

УДК 621.397

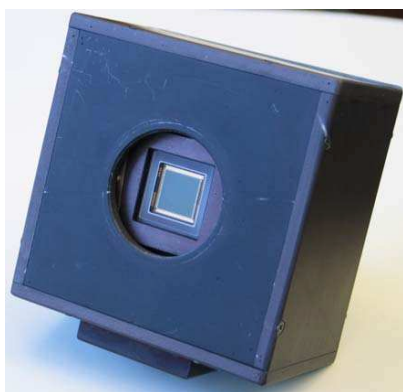
РАСЧЕТ ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ И ОСВЕЩЕННОСТИ ДЛЯ ПЗС МАТРИЦ KODAK KAI-1003M, KODAK KAI-1020 И PHILIPS FTF3020M

Князев М.Г., Бондаренко А.В., Докучаев И.В.

Постановка задачи

В предлагаемой вашему вниманию статье, на основе паспортных данных, производится расчет пороговых значений потока излучения и освещенности для ПЗС матриц Kodak KAI-1003M, KAI-1020 и Philips FTF3020M, применяемых в качестве матричных приемников излучения в цифровых телевизионных камерах, производимых ООО «Растр технолоджи» (рис.1).

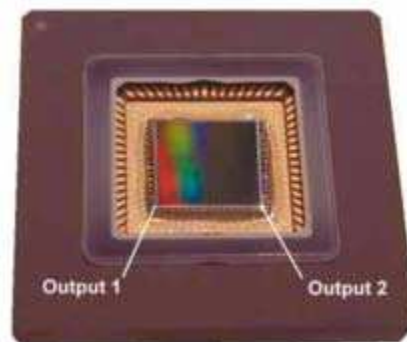
Приводится методика и результаты расчета пороговых значений потока излучения и освещенности для ПЗС матриц семейства Kodak и Philips. Показано, что наименьшие значения пороговых освещенности и потока излучения имеет матрица KAI-1003M, далее идет матрица FTF-3020M и, наконец, матрица KAI-1020.



Цифровая камера RT1000DC
(ПЗС матрица Kodak KAI-1003M)



Цифровая камера RT6000DC
(ПЗС матрица Philips FTF3020M)



ПЗС матрица Kodak KAI-1020
(Цифровая камера RT1020DC)

Рис.1. Цифровые камеры производства ООО «Растр технолоджи»

Рассмотрим следующую типовую схему наблюдения объекта при помощи телевизионной камеры на матричном фотоприемнике (рис.2).

Объект с коэффициентом диффузного отражения $\rho_{об}(\lambda)$ подсвечивается источником излучения с цветовой температурой $T_{цв}$. Этот источник создает у поверхности объекта интегральную энергетическую освещенность E_3 и эквивалентную ей световую освещенность $E_{св}$. Часть излучения отраженного объектом проходит через атмосферу, имеющую коэффициент пропускания $\tau_{атм}(\lambda)$, и попадает в оптическую систему, состоящую из объектива и матричного приемника излучения. Объектив имеет фокусное расстояние f' , диаметр входного зрачка D и коэффициент пропускания $\tau_{oc}(\lambda)$. Матричный фо-

топриемник установлен в задней фокальной плоскости объектива (плоскости изображения). Изображение объекта, формируемое объективом, имеет интегральную энергетическую освещенность E'_3 и эквивалентную ей световую освещенность $E'_{св}$.

Целью расчета является определение пороговых (минимальных) значений освещенности и соответствующего ей потока излучения, попадающего на одиночный пиксель матричного приемника, при которых уровень полезного сигнала, снимаемый с этого пикселя, будет равен значению среднеквадратического отклонения (СКО) шума. Расчет будем проводить как для световых величин (привязанных к спектральной чувствительности глаза), так и для энергетических величин.

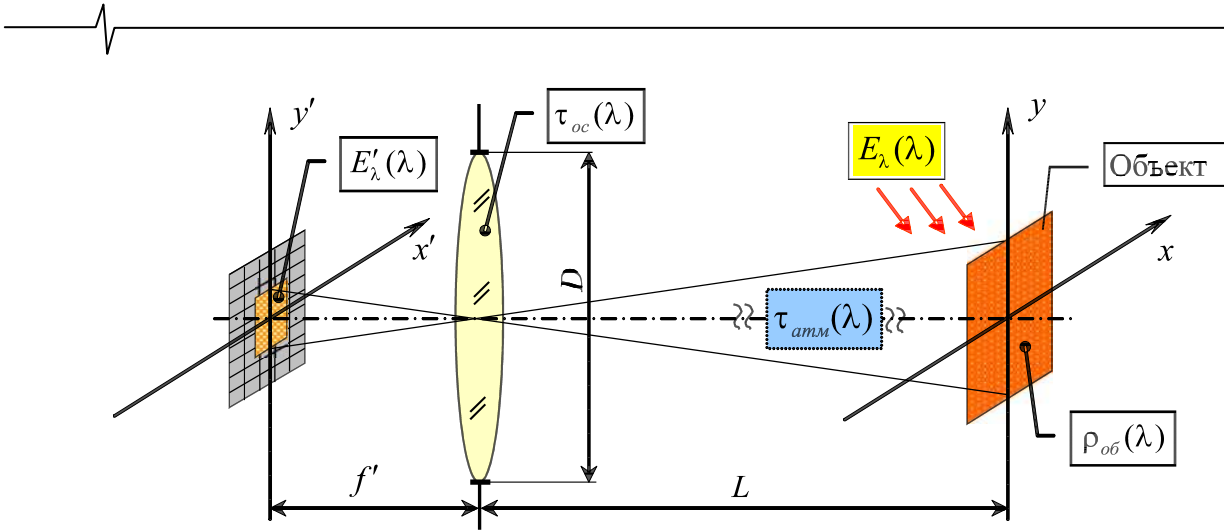


Рис. 2. Т схема наблюдения объекта при помощи телевизионной камеры

Теоретические основы расчета пороговых значений

В общем случае, излучение источника, подсвечивающего объект, имеет сложный спектральный состав, который у поверхности объекта характеризуется спектральной плотностью освещенности $E_\lambda(\lambda)$.

Соответственно выражение для интегральной освещенности в плоскости объекта будет иметь вид:

$$E_o = \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) \cdot d\lambda \quad \left[\frac{Bm}{M^2} \right]. \quad (1)$$

Ей будет соответствовать световая освещенность:

$$E_{cv} = 683 \cdot \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda, \quad [ЛК], \quad (2)$$

где: $E_\lambda(\lambda)$ – спектральная плотность энергетической освещенности объекта;

E_{cv} – интегральная энергетическая освещенность объекта;

E_{cv} – световая освещенность объекта;

$V(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность глаза;

683 – пересчетный коэффициент энергетических величин в световые $[Лм/Вм]$;

λ – длина волны излучения.

Для случая, когда угловые размеры объекта $\omega_{об}$ значительно превышают угловой предел разрешения объектива оптической системы δ_{oc} и объект удален от объектива на расстояние L , значительно превышающее фокусное расстояние f' объектива:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{об} > 10 \cdot \delta_{oc} \\ L > 10 \cdot f' \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

справедливо следующее выражение, связывающее спектральную освещенность в плоскости изображения со спектральной освещенностью объекта:

$$E'_\lambda(\lambda) = \frac{\tau_{атм}(\lambda) \cdot \tau_{oc}(\lambda) \cdot \rho_{об}(\lambda)}{4} \cdot \left(\frac{D}{f'} \right)^2; \quad (4)$$

$$E_\lambda(\lambda) = \frac{\tau_{атм}(\lambda) \cdot \tau_{oc}(\lambda) \cdot \rho_{об}(\lambda)}{4 \cdot k^2} \cdot E_\lambda(\lambda)$$

где: $\tau_{атм}(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания атмосферы;

$\tau_{oc}(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания оптической системы (объектива);

$\rho_{об}(\lambda)$ – коэффициент диффузного отражения объекта;

$\frac{D}{f'}$ – относительное отверстие объектива;

k – диафрагменное число объектива.

В этом случае энергетическая освещенность в плоскости светочувствительного слоя матричного приемника излучения будет определяться выражением:

$$E'_o = \int_0^\infty E'_\lambda(\lambda) \cdot d\lambda = \frac{1}{4 \cdot k^2} \cdot \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) \cdot \tau_{атм}(\lambda) \cdot \tau_{oc}(\lambda) \cdot \rho_{об}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (5)$$

Будем считать, что объект подсвечивается источником излучения, относительная спектральная плотность светимости которого, совпадает с относительной спектральной плотностью светимости абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой T .

$$E_\lambda(\lambda) = E_{\lambda_{макс}} \cdot \frac{M_\lambda(\lambda, T)}{M_{\lambda_{макс}}(T)} = E_{\lambda_{макс}} \cdot X(\lambda, T); \quad (6)$$

$$M_\lambda(\lambda, T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot c^2 \cdot h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}\right) - 1}; \quad (7)$$

$$\lambda_{макс} = \frac{2.8978 \cdot 10^{-6}}{T} \quad [M], \quad (8)$$

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

$M_\lambda(\lambda, T)$ – спектральная плотность светимости АЧТ, рассчитываемая по формуле Планка (7);

$M_{\lambda_{макс}}(T)$ – максимальное значение спектральной плотности светимости АЧТ;

$X(\lambda, T)$ – относительная спектральная плотность светимости АЧТ;

$\lambda_{\text{макс}}$ – длина волны излучения, соответствующая максимуму спектральной плотности светимости АЧТ, рассчитываемая в соответствии с законом смещения Вина (8);

T – температура АЧТ;

h – постоянная Планка, $h = 6.626176 \cdot 10^{-34} \frac{\text{Дж}\cdot\text{с}}{\text{Гц}}$;

c – скорость света в вакууме;

k – постоянная Больцмана, $k = 1.380662 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$.

Интегральная светимость АЧТ в диапазоне длин волн $0 < \lambda < \infty$:

$$M^0 = \int_0^{\infty} M_{\lambda}(\lambda, T) \cdot d\lambda = M_{\lambda_{\text{макс}}}(T) \cdot \int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4, \quad (9)$$

где: M^0 – интегральная светимость АЧТ;

σ – постоянная Стефана-Больцмана,

$$\sigma = 5.6697 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}.$$

Подставив (8) в (7), получим выражение для расчета максимального значения спектральной плотности светимости АЧТ:

$$M_{\lambda_{\text{макс}}}(T) = 1.2865 \cdot 10^{-11} \cdot T^5 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{мкм}} \right], \quad (10)$$

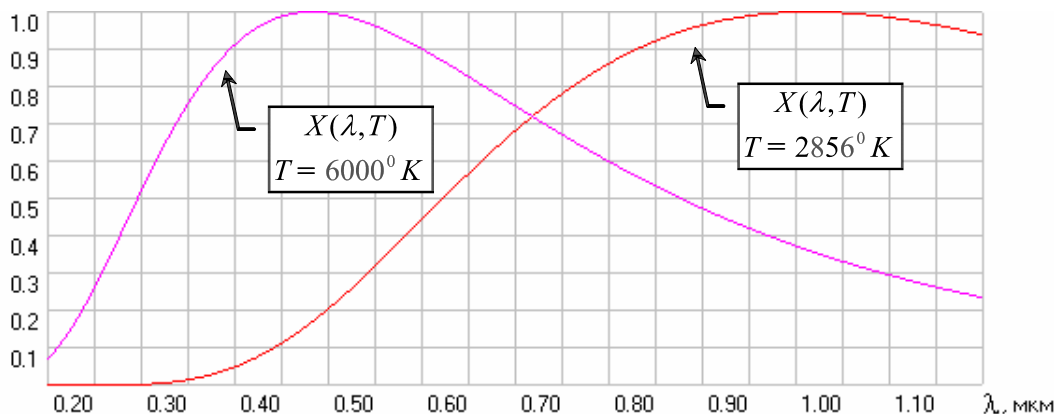


Рис. 3. Относительная спектральная плотность светимости АЧТ при температурах $T = 2856^{\circ} \text{K}$ и $T = 6000^{\circ} \text{K}$.

С учетом подстановки (8) и (7) в (6), получим формулу для вычисления относительной спектральной плотности светимости АЧТ $X(\lambda, T)$:

$$X(\lambda, T) = \frac{2.9081 \cdot 10^{19}}{(\lambda \cdot T)^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{14388}{\lambda \cdot T}\right) - 1}. \quad (11)$$

На рис.3. приведены графики относительной спектральной плотности светимости АЧТ при температурах $T = 2856^{\circ} \text{K}$ и $T = 6000^{\circ} \text{K}$.

Из выражения (9) с учетом (10) можно получить численное значение для интеграла

$$\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot d\lambda, \text{ которое нам понадобится в дальнейшем:}$$

$$\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot d\lambda = \frac{\sigma \cdot T^4}{M_{\lambda_{\text{макс}}}(T)} = \frac{4407}{T}. \quad (12)$$

Окончательно для спектральной плотности освещенности в плоскости изображения получим:

$$E'_{\lambda}(\lambda) = \frac{\tau_{\text{атм}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{ос}}(\lambda) \cdot \rho_{\text{об}}(\lambda)}{4 \cdot k^2} \cdot E_{\lambda_{\text{макс}}} \cdot X(\lambda, T). \quad (13)$$

Соответственно выражение (5) для интегральной энергетической освещенности в плоскости изображения можно переписать в виде:

$$E'_{\lambda} = \int_0^{\infty} E'_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda = \frac{E_{\lambda_{\text{макс}}}}{4 \cdot k^2} \cdot \int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot \tau_{\text{атм}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{ос}}(\lambda) \cdot \rho_{\text{об}}(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (14)$$

Выражение для интегрального энергетического потока излучения, попадающего на одиночный пиксель матричного приемника излучения, будет иметь вид:

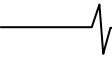
$$\Phi'_{\lambda} = A_{\text{ПИИ}} \cdot E'_{\lambda} = \frac{A_{\text{ПИИ}} \cdot E_{\lambda_{\text{макс}}}}{4 \cdot k^2} \times \int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot \tau_{\text{атм}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{ос}}(\lambda) \cdot \rho_{\text{об}}(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (15)$$

где: Φ'_{λ} – интегральный энергетический поток излучения, попадающий на одиночный пиксель матричного приемника излучения; $A_{\text{ПИИ}}$ – площадь пикселя.

Выражения для световой освещенности и светового потока излучения будут иметь вид (16) и (17) соответственно:

$$E'_{\text{св}} = 683 \cdot \int_0^{\infty} E'_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda = \frac{683 \cdot E_{\lambda_{\text{макс}}}}{4 \cdot k^2} \cdot \int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot V(\lambda) \cdot \tau_{\text{атм}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{ос}}(\lambda) \cdot \rho_{\text{об}}(\lambda) \cdot d\lambda; \quad (16)$$

$$\Phi'_{\text{св}} = A_{\text{ПИИ}} \cdot E'_{\text{св}} = \frac{683 \cdot A_{\text{ПИИ}} \cdot E_{\lambda_{\text{макс}}}}{4 \cdot k^2} \times \int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot V(\lambda) \cdot \tau_{\text{атм}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{ос}}(\lambda) \cdot \rho_{\text{об}}(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (17)$$



Поток излучения (15) вызовет появление в потенциальной яме пикселя матрицы n сигнальных электронов:

$$n = t_{\text{нак}} \cdot A_{\text{ПИ}} \cdot \int_0^{\infty} \frac{E'_{\lambda}(\lambda) \cdot \eta(\lambda)}{E_{\phi}(\lambda)} \cdot d\lambda =$$

$$t_{\text{нак}} \cdot A_{\text{ПИ}} \cdot \int_0^{\infty} E'_{\lambda}(\lambda) \cdot \frac{\eta(\lambda) \cdot \lambda}{h \cdot c} \cdot d\lambda ;$$

$$E_{\phi}(\lambda) = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \quad (19)$$

где: n – количество сигнальных электронов;
 $\eta(\lambda)$ – квантовая эффективность матрицы;
 $E_{\phi}(\lambda)$ – энергия фотона на длине волны λ ;
 $t_{\text{нак}}$ – время накопления.
 Величина $\frac{\eta(\lambda) \cdot \lambda}{h \cdot c}$ фактически представляет

собой спектральную чувствительность матрицы:

$$S(\lambda) = \frac{\eta(\lambda) \cdot \lambda}{h \cdot c} = S_{\text{макс}} \cdot S_{\text{отн}}(\lambda) =$$

$$\frac{\text{Max}[\eta(\lambda) \cdot \lambda]}{h \cdot c} \cdot \frac{\eta(\lambda) \cdot \lambda}{\text{Max}[\eta(\lambda) \cdot \lambda]}, \quad (20)$$

где: $S_{\text{макс}}$ – значение максимальной чувствительности матрицы;
 $S_{\text{отн}}(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность матрицы.

Чувствительности матрицы $S(\lambda)$ в данном случае имеет размерность $[\text{Дж}^{-1}]$, что соответствует количеству электронов возникающих в потенциальной яме при поглощении 1 Дж лучистой энергии.

С учетом выражений (19) и (20), выражение (18)

запишется в виде:

$$n = \frac{t_{\text{нак}} \cdot A_{\text{ПИ}} \cdot S_{\text{макс}} \cdot E_{\lambda_{\text{макс}}}}{4 \cdot k^2} \times$$

$$\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{\text{отн}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{атм}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{ос}}(\lambda) \cdot \rho_{\text{об}}(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (21)$$

Суммарный уровень шума, возникающий при фотоэлектрическом преобразовании, состоит из фотонного шума потока излучения от объекта и собственных шумов сенсора ПЗС матрицы и ее электронного тракта.

$$N_{\text{ш}} = \sqrt{N_{\phi}^2 + N_{\text{пасн}}^2}, \quad (22)$$

где: $N_{\text{ш}}$ – суммарное значение СКО шума;
 N_{ϕ} – СКО фотонного шума; $N_{\text{пасн}}$ – паспортное значение СКО шума ПЗС матрицы.

Фотонный шум является следствием дискретной природы света и подчиняется закону распределения (статистике) Пуассона. Согласно этой статистике, фотонный шум равен квадратному корню из числа сигнальных фотонов. Таким образом, отношение сигнал/шум в потоке фотонов, падающем на пиксель, будет также равно корню квадратному из числа фотонов. Приемник излучения дополнительно ухудшает соотношение сигнал/шум за счет наличия собственных шумов.

Учитывая, что по условию расчета, количество сигнальных электронов должно быть равно значению СКО шумовых электронов, получим:

$$n = N_{\text{ш}} = \sqrt{(\sqrt{n})^2 + N_{\text{пасн}}^2} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot N_{\text{пасн}}^2}}{2} \approx N_{\text{пасн}} \quad (23)$$

Соответственно выражение для пороговой величины максимальной спектральной плотности освещенности будет иметь вид:

$$E_{\lambda_{\text{макс}}}^{\text{пор}} = \frac{4 \cdot k^2 \cdot N_{\text{ш}}}{t_{\text{нак}} \cdot A_{\text{ПИ}} \cdot S_{\text{макс}} \cdot \int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{\text{отн}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{атм}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{ос}}(\lambda) \cdot \rho_{\text{об}}(\lambda) \cdot d\lambda}. \quad (24)$$

Сделаем следующие допущения:

1) Будем считать, что дальность до объекта наблюдения невелика, в этом случае можно пренебречь потерями в атмосфере, то есть $\tau_{\text{атм}}(\lambda) \approx 1$.

2) Рассматриваемые нами матричные приемники излучения имеют область спектральной чувствительности в диапазоне $\Delta\lambda = 0.35 \div 1.0 \text{ мкм}$ (см. рис.4). За его пределами относительная спектральная чувствительность приемника $S_{\text{отн}}(\lambda) = 0$. Область спектральной чувствительности человеческого глаза еще уже и располагается в диапазоне $\Delta\lambda = 0.4 \div 0.8 \text{ мкм}$.

То есть на практике, область интегрирования будет ограничена областью спектральной чувствительности

приемника (глаза). В этом диапазоне коэффициент пропускания оптической системы можно считать постоянным $\tau_{\text{ос}}(\lambda) \approx \text{const}$. В качестве примера на рис. 5. приведен график спектрального коэффициента пропускания оптического стекла К8 при толщине 10 мм.

3) Будем также считать постоянным в диапазоне коэффициент диффузного отражения объекта $\rho_{\text{об}}(\lambda) \approx \text{const}$.

$$\left. \begin{aligned} \tau_{\text{атм}}(\lambda) &\approx \tau_{\text{атм}} \approx 1 \\ \tau_{\text{ос}}(\lambda) &\approx \tau_{\text{ос}} \approx \text{const} \\ \rho_{\text{об}}(\lambda) &\approx \rho_{\text{об}} \approx \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

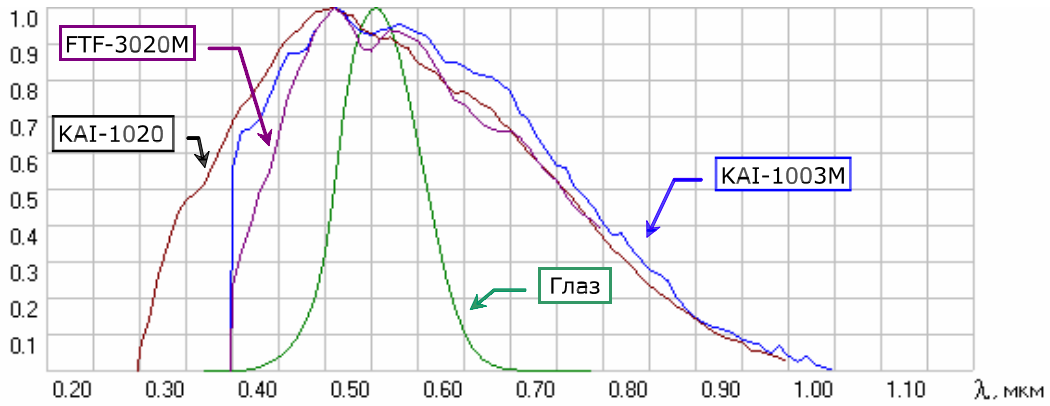


Рис.4. Графики относительных спектральных чувствительностей ПЗС матриц и человеческого глаза

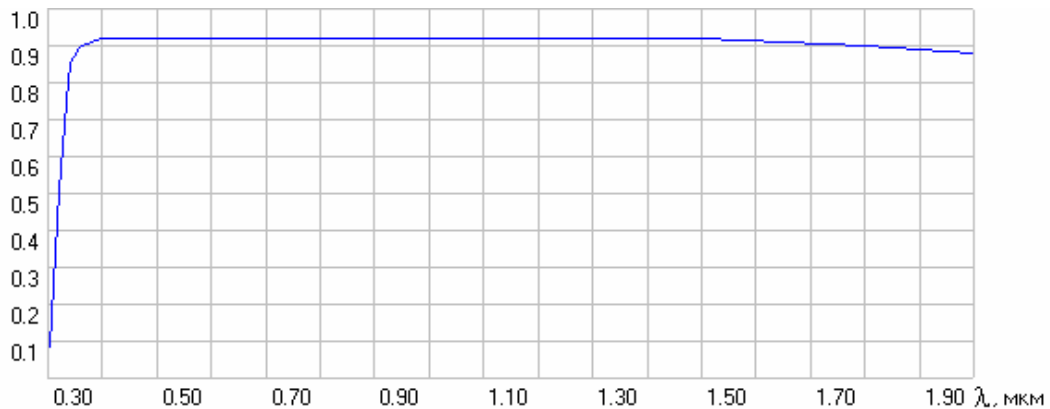


Рис.5. Спектральный коэффициент пропускания оптического стекла К8 при толщине 10 мм.

С учетом допущений (25) выражение (24) запишется в виде:

$$E_{\lambda_{\max}}^{nor} = \frac{4 \cdot k^2 \cdot N_{ш}}{t_{\text{нак}} \cdot A_{\text{ПИ}} \cdot S_{\text{макс}} \cdot \tau_{oc} \cdot \rho_{об} \cdot \int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{\text{отн}}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (26)$$

Подставляя выражение (26) в выражения (1) и (2) с учетом (6), получим выражения для интегральных значений энергетической и световой освещенности на объекте:

$$E_{\lambda_{\max}}^{nor} = E_{\lambda_{\max}}^{nor} \cdot \int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot d\lambda = \frac{4 \cdot k^2 \cdot N_{ш}}{t_{\text{нак}} \cdot A_{\text{ПИ}} \cdot S_{\text{макс}} \cdot \tau_{oc} \cdot \rho_{об}} \cdot \int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot d\lambda \quad (27)$$

$$E_{\text{св}}^{nor} = 683 \cdot E_{\lambda_{\max}}^{nor} \cdot \int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda = \frac{683 \cdot 4 \cdot k^2 \cdot N_{ш}}{t_{\text{нак}} \cdot A_{\text{ПИ}} \cdot S_{\text{макс}} \cdot \tau_{oc} \cdot \rho_{об}} \cdot \int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (28)$$

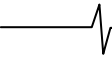
Выражение для порогового значения интегральной энергетической освещенности в плоскости изображения (14) с учетом (26) имеет вид:

$$E_{\lambda_{\max}}^{nor} = \frac{N_{ш}}{t_{\text{нак}} \cdot A_{\text{ПИ}} \cdot S_{\text{макс}} \cdot \tau_{oc} \cdot \rho_{об}} \times \frac{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot \tau_{oc}(\lambda) \cdot \rho_{об}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{\text{отн}}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (29)$$

К сожалению, для интеграла в числителе выражения (29) невозможно получить численное значение, так как функция $X(\lambda, T)$ имеет отличное от нуля значение в диапазоне $0 < \lambda < \infty$, а соответствующие данные по функциям $\tau_{oc}(\lambda)$ и $\rho_{об}(\lambda)$ у нас отсутствуют. Тем не менее, применим к выражению (29) допущение (25) и в этом случае, получим оценочное (завышенное) значение пороговой освещенности. На самом деле такая ситуация эквивалентна случаю, когда матричный приемник без объектива подсвечивается тем же источником и при тех же условиях, что и объект.

$$E_{\lambda_{\max}}^{nor} = \frac{N_{ш}}{t_{\text{нак}} \cdot A_{\text{ПИ}} \cdot S_{\text{макс}}} \cdot \frac{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{\text{отн}}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (30)$$

Пороговое значение интегрального энергетического потока излучения:



$$\Phi_3^{пор} = E_3^{пор} \cdot A_{ПИ} = \frac{N_{ш}}{t_{нак} \cdot S_{макс}} \cdot \frac{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{омн}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (31)$$

Пороговая световая освещенность в плоскости изображения:

$$E_{св}^{пор} = \frac{683 \cdot N_{ш}}{t_{нак} \cdot A_{ПИ} \cdot S_{макс}} \cdot \frac{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{омн}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (32)$$

$$\Phi_{св}^{пор} = E_{св}^{пор} \cdot A_{ПИ} = \frac{683 \cdot N_{ш}}{t_{нак} \cdot S_{макс}} \cdot \frac{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{омн}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (33)$$

Величина обратная отношению интегралов в выражениях (27), (30) и (31) представляет собой коэффициент использования излучения источника матричным приемником.

$$K_{ПИ} = \frac{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{омн}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot d\lambda} \quad (34)$$

Для человеческого глаза выражение для коэффициента использования будет иметь вид:

$$K_{ГЛ} = \frac{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot d\lambda} \quad (35)$$

С учетом (34) и (35) выражения (32) и (33) можно записать в виде:

$$E_{св}^{пор} = 683 \cdot \frac{N_{ш}}{t_{нак} \cdot A_{ПИ} \cdot S_{макс}} \cdot \frac{K_{ГЛ}}{K_{ПИ}} \quad (36)$$

$$\Phi_{св}^{пор} = 683 \cdot \frac{N_{ш}}{t_{нак} \cdot S_{макс}} \cdot \frac{K_{ГЛ}}{K_{ПИ}} \quad (37)$$

На рис.6. показана графическая интерпретация коэффициентов использования излучения источника с цветовой температурой $T = 2856^{\circ} K$ человеческим глазом и матричным приемником на примере матрицы Kodak KAI-1020. Для глаза – это отношение площади под кривой $X(\lambda, T) \cdot V(\lambda)$ (выделена синим цветом) к площади под кривой $X(\lambda, T)$ (выделена красным цветом). Для матричного приемника – это отношение площади под кривой $X(\lambda, T) \cdot S_{омн}(\lambda)$ (выделена фиолетовым цветом) к площади под кривой $X(\lambda, T)$ (выделена красным цветом).

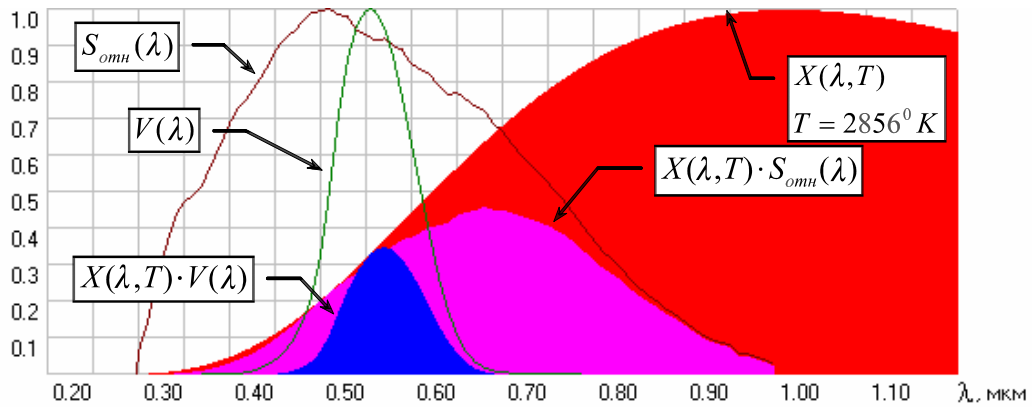


Рис.6. Графическая интерпретация коэффициента использования излучения источника

Пример расчета пороговых значений

Таблица 1.

При расчете будем использовать следующие исходные данные. Паспортные параметры матриц Kodak KAI-1020, KAI-1003M и Philips FTF3020M взяты из [3], [4] и [5].

Параметры ПЗС матриц, используемые при расчете, приведены в таблице 1.

Примечание. Условия измерения:

- частота кадров 30 Гц, время накопления 0.033 с.

- частота кадров 30 Гц, пиксельная частота 40 МГц.

- частота кадров 4.5 Гц, пиксельная частота 9 МГц, время накопления 0.033 с.

Параметр	Приемник излучения		
	KAI-1003M	KAI-1020	FTF3020M
Геометрические размеры пикселя $W \times H$, мкм	12.8 x 12.8	7.4 x 7.4	12.0 x 12.0
Время накопления $t_{нак}$, с	0.033	0.033	0.033
СКО шума $N_{насп}$, электронов (типичное значение)	40(1)	42(2)	30(3)

Параметры оптической системы:

- диафрагменное число объектива: $k = 1.4$;
- коэффициент пропускания оптической системы:
 $\tau_{oc} = 0.8$.

Условия наблюдения объекта:

- цветовая температура источника излучения:
 $T_1 = 2856^0 K, T_2 = 6000^0 K$;
- коэффициент диффузного отражения объекта:
 $\rho_{об} = 0.75$.

Вычисление пороговых значений потока излучения и освещенности производилось согласно выражениям (27), (28), (30), (31), (32), (33). Для вычисления интегралов

$$\int X(\lambda, T) \cdot S_{отн}(\lambda) \cdot d\lambda \text{ и } \int X(\lambda, T) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

был использован метод прямоугольников в диапазоне $\Delta\lambda = 0.35 \div 1.0$ мкм с шагом 0.01 мкм.

Значение $X(\lambda, T)$ вычислялось по формуле (11), а значения $S_{макс}$ и $S_{отн}(\lambda_i)$ - на основе табличных паспортных значений квантовой эффективности $\eta(\lambda_i)$ матриц. Промежуточные значения относительной спектральной чувствительности глаза $V(\lambda)$ и матриц $S_{отн}(\lambda)$ вычислялись методом линейной интерполяции:

$$f(\lambda) = f(\lambda_i) + \frac{f(\lambda_{i+1}) - f(\lambda_i)}{\lambda_{i+1} - \lambda_i} \cdot (\lambda - \lambda_i); \lambda_i \leq \lambda < \lambda_{i+1}.$$

Вычисление интеграла $\int X(\lambda, T) \cdot d\lambda$ осуществлялось по формуле (12).

Результаты расчета пороговых значений освещенности и потока излучения для источника с цветовой температурой $T = 2865^0 K$ сведены в таблицу 2, а результаты расчета пороговых значений освещенности и потока излучения для источника с цветовой температурой $T = 6000^0 K$ - в таблицу 3.

Таблица 2

Параметр		Приемник излучения		
		КАИ-1003М	КАИ-1020	ФТФ3020М
$S_{макс}, Дж\cdot c^{-1}$		1.23e+18	1.10e+18	7.35e+17
$A_{ПИ}, M^2$		1.64e-10	5.48e-11	1.44e-10
$N_{ш}$		40	42	30
$t_{нак}, c$		0.033	0.033	0.033
$\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot d\lambda$		1.54		
$\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$		0.037		
$K_{ГП}$		0.024		
$\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{отн}(\lambda) \cdot d\lambda$		0.169	0.155	0.121
$K_{ПИ}$		0.11	0.1	0.078
Матрица	$E_3^{нор}, Вт/м^2$	5.47e-5	2.1e-4	1.09e-4
	$\Phi_3^{нор}, Вт$	8.97e-15	1.15e-14	1.58e-14
	$E_{св}^{нор}, лк$	9.02e-4	3.46e-3	1.81e-3
	$\Phi_{св}^{нор}, лм$	1.48e-13	1.9e-13	2.61e-13
Объект	$E_3^{нор}, Вт/м^2$	7.15e-4	2.74e-3	1.43e-3
	$E_{св}^{нор}, лк$	1.17e-2	4.52e-2	2.37e-2

Таблица 3

Параметр	Приемник излучения			
	КАI-1003M	КАI-1020	FTF3020M	
$S_{\text{макс}}, \text{Джс}^{-1}$	1.23e+18	1.10e+18	7.35e+17	
$A_{\text{ПИ}}, \text{м}^2$	1.64e-10	5.48e-11	1.44e-10	
$N_{\text{ш}}$	40	42	30	
$t_{\text{нак}}, \text{с}$	0.033	0.033	0.033	
$\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot d\lambda$	0.734			
$\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$	0.101			
$K_{\text{ГЛ}}$	0.138			
$\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{\text{отн}}(\lambda) \cdot d\lambda$	0.299	0.324	0.251	
$K_{\text{ПИ}}$	0.47	0.441	0.342	
Матрица	$E_{\text{э}}^{\text{нор}}, \text{Вт}/\text{м}^2$	1.47e-5	4.77e-5	2.52e-5
	$\Phi_{\text{э}}^{\text{нор}}, \text{Вт}$	2.42e-15	2.62e-15	3.62e-15
	$E_{\text{св}}^{\text{нор}}, \text{лк}$	1.38e-3	4.48e-3	2.36e-3
	$\Phi_{\text{св}}^{\text{нор}}, \text{лм}$	2.27e-13	2.46e-13	3.4e-13
Объект	$E_{\text{э}}^{\text{нор}}, \text{Вт}/\text{м}^2$	1.92e-4	6.24e-4	3.29e-4
	$E_{\text{св}}^{\text{нор}}, \text{лк}$	1.81e-2	5.86e-2	3.09e-2

Заключение

Наименьшие значения пороговых освещенности и потока излучения, согласно расчету, имеет матрица КАI-1003M. От нее почти в два раза отстает матрица FTF3020M, несмотря на более низкий уровень шума. Это обусловлено более низкой квантовой эффективностью, меньшим размером пикселя и меньшим значением коэффициента использования излучения источника. К сожалению, изготовитель матрицы привел график квантовой эффективности лишь в диапазоне $\Delta\lambda = 0.4 \div 0.8$ мкм. Третье место занимает матрица КАI-1020, что объясняется гораздо меньшей, по сравнению с остальными матрицами, площадью ее пикселя.

За счет увеличения времени накопления матрицы, можно добиться значительного уменьшения пороговой освещенности. Так при времени накопления

$t_{\text{нак}} = 3$ с пороговая освещенность для матрицы КАI-1003M составит $E_{\text{св}}^{\text{нор}} \approx 10^{-5}$ лк.

Литература

1. Криксунов Л.З. "Справочник по основам инфракрасной технике", Сов. Радио, 1978.- 396 с.
2. Неизвестный С.И., Никулин О.Ю. "Приборы с зарядовой связью - основа современной телевизионной техники. Основные характеристики ПЗС", "Специальная техника", № 5, 1999.
3. КАI - 1003M. Megapixel Interline CCD Image Sensor. Performance Specification., Eastman Kodak Company, Image Sensor Solutions, Revision 3, September 22, 2000.
4. Kodak КАI-1020. Image sensor. Device performance specification., January 16, 2004, Revision 4.1.
5. FTF 3020-M. Full Frame CCD Image Sensor. Data Sheet. November 22, 1999.