

УДК 621.397

Е.В. Зайцева

Погрешности аппроксимаций усредненных кривых видности при определении освещённости оптического изображения

Рассмотрены особенности аппроксимации в виде «гауссоид» кривых видности для дневного и ночного зрения при расчёте зависимости освещённости оптического изображения от освещённости объекта.

Ключевые слова: освещённость, объект, оптическое изображение, кривая видности, температура черного тела.

Усредненная кривая относительной спектральной чувствительности глаза (кривая видности), принятая Международной комиссией по освещённости (МКО) еще в 1924 г., используется и сейчас при расчетах светового воздействия сложного по составу излучения, в частности для расчётов освещённости изображения $E'_{св}$, уточнённая зависимость которой от освещённости поверхности объекта $E_{св}$ равна [1]

$$E'_{св} = E_{св} \frac{\rho_{об} \tau_o}{\beta^2} 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+d^2}} \right),$$

где $E_{св} = 683 \int_0^{\infty} E_{\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$ – освещённость поверхности объекта; 683 [Лм/Вт] – пересчитанный коэффициент энергетических величин в световые; $\rho_{об}$ – коэффициент диффузного отражения поверхности объекта; τ_o – коэффициент пропускания объектива; β – линейный масштаб изображения; $d = \frac{\theta\beta}{2(1+\beta)}$ (θ – относительное отверстие объектива); λ –

длина волны излучения; $E_{\lambda}(\lambda)$ – спектральная плотность энергетической освещённости объекта; $V(\lambda)$ – кривая видности глаза.

Будем считать, что объект подсвечивается источником излучения, относительная спектральная плотность светимости которого совпадает с относительной спектральной плотностью светимости черного тела с температурой T , т.е.

$$E_{\lambda}(\lambda) = E_{\lambda_{макс}} X(\lambda T),$$

где $E_{\lambda_{макс}}$ – максимальное значение спектральной плотности освещенности объекта;

$X(\lambda T) = M_{\lambda}(\lambda T) / M_{\lambda_{макс}}(T)$; $M_{\lambda}(\lambda T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]^{-1}$ – спектральная плотность светимости черного тела (здесь c – скорость света в вакууме; $h = 6,6258 \cdot 10^{-34}$ – постоянная Планка, Дж/Гц; $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, Дж/К); $M_{\lambda_{макс}}(T) = 1,2865 \cdot 10^{-5} T^5$ –

максимальное значение $M_{\lambda}(\lambda T)$, Вт/м³, имеющее место при $\lambda_{макс} = 2897,8 \cdot 10^{-6} / T$, м.

На рис. 1 приведены «табличные» кривые видности для дневного и ночного зрения, построенная по данным таблиц МКО [2]. Дневное зрение – зрение нормального глаза при адаптации его к уровням яркости, начиная примерно с 10 кд/м², т.е. освещенность поверхности с коэффициентом отражения 0,6 не менее 50 лк; ночное зрение – при яркости менее 0,01 кд/м², т.е. при освещенности не более 0,05 лк к той же поверхности. В промежутке существует область, где происходит главный переход от одного вида зрения к другому, т.е. имеет место сумеречное зрение [3]. Кривая видности нормализована МКО при яркости 100 кд/м² для дневного зрения и 10⁻⁴ кд/м² – для ночного [4].

В работе [5] предложены аппроксимации «табличных» кривых видности гауссоидами, исходя из условия равенства площадей под соответствующей «табличной» кривой видности и под гауссоидой в виде формулы (1) для дневного зрения и формулы (2) для ночного зрения:

$$V_{\text{ГД}}(\lambda) = \exp \left[- \left(\frac{\lambda - 0,559}{0,06} \right)^2 \right], \quad (1)$$

$$V_{\text{ГН}}(\lambda) = \exp \left[- \left(\frac{\lambda - 0,5025}{0,05} \right)^2 \right]. \quad (2)$$



Рис. 1. Табличные кривые видности для дневного и ночного зрения

После уточнения значений «радиусов» гауссоид выражения (1) и (2) соответственно приобрели вид

$$V_{\text{ГД1}}(\lambda) = \exp \left[- \left(\frac{\lambda - 0,559}{0,06024} \right)^2 \right], \quad (3)$$

$$V_{\text{ГН1}}(\lambda) = \exp \left[- \left(\frac{\lambda - 0,5025}{0,05464} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) были рассчитаны при равенстве площадей для бесконечных пределов интегрирования. Целесообразно получить аналогичные выражения для случая равенства площадей при ограниченных пределах интегрирования, т.е. от $0,38 \cdot 10^{-6}$ до $0,76 \cdot 10^{-6}$ м. Они представлены формулами (5) и (6):

$$V_{\text{ГД2}}(\lambda) = \exp \left[- \left(\frac{\lambda - 0,559}{0,060283} \right)^2 \right], \quad (5)$$

$$V_{\text{ГН2}}(\lambda) = \exp \left[- \left(\frac{\lambda - 0,5025}{0,05475} \right)^2 \right]. \quad (6)$$

Относительная погрешность определения освещённости изображения, рассчитанная на основании гауссоиды (3) для бесконечных пределов интегрирования вместо табличных значений кривой видности $V_{\text{ГД}}(\lambda)$ в случае дневного зрения, получается равной

$$\delta E'_{\text{свд1}} = \frac{E'_{\text{св ГД1}} - E'_{\text{св ГД}}}{E'_{\text{св ГД}}} 100\% = \frac{\int_0^{\infty} X(\lambda T) V_{\text{ГД1}}(\lambda) d\lambda - \int_0^{\infty} X(\lambda T) V_{\text{ГД}}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} X(\lambda T) V_{\text{ГД}}(\lambda) d\lambda} 100\%. \quad (7)$$

Для конечных пределов интегрирования при использовании гауссоиды (5) формула (7) приобретает вид

$$\delta E'_{свд2} = \frac{E'_{св гд2} - E'_{св тд}}{E'_{св тд}} 100\% = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X(\lambda T) V_{гд2}(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X(\lambda T) V_{тд}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X(\lambda T) V_{тд}(\lambda) d\lambda} 100\% . \quad (8)$$

Относительная погрешность в случае ночного зрения, когда используется гауссоида (4) для бесконечных пределов интегрирования и соответствующие табличные значения кривой видности $V_{тн}(\lambda)$, получается равной

$$\delta E'_{свн1} = \frac{E'_{св гн1} - E'_{св тн}}{E'_{св тн}} 100\% = \frac{\int_0^{\infty} X(\lambda T) V_{гн1}(\lambda) d\lambda - \int_0^{\infty} X(\lambda T) V_{тн}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} X(\lambda T) V_{тн}(\lambda) d\lambda} 100\% . \quad (9)$$

Для конечных пределов интегрирования, при использовании гауссоиды (6), формула (9) приобретает вид

$$\delta E'_{свн2} = \frac{E'_{св гн2} - E'_{св тн}}{E'_{св тн}} 100\% = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X(\lambda T) V_{гн2}(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X(\lambda T) V_{тн}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X(\lambda T) V_{тн}(\lambda) d\lambda} 100\% . \quad (10)$$

В формулах (8) и (10) значения λ_1 и λ_2 приняты соответственно $0,38 \cdot 10^{-6}$ и $0,76 \cdot 10^{-6}$ м.

Зависимости относительных погрешностей определения освещённости изображения для неограниченных пределов интегрирования $\delta E'_{свд1}$ и $\delta E'_{свн1}$ от температуры источника излучения, полученные соответственно по формулам (7) и (9), представлены на рис. 2.

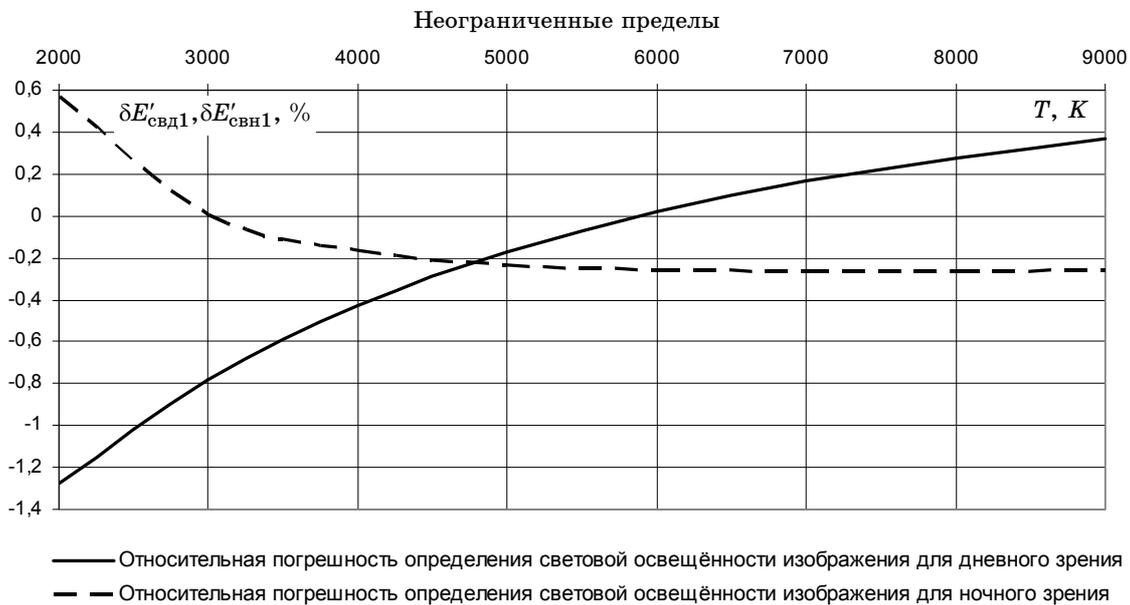


Рис. 2. Зависимости относительных погрешностей определения освещённости изображения для неограниченных пределов интегрирования $\delta E'_{свд1}$ и $\delta E'_{свн1}$ от температуры источника излучения

На рис. 3 представлены зависимости относительных погрешностей определения освещённости изображения для ограниченных пределов интегрирования $\delta E'_{свд2}$ и $\delta E'_{свн2}$ от температуры источника излучения, полученные соответственно по формулам (8) и (10).

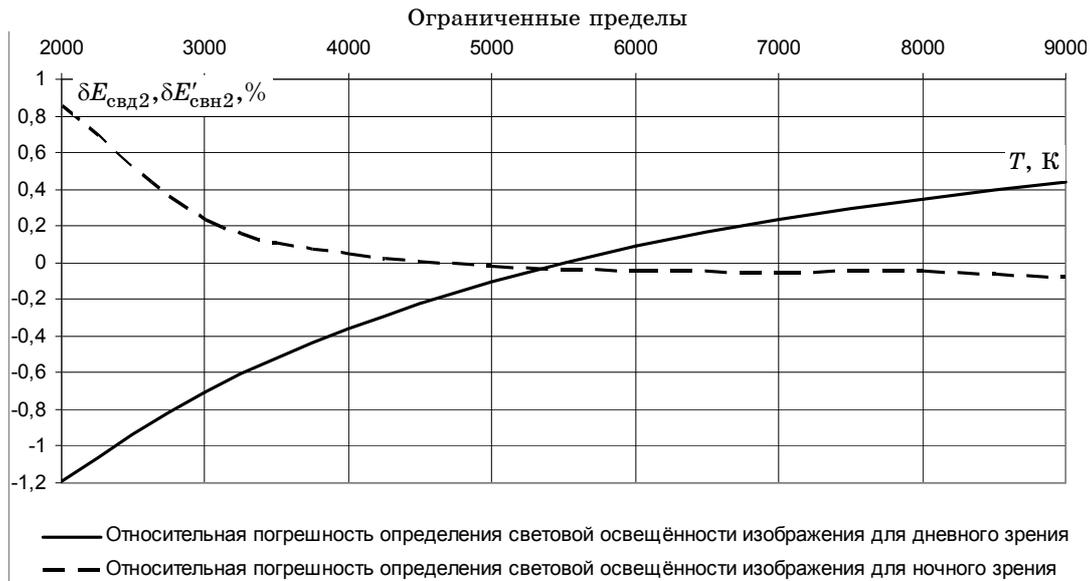


Рис. 3. Зависимости относительных погрешностей определения освещённости изображения для ограниченных пределов интегрирования $\delta E'_{свд2}$ и $\delta E'_{свн2}$ от температуры источника излучения

Сравнение рис. 2 и 3 показало, что для дневного зрения в диапазоне температур от 2000 до 5475 К предпочтительнее использовать выражение (5), а в диапазоне от 5475 до 9000 К – выражение (3). Для ночного зрения в интервале температур от 2000 до 3250 К целесообразнее использовать формулу (4), а в интервале от 3250 до 9000 К – формулу (6).

Полученные аппроксимации кривых видности дневного и ночного зрения (3)–(6) обеспечивают сравнительно высокую точность (погрешность менее 1,3%) определения освещённости оптического изображения в телевизионном датчике. В данном примере на расчёт освещённости с использованием табличной кривой видности при использовании программ Excel и Mathcad требуется примерно в 2000 раз больше времени, чем при использовании аппроксимации гауссоидой (около получаса для табличной кривой и 1 с для гауссоиды). Таким образом, данные аппроксимации целесообразно использовать в предварительных расчётах широкого класса телевизионных датчиков.

В заключение, пользуясь случаем, авторы работы [1] приносят свои извинения перед читателями за допущенные по их вине следующие неточности

1) На рис. 1 и 2 (с. 8 и 9) не должно быть пунктирных линий и соответствующих пояснений. Поэтому последний абзац статьи целесообразно изложить в следующей редакции.

Из формул (11), (12) и (13) следует, что полученные по уточненным формулам (12)–(13) результаты заметно отличаются от данных, которые получаются по формуле (11), поскольку она справедлива лишь для источника излучения с равномерным распределением энергии в спектре кривой видности глаза.

2) В последний абзац на с. 8 вместо (11)–(13) должно быть (12)–(13).

3) В расшифровке формулы (4) на с. 6 исключить обозначение « T – цветовая температура».

Литература

1. Пустынский И.Н. К расчёту освещённости изображения и числа сигнальных электронов в телевизионном датчике на ПЗС-матрице / И.Н. Пустынский, Е.В. Зайцева // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – № 2. – С. 5–10.
2. Гуревич М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы) – 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.
3. Кнорринг Г.М. Осветительные установки. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд., 1981. – 288 с.
4. Гейхман И.Л. Видение и безопасность / И.Л. Гейхман, В.Г. Волков. – М., 2009. – 840 с.

5. Пустынский И.Н. Аналитическое выражение спектральной чувствительности зрения / И.Н. Пустынский, Е.В. Зайцева // Матер. докл. всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2006». – Томск: ТУСУР, 2006. – С. 146–148.

Зайцева Екатерина Викторовна

Аспирант кафедры телевидения и управления ТУСУРа

Тел.: (382-2) 70-15-04

Эл. почта: katya@tu.tusur.ru

Zaitceva E.V.

Approximation errors of visibility averaged curves at determining the light exposure of an optical image

The article presents the features of approximation in Gaussian visibility curves for day and night vision at the calculation of the dependence between light exposure of an optical image and light exposure of an object.

Keywords: Light exposure, object, optical image, visibility curve, temperature of a black body.
