

Ю. Р. КИРПИЧЕНКО, И. Н. ПУСТЫНСКИЙ

О ВЛИЯНИИ РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ФОРМИРУЕМОГО ТЕЛЕВИЗИОННЫМ ДАТЧИКОМ

Получены уточненные зависимости освещенности оптического изображения от освещенности объекта для случая, когда расстояние от объекта до объектива соизмеримо с расстоянием от объектива до плоскости изображения. Рассмотрено влияние светорассеяния на характеристики изображения в плоскости фоточувствительной поверхности телевизионного датчика.

Ключевые слова: телевизионный датчик, освещенность, электронно-оптический преобразователь, светорассеяние, оптическая обратная связь.

Под телевизионным датчиком подразумевается преобразователь световой энергии, излучаемой объектом или отражаемой от него, в электрический сигнал. Как правило, в состав телевизионного датчика входят объектив и передающая трубка или ее твердотельный аналог (матричные ПЗС или КМОП-фотоприемники), а также предварительный видеоусилитель. В настоящее время в состав телевизионных датчиков для повышения их чувствительности довольно часто включают и электронно-оптические преобразователи (ЭОП).

При использовании между ЭОП и преобразователем „свет—сигнал“ согласующего объектива расстояния между ЭОП и объективом, а также объективом и оптическим изображением, сформированным на передающей трубке, являются соизмеримыми.

Однако известные соотношения по определению зависимости освещенности оптического изображения от освещенности объекта (сцены) [1—3] справедливы в основном для случаев, когда расстояние от объектива до объекта наблюдения значительно больше расстояния от объектива до оптического изображения. Кроме того, не всегда учитывается влияние рассеяния света в объективе и в ЭОП на характеристики изображения.

В данной работе предпринята попытка одновременного учета этих факторов.

Зависимость освещенности оптического изображения $E_{из}$ от освещенности объекта (сцены) обычно определяется по формуле [1, 2]

$$E_{из} = \frac{E_{об} \rho \tau \theta^2}{4(1+\beta)^2}, \quad (1)$$

где ρ — коэффициент отражения; τ — коэффициент прозрачности объектива; $\theta = D/f = 1/F$ — относительное отверстие объектива (здесь D и f — диаметр входного зрачка и фокусное расстояние объектива соответственно, F — диафрагменное число объектива); $\beta = a'/a$ — линейный масштаб изображения (здесь a и a' — расстояние от объектива до объекта и от объектива до оптического изображения объекта соответственно).

При диффузном отражении объекта его яркость $L_{об}$ и освещенность $E_{об}$ связаны соотношением

$$L_{об} = \frac{\rho E_{об}}{\pi},$$

и, таким образом, формулу (1) можно записать в следующем виде:

$$E_{из} = \frac{\rho \tau E_{об}}{\pi \beta^2} \Omega, \quad (2)$$

где Ω — телесный угол, под которым из центра элемента объекта, расположенного параллельно плоскости объектива и перпендикулярно оптической оси, „виден“ входной зрачок объектива.

Основное отличие известных зависимостей освещенности изображения от освещенности или яркости объекта связано с определением телесного угла Ω . Так, формула (1) получена при условии, что телесный угол равен [4]

$$\Omega = \Omega_1 \approx \frac{\pi D^2}{4a^2},$$

что можно считать допустимым при $D \ll a$.

Если в системах вещательного телевидения условие $D \ll a$ практически всегда выполняется, то в системах прикладного (в том числе, измерительного) телевидения это условие выполняется далеко не всегда, и величины D и a часто бывают соизмеримы.

Из уравнения Гаусса следует, что [1]

$$a = \frac{f(1+\beta)}{\beta}. \quad (3)$$

С учетом формулы (3) получим

$$\Omega_1 = \frac{\pi \theta^2 \beta^2}{4(1+\beta)^2} = \pi d^2, \quad (4)$$

где $d = \frac{\theta \beta}{2(1+\beta)} = \frac{D}{2a}$.

В работе [5] значение телесного угла принято равным

$$\Omega_2 \approx \frac{\pi d^2}{1+d^2}. \quad (5)$$

Авторами настоящей статьи предложено использовать „точное“ значение телесного угла, которое, с учетом приведенных в работе [6] данных, для сегмента сферы получается равным

$$\Omega_3 = 2\pi \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right),$$

где α — плоский угол вершины конуса.

Как показывают расчеты [7],

$$\Omega_3 = 2\pi \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1+d^2}} \right]. \quad (6)$$

Введем в формулу (2) значения Ω_1 , Ω_2 и Ω_3 из формул (4)—(6), тогда соответственно получим

$$E_{из1} = \frac{\rho \tau E_{об}}{\beta^2} d^2, \quad (7)$$

$$E_{из2} = \frac{\rho \tau E_{об}}{\beta^2} \frac{d^2}{1+d^2}, \quad (8)$$

$$E_{из3} = \frac{\rho \tau E_{об}}{\beta^2} 2 \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1+d^2}} \right]. \quad (9)$$

Погрешности определения освещенности по приближенным формулам (7) и (8) по сравнению с уточненной формулой (9) могут быть существенными. Например, при $d=0,5$ они составляют соответственно 18,4 и – 5,66 %.

Освещенность на светочувствительном слое преобразователя „свет—сигнал“ в общем случае создается двумя составляющими, одна из которых обусловлена светом, образующим оптическое изображение, а другая — рассеянным светом.

Рассеяние света вызвано примесными частицами внутри самого стекла, пылью и влагой на поверхностях линз, отражениями от поверхностей раздела „стекло — воздух“ и внутренних элементов объектива и ТВ-камеры [8].

Отраженные от поверхностей раздела „стекло — воздух“ лучи создают световые пятна в плоскости изображения. А так как пятна перекрываются, то паразитная освещенность, которую они создают, практически равномерна. Паразитная освещенность накладывается на оптическое изображение, снижая тем самым его контраст.

Количество отражений возрастает по мере усложнения оптической системы и определяется выражением

$$p = \frac{N(N-1)}{2},$$

где N — число поверхностей раздела „стекло — воздух“; поэтому большие потери контраста следует ожидать в сложных оптических системах. Максимальный контраст изображения, формируемого на выходе из системы линз, содержащей различное число свободных поверхностей, согласно данным работы [8], будет равен 625, 108 и 47 при $N=2, 4$ и 6 соответственно.

Как отмечалось выше, общий поток излучения $\Phi_{\text{общ}}$, падающего на светочувствительный слой датчика изображения, формируется потоком $\Phi_{\text{из}}$, образующим оптическое изображение, и потоком $\Phi_{\text{р}}$, образованным рассеянным светом:

$$\Phi_{\text{общ}} = \Phi_{\text{из}} + \Phi_{\text{р}}. \quad (10)$$

Выразим величину $\Phi_{\text{р}}$ через $\Phi_{\text{общ}}$:

$$\Phi_{\text{р}} = \eta_{\text{р}} \Phi_{\text{общ}}, \quad (11)$$

где $\eta_{\text{р}}$ — коэффициент светорассеяния, значение которого при равномерном распределении рассеянного света определяется как [8]

$$\eta_{\text{р}} = \frac{\Phi_{\text{р}}}{\Phi_{\text{общ}}} = r^2 \left\{ 1 + \frac{1}{1-\tau_1^2} \left[2(N-1) - \frac{\tau_1^{4(N-1)}}{1-\tau_1^2} \right] \right\},$$

где $\tau_1 = \frac{4n}{(n+1)^2}$; n — показатель преломления стекла; $r = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}$ — френелевский коэффициент отражения.

С учетом выражений (10) и (11) освещенность участка $dS_{\text{из}}$ изображения, сфокусированного объективом, будет равна

$$E'_{\text{из}} = \frac{\Phi_{\text{общ}} - \Phi_{\text{р}}}{dS_{\text{из}}} = (1 - \eta_{\text{общ}}) \frac{\Phi_{\text{общ}}}{dS_{\text{из}}} = (1 - \eta_{\text{общ}}) E_{\text{из}}. \quad (12)$$

Отраженные от поверхностей раздела „стекло — воздух“ составляющие рассеянного потока излучения суммируются на участках фоточувствительной поверхности ТВ-датчика. Освещенность, создаваемая рассеянным потоком излучения, описывается выражением

$$E_{\text{р}} = \eta_{\text{р}} E_{\text{ср}}, \quad (13)$$

где $E_{\text{ср}}$ — средняя освещенность фоточувствительной поверхности ТВ-датчика.

При строгом подходе освещенность, обусловленная рассеянным светом, является функцией координат участков $dS_{\text{из}}$ в плоскости изображения.

Согласно выражениям (12) и (13) общая освещенность изображения на фоточувствительной поверхности ТВ-датчика определяется как

$$E_{\text{общ}} = (1 - \eta_p) E_{\text{из}} + \eta_p E_{\text{ср}}. \quad (14)$$

С учетом формулы (9) выражение (14) примет следующий вид:

$$E_{\text{общ}} = (1 - \eta_p) E_{\text{об}} \frac{\rho\tau}{\beta^2} 2 \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1+d^2}} \right] + \eta_p E_{\text{ср}}. \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что при отсутствии рассеяния света зависимость освещенности изображения от яркости объекта линейная. При наличии рассеяния энергия излучения перераспределяется между участками изображения. Уменьшение освещенности на светлых участках изображения сопровождается ее увеличением на темных участках.

Освещенность участка изображения зависит от распределения яркости объекта, расстояния от центра объектива, максимальной яркости и контраста сцены: т.е. освещенность, обусловленная рассеянным светом, в различных точках плоскости изображения будет иметь различные значения. Из этого следует, что при строгом подходе к рассмотрению явлений в оптической системе, каждой точке плоскости проекции будет соответствовать своя характеристика передачи освещенности, определяемая выражением (15).

Не менее важной причиной снижения контраста изображения, формируемого телевизионным датчиком, является яркость темного свечения экрана ЭОП, которая характеризуется термоэлектронной эмиссией и побочными процессами (автоэлектронной и автоионной эмиссией; ионизацией и возбуждением атомов остаточных газов, оптической обратной связью „экран—фотокатод“ и др.) [9].

Механизмы образования темного свечения экрана ЭОП по-разному влияют на распределение яркости по площади экрана. Так, например, если автоэлектронная эмиссия и ионизация атомов остаточных газов приводят к появлению характерной составляющей яркости темного фона, проявляющейся в виде сцинтилляций [10], то влияние оптической обратной связи аналогично влиянию рассеянного света в оптической системе.

Основное отличие характеристики передачи освещенности ЭОП от характеристики передачи освещенности оптической системы состоит в наличии участка насыщения. Освещенность фотокатода, при которой наступает насыщение, определяется током микроканальной пластины, составляющим примерно 10 мкА.

Результаты, полученные в ходе проведенных исследований, могут быть полезны при проектировании телевизионных датчиков, к которым предъявляются повышенные требования по точности преобразования оптического излучения в электрический сигнал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Быков Р. Е.* Основы телевидения и видеотехники: Учеб. для вузов. М.: Горячая линия—Телеком, 2006. 399 с.
2. Телевидение: Учеб. для вузов / *В. Е. Джакония, А. А. Гоголь, Я. В. Друзин* и др.: Под ред. *В. Е. Джаконии*. М.: Радио и связь, 2004. 616 с.
3. *Казанцев Г. Д., Курячий М. И., Пустынский И. Н.* Измерительное телевидение: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1994. 288 с.
4. *Бабенко В. С.* Оптика телевизионных устройств. М. — Л.: Энергия, 1964. 256 с.
5. *Мирошников М. М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для вузов. Л.: Машиностроение, 1977. 600 с.
6. *Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М.: Гостехтеориздат, 1955. 608 с.

7. Пустынский И. Н. Уточнение зависимости освещенности оптического изображения от освещенности объекта в телевизионных датчиках // Докл. Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2009. С. 36—39.
8. Богатов Г. В. Контрастные искажения в телевидении. М. — Л.: Энергия, 1965. 284 с.
9. Архипова Т. А. и др. Оценка вклада эмиссионных процессов в яркость темного фона электронно-оптического преобразователя // ОМП. 1983. № 2. С. 42—44.
10. Бутслов М. М., Степанов Б. М., Фанченко С. Д. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. М.: Наука, 1978. 432 с.

Сведения об авторах

Юрий Романович Кирпиченко

— канд. техн. наук, доцент; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, кафедра телевидения и управления; E-mail: kirp@tu.tusur.ru

Иван Николаевич Пустынский

— д-р техн. наук, профессор; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, кафедра телевидения и управления; заведующий кафедрой; E-mail: in@tu.tusur.ru

Рекомендована кафедрой
телевидения и управления

Поступила в редакцию
14.04.10 г.