УДК 629.7.07

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

к.т.н. С.М. Андреев, к.т.н. К.Ф. Фомичев
(представил д.т.н., проф. Д.В. Голкин)

В работе предлагается расчет распределения освещенности в фокальной плоскости оптических систем, исходя из представления, что оптическое излучение распространяется вдоль нормалей (лучей) к волновой поверхности, т.е. не принимается во внимание дифракция и интерференция.

Оценка качества изображения оптических систем (ОС) представляет собой одну из важнейших задач при проектировании оптико - электронных приборов наведения и самонаведения летательных аппаратов [1].

Распределение энергии в изображении светящейся площадки, величина которой превышает несколько наименьших разрешаемых расстояний, практически не зависит от того, учитываются дифракционные явления или нет, т.е. можно ограничиться тем приближением, которое дает чисто геометрическая оптика [2].

Для получения картины распределения освещенности в плоскости изображения необходимо знать направление отраженных (преломленных) лучей после попадания на последнюю оптическую поверхность и координаты точек пересечения их с той же поверхностью. Все последующие рассуждения справедливы как для отражения, так и для преломления. Для расчета хода лучей, отраженных от поверхности второго порядка, удобно воспользоваться формулами Федера [3]. Распределение освещенности может быть вычислено с помощью подсчета точек пересечения лучей с фокальной плоскостью, если выполнены следующие условия [3]:

- лучи попадают на поверхность со стороны объекта в точках, образующих правильную квадратную сетку;
- число лучей велико, чтобы обеспечить на изображении достаточно подробную картину распределения.

Луч в схеме Федера определяется с помощью следующих векторов (рис. 1): $\overline{\mathbf{Q}}\ (\mathbf{X, Y, Z})$, $\overline{\mathbf{Q}}\ (\mathbf{X_1, Y_1, Z_1})$ - единичные вектора вдоль луча до и после отражения соответственно; $\overline{\mathbf{T}}\ (\mathbf{X_1, Y_1, Z_1})$ - вектор, соединяющий вершину поверхности 2 с точкой пересечения луча с этой поверхностью; $\mathbf{X, Y, Z}$ - координаты луча на поверхности 1; $\mathbf{X_1, Y_1, Z_1}$ - координаты луча на поверхности 2.

Уравнение поверхности второго порядка имеет вид

$$\mathbf{F\ (x_1\ y_1\ z_1) = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - 2px_1 - e^2 x_1^2 = 0}\,. \tag{1}$$

Уравнение луча:

$$\mathbf{x_1 = Mx + tX}; \quad \mathbf{y_1 = My + tY}; \quad \mathbf{z_1 = Mz + tZ}, \qquad (2)$$

где **Mx**, **My**, **Mz** - проекции перпендикуляра **M**, опущенного из точки $\mathbf{Q_2}$ на падающий луч, на оси, связанной с поверхностью системы координат; **X, Y, Z** - направляющие косинусы падающего луча.

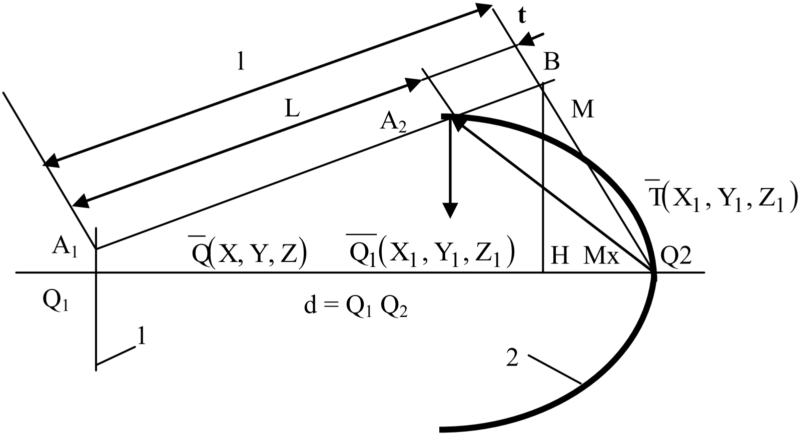

Рис. 1. Луч в схеме Федера

Для отрезка **M**

$$\mathbf{M^2 = (Mx)^2 + (My)^2 + (Mz)^2},$$

где $\mathbf{Mx = x + 1X - d}$; $\mathbf{My = y + 1Y}$; $\mathbf{Mz = z + 1Z}$.

Подставляя (2) в (1), определяем величину **t** как

$$\mathbf{t = \frac{cM^2 - ce^2M^2x - 2Mx}{X\left(ce^2Mx + 1\right) + Q}} \ ,$$

где $\mathbf{c = \frac{1}{P}}$; $\mathbf{Q = \sqrt{x^2 + c^2e^2M^2x + 2cMx - c^2M^2\left(1 - e^2X^2\right)}}$.

Величина **L** определяется из уравнения $\mathbf{L = 1 - t}$,
где $\mathbf{1 = dX - (xX + yY + zZ)}$.

Зная **L** , легко получить выражение для $\mathbf{x_1}$, $\mathbf{y_1}$, $\mathbf{z_1}$:

$$\mathbf{x_1 = x + LX - d}\ ; \quad \mathbf{y_1 = y + LY}; \quad \mathbf{z_1 = z + LZ}. \qquad (3)$$

Орт направления луча, отраженного от поверхности любой формы, можно найти из векторного уравнения [2]:

$$\mathbf{\overline{Q_1} = \frac{n}{n_1}\overline{Q} + \overline{N}\left(\frac{n}{n_1}\cos\varepsilon - \cos\varepsilon'\right)} \ , \qquad (4)$$

где $\mathbf{\overline{N}}$ - вектор, у которого направляющие косинусы нормали к отражающей поверхности $(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\nu})$; **n**, $\mathbf{n^1}$ - показатели преломления сред соответственно до и после поверхности (в случае отражения $\mathbf{n = -n^1}$); $\boldsymbol{\varepsilon, \varepsilon'}$ - угол падения и угол отражения луча на поверхности.

Известно [4], что направляющие косинусы нормали пропорциональны частным производным $\frac{\partial F}{\partial x}$, $\frac{\partial F}{\partial y}$, $\frac{\partial F}{\partial z}$, т.е.:

$$\lambda = \frac{\frac{\partial F}{\partial x}}{PD}; \quad \mu = \frac{\frac{\partial F}{\partial y}}{PD}; \quad \nu = \frac{\frac{\partial F}{\partial z}}{PD},$$

где $$\frac{\partial F}{\partial x} = 2(Kx - P); \quad \frac{\partial F}{\partial y} = 2y; \quad \frac{\partial F}{\partial z} = 2z; \quad K = 1 - e^2;$$

$$D = \frac{1}{P}\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2} = \sqrt{1 + c^2 e^2 \left(y_1^2 + z_1^2\right)}.$$

Тогда угол луча с нормалью вычисляется по формуле

$$\cos\varepsilon = \frac{Kx_1 - P}{PD} X + \frac{Y_1}{PD} Y + \frac{Z_1}{PD} Z.$$

После подстановки величин $\mathbf{x_1, y_1, z_1}$ из формул (3) получаем

$$\cos\varepsilon = \frac{Q}{D}.$$

Угол $\boldsymbol{\acute{\varepsilon}}$ определяется по его косинусу

$$\cos\varepsilon = \left[1 - \left(\frac{n}{n_1}\right)^2 \left(1 - \cos^2\varepsilon\right)\right]^{1/2}.$$

Переходя к составляющим по осям координат на основании (4), получим значения направляющих косинусов отраженного луча:

$$X = bX - a\frac{CKX_1 - 1}{D}; \quad Y = bY - a\frac{CY_1}{D}; \quad Z = bZ - a\frac{CZ_1}{D},$$

где $\mathbf{b = \frac{n}{n^1}}$; $\mathbf{a = \cos\varepsilon' - b\cos\varepsilon}$.

При моделировании в качестве поверхностей ОС, для которых необходимо получить вид изображения в фокальной плоскости, использовались:

а) **сфера**, описываемая уравнением $\mathbf{x^2 + y^2 = R^2}$;

б) **параболоид вращения**, описываемый уравнением $\mathbf{y^2 + z^2 - 4fx = 0}$.

Параметры сферы и параболоида, используемые в модели, приведены в табл. 1.

Количество лучей, формирующих изображение, равно 1200.

Начальные координаты точки пересечения каждого луча с плоскостью входного зрачка определяются по формулам [5]:

$$x = 0 \; ; \quad y = \pm R\sqrt{\frac{K}{20} \cdot \sin\frac{\pi n}{30}} \; ; \quad z = R\sqrt{\frac{K}{20} \cdot \cos\frac{\pi n}{30}} \; ;$$

где $K = 1, 2\ldots, 20$; $n = 0, 1, 2\ldots., 15$; R - радиус входного зрачка ОС.

Площадь входного зрачка при этом разбивается на 20 равновеликих зон. Кроме того, входной зрачок разбивается на равные секторы с углом в центре зрачка, равным 6.

Таблица 1

Параметры сферы и параболоида, используемые в модели

Вид поверхности	Фокусное расстояние, мм	Диаметр входного зрачка, мм
Сфера	15	60
Параболоид	6	60

Для определения координаты точки пересечения отраженного луча с фокальной плоскостью ОС воспользуемся формулами:

$$x_{\varphi n} = f \; ; \quad y_{\varphi n} = y_1 - \frac{(f - x_1) \cdot Y}{X} \; ; \quad z_{\varphi n} = z_1 - \frac{(f - x_1) \cdot Z}{X} \; ,$$

где f – фокусное расстояние оптической поверхности.

Исследование качественной характеристики освещенности в фокальной плоскости сферы и параболоида вращения для углов наклона лучей 2^o и 4^o показало, что многократное увеличение количества лучей к заметному изменению картины изображения не приводит.

Таким образом, применение данной методики расчета для сферических поверхностей и поверхностей 2-го порядка позволяет получить довольно точные их характеристики, необходимые как при количественном, так и качественном анализе ОС координаторов цели.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лазарев Л.П. Оптико - электронные приборы наведения летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1984. – 128 с.*
2. *Апенко М.И., Дубовик А.С. Прикладная оптика. – М.: Наука, 1982. – 256 с.*
3. *Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1969. – 160 с.*
4. *Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1977. – 456 с.*
5. *Леонова В.Б. Автоматизация расчетов оптических систем. – М.: Машиностроение, 1970. – 270 с.*

Поступила 29.03.2002

АНДРЕЕВ Сергей Михайлович, *канд. техн. наук, доцент кафедры Харьковского института ВВС Украины. В 1986 году окончил Харьковское ВВАУРЭ. Область научных интересов – обработка информации, беспилотные летательные аппараты.*

ФОМИЧЕВ Константин Федорович, *канд. техн. наук, доцент кафедры Харьковского института ВВС Украины. В 1980 году окончил ХАИ. Область научных интересов – системы автоматического управления.*