенту рассеяния, так и значения коэффициента рассеяния по снижению функции передачи модуляции, что даст возможность разработчикам оптических систем и оптико-электронных приборов оптимально задавать допуск на коэффициент рассеяния по допустимому снижению функции передачи модуляции. **Метод.** Расчетно-теоретический метод определения зависимости между функцией передачи модуляции и коэффициентом рассеяния. Расчетно-практический метод определения коэффициента рассеяния по функции передачи модуляции, полученной путем преобразования Фурье измеренной функции рассеяния линии. **Основные результаты.** Проведен анализ нормативной документации и исследований в области определения параметров, характеризующих рассеянное излучение оптических систем и оптико-электронных приборов, среди которых широко применяемый в отечественной оптической промышленности коэффициент рассеяния и функция распределения рассеяния. Проведены теоретические и практические исследования, связывающие функцию передачи модуляции и коэффициент рассеяния, в результате чего выведена зависимость между коэффициентом рассеяния и коэффициентом передачи модуляции — значением функции передачи модуляции на заданной пространственной частоте. Для подтверждения справедливости полученных зависимостей был рассчитан коэффициент рассеяния по снижению функции передачи модуляции, полученной через преобразование Фурье функции рассеяния линии объектов, измеренных на коллиматорной установке по стандартизированному методу измерений, с заведомо высоким коэффициентом рассеяния и с минимальным коэффициентом рассеяния. Полученные результаты свидетельствуют о достоверности полученных формул. Даны рекомендации для определения коэффициента рассеяния по снижению функции передачи модуляции при отсутствии сферической аберрации в оптической системе без использования фотометрического шара. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволят разработчикам оптических систем и оптико-электронных приборов оптимально задавать допуск на коэффициент рассеяния по допустимому снижению функции передачи модуляции, а также создают предпосылки к созданию нового метода измерения коэффициента рассеяния, не требующего наличия фотометрического шара.

Ключевые слова: фотометрические измерения, рассеянное излучение, коэффициент рассеяния, оптические измерения, функция рассеяния линии, функция передачи модуляции

Ссылка для цитирования: Леонов М.Б., Шульга А.А. Влияние рассеянного излучения на характеристики качества оптических систем // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 7. С. 68–75. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-68-75>

Коды OCIS: 120.4630, 120.4800, 120.5240, 110.4850

The influence of scattering light on optical systems' quality characteristics

MIKHAIL B. LEONOV¹✉, ANNA A. SHUL'GA²

The Branch of "Kometa Corp." — "Electro Optical Surveillance Systems", St. Petersburg, Russia

¹muxeu87@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8540-9312>

²anya.shulga93@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9712-2060>

Abstract

Subject of study. The correlation of the modulation transfer function related to optical systems quality and the veiling glare index related to optical systems scattering light quantity was researched. **Aim of study** is determination of correlation between the modulation transfer function and the veiling glare index to derive lowness of the modulation transfer function via the veiling glare index and vice versa, that allow optical system developers set tolerance to the veiling glare index via the modulation transfer function decrease. **Method.** Theoretical computation method of the modulation transfer function decrease via the veiling glare index. Practical method of the veiling glare index computation using measurement result of the modulation transfer function acquired by Fourier transform of the line spread function. **Main results.** Standards documentation and research regarding to scattering light in optical system was analyzed. The veiling glare index and glare spread function are one of measureable characteristics of scattering light in optical systems. Theoretical and practical research were made, which finally could help to derive formulas of optical systems the modulation transfer function decrease via the veiling glare index and vice versa. To proof validity of formulas the veiling glare index was calculated using the modulation transfer function decrease by Fourier transform of the line spread function for lens with high the veiling glare index and lens with low the veiling glare index. Lenses were tested on collimator test bench according to standard the modulation transfer function test method. The veiling glare index calculation results via the modulation transfer function measurements proofed validity of formulas. Recommendations for optical systems the veiling glare index measurement without a photometric sphere via the modulation transfer function with the lack of spherical aberrations were given. **Practical significance.** Acquired results allowing optical system developers set tolerance to the veiling glare index via the modulation transfer function decrease. Results can be used as background for new the veiling glare index measurement method without a photometric sphere via the modulation transfer function with the lack of spherical aberrations.

Keywords: photometric measurements, scattering light, veiling glare index, optical measurements, line spread function, modulation transfer function

For citation: Leonov M.B., Shul'ga A.A. The influence of scattering light on optical systems' quality characteristics [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 7. P. 68–75. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-68-75>

OCIS codes: 120.4630, 120.4800, 120.5240, 110.4850

ВВЕДЕНИЕ

Одним из актуальных вопросов улучшения качества оптических систем (ОС) и оптико-электронных приборов (ОЭП) является снижение уровня рассеянного излучения, которое снижает контраст изображения. Увеличение требований к качеству изображения ОС, пред-

назначенных для работы в условиях фоновых засветок по малококонтрастным объектам, приводит к необходимости ограничения влияния рассеянного излучения.

Рассеянное излучение в ОС возникает вследствие ряда причин, связанных как с оптическими деталями (дефекты оптических

поверхностей, в том числе загрязнение, царапины, выколки, некачественные просветляющие покрытия, пузырность, свилю и др.), так и механическими (несовершенство отделки внутренних полостей корпуса, оправ, бленд, диафрагм, фасок, боковых граней и образующих поверхностей оптических деталей) [1, 2]. Еще одним фактором возникновения рассеянного излучения являются многократные отражения света на оптических поверхностях, а также отражение света от поверхности приемника излучения.

В связи с тем, что методы подавления рассеянного излучения основаны преимущественно на конструкторско-технологических мероприятиях [3–5], при разработке ОС и ОЭП необходимо знать степень влияния рассеянного излучения на качество изображения и эффективность вводимых разработчиком решений. Методы измерений характеристик качества, например, функции передачи модуляции (ФПМ), разрабатываются таким образом, чтобы уменьшить влияние рассеянного излучения на результат измерений [6]. Однако при эксплуатации ОС в реальных условиях рассеянное излучение будет снижать качество изображения, причем по-разному в зависимости от характера фоновых засветок.

В отечественной оптической промышленности мерой рассеянного излучения объектива является коэффициент рассеяния (КР) — отношение освещенности (облученности) создаваемого ОС изображения черного предмета, расположенного на широком равномерно ярком фоне, к освещенности изображения фона [7]. Равномерно яркий фон создается протяженным источником излучения, видимым из центра входного зрачка объектива под телесным углом 2π . Для объектива, оснащенного блендой, телесный угол определяется параметрами бленды.

Стандартизированные методы [7–9] измерения КР, несмотря на оперативность измерений, не всегда позволяют достоверно определять факторы, вызывающие повышение рассеянного излучения в ОС.

В зарубежной оптической промышленности, помимо определения КР ОС, применяется стандартизированный метод определения функции распределения рассеяния (ФРР) ОС, которая представляет собой распределение освещенности в плоскости изображения при определенном положении малоразмерного ис-

точника излучения, нормированное по полному потоку в изображении этого источника [9]. Функция распределения рассеяния может быть определена для различного расположения источника излучения. Измерение ФРР или совокупностей ФРР для различных положений источника излучения является более длительным по сравнению с определением КР. В случаях, когда увеличение рассеянного излучения может быть обусловлено засветками интенсивными источниками малых размеров, целесообразно оценивать ФРР [10–12], а не КР, определяемый с использованием протяженного источника.

Помимо КР и ФРР вредное рассеянное излучение может также характеризоваться функцией распределения двунаправленного отражения [5, 10, 13] и передаточной функцией поверхности [13], однако в связи с тем, что в отечественной оптической промышленности используют именно КР, то в настоящей работе влияние других характеристик на качество ОС не рассматривается.

В связи с изложенным выше и тем, что одной из основных характеристик качества ОС является ФПМ, то актуальной задачей становится определение влияния КР ОС на ФПМ.

Таким образом, цель настоящей работы — нахождение зависимости между ФПМ и КР, позволяющей определять как снижение ФПМ по КР, так и значения КР по снижению ФПМ, что даст возможность разработчикам ОС и ОЭП оптимально задавать допуск на КР по допустимому снижению ФПМ.

РАСЧЕТ СНИЖЕНИЯ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ МОДУЛЯЦИИ ИЗ-ЗА РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрим связь КР и коэффициента передачи модуляции (КПМ) — значения ФПМ $T(N)$ на заданной пространственной частоте N . Коэффициент передачи модуляции без учета рассеянного излучения определяется по формуле [6]

$$T(N) = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}, \quad (1)$$

где E_{\max} , E_{\min} — максимальная и минимальная освещенности в изображении миры с синусоидальным распределением яркости.

Рассеянное излучение в ОС приводит к созданию добавочной освещенности в изображении

и, как следствие, к перераспределению освещенности в изображении миры [14]. Предположим, что добавочная освещенность ΔE равномерна по полю ОС на всех пространственных частотах, тогда КПМ $T_S(N)$ с учетом рассеянного излучения выражается как

$$T_S(N) = \frac{(E_{\max} + \Delta E) - (E_{\min} + \Delta E)}{E_{\max} + \Delta E + E_{\min} + \Delta E}. \quad (2)$$

С учетом формулы (1) получим

$$T_S(N) = \frac{T(N)}{1 + 2\Delta E / (E_{\max} + E_{\min})}. \quad (3)$$

Предположим, что дополнительная освещенность ΔE соответствует освещенности в изображении ОС черного предмета $E_{b.ob}$, а максимальная освещенность E_{\max} соответствует освещенности равномерного фона E_{bg} . Тогда исходя из определения КР [7] получим

$$S = \frac{E_{b.ob}}{E_{bg}} = \frac{\Delta E}{E_{\max}}, \quad (4)$$

где S — КР, отн.ед.

Приведем формулу (3) к следующему виду:

$$\begin{aligned} T_S(N) &= \frac{T(N)}{1 + 2\Delta E / (E_{\max}(1 + E_{\min}/E_{\max}))} = \\ &= \frac{T(N)}{1 + 2\Delta E / E_{\max} (1/(1 + E_{\min}/E_{\max}))}, \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом формулы (4) получим следующее выражение для определения соотношения КПМ и КР:

$$\begin{aligned} T_S(N) &= \frac{T(N)}{1 + 2S \left(1 + \frac{E_{\min}}{E_{\max}}\right)^{-1}} = \\ &= \frac{T(N)}{1 + 2S(1 + (1 - T(N))/(1 + T(N)))^{-1}} = \\ &= \frac{T(N)}{1 + 2S \left(\frac{1 + T(N)}{2}\right)} = \\ &= \frac{T(N)}{1 + S + ST(N)} = \frac{T(N)}{1 + S(1 + T(N))}. \end{aligned} \quad (6)$$

Полученная формула (6) справедлива в лабораторных условиях измерения КР стандартизированными методами [7–9], в которых предполагается, что освещенность в изображении фона E_{bg} пропорциональна яркости фона L_{bg} и равна максимальной освещенности изображения E_{\max} , пропорциональной максимальной яркости L_{\max} от объекта [15] при угловом размере объекта от 0,5 до 2° [7, 8]. Однако при функционировании ОС в реальных условиях телесный угол, в котором распространяется рассеянное излучение, может быть значительно больше и, соответственно, фоно-целевая обстановка может отличаться от лабораторных условий.

Для учета реального распределения яркостей фона в работе [15] значение добавочной освещенности в изображении связывается с соотношением яркостей фона в виде коэффициента $m = L_{bg}/L_{\max}$, и с учетом контраста объекта наблюдения K_{ob} формула для определения КПМ с рассеянным излучением принимает вид

$$T_S(N) = \frac{T(N)}{1 + mS(1 + T(N)K_{ob})}. \quad (7)$$

Таким образом, формула (7) позволяет моделировать различную фоно-целевую обстановку, а при $m = 1$ и $K_{ob} = 1$ получим ранее выведенную формулу (6), что соответствует лабораторным условиям измерения КР.

В публикации [16], основанной на работе [17], приводится следующая формула для связи КПМ и КР:

$$T_S(N) = \frac{T(N)}{1 + S}. \quad (8)$$

Как видно, формула (8) отличается от выведенной формулы (6) и формулы (7) из работы [15] и дает приблизительные результаты по снижению КПМ, поэтому в дальнейшем не рассматривается.

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА РАССЕЯНИЯ ПО СНИЖЕНИЮ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ МОДУЛЯЦИИ

Измерение КР стандартизированными методами [7–9] требует наличия специализированного оборудования — фотометрического шара

или полусферы [18, 19], диаметр которых должен быть больше испытуемой ОС, либо, если это требование не выполнимо, в состав фотометрического шара вводится коллиматор [7–9], вносящий систематическую составляющую из-за собственного рассеяния коллиматорного объектива. При отсутствии такого оборудования КР обычно не измеряют или подтверждают расчетными методами.

В связи с этим рассмотрим обратную задачу и определим КР по снижению ФПМ от его

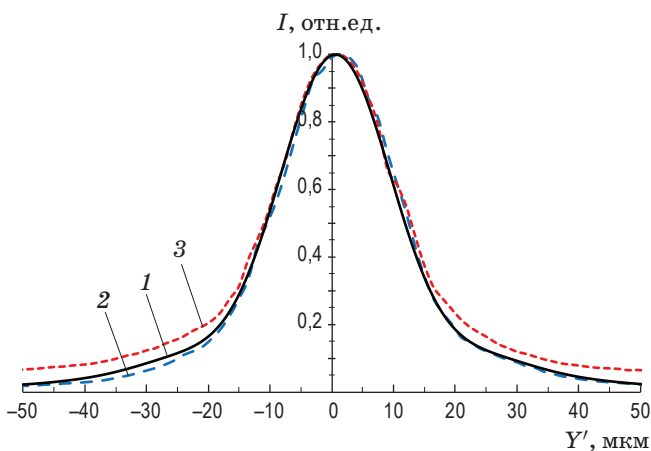


Рис. 1. Функции рассеяния линии объективов-образцов сравнения расчетная (1), без рассеянного излучения (2), с рассеянным излучением (3)

Fig. 1. Line scattering functions of reference lenses are (1) calculated, (2) without scattered radiation, (3) with scattered radiation

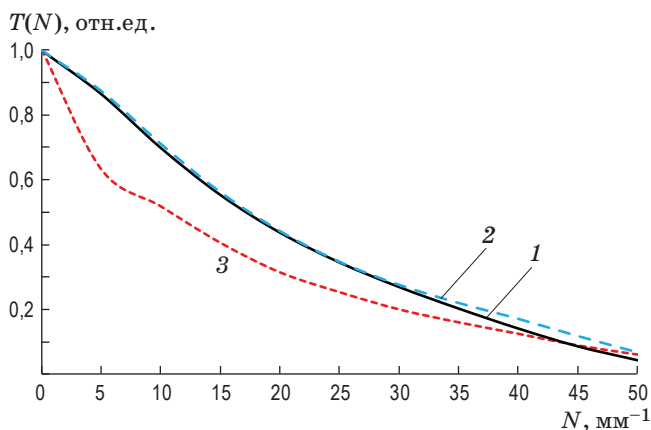


Рис. 2. Функции передачи модуляции объективов-образцов сравнения расчетная (1), без рассеянного излучения (2), с рассеянным излучением (3)

Fig. 2. The modulation transfer functions of reference lenses are (1) calculated, (2) without scattered radiation, (3) with scattered radiation

расчетного значения. Пусть имеются функция рассеяния линии (ФРЛ) и полученная путем преобразования Фурье ФПМ, измеренные на коллиматорной установке [20] стандартизированным методом [21] с заведомо высоким КР и с минимальным КР. На рис. 1 представлены расчетная ФРЛ, ФРЛ с рассеянным излучением и без рассеянного излучения объективов-образцов сравнения. Как видно из рисунка, ФРЛ объектива с рассеянным излучением имеет повышенную составляющую, начиная с уровня 0,3 от максимального значения. Соответственно, значения ФПМ с рассеянным излучением получаются значительно ниже расчетных (рис. 2), а измеренные значения ФПМ соответствуют расчету с погрешностью $\pm 0,01$ отн. ед. в диапазоне пространственных частот до 30 мм^{-1} .

Используя формулы (6), (7), выведем формулы для определения КР

$$S = \frac{(T/T_S) - 1}{1 + T}, \quad (9)$$

$$S = \frac{(T/T_S) - 1}{m(K_{ob}T + 1)}. \quad (10)$$

На основе полученных ФПМ рассчитаем КР, при этом полученные формулы не следует применять при $T(N) = 1$ и $T(N) \leq 0,05\text{--}0,08$, так как на нулевой пространственной частоте происходит нормировка ФПМ, а на пространственных частотах, близких к предельной, влияние рассеянного излучения является незначительным.

В связи с изложенным выше расчет КР проводился по формулам (9) и (10) при $m = 1$ и $K_{ob} = 1$ для пространственных частот от 5 до 45 мм^{-1} с шагом 5 мм^{-1} , значение КР составило $S = 0,27 \pm 0,04$ отн. ед.

Для проверки полученных результатов определения КР рассчитаем ФПМ с рассеянным излучением по формулам (6) и (7). Как видно из графика (рис. 3), полученные результаты соответствуют ФПМ с рассеянным излучением с расхождением не более

0,05 отн. ед. в диапазоне пространственных частот от 0 до 10 мм^{-1} ,

0,01 отн. ед. в диапазоне пространственных частот от 10 до 50 мм^{-1} .

Полученные результаты свидетельствуют о достоверности полученных формул и создают предпосылки к созданию нового метода

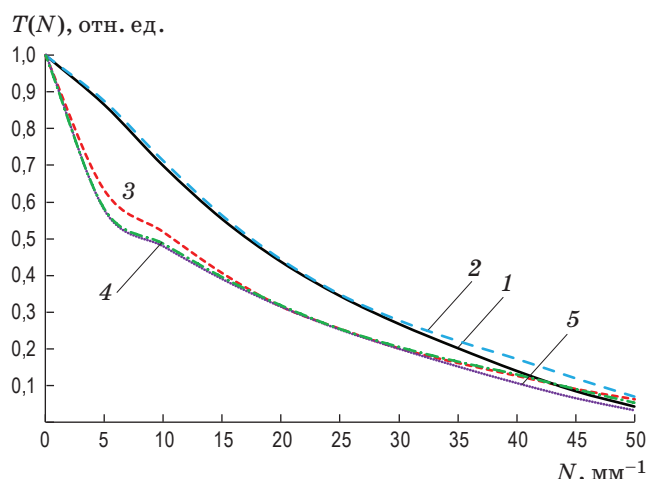


Рис. 3. Результаты расчета снижения ФПМ из-за рассеянного излучения в ОС. Расчетная ФПМ (1), ФПМ без рассеянного излучения (2), с рассеянным излучением (3), расчет снижения ФПМ относительно измеренной функции (4), расчет снижения ФПМ относительно расчетной функции (5)

Fig. 3. Results of the decrease calculation in the modulation transfer function due to scattered radiation. (1) Calculated modulation transfer function, modulation transfer functions (2) without scattered radiation, (3) with scattered radiation, calculations of the modulation transfer function reduction relative to the (4) measured function and to the (5) calculated function

измерения КР, не требующего наличия фотометрического шара. Однако при использовании предложенных формул для определения КР ОС следует четко отделять повышение

значений ФРЛ, вызванное рассеянным излучением от сферической аберрации: при регистрации ФРЛ анализирующим узлом измерительной установки результирующая ФРЛ может не иметь симметричных побочных максимумов, характерных для сферической аберрации, а иметь вид как на рис. 1. Для достоверного определения сферической аберрации следует провести или интерферометрический контроль, или измерение фокусного расстояния на соответствие допускам, установленным в расчете оптических величин ОС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе установлена зависимость между КР и ФПМ и выведены формулы (6) и (9) для определения снижения КПМ под влиянием рассеянного излучения и определения КР по снижению КПМ. Достоверность формул проверена экспериментально. В дальнейшем планируется более тщательная проработка эксперимента и его реализация в различных спектральных диапазонах.

Полученные зависимости позволят разработчикам ОС оптимально задавать допуск на КР по допустимому снижению ФПМ, а также создают предпосылки к созданию нового, не требующего наличия фотометрического шара, метода измерения КР по снижению ФПМ (или КПМ на заданной пространственной частоте), полученной путем преобразования Фурье измеренной ФРЛ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Забелина И.А. Расчет видимости звезд и далеких огней. Л.: Машиностроение, ЛО, 1978. 184 с.
2. РТМ 3-670-75 Приборы телескопические. Методы уменьшения вредного рассеянного света.
3. Правдивцев А.В. Исследование комплексного влияния конструктивных и технологических параметров оптической системы для инфракрасной области спектра на фоновую облученность на приемнике // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 9. С. 3–10. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-09-03-10>
4. Правдивцев А.В. Разработка методов уменьшения фоновой облученности для повышения эффективности ИК пеленгаторов // Автореф. дис. кан. техн. наук. М.: 2019. 22 с.
5. Li J., Yang Y., Qu X., et al. Stray light analysis and elimination of an optical system based on the structural optimization design of an airborne camera // Appl. Sci. 2022. V. 12. № 4. P. 1935. <https://doi.org/10.3390/app12041935>

REFERENCES

1. Zabelina I.A. Stars and distant lights visibility calculation [in Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publ., 1978. 184 p.
2. RTM 3-670-75 Telescopic instruments. A scattering light reducing methods. [in Russian]
3. Pravdivtsev A.V. Combined effect of an IR optical system's design and process parameters on the background irradiation on the detector // J. Opt. Technol. 2019. V. 86. № 9. P. 533–538. <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000533>
4. Pravdivtsev A.V. The development of methods a background irradiance reducing for IR direction finder efficiency gaining [in Russian] // PhD thesis. Moscow, 2019. 22 p.
5. Li J., Yang Y., Qu X., et al. Stray light analysis and elimination of an optical system based on the structural optimization design of an airborne camera // Appl. Sci. 2022. V. 12. № 4 P. 1935. <https://doi.org/10.3390/app12041935>

6. Шульман М.Я. Измерение передаточных функций оптических систем. Л.: Машиностроение, 1980. 208 с.
7. ОСТ ВЗ-4774-80 Объективы для изделий общей техники. Метод измерения коэффициента рассеяния
8. ГОСТ 24724-81 Объективы для кино- и фотоаппаратов. Метод определения коэффициента рассеяния. Введ. 01.07.1982. М.: изд. Стандартов, 1981. 15 с.
9. ISO 9358:2021 Optics and optical instruments — Veiling glare of image-forming systems — Definitions and methods of measurement.
10. Dun Liu, Lihua Wang, Wei Yang, et al. Stray light characteristics of the diffractive telescope system // Opt. Eng. 2018. V. 57. № 2. P. 025105. <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.2.025105>
11. Jing D., Chao M., Kai J., et al. The influence of the stray light on MTF in optical system in test range // in Internat. Photonics and Optoelectronics Meetings, OSA Technical Digest (online) (Optica Publishing Group, 2012). P. IF4A.26. <https://doi.org/10.1364/IONT.2012.IF4A>
12. Chao Mei, Rui Qu, Aqi Yan, et al. The influence of the stray light on MTF in optical system // Proc. SPIE 10847, Optical Precision Manufacturing, Testing, and Applications, 1084702 (December 12, 2018). <https://doi.org/10.1117/12.2501931>
13. Harvey J.E. Parametric analysis of the effect of scattered light upon the modulation transfer function // Proc. SPIE 8841, Current Developments in Lens Design and Opt. Eng. XIV, 88410W. (September 25, 2013). <https://doi.org/10.1117/12.2026958>
14. Кирпиченко Ю.Р., Пустынский И.Н. О влиянии рассеяния света на характеристики изображения, формируемого телевизионным датчиком // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53. № 9. С. 38–42.
15. Шайович С.Л. Зависимость контраста и функции передачи модуляции от коэффициента светорассеяния объектива // Всесоюз. семинар по теории и расчету оптических систем (сб. м-лов). Ленинград. 5–7 апреля 1982 г. С. 180–183.
16. Бартенева О.А. Исследование качества фотографического изображения фотоаппаратов с использованием элементов теории информации // Автореф. дис. кан. техн. наук. СПб.: 1980. 20 с.
17. Бартенева О.А. Влияние рассеянного света на качество фотографического изображения // ОМП. 1977. № 4. С. 10–11.
18. Кувалдин Э.В., Шульга А.А. Измерение светорассеяния в объективах // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 11. С. 40–46.
19. Кувалдин Э.В., Киргетов М.В., Леонов М.Б. Установка для измерения основных характеристик малогабаритных объективов // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 1. С. 94–99.
20. Леонов М.Б., Куприянов И.А., Серегин Д.А. и др. Аппаратно-программный комплекс для измерения характеристик качества оптических систем инфракрасного диапазона спектра // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 7. С. 74–78.
21. ГОСТ Р 58566-2019 Оптика и фотоника. Объективы для оптико-электронных систем. Методы испытаний. Введ. 27.09.2019. М.: Стандартиформ, 2019. 31 с.
6. Shulman M.Ya. Measurement of transfer functions of optical systems [in Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publ., 1980. 208 p.
7. OST B3-4774-80 Lenses for overall technique products. The veiling glare index measurement method. [in Russian]
8. GOST 24724-81 Lenses for cameras. Method of determination of scattering coefficient. Introduction 07/01/1982. Moscow: 'Izdatel'stvo standartov' Publ., 1981. 15 p. [in Russian]
9. ISO 9358:2021 Optics and optical instruments — Veiling glare of image-forming systems — Definitions and methods of measurement.
10. Dun Liu, Lihua Wang, Wei Yang, et al. Stray light characteristics of the diffractive telescope system // Opt. Eng. 2018. V. 57. № 2. P. 025105. <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.2.025105>.
11. Jing D., Chao M., Kai J., et al. The influence of the stray light on MTF in optical system in test range // in Internat. Photonics and Optoelectronics Meetings, OSA Technical Digest (online) (Optica Publishing Group, 2012). Paper IF4A.26. <https://doi.org/10.1364/IONT.2012.IF4A>
12. Chao Mei, Rui Qu, Aqi Yan, et al. The influence of the stray light on MTF in optical system // Proc. SPIE 10847, Optical Precision Manufacturing, Testing, and Applications, 1084702 (December, 12 2018). <https://doi.org/10.1117/12.2501931>
13. Harvey J.E. Parametric analysis of the effect of scattered light upon the modulation transfer function // Proc. SPIE 8841, Current Developments in Lens Design and Opt. Eng. XIV, 88410W (September, 25 2013). <https://doi.org/10.1117/12.2026958>
14. Kirpichenko Y.R., Pustinskii I.N. The influence of the scattering light on a TV transducer image quality [in Russian] // J. Instrument Eng. 2010. V. 53. № 9. P. 38–42.
15. Shajovich S.L. The relation between the contrast and the modulation transfer function and the veiling glare index of lenses [in Russian] // Proc. All-Union theory and calculation of optical systems workshop. Leningrad. April 5–7, 1982. P. 180–183.
16. Barteneva O.A. A photographic image quality investigation with the information theory usage [in Russian] // PhD thesis. Leningrad: 1980. 20 p.
17. Barteneva O.A. A scattering light influence on a photographic image quality // Optical-mechanical Industry. 1977. № 4. P. 10–11.
18. Kuvaldin E.V., Shul'ga A.A. Measurement of light scattering in objectives // J. Opt. Technol. 2016. V. 83. № 11. P. 678–682 <https://doi.org/10.1364/JOT.83.000678>
19. Kuvaldin E.V., Kirgetov M.V., Leonov M.B. apparatus for measuring the main characteristics of compact objectives // J. Opt. Technol. 2016. V. 83. № 1. P. 72–76. <https://doi.org/10.1364/JOT.83.000072>
20. Leonov M.B., Kupriyanov I.A., Seregin D.A., et al. Hardware and software system for measuring the quality characteristics of infrared optical systems // J. Opt. Technol. 2019. V. 86. № 7. P. 452–455. <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000452>
21. GOST R 58566-2019 Optics and photonics. Lenses for optical-electronic systems. Test methods. Introduction 09/27/2019. Moscow: "Standartinform" Publ., 2019. 31 p. [in Russian]

АВТОРЫ

Михаил Борисович Леонов — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Филиал Корпорации «Комета» — Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург, 194021, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-8540-9312>; muxeu87@yandex.ru

Анна Анатольевна Шульга — инженер 1 категории, Филиал Корпорации «Комета» — Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург, 194021, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-9712-2060>; anya.shulga93@gmail.com

Статья поступила в редакцию 17.02.2023

Одобрена после рецензирования 26.04.2023

Принята к печати 29.05.2023

AUTHORS

Mikhail B. Leonov — PhD, Senior Scientist, The Branch of "Kometa Corp." — "Electro Optical Surveillance Systems", St. Petersburg, 194021, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-8540-9312>; muxeu87@yandex.ru

Anna A. Shul'ga — 1st category Engineer, The Branch of "Kometa Corp." — "Electro Optical Surveillance Systems", St. Petersburg, 194021, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-9712-2060>; anya.shulga93@gmail.com

The article was submitted to the editorial office 17.02.2023

Approved after review 26.04.2023

Accepted for publication 29.05.2023