

# ОБОБЩЕННАЯ СВЕТОСИЛА ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

С. А. РОДИОНОВ

Вводятся понятия обобщенных светосил, описывающих передачу в изображении энергии предмета любым линейным изопланатическим изображающим прибором.

Одной из наиболее важных характеристик оптического прибора является его светосила. В теории оптических приборов [1, 2] принято определять светосилу как отношение освещенности изображения к яркости предмета. Кроме того, геометрическая светосила определяется как квадрат относительного отверстия объектива, физическая светосила [2] – как геометрическая, умноженная на коэффициент пропускания системы. Указанные определения обладают некоторыми существенными недостатками, не позволяющими использовать их для построения математической модели оптического прибора, например, при его автоматизированном проектировании.

Во-первых, яркость и освещенность есть только частные реализации обобщенных интенсивностей предмета и изображения. Например, интенсивность изображения для приборов дальнего действия по изображению характеризуется силой света зрачка в данном направлении [3].

Во-вторых, светосила, определенная как отношение освещенности изображения к яркости предмета, существенно зависит от вида предмета и получается различной, например, для протяженных, точечных и линейных предметов [1, 2] и не может, следовательно, служить собственной, не зависящей от объекта характеристикой прибора.

В-третьих, геометрическая и физическая светосилы, как они определены выше, имеют смысл только для систем типа фотообъектива и только для осевой точки предмета, причем просто светосила в этом случае зависит от геометрической или физической светосил, положения предмета и увеличения в зрачках [2].

В-четвертых, приведенные определения светосил нельзя применить к неоптическим элементам, участвующим в построении изображения в общей цепи с оптическими, например, к ЭОПам, фотоматериалам и др.

Отмеченных недостатков лишены понятия обобщенных светосил, введенные автором при рассмотрении оптического прибора с позиций общей теории изображения [4]. При этом работа оптического прибора описывается некоторым оператором  $L$ , преобразующим функцию обобщенной интенсивности предмета  $I(\mathbf{x})$  в функцию обобщенной интенсивности изображения  $I'(\mathbf{x}')$ :

$$I'(\mathbf{x}') = L[I(\mathbf{x})],$$

где  $\mathbf{x}$  и  $\mathbf{x}'$  – векторы обобщенных координат на поверхностях предмета и изображения соответственно. Как интенсивности  $I$  и  $I'$ , так и координаты  $\mathbf{x}$  и  $\mathbf{x}'$  могут в конкретных случаях иметь самый различный физический смысл [3]. Для линейных изопланатических приборов, приближением к которым считают

оптический прибор, изображающий оператор, как известно, приводится к оператору типа свертки [5]:

$$I'(\mathbf{x}') = \iint h(\mathbf{x}' - \mathbf{V}\mathbf{x})I(\mathbf{x})d\mathbf{x}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{V}$  – матрица обобщенных увеличений [6],  $h$  – функция рассеяния точки (ФРТ), описывающая распределение интенсивности в изображении точечного предмета:  $h(\mathbf{x}') = L[\delta(\mathbf{x})]$  ( $\delta$  – дельта-функция Дирака). Интегрирование в (1) производится по всей поверхности предмета.

Светосилы в теории изображения описывают передачу прибором энергии предмета, т. е. служат энергетическими передаточными характеристиками. Определим обобщенную энергию предмета и изображения как интегралы от функций обобщенных интенсивностей по соответствующим поверхностям:

$$E = \iint I(\mathbf{x})d\mathbf{x}; \quad E' = \iint I'(\mathbf{x}')d\mathbf{x}';$$

$$E_r = \iint I(\mathbf{V}^{-1}\mathbf{x}')d\mathbf{x}' = \|\mathbf{V}\|E; \quad E' = \iint I'(\mathbf{V}\mathbf{x})d\mathbf{x} = \frac{1}{\|\mathbf{V}\|} E' = \|\mathbf{V}\|E,$$

где  $E$  и  $E'$  – обобщенные энергии предмета и изображения на своих поверхностях,  $E_r$  – энергия предмета, перенесенного в масштабе на поверхность изображения,  $E_r'$  – энергия изображения, перенесенного на поверхность предмета,  $\|\mathbf{V}\|$  – модуль определителя матрицы увеличений  $\mathbf{V}$ .

Естественно определить передачу энергии при помощи коэффициента, равного отношению энергии изображения к энергии предмета:

$$H = \frac{E'}{E}. \quad (2)$$

Если сравнивать энергии предмета и изображения, приведенных на одну поверхность, то получим другой коэффициент

$$H' = \frac{E_r'}{E} = \frac{E'}{E_r} = \|\mathbf{V}\|^{-1} H. \quad (3)$$

Эти коэффициенты можно назвать обобщенными передней и задней светосилами.

Покажем, что обобщенные светосилы  $H$  и  $H'$  не зависят от вида предмета, т. е. являются собственными характеристиками прибора. Подставив выражение (1) для функции изображения  $I'(\mathbf{x}')$  в выражение для энергии  $E'$  а затем в определение светосилы (2) и сделав замену переменных интегрирования, получим

$$H = \frac{\iiint I(\mathbf{x})h(\mathbf{x}' - \mathbf{V}\mathbf{x})d\mathbf{x}d\mathbf{x}'}{\iint I(\mathbf{x})d\mathbf{x}} = \frac{\iint I(\mathbf{x})d\mathbf{x} \iint h(\mathbf{x}')d\mathbf{x}'}{\iint I(\mathbf{x})d\mathbf{x}} = \iint h(\mathbf{x}')d\mathbf{x}' = E'_h. \quad (4)$$

Итак,  $H$  и, следовательно,  $H'$  для линейных изопланатических приборов не зависят от функции предмета  $I(\mathbf{x})$ , кроме того, передняя светосила  $H$  есть обобщенная энергия ФРТ.

Установим теперь связь обобщенных светосил с понятием светосил в теории оптических приборов. Для этого рассмотрим изображение «протяженного» предмета, т. е. такого предмета, интенсивность которого можно считать постоянной в пределах области, превышающей характеристический размер ФРТ, приведенной на поверхность предмета. Тогда в выражении (1) функцию предмета можно вынести из-под интеграла, что с учетом (2), (3), (4) дает

$$I'(\mathbf{x}') = I(\mathbf{x}) \iint h(\mathbf{x}' - \mathbf{V}\mathbf{x}) d\mathbf{x} = I(\mathbf{x}) \|\mathbf{V}\|^{-1} \iint h(\mathbf{x}') d\mathbf{x}' = I(\mathbf{x}) H'.$$

Таким образом, для протяженных в указанном смысле предметов интенсивность изображения пропорциональна интенсивности предмета, причем коэффициентом пропорциональности служит задняя светосила. В частном случае для прибора типа «фотографический объектив» [3] обобщенная интенсивность предмета есть яркость, а изображения – освещенность, следовательно, в этом случае введенная нами обобщенная задняя светосила совпадает со светосилой, определенной в теории оптических приборов для протяженных предметов.

Рассмотрим теперь изображение «точечных» предметов. Под точечным предметом будем понимать такой, размеры которого, т. е. размеры той области, в которой функция предмета существенно отличается от нуля, значительно меньше размеров ФРТ, приведенной на поверхность предмета, так что ФРТ можно считать постоянной в пределах этой области. В этом случае в выражении (1) из-под интеграла можно вынести ФРТ:

$$I'(\mathbf{x}') = h(\mathbf{x}') \iint I(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = E h(\mathbf{x}'). \quad (5)$$

Предыдущее выражение показывает, что изображение точечного предмета независимо от вида предмета пропорционально ФРТ. Обычно при рассмотрении структуры изображения вместо  $h(\mathbf{x}')$  используют нормированную ФРТ  $h_1(\mathbf{x}') = H^{-1} h(\mathbf{x}')$ , энергия которой единична. Для нормированной ФРТ выражение (5) примет вид

$$I'(\mathbf{x}') = E H h_1(\mathbf{x}'),$$

т. е. при прочих равных условиях интенсивность изображения точечного предмета пропорциональна передней обобщенной светосиле.

Итак, введенные понятия обобщенных светосил не противоречат существующему определению светосил в теории оптических приборов, но лишены недостатков последних, носят более общий характер, более универсальны и могут быть применены при построении математических моделей любых изображающих приборов, в том числе и неоптических.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Чуриловский В. И. *Теория оптических приборов*. – М. – Л.: Машиностроение, 1966.
2. Бегунов Б. Я., Заказнов Н. П. *Теория оптических систем*. – М.: Машиностроение, 1973.
3. Родионов С. Л. *Передаточные характеристики оптических приборов в теории изображения*. – Тр. ЛИТМО, вып. 75, 1974, с. 36.
4. Родионов С. А. *Типы оптических систем и конкретизация обобщенных характеристик*. – Тр. ЛИТМО. вып. 75, 1974, с. 46.

5. Папулис А. *Теория систем и преобразований в оптике*. – М.: Мир, 1971.
6. Родионов С. А. *Масштабные передаточные характеристики оптических приборов*. – Изв. вузов СССР – Приборостроение, 1977, № 10, с. 117.