

## СВЕТОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ШИРОКОУГОЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВАХ

*Дарья Евгеньевна Деева*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры фотоники и приборостроения, тел. (999)464-08-77, e-mail: daria.abramkina@yandex.ru

*Татьяна Николаевна Хацевич*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

В статье рассмотрены два метода определения светораспределения в широкоугольных объективах: метод прямого расчета большого количества лучей и аналитический метод. Приведены формулы для расчета светораспределения в объективах с различными законами построения изображения. Приведены результаты компьютерного моделирования светораспределения в объективах с полями зрения, равными  $150^\circ$  и  $190^\circ$ . Показана эффективность применения недетерминированной трассировки лучей для анализа светораспределения в объективах с полями зрения, близкими к полусфере.

**Ключевые слова:** широкоугольный объектив, линейный закон построения изображения, светораспределение, недетерминированный ход луча

## LIGHT DISTRIBUTION IN WIDE-ANGLE LENSES

*Daria E. Deeva*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (999)464-08-77, e-mail: daria.abramkina@yandex.ru

*Tatiana N. Khatsevich*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)344-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

The article considers a two methods for determining light distribution in wide-angle lenses: the direct calculation method a lot of rays and the analytical method. Formulas for calculating the light distribution in lenses with different image construction laws are given. The results of computer simulation of light distribution in lenses with fields of view equal to  $150$  and  $190^\circ$  are presented. The efficiency of the use of nondeterministic ray tracing for the analysis of light distribution in lenses with fields of view close to the hemisphere is shown.

**Keywords:** wide-angle lens, linear image construction of the law, light distribution, nondeterministic, ray path length

### *Введение, актуальность*

Одной из наиболее важных задач в проектировании широкоугольных объективов является обеспечение приемлемого светораспределения по полю зрения. В некоторых широкоугольных объективах освещенность поля зрения на краю

падает до 5 % от освещенности в центре [4, 6], что снижает их эксплуатационные возможности. Поэтому обеспечение достаточного светораспределения по полю является актуальным направлением в объективостроении.

Целью статьи является сравнение различных подходов к расчету светораспределения в широкоугольных объективах на примере объективов с полями зрения, близкими к полусфере.

При проведении исследования использованы специальные методы исследования, такие как теория аббераций третьих порядков и компьютерное моделирование оптических систем.

### ***Оценка светораспределения в широкоугольных объективах аналитическим методом по Русинову***

Как утверждается в [4], развитие полей зрения до  $180^\circ$  возможно при наличии большой отрицательной дисторсии. Помимо увеличения поля зрения использование дисторсии помогает улучшить светораспределение по полю.

Поскольку дисторсия в широкоугольных объективах может достигать 100 %, то её объективная оценка с помощью традиционного графика отступления от ортоскопического закона невозможна. В этом случае наиболее часто оценивают отступление от линейного закона построения изображения (F-Theta дисторсию). Расчет отклонения от линейного закона можно выполнить с помощью специализированных программ по расчету оптических систем.

Исследование светораспределения проводится на примере двух разработанных авторами схем объективов: ОБ150 и ОБ190.

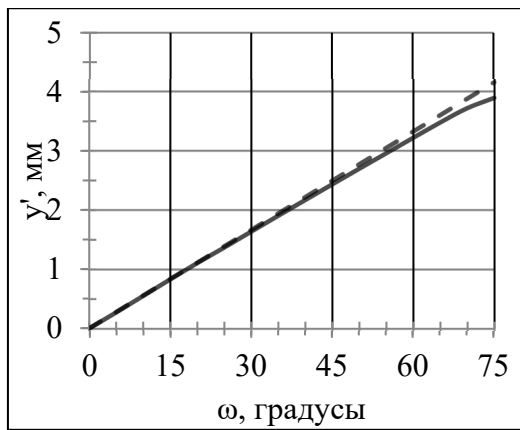
Объектив ОБ150 [1] состоит из шести линзовых компонентов со сферическими преломляющими поверхностями, выполненных из стекол российского производства, и имеет следующие характеристики:

- фокусное расстояние объектива 3,17 мм;
- угловое поле зрения оптической системы в пространстве предметов  $150^\circ$ ;
- относительное отверстие 1 : 4.

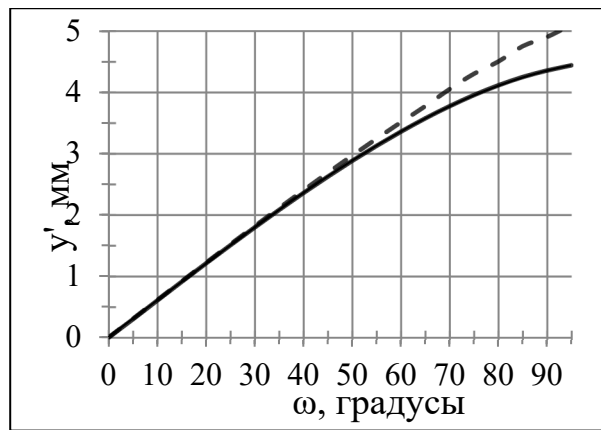
Объектив ОБ190 состоит из восьми компонентов, выполненными из стекол российского производства, при этом одна из поверхностей является асферической, и имеет следующие характеристики:

- фокусное расстояние объектива 3,51 мм;
- угловое поле зрения оптической системы в пространстве предметов  $190^\circ$ ;
- относительное отверстие 1 : 2.

На рис. 1 для указанных объективов представлены зависимости размера изображения от половинного угла поля зрения объектива. Пунктирной линией указаны графики аппроксимирующих функций.



а)



б)

Рис. 1. Графики изменения размера изображения в зависимости от угла  $\omega$ :  
а) ОБ150; б) ОБ190

Характер зависимости размера изображения от угла  $\omega$  наклонных пучков лучей в пространстве предметов, представленный на рис. 1 (а) для объектива ОБ150 аппроксимирован следующей функцией:

$$y' = f' \cdot \omega, \quad (1)$$

где  $y'$  – размер изображения;  $f'$  – фокусное расстояние объектива;  $\omega$  – угол главного луча с оптической осью объектива в пространстве предметов, выраженный в радианах.

Для объектива ОБ190 характер зависимости величины изображения от углового поля аппроксимирован следующей функцией:

$$y' = 2f' \cdot \sin\left(\frac{\omega}{2}\right). \quad (2)$$

Функция светораспределения  $\Phi(\omega)$  описывает зависимость отношения освещенности в точке изображения, соответствующей углу  $\omega$ , к освещенности в центре изображения, от поля зрения или размера изображения. Согласно методу Русинова М. М. [7], функция светораспределения может быть вычислена по формуле (3) как произведение трех составляющих:

$$\Phi(\omega) = \frac{E'_\omega}{E'_0} = F(\omega) \cdot \cos^4 \omega \cdot \frac{dS'_0}{dS'_\omega}, \quad (3)$$

где  $F(\omega)$  – функция геометрического и абберационного виньетирования;  $\frac{dS'_0}{dS'_\omega}$  – отношение площадей изображений элементарных площадок на оси объектива

и в точке, соответствующей углу  $\omega$ , при одинаковых значениях площадей соответствующих элементарных площадок в предметной плоскости.

Учитывая, что отношение площадей элементарных площадок зависит от реализованного в объективе закона построения изображения [8], формула (3) для объектива ОБ150 с учетом формулы (1) и дальнейших преобразований примет вид:

$$\Phi(\omega) = F(\omega) \cdot \frac{\sin 2\omega}{2\omega}. \quad (4)$$

Аналогично для объектива ОБ190, принимая во внимание закона построения изображения (2), можно записать:

$$\Phi(\omega) = F(\omega) \cdot \cos \omega. \quad (5)$$

По теории Русинова [6] абберационное виньетирование может быть описано формулой (6):

$$F(\omega) \approx 1 + 4An'^2 \sin^2 \omega', \quad (6)$$

где  $n'$  – показатель преломления в пространстве изображений;  $A$  – постоянный член разложения, не зависящий от углов  $\omega$  и  $\omega'$ ;  $\omega'$  – угол наклона главного луча в пространстве изображений.

Поскольку в объективе, согласно [1], реализован телецентрический ход главных лучей, то

$$\omega' \rightarrow 0^\circ \Rightarrow F(\omega) \rightarrow 1. \quad (7)$$

С учетом условия (7), в объективе ОБ150 абберационное виньетирование равно 1 для всех углов  $\omega$ , и поэтому формула для светораспределения принимает вид:

$$\Phi(\omega) = \frac{\sin 2\omega}{2\omega}. \quad (8)$$

В объективе ОБ190 угол между главным лучом и оптической осью в пространстве изображений находится в диапазоне от  $0^\circ$  до  $13^\circ$ , и, согласно формуле (6), значение абберационного виньетирования в конкретном исполнении объектива примерно равно 1,05 для края поля зрения. С учетом приведенных выше формул функция светораспределения для объектива ОБ190 принимает вид:

$$\Phi(\omega) = 1,05 \cdot \cos \omega. \quad (9)$$

Таким образом, получены формулы, описывающие светораспределение в объективах ОБ150 и ОБ190.

### ***Оценка светораспределения в объективах методом недетерминированной трассировки лучей***

Классические расчеты оптических систем предполагают использование детерминированного хода лучей, при котором порядок пересечения лучей с поверхностями определен пользователем, и игнорируется тот факт, что лучи могут многократно отражаться, преломляться в пределах одного элемента, а так же миновать отдельные элементы. Однако при оценке таких характеристик как освещенность поля зрения детерминированный ход луча может давать необъективные результаты, поскольку порядок чередования оптических элементов и преобразование луча на его поверхностях не определены [5].

Поэтому расчет с помощью недетерминированного хода луча является предпочтительным. Задачи, связанные с определением освещенности на приемнике излучения, решаются с использованием метода Монте-Карло. С помощью него программа моделирует распространение лучей, исходящих от источника излучения, до приемника излучения. Тем самым распределение освещенности на приемнике излучения воспроизводится статистически [2, 3].

Для конкретных исполнений объективов ОБ150 и ОБ190 объект задан как совокупность точечных источников, главные лучи которых направлены в центр входного зрачка системы. Для цилиндрических составляющих линз, а так же плоских фасок заданы поглощающие свойства. Для исключения фоновой засветки приемника объектив помещен в светопоглощающем корпусе. На рис. 2 представлена модель объектива ОБ150 для расчета в недетерминированном ходе лучей.

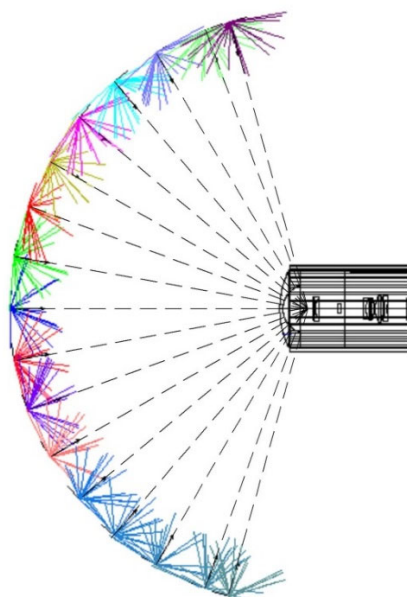


Рис. 2. Расчетная модель объектива ОБ150

В соответствии с рис. 2 на модели объектива, объект представлен 17 элементарными площадками (точечными источниками), размещенными по дуге в пределах поля зрения  $150^\circ$ . Пунктирными линиями на рисунке указано направление главных лучей источников излучения. Характер излучения каждого точечного источника соответствует ламбертовскому закону. В процессе расчета количество лучей, трассируемых от каждого точечного источника, составляло 10 миллионов. Каждому лучу приписывалась соответствующая мощность, проводилась его трассировка через все поверхности в непоследовательном режиме с учетом расщепления на поверхностях и многократных переотражений и преломлений.

Трассировка лучей позволяет получить на приемнике излучения изображения точечных источников, и провести оценку распределения освещенности от центра к краю изображения. Приемник излучения задан реальными размерами КМОП матрицы [9]. Фиксация приемником лучей и дальнейшее вычисление освещенности происходит следующим образом: на приемнике, зафиксировавшем падение на него луча, определяется номер пиксела, и затем к ранее накопленной энергии пиксела прибавляется энергия упавших на него лучей. На основании обработки результатов были построены графики, отражающие значение пиковой освещенности изображений отдельных источников по полю приемника. На рис. 3 для объектива ОБ150 представлен график распределения освещенности, полученный аналитическим методом (кривая 1), и прямым расчетом (кривая 2).

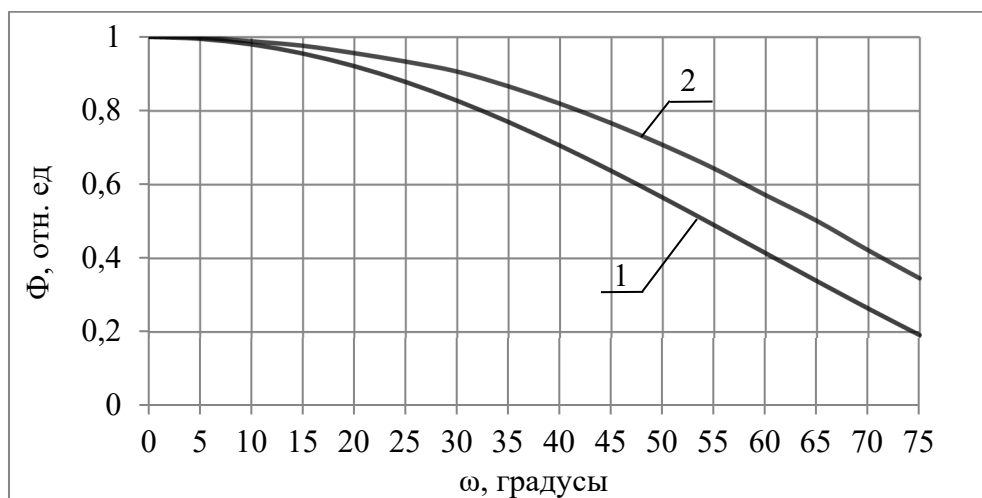


Рис. 3. Распределение освещенности по полю в объективе ОБ150:

1 – аналитический метод; 2 – метод прямого расчета с использованием недетерминированной трассировки лучей

Согласно графикам, представленным на рис. 3, значение светораспределения на краю поля зрения объектива ОБ150, рассчитанное двумя указанными методами, отличается примерно в 1,78 раз. При этом результат, полученный методом прямого расчета с использованием недетерминированной трасси-

ровки лучей, получен выше на 55,8 %. Это может объясняться тем, что формула (8), получена для плоского предмета. Поскольку анализируемые широкоугольные объективы работают с полями зрения более  $150^\circ$ , то многие применения объективов предполагают работу с предметами, расположенными на равном расстоянии от объектива. Поэтому, основываясь на рис. 3, можно сделать вывод, что переход от плоского предмета к криволинейному приводит к повышению светораспределения, а в конкретном исполнении объектива светораспределение увеличилось в 1,78 раз.

На рис. 4 представлены графики светораспределения для объектива ОБ190.

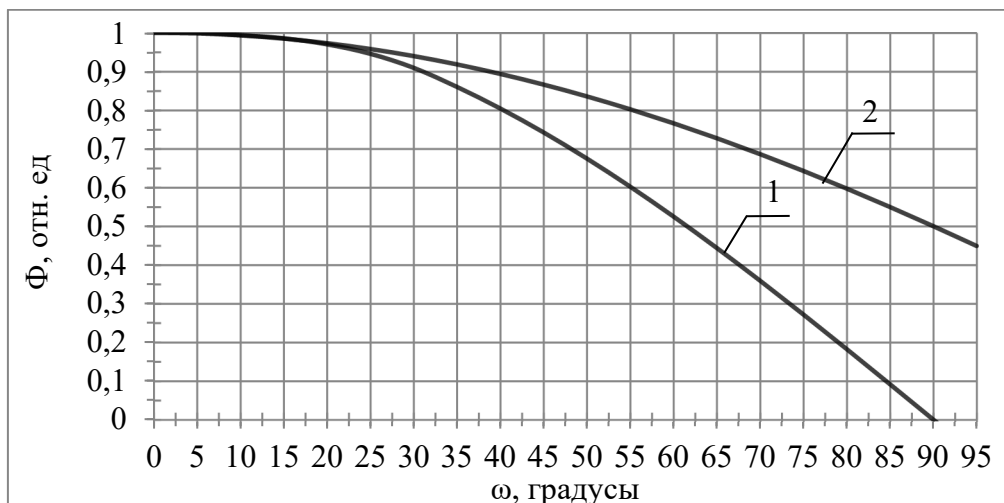


Рис. 4. Распределение освещенности по полю в объективе ОБ190:

1 – аналитический метод; 2 – метод прямого расчета с использованием недетерминированного хода лучей

Поскольку для объектива ОБ190 угол между главным лучом и оптической осью в пространстве предметов превышает  $90^\circ$ , то в соответствии с формулой (8) освещенность на краю поля в таком объективе должна падать до нуля. График 2, полученный методом прямого расчета, показывает, что падение освещенности изображения от центра к краю происходит значительно медленнее и достигает на краю 43 % от освещенности на оси объектива.

### ***Обсуждение результатов и заключение***

Повышение светораспределения в объективе ОБ150 по сравнению с рассчитанным по формуле (8), иллюстрируемое графиками рис. 3, можно объяснить, если в указанную формулу ввести коэффициент  $(1 - \cos \omega)^{-2}$ , учитывающий дугообразную форму предмета, принятую при моделировании. Для угла, равного  $75^\circ$ , значение коэффициента составляет 1,82. Таким образом формула (8), дополненная указанным коэффициентом, достаточно хорошо описывает светораспределение в телецентрическом объективе с линейным законом построения изображения.

В объективе ОБ190 с полем зрения, превышающем полусферу, оценка по формуле (9) не дает достоверного результата. Можно ожидать, что в силу большой отрицательной дисторсии светораспределение будет повышено, но количественную оценку на этапе разработки схемы могут дать только прямые методы трассировки через систему большого количества лучей.

Было проведено сравнение полученных результаты моделирования светораспределения по полю в оптических системах широкоугольных объективов с аналогичными результатами других исследователей. В [10] показано, что в объективе с относительной дисторсией, равной на краю поля минус 90 %, светораспределение для диафрагменного числа 5,6 составило примерно 50 %, и для диафрагменного числа от 2,8 % до 25 %.

Таким образом наличие отрицательной дисторсии, характерной для широкоугольных и сверхширокоугольных объективов, приводит к повышению светораспределения по полю. Наличие аберраций в зрачках, прежде всего дисторсии и комы, может приводить к увеличению размеров выходных зрачков для наклонных пучков лучей по сравнению с размером выходного зрачка для осевого пучка. Этот фактор способствует повышению светораспределения по полю. В зависимости от знака аберраций в зрачках аберрационное виньетирование может быть как больше, так и меньше единицы. Количественно учесть этот фактор при анализе светораспределения аналитическими методами достаточно сложно. На этапе разработки схем широкоугольных объективов наиболее достоверную информацию о прогнозируемом светораспределении в объективе дает моделирование методами недетерминированной трассировки лучей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамкина, Д.Е., Хацевич Т.Н. Оптические системы широкоугольных объективов // ГЕО-Сибирь-2020 : сб. материалов Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке». СГУГиТ. – 2020. – Т. 6, ч. 1. – С. 3–10.
2. Волобой А.Г., Галактионов В.А., Дмитриев К.А., Копылов Э.А. Двухнаправленная трассировка лучей для интегрирования освещенности методом квази- Монте-Карло // Программирование. – 2004. – № 5. С. 25–34.
3. Волобой А.Г., Галактионов В.А., Ершов С.В., Жданов Д.Д., Потемин И.С., Шапиро Л.З. Анализ ошибок компьютерного моделирования освещения сложных сцен // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2010. – № 2. С. 83–94.
4. Волосов Д.С., Фотографическая оптика. – М. : Искусство. – 1978. – 543 с.
5. Жданов Д.Д., Гарбуль А.А., Майоров В.А., Потемин И.С., Соколов В.Г. Недетерминированная трассировка лучей в задачах анализа светорассеивания и проектирования осветительных систем // Оптический журнал. – 2014. – Т.81. - №6. С. 27-33.
6. Карпова Г.В., Перспективные искажения, связанные с дисторсией объектива // Оптико-механические и электронно-оптические приборы: Межвуз. сб. науч. тр. – 1985. – С. 135-138.
7. Русинов М.М., Техническая оптика. Машиностроение. Ленингр. отд-ние. – 1979. – 488 с.
8. Хацевич Т.Н., Светораспределение в объективах с линейным законом построения изображения // Оптические и оптико-электронные приборы: Межвуз. сб. науч. тр. – 1989. – С. 20-25.
9. НПП «Фотоника» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.npk-photonika.ru/> (дата обращения: 16.04.2021).
10. Ray S.F., Applied Photographic Optics // Focal Press. – 1988. – 526 p.

© Д. Е. Деева, Т. Н. Хацевич, 2021