DOI:

УДК 681.7.013.8

Влияние рассеянного излучения на характеристики качества оптических систем

Михаил Борисович Леонов1\*, Анна Анатольевна Шульга2

Филиал АО «Корпорация «Комета» - «Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения», Санкт-Петербург, Россия

*1*muxeu87@yandex.ru       https://orcid.org/0000-0001-8540-9312

*2*anya.shulga93@gmail.com          https://orcid.org/0000-0001-9712-2060

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрена связь функции передачи модуляции (ФПМ), характеризующей качество оптических систем (ОС) и оптико-электронных приборов (ОЭП), с коэффициентом рассеяния (КР), характеризующим уровень рассеянного излучения в ОС. Цель 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. Метод. Расчетно-теоретический метод определения зависимости между ФПМ и КР. Расчетно-практический метод определения КР по ФПМ, полученной путем преобразования Фурье измеренной ФРЛ. Основные результаты.  Проведен анализ нормативной документации и исследований в области определения параметров, характеризующих рассеянное излучение ОС и ОЭП, среди которых широко применяемый в отечественной оптической промышленности КР и функция распределения рассеяния. Проведены теоретические и практические исследования, связывающие ФПМ и КР, в результате чего выведена зависимость между КР и коэффициентом передачи модуляции (КПМ) – значении ФПМ на заданной пространственной частоте *N*. Для подтверждения справедливости полученных зависимостей был рассчитан КР по снижению ФПМ, полученной через преобразования Фурье функции рассеяния линии (ФРЛ) объективов, измеренных на коллиматорной установке по стандартизированному методу измерений, с заведомо высоким КР и с минимальным КР. Полученные результаты свидетельствуют о достоверности полученных формул. Даны рекомендации для определения КР по снижению ФПМ при отсутствии сферической аберрации в ОС без использования фотометрического шара. Практическая значимость. Полученные результаты позволят разработчикам ОС и ОЭП оптимально задавать допуск на КР по допустимому снижению ФПМ, а также дают предпосылки к созданию нового метода измерения КР, 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.\_\_. № \_\_. С. \_\_–\_\_. DOI:

Коды OCIS: 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 контрастность изображения. Увеличение требований к качеству изображения ОС, предназначенных для работы в условиях фоновых засветок по малоконтрастным 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 т. ч. загрязнение, царапины, выколки, некачественные просветляющие покрытия, пузырность, свили и т. д.), 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.

Стандартизированные методы [7-9] измерения КР, не смотря 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 источника излучения, нормированное по полному потоку в изображении этого источника [9]. ФРР может быть определена для различного расположения источника излучения. Измерение ФРР или совокупностей ФРР для различных положений источника излучения является более длительным по сравнению с 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 оптических систем не рассматривается.

**РАСЧЕТ СНИЖЕНИЯ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ МОДУЛЯЦИИ ИЗ-ЗА РАССЕЯНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

В связи с тем, что одной из основных характеристик качества ОС является ФПМ [6], то рассмотрим связь КР и коэффициента передачи модуляции (КПМ) – значении ФПМ *T*(*N*) на заданной пространственной частоте *N*.

КПМ без учета рассеянного излучения определяется по формуле [6]:

, (1)

где *Emax, Emin* – максимальная и минимальная освещенности в изображении миры с синусоидальным распределением яркости.

Рассеянное излучения в ОС приводит к созданию добавочной освещенности Δ*E* в изображении, тогда КПМ *Ts(N)* с учетом рассеяния:

. (2)

С учетом формулы (1) получим:

 (3)

Предположим, что дополнительная освещенность Δ*E* соответствует освещенности в изображении ОС черного предмета *Eb.ob.*, а максимальная освещенность *E*max соответствует освещенности равномерного фона *Ebg.* Тогда, исходя из определения КР [7], получим:

** (4)

где *S* – КР, отн.ед.

Приведем формулу (3) к следующему виду:

 (5)

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

 (6)

Полученная формула справедлива для лабораторных условий измерения КР по стандартизированным методам [7-9], для которых предполагается, что освещенность в изображении фона *Ebg* пропорциональна яркости фона *Lbg* и равна максимальной освещенности изображения *E*max, пропорциональной максимальной яркости *Lmax* от объекта [14], 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 [14] величина добавочной освещенности в изображении связывается с соотношением яркостей фона в виде коэффициента *m = Lbg/Lmax*, и, с учетом контраста объекта наблюдения *Кob*, формула для определения КПМ с рассеянным излучением принимает вид:

. (7)

Таким образом формула (7) позволяет моделировать различную фоноцелевую обстановку, а при *m = 1*; *Кob= 1* получим ранее выведенную формулу (6), что соответствует лабораторным условиям измерения КР.

В работе [15], основанной на работе [16], приводится следующая формула для связи КПМ и КР:

 (8)

Как видно, формула (8) отличается от выведенной формулы (6) и формулы (7) из работы [13], и дает приблизительные результаты по снижению КПМ, в связи с чем в дальнейшем не рассматривается.

**РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА РАССЕЯНИЯ ПО СНИЖЕНИЮ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ МОДУЛЯЦИИ**

Измерение КР по стандартизованным методам [7-9] требует наличия специализированного оборудования – фотометрического шара или полусферы [17,18], диаметр которых должен быть больше испытуемой ОС, либо, если это требования 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 расчетного значения. Пусть имеется функция рассеяния линии (ФРЛ) и полученная путем преобразования Фурье ФПМ измеренные на коллиматорной установке [19] по стандартизированному методу [20] 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, ФРЛ с рассеянным излучением имеет повышенную составляющую начиная с уровня 0,3 от максимального значения. Соответственно, значения ФПМ с рассеянным излучением получается значительно ниже расчётного (рис. 2), а измеренные значения ФПМ соответствуют расчету с погрешностью ±0,01 отн.ед. в диапазоне пространственных частот до 30 мм-1.

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

**  (9)

** (10)

На основе полученных ФПМ рассчитаем КР, при этом полученные формулы не следует применять при *T*(*N*)=1 и *T*(*N*)≤0,05­–0,08, т.к. на нулевой пространственной частоте происходит нормировка ФПМ, а на пространственных частотах близких к предельной влияние рассеянного излучения является незначительным.

В связи с вышеизложенным расчет КР проводился по формуле (9) и формуле (10) при *m =* 1 и *Кob=* 1 для пространственных частот от 5 до 45 мм-1 с шагом 5 мм-1 и составил *S* = (0,27±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 дают предпосылки к созданию нового метода измерения КР, не требующего наличия фотометрического шара. Однако, при использовании предложенных формул для определения КР ОС следует четко отделять повышение значений ФРЛ, вызванных 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), (9) для определения снижения КПМ из-за 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 дают 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 далёких огней. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1978. 184 с., ил.

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

Pravdivtsev A.V. Combined effect of an IR optical system's design and process parameters on the background irradiation on the detector // Journal of Optical Technology. – 2019. – Vol.86. – No.9. – pp.533-538

4. Правдивцев А.В. Разработка методов уменьшения фоновой облучённости для повышения эффективности ИК пеленгаторов // Автореф. дис. кан. техн. наук. М.: 2019. 22 с.

5. Li J, Yang Y, Qu X, Jiang C. Stray Light Analysis and Elimination of an Optical System Based on the Structural Optimization Design of an Airborne Camera. Applied Sciences. 2022; 12(4):1935. https://doi.org/10.3390/app12041935

6. Шульман М.Я. Измерение передаточных функций оптических систем. Л.: Машиностроение, 1980. 208 с.

7. ОСТ В3-4774-80 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.: Издательство 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, Shibin Wu, Bin Fan, Fan Wu, Stray light characteristics of the diffractive telescope system // Optical Engineering. 57(2), 025105 (2018), https://doi.org/10.1117/1.OE.57.2.025105.

11. D. Jing, M. Chao, J. Kai, and W. Yang-bin, "The Influence of The stray light on MTF in Optical System in Test Range," in International 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, Yingjun Ma, "The influence of the stray light on MTF in optical system," Proc. SPIE 10847, Optical Precision Manufacturing, Testing, and Applications, 1084702 (12 December 2018); https://doi.org/10.1117/12.2501931

13. James E Harvey "Parametric analysis of the effect of scattered light upon the modulation transfer function", Proc. SPIE 8841, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XIV, 88410W (25 September 2013); https://doi.org/10.1117/12.2026958

14. Шайович С.Л. Зависимость контраста и функции передачи модуляции от коэффициента светорассеяния объектива // Всесоюзный семинар по теории и расчету оптических систем (сборник материалов). Ленинград. 5–7 апреля 1982 г. С. 180–183.

15. Бартенева О.А. Исследование качества фотографического изображения фотоаппаратов с использованием элементов теории информации // Автореф. дис. кан. техн. наук. СПб.: 1980. 20 с.

16. Бартенева О.А. Влияние рассеянного света на качество фотографического изображения // ОМП. 1977. № 4. С. 10–11.

17. Кувалдин Э.В., Шульга А.А. Измерение светорассеяния в объективах // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 11. С. 40–46.

Kuvaldin É.V., Shul'ga A.A. Measurement of light scattering in objectives // Journal of Optical Technology. – 2016. – Vol.83. – No.11. – pp.678-682 https://doi.org/10.1364/JOT.83.000678

18. Кувалдин Э.В., Киргетов М.В., Леонов М.Б. Установка для измерения основных характеристик малогабаритных объективов // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83. – № 1. – C 94-99

Kuvaldin E.V., Kirgetov M.V., Leonov M.B. Apparatus For Measuring The Main Characteristics Of Compact Objectives // Journal of Optical Technology. – 2016. – Vol. 83. – No.1. – pp.72-76. https://doi.org/10.1364/JOT.83.000072

19. Леонов М.Б., Куприянов И.А., Серегин Д.А., Чуриков С.С., Терлецкий Е.С. Аппаратно-программный комплекс для измерения характеристик качества оптических систем инфракрасного диапазона спектра // Оптический журнал. – 2019. – Т. 86. – № 7. – С. 74–78.

Leonov M.B, Kupriyanov I.A., Seregin D.A., Churikov S.S., Terletskiy E.S., Hardware and software system for measuring the quality characteristics of infrared optical systems // Journal of Optical Technology. – 2019. – Vol.86. – No.7. – pp.452-455 https://doi.org/10.1364/JOT.86.000452

20. ГОСТ Р 58566-2019 Оптика и фотоника. Объективы для оптико-электронных систем. Методы испытаний. Введ. 27.09.2019. М.: Стандартинформ, 2019. 31 с.

**Рис.1.** ФРЛ объективов-образцов сравнения

**Рис.2.** ФПМ объективов-образцов сравнения

**Рис.3.** Результаты расчета снижения ФПМ из-за рассеянного излучения

**АВТОРЫ**

Михаил Борисович Леонов – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Филиал АО «Корпорация «Комета» - «Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения», 194021, Санкт-Петербург, Россия, https://orcid.org/0000-0001-8540-9312, muxeu87@yandex.ru

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

THE INFLUENCE OF SCATTERING LIGHT ON OPTICAL SYSTEMS’ QUALITY CHARACTERISTICS

M.B. Leonov1,2,\*, A.A. Shul'ga 1,3

1The Branch of JSC «Kometa Corp.» – «Electro Optical Surveillance Systems», St. Petersburg, Russia

2e-mail: muxeu87@yandex.ru

3e-mail: anya.shulga93@gmail.com

\*Corresponding author: muxeu87@yandex.ru

Abstract

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

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

FIG. 1. LSF of reference lenses

FIG. 2. MTF of reference lenses

FIG. 3. MTF decrease via VGI calculation results

**AUTHORS**

Mikhail B. Leonov – PhD, senior scientist, The Branch of JSC «Kometa Corp.» – «Electro Optical Surveillance Systems», 194021, St. Petersburg, Russia, https://orcid.org/0000-0001-8540-9312, muxeu87@yandex.ru

Anna A. **Shul'ga** – 1st category engineer, The Branch of JSC «Kometa Corp.» – «Electro Optical Surveillance Systems», 194021, St. Petersburg, Russia, https://orcid.org/0000-0001-9712-2060, anya.shulga93@gmail.com