

М. В. В я з о в ы х

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСВЕЩЕННОСТИ В ПЛОСКОСТИ АНАЛИЗА ОПТИЧЕСКОЙ ИЗОБРАЖАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРИ НЕКОГЕРЕНТНОМ ОСВЕЩЕНИИ**

*Проведен анализ методик определения освещенности в плоскости анализа оптической изображающей системы при некогерентном освещении; представлена новая методика на основе расчета реальных лучей, проходящих через абберационную оптическую систему.*

В настоящее время с появлением новых мощных систем автоматизированного проектирования стало возможным определение освещенности в плоскости анализа любой оптической изображающей системы при некогерентном освещении с повышенной точностью.

Широко используется методика определения энергетической освещенности в плоскости анализа оптической изображающей системы в рамках фурье-оптики [1]. В соответствии с ней находят пространственно-частотный спектр (ПЧС) яркости в предметной области с помощью прямого преобразования Фурье (при этом считается известным распределение яркости в предметной области), умножают полученный ПЧС на заранее известную оптическую передаточную функцию (ОПФ) изображающей системы, находят обратное преобразование Фурье от полученного ПЧС с целью определения искомого распределения энергетической освещенности в плоскости изображения.

Как видно из краткого описания методики, по меньшей мере две физические величины — распределение яркости в предметной области и ОПФ — нуждаются в априорном определении. Нахождение распределения яркости в предметной области является задачей трудной, а в большинстве случаев — невыполнимой. Для определения ОПФ изображающей системы используют аналитические выражения; например, выражение для ОПФ оптической системы вычисляют с помощью автокорреляционной функции зрачковой функции системы [2]. Однако эти аналитические выражения либо недостаточно точны, либо их вычисление является трудоемким.

Кроме того, данная методика предполагает в качестве необходимого условия выполнение требований пространственной инвариантности. В реальной оптической системе это условие, как правило, не выполняется, что приводит к существенному усложнению алгоритма расчета распределения энергетической освещенности из-за необходимости выделения изопланатичных зон в плоскости изображения и последующей идентификации ОПФ для этих зон.

Особенно сложно использовать данную методику при анализе изображения, формируемого оптической системой, в рассеивающих средах. В этих случаях использование скалярной теории дифракции не представляется возможным.

Существует другое решение задачи определения энергетической освещенности в плоскости анализа оптической изображающей системы, но уже в рамках теории переноса. При описании формирования изображения в рамках теории переноса, в том числе в рассеивающих средах, задача состоит в расчете освещенности в плоскости изображения в зависимости от пространственно-углового распределения яркости в плоскости входного зрачка системы [3].

Рассмотрим следующую схему наблюдения при отсутствии рассеяния в атмосфере (рис. 1): в плоскости  $z = 0$  находится плоский объект наблюдения, являющийся источником излучения с пространственно-угловым распределением яркости  $L_0(\vec{\rho}, \vec{\Omega})$ , в плоскости  $z = l$  находится плоскость входного зрачка изображающей оптической системы, в плоскости  $z = l + z_s$  находится плоскость изображения оптической системы. Найдем распределение освещенности в этой плоскости. Для решения этой задачи будем использовать метод функций Грина, которые в данном случае описывают пространственно-угловое распределение яркости излучения, создаваемое в плоскости регистрации точечным мононаправленным излучателем, находящимся в плоскости  $z = 0$  в точке  $\vec{\rho} = \vec{\rho}_1$  и излучающим в направлении  $\vec{\Omega} = \vec{\Omega}_1 - G_{es}(\vec{\rho}, \vec{\rho}_1; \vec{\Omega}, \vec{\Omega}_1)$ . Тогда энергетическую освещенность в плоскости анализа изображающей оптической системы, создаваемую объектом наблюдения, можно представить в следующем виде:

$$E(\vec{\rho}_s) = \iint L_0(\vec{\rho}_1, \vec{\Omega}_1) G_{es}(\vec{\rho}_s, \vec{\rho}_1; \vec{\Omega}_1) d\vec{\rho}_1 d\vec{\Omega}_1,$$

где  $G_{es}(\vec{\rho}_s, \vec{\rho}_1; \vec{\Omega}_1)$  — функция Грина оптической системы для освещенности.

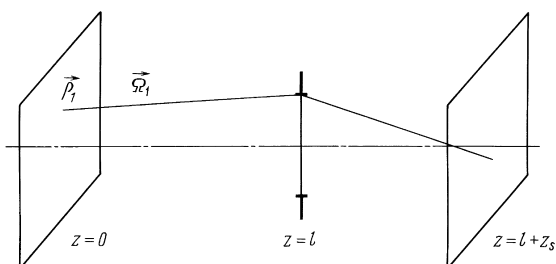


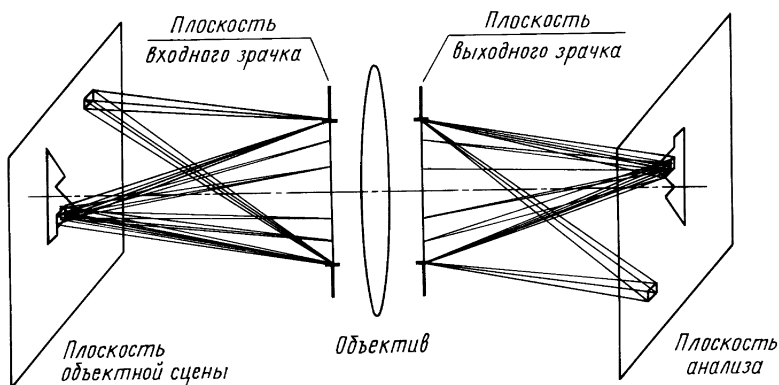
Рис. 1. Схема наблюдения

Таким образом, при описании формирования изображения с помощью методов теории переноса можно получить примерно те же результаты, что и с помощью метода фурье-оптики. И в том, и в другом случае необходимо априорное знание распределения яркости в предметной области и функции Грина оптической системы для освещенности.

Перечисленные недостатки обеих методик значительно затрудняют определение искомого распределения энергетической освещенности в плоскости изображения и снижают точность его представления.

С целью повышения точности определения освещенности в плоскости анализа любой оптической изображающей системы при некогерентном освещении была разработана новая методика. В этой методике вместо громоздких интегральных преобразований используют расчет реальных лучей, проходящих через абберационную оптическую систему, с последующим анализом так называемой суперспотдиagramмы. Для этого пространственно-угловое распределение яркости в предметной плоскости оптической системы представляют в виде конечного числа малоразмерных элементарных источников, которые формируют цифровой файл объектной сцены; определяют количество лучей от каждого элемента объектной сцены, прямо пропорциональное его яркости, а сами лучи распределяют равномерно в пределах элемента; рассчитывают ход лучей через оптическую систему от каждого элемента; плоскость изображения также разбивают на конечное число элементарных площадок и рассчитывают освещенность каждой из них пропорционально количеству лучей, пришедших на данный элемент; в результате такого расчета получают суперспотдиagramму, которая представляет собой искомое распределение освещенности в плоскости изображения.

Практическую реализацию методики можно представить следующим образом. На первом этапе исследования формируется файл объектной сцены. Для этого объектная сцена фотографируется высококачественным цифровым фотоаппаратом с мегапиксельным матричным приемником и объективом, функция размытия которого стремится к дельта-функции. При этом входной зрачок фотоаппарата помещают на место входного зрачка инспектируемой оптической системы. На цифровой ФПЗС-матрице фотоаппарата (ФПЗС — фотоприбор с зарядной связью) формируется скрытое электронное изображение в виде пространственного распределения зарядовых пакетов, соответствующее пространственно-угловому распределению яркости объектной сцены. При этом происходит разбиение объектной сцены на пиксели в соответствии с пространственным разрешением ФПЗС-матрицы. На рис. 2 выделены два пикселя — “объектный” и “фоновый”. Далее полученный с помощью фотоаппарата файл используется в качестве исходного для имеющейся подпрограммы системы автоматизированного



**Рис. 2. Схема формирования изображения оптической системой**

проектирования (САПР). Для примера рассмотрим пакет программ “Zemax”.

После запуска САПР “Zemax” необходимо сформировать файл исследуемой оптической системы путем ввода в редактор ее конструктивных параметров. Файл объектной сцены загружают в программу. Затем выбирают суммарное количество  $N$  лучей от всех пикселей объектной сцены. Исходя из выбранного количества лучей  $N$ , программа определяет количество лучей от каждого пикселя, прямо пропорциональное его яркости, а сами лучи распределяет равномерно в пределах пикселя в соответствии с заложенным алгоритмом (на рис. 2 количество лучей от “объектного” пикселя больше, чем от “фонового” пикселя), а также на данном этапе существует возможность выбора типа отражательной способности объекта — например, ламбертова или изотропного.

Затем запускают стандартную подпрограмму расчета хода лучей через оптическую систему. Эта подпрограмма в соответствии с заложенным в ней алгоритмом рассчитывает ход лучей через оптическую систему с учетом всех ее реальных aberrаций — находит точку встречи луча с плоскостью анализа изображения, при этом плоскость анализа заранее разбивается на пиксели. После окончания расчета формируется распределение освещенности в изображении объектной сцены путем подсчета количества лучей, пришедших на каждый пиксель (см. рис. 2).

В результате такого способа эмуляции процесса формирования изображения в плоскости анализа реальной оптической системой корректно учитываются все aberrации и искажения (включая дисторсию) и, соответственно, не требуется достижения изопланатизма изображающей системы, достигнуть которого в сколь-либо значительном угловом поле практически невозможно.

Полученная описанным способом суперспотдиаграмма (с точностью до размера пикселя объектной сцены) практически полностью имитирует распределение светового потока на поверхности анализа (обычно — на плоскости, реже — на сфере или цилиндре) и может либо анализироваться непосредственно (в том числе — визуально на экране монитора ЭВМ), либо исследоваться известными способами после подсчета числа лучей определенного цвета, попавших в заданный пиксель плоскости анализа (плоскости изображения).

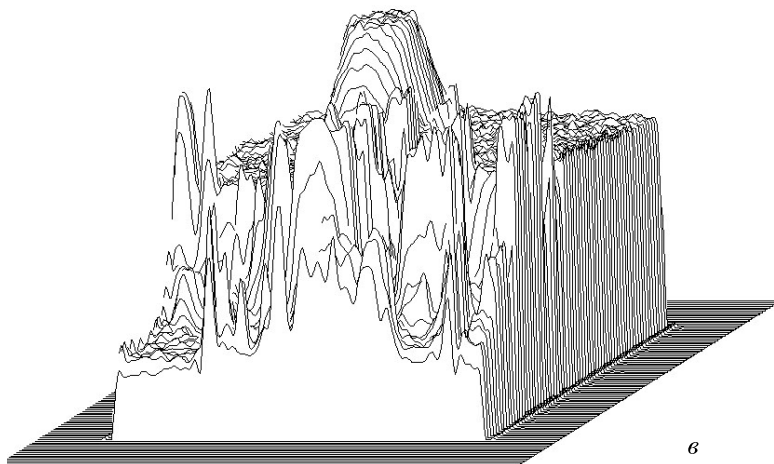
Для реализации предложенной методики было использовано изображение объекта и подстилающей поверхности (рис. 3, *а*). Цифровой



*а*



*б*



*в*

**Рис. 3. Графическое представление результатов:**

*а* — изображение объектной сцены; *б* — изображение объектной сцены, сформированное оптической системой; *в* — 3D-представление распределения суммарной освещенности в изображении объектной сцены

файл этого изображения использовался в качестве входного для программы САПР “Zemax”. В редакторе программы были введены конструктивные параметры стандартного объектива. После этого установили суммарное количество испускаемых лучей в 5 000 000. Далее была запущена подпрограмма расчета хода лучей через исследуемую оптическую систему. После окончания расчета программа сформировала цифровой файл изображения объектной сцены, который был визуализирован на дисплее (рис. 3, б).

Кроме непосредственного наблюдения выходного изображения на экране монитора, для количественного анализа может быть использовано 3D-представление распределения освещенности (как суммарной, так и в любом из используемых цветов) либо его двумерная “карта” с изофотами (линиями постоянной освещенности). На рис. 3, в изображено 3D-представление распределения суммарной освещенности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М о с я г и н Г. М., Н е м т и н о в В. Б., Л е б е д е в Е. Н. Теория оптико-электронных систем. – М.: Машиностроение, 1990. – С. 128–130.
2. К а р а с и к В. Е., О р л о в В. М. Лазерные системы видения. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – С. 70–75.
3. В а л е н т ю к А. Н., П р е д к о К. Г. Оптическое изображение при дистанционном наблюдении. – Мн.: Наука і тэхніка, 1991. – С. 97–100.

Статья поступила в редакцию 27.06.2002

Максим Вячеславович Вязовых родился в 1976 г., окончил в 2000 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Научный сотрудник кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 научных работ в области лазерной локации и лазерных систем видения.

M.V. Vyazovykh (b. 1976) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2000. Researcher of “Laser and Optical-and-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 10 publications in the field of the laser location and laser imaging systems.

