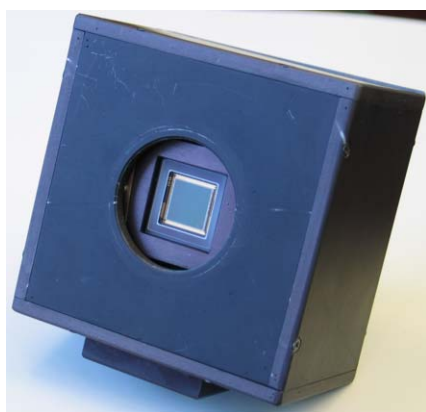


Расчет пороговых значений потока излучения и освещенности для ПЗС матриц Kodak KAI-1003M, Kodak KAI-1020 и Philips FTF3020M

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

1. Введение

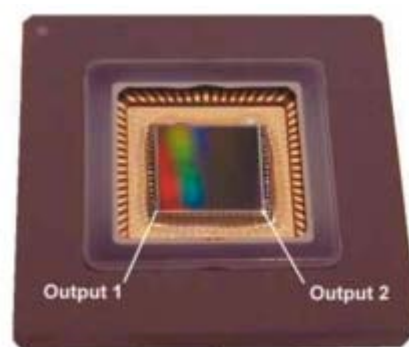
В данной статье на основе паспортных данных будет произведен расчет пороговых значений потока излучения и освещенности для ПЗС матриц *Kodak KAI-1003M*, *KAI-1020* и *Philips FTF3020M*, применяемых в качестве матричных приемников излучения в цифровых телевизионных камерах, производимых ООО «Растр технолоджи», [рис.1](#). Более подробную информацию о продукции, производимой ООО «Растр технолоджи», можно получить [здесь](#).



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»

2. Постановка задачи

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_s 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 фотоприемник установлен в задней фокальной плоскости объектива (плоскости изображения). Изображение объекта, формируемое объективом, имеет интегральную энергетическую освещенность E'_s 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.

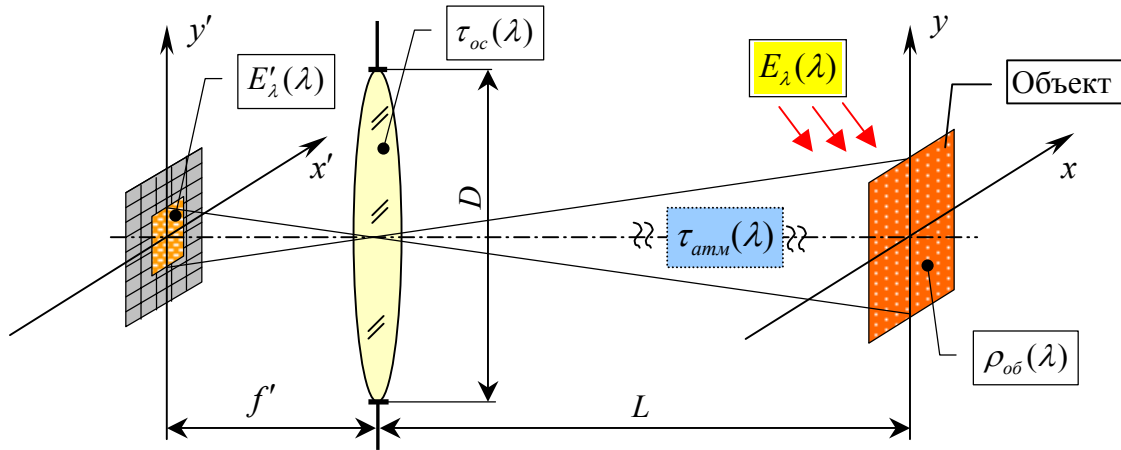


Рис. 2. Типовая схема наблюдения объекта при помощи телевизионной камеры

3. Теоретическая часть

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:

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

Ей будет соответствовать световая освещенность:

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

- где: $E_\lambda(\lambda)$ – спектральная плотность энергетической освещенности объекта;
 E_o – интегральная энергетическая освещенность объекта;
 E_{ce} – световая освещенность объекта;
 $V(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность глаза;
 683 – пересчетный коэффициент энергетических величин в световые, $[лм/Вт]$.
 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:

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

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

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

где: $\tau_{атм}(\lambda)$ - спектральный коэффициент пропускания атмосферы;
 $\tau_{oc}(\lambda)$ - спектральный коэффициент пропускания оптической системы (объектива);
 $\rho_{об}(\lambda)$ - коэффициент диффузного отражения объекта;
 $E_\lambda(\lambda)$ - спектральная плотность освещенности 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:

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

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 .

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

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

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

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;
 λ – длина волны излучения;
 $\lambda_{макс}$ – длина волны излучения, соответствующая максимуму спектральной плотности светимости АЧТ, рассчитываемая в соответствии с законом смещения Вина (8);
 T – температура АЧТ;
 h – постоянная Планка, $h = 6.626176 \cdot 10^{-34} \frac{Дж \cdot с}{Гц}$;

c – скорость света в вакууме, $c = 2.99792458 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$;

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

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

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

где: M^0 – интегральная светимость АЧТ;

σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5.6697 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$;

Подставляем (8) в (7) и получаем выражение для расчета максимального значения спектральной плотности светимости АЧТ:

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

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

T – температура АЧТ, $^{\circ}К$.

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

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

где: λ – длина волны излучения, $мкм$;

T – температура АЧТ, $^{\circ}К$;

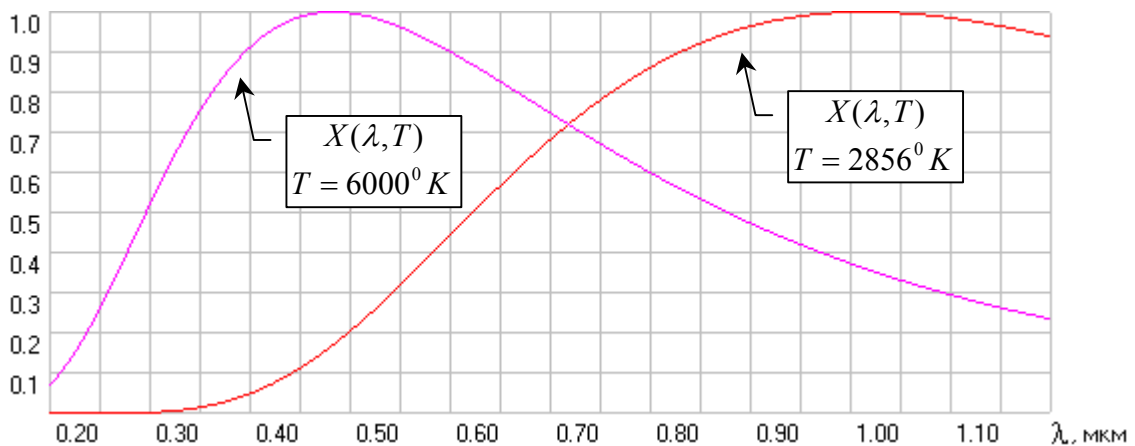


Рис. 3. Относительная спектральная плотность светимости АЧТ при температурах $T = 2856^{\circ}К$ и $T = 6000^{\circ}К$.

На [рис.3.](#) приведены графики относительной спектральной плотности светимости АЧТ при температурах $T = 2856^{\circ}К$ и $T = 6000^{\circ}К$.

Из выражения (9) с учетом (10) можно получить численное значение для интеграла $\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot d\lambda$, которое нам понадобится в дальнейшем:

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

где: T – температура АЧТ, $^{\circ}K$;

Окончательно для спектральной плотности освещенности в плоскости изображения получаем:

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

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

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

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

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

где: Φ'_s – интегральный энергетический поток излучения, попадающий на одиночный пиксель матричного приемника излучения;

$A_{\text{пш}}$ – площадь пикселя.

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

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

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

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

$$n = t_{\text{нак}} \cdot A_{\text{пш}} \cdot \int_0^{\infty} \frac{E'_{\lambda}(\lambda) \cdot \eta(\lambda)}{E_{\phi}(\lambda)} \cdot d\lambda = t_{\text{нак}} \cdot A_{\text{пш}} \cdot \int_0^{\infty} E'_{\lambda}(\lambda) \cdot \frac{\eta(\lambda) \cdot \lambda}{h \cdot c} \cdot d\lambda \quad (18)$$

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

где: n – количество сигнальных электронов;

$\eta(\lambda)$ – квантовая эффективность матрицы;
 $E_{\phi}(\lambda)$ – энергия фотона на длине волны λ ;
 $t_{\text{нак}}$ – время накопления;
 h – постоянная Планка;
 c – скорость света в вакууме;

Величина $\frac{\eta(\lambda) \cdot \lambda}{h \cdot c}$ фактически представляет собой спектральную чувствительность матрицы:

$$S(\lambda) = \frac{\eta(\lambda) \cdot \lambda}{h \cdot c} = \frac{\text{Max}[\eta(\lambda) \cdot \lambda]}{h \cdot c} \cdot \frac{\eta(\lambda) \cdot \lambda}{\text{Max}[\eta(\lambda) \cdot \lambda]} = S_{\text{макс}} \cdot S_{\text{отн}}(\lambda) \quad (20)$$

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:

$$n = \frac{t_{\text{нак}} \cdot A_{\text{ПЗС}} \cdot S_{\text{макс}} \cdot E_{\lambda_{\text{макс}}}}{4 \cdot k^2} \cdot \int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{\text{отн}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{амм}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{ос}}(\lambda) \cdot \rho_{\text{об}}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (21)$$

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.

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

где: $N_{\text{ш}}$ - суммарное значение СКО шума;
 N_{ϕ} - СКО фотонного шума;
 $N_{\text{насл}}$ - 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, получаем:

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

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

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

Сделаем следующие допущения:

- 1) Будем считать, что дальность до объекта наблюдения невелика, в этом случае можно пренебречь потерями в атмосфере, то есть $\tau_{атм}(\lambda) \approx 1$.
- 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 $S_{омн}(\lambda) = 0$. 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 $\tau_{oc}(\lambda) \approx const$. 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 $\rho_{об}(\lambda) \approx const$.

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

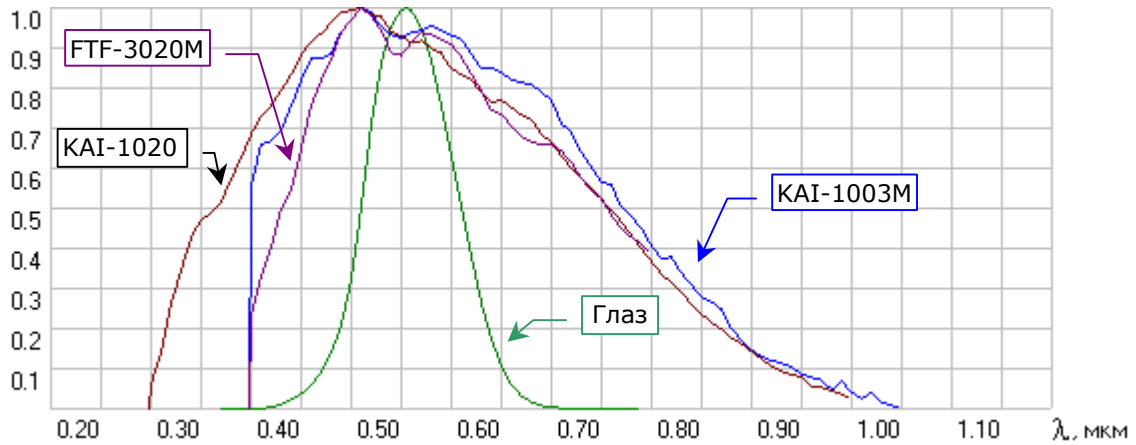


Рис.4. Графики относительных спектральных чувствительностей ПЗС матриц и человеческого глаза

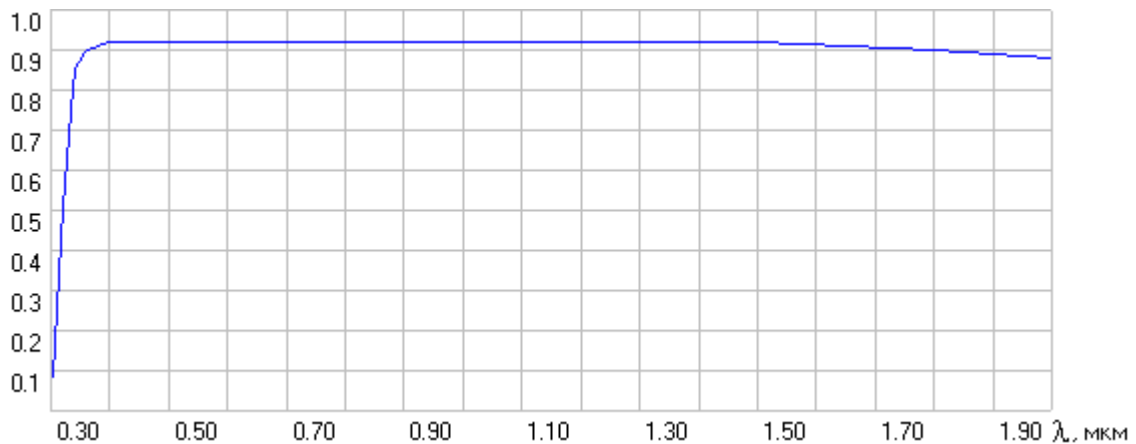


Рис.5. Спектральный коэффициент пропускания оптического стекла К8 при толщине 10 мм.

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

$$E_{\lambda_{\max}}^{nop} = \frac{4 \cdot k^2 \cdot N_{ш}}{t_{\text{нак}} \cdot A_{\text{ПШ}} \cdot S_{\text{макс}} \cdot \tau_{oc} \cdot \rho_{об} \cdot \int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{\text{отн}}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (26)$$

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

$$E_{э}^{nop} = E_{\lambda_{\max}}^{nop} \cdot \int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot d\lambda = \frac{4 \cdot k^2 \cdot N_{ш}}{t_{\text{нак}} \cdot A_{\text{ПШ}} \cdot S_{\text{макс}} \cdot \tau_{oc} \cdot \rho_{об}} \cdot \frac{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{\text{отн}}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (27)$$

$$E_{св}^{nop} = 683 \cdot E_{\lambda_{\max}}^{nop} \cdot \int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda = \frac{683 \cdot 4 \cdot k^2 \cdot N_{ш}}{t_{\text{нак}} \cdot A_{\text{ПШ}} \cdot S_{\text{макс}} \cdot \tau_{oc} \cdot \rho_{об}} \cdot \frac{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{\text{отн}}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (28)$$

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

$$E_{э}'^{nop} = \frac{N_{ш}}{t_{\text{нак}} \cdot A_{\text{ПШ}} \cdot S_{\text{макс}} \cdot \tau_{oc} \cdot \rho_{об}} \cdot \frac{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot \tau_{oc}(\lambda) \cdot \rho_{об}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{\text{отн}}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (29)$$

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.

$$E_{э}'^{nop} = \frac{N_{ш}}{t_{\text{нак}} \cdot A_{\text{ПШ}} \cdot S_{\text{макс}}} \cdot \frac{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{\text{отн}}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (30)$$

Пороговое значение интегрального энергетического потока излучения:

$$\Phi_{э}'^{nop} = E_{э}'^{nop} \cdot A_{\text{ПШ}} = \frac{N_{ш}}{t_{\text{нак}} \cdot S_{\text{макс}}} \cdot \frac{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{\text{отн}}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (31)$$

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 источником 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 $T = 2856^0 K$ 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).

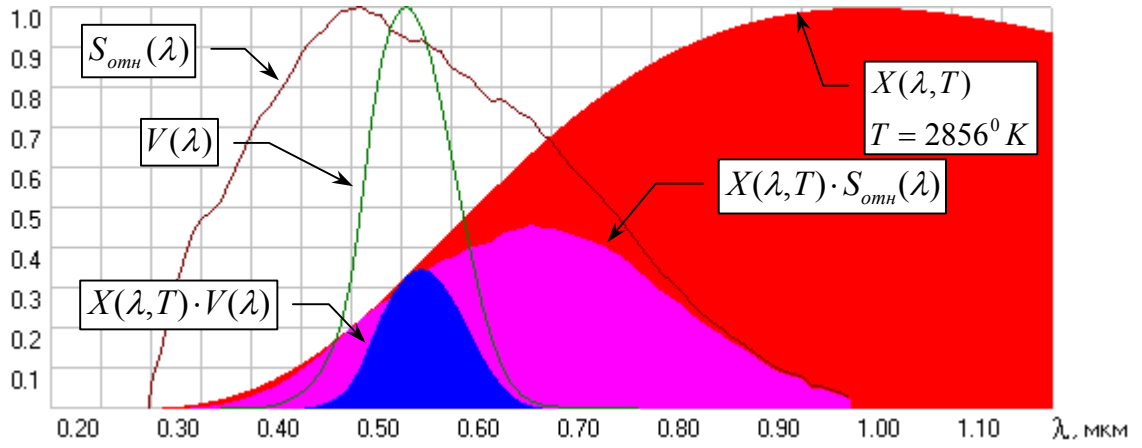


Рис.6. Графическая интерпретация коэффициента использования излучения источника

4. Расчетная часть

4.1. Исходные данные

При расчете будем использовать следующие исходные данные. Паспортные параметры матриц взяты из [3], [4], [5]. Значения квантовой эффективности получены путем оцифровки одноименных графиков из [3], [4], [5].

4.1.1. Паспортные параметры ПЗС матриц.

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

Таблица 1. Паспортные параметры ПЗС матриц.

Параметр	Приемник излучения		
	КАИ-1003М	КАИ-1020	FTF3020М
Квантовая эффективность $\eta(\lambda)$	Таблица 2	Таблица 3	Таблица 4
Геометрические размеры пикселя $W \times H$, мкм	12.8 x 12.8	7.4 x 7.4	12.0 x 12.0
Время накопления $t_{\text{нак}}$, с	0.033	0.033	0.033
СКО шума $N_{\text{нашп}}$, электронов (типовое значение)	40(1)	42(2)	30(3)

Примечание. Условия измерения.

1. Частота кадров 30 Гц, время накопления 0.033 с.
2. Частота кадров 30 Гц, пиксельная частота 40 МГц.
3. Частота кадров 4.5 Гц, пиксельная частота 9 МГц, время накопления 0.033 с.

4.1.2. Параметры оптической системы

Диафрагменное число объектива:

$$k = 1.4 ;$$

Коэффициент пропускания оптической системы:

$$\tau_{oc} = 0.8 .$$

4.1.3. Условия наблюдения объекта

Цветовая температура источника излучения:

$$T_1 = 2856^0 K, T_2 = 6000^0 K ;$$

Коэффициент диффузного отражения объекта:

$$\rho_{об} = 0.75 ;$$

4.1.4. Относительная спектральная чувствительность глаза

Относительная спектральная чувствительность глаза: [Таблица 5](#)

Таблица 2. Квантовая эффективность и относительная спектральная чувствительность матрицы Kodak KI-1003M.

$Max[\eta(\lambda) \cdot \lambda] = 0.245$ $S_{\text{макс}} = 1.23e18 \text{ Джс}^{-1}$

λ , мкм	$\eta(\lambda)$	$S_{\text{отн}}(\lambda)$	λ , мкм	$\eta(\lambda)$	$S_{\text{отн}}(\lambda)$
0.390	-	-	0.730	0.21500	0.64114
0.400	0.34000	0.55556	0.740	0.20000	0.60458
0.410	0.39400	0.65989	0.750	0.18500	0.56679
0.420	0.39000	0.66912	0.760	0.18000	0.55882
0.430	0.39500	0.69383	0.770	0.16000	0.50327
0.440	0.42000	0.75490	0.780	0.15000	0.47794
0.450	0.44500	0.81801	0.790	0.14000	0.45180
0.460	0.46500	0.87377	0.800	0.12500	0.40850
0.470	0.45500	0.87357	0.810	0.11300	0.37390
0.480	0.45200	0.88627	0.820	0.11300	0.37851
0.490	0.47000	0.94077	0.830	0.10000	0.33905
0.500	0.47500	0.97018	0.840	0.09000	0.30882
0.510	0.48000	1.00000	0.850	0.08000	0.27778
0.520	0.46500	0.98775	0.860	0.07600	0.26699
0.530	0.44000	0.95261	0.870	0.07000	0.24877
0.540	0.42300	0.93309	0.880	0.05600	0.20131
0.550	0.41200	0.92565	0.890	0.04700	0.17087
0.560	0.41000	0.93791	0.900	0.04000	0.14706
0.570	0.40600	0.94534	0.910	0.03500	0.13011
0.580	0.40300	0.95482	0.920	0.03200	0.12026
0.590	0.39200	0.94477	0.930	0.03000	0.11397
0.600	0.38000	0.93137	0.940	0.02700	0.10368
0.610	0.37000	0.92198	0.950	0.02200	0.08538
0.620	0.35000	0.88644	0.960	0.02000	0.07843
0.630	0.33000	0.84926	0.970	0.01800	0.07132
0.640	0.32500	0.84967	0.980	0.01200	0.04804
0.650	0.31600	0.83905	0.990	0.01700	0.06875
0.660	0.30500	0.82230	1.000	0.01000	0.04085
0.670	0.29700	0.81287	1.010	0.00600	0.02475
0.680	0.29200	0.81111	1.020	0.01000	0.04167
0.690	0.28000	0.78922	1.030	0.00400	0.01683
0.700	0.27000	0.77206	1.040	0.00200	0.00850
0.710	0.24500	0.71058	1.050	0.0	0.0
0.720	0.23500	0.69118	1.060	0.0	0.0

Таблица 3. Квантовая эффективность и относительная спектральная чувствительность матрицы Kodak KAI-1020

$$\text{Max}[\eta(\lambda) \cdot \lambda] = 0.219$$

$$S_{\text{макс}} = 1.1 \cdot 10^{18} \text{ Дж}^{-1}$$

λ , МКМ	$\eta(\lambda)$	$S_{\text{отн}}(\lambda)$	λ , МКМ	$\eta(\lambda)$	$S_{\text{отн}}(\lambda)$
0.300	0.04500	0.06156	0.660	0.25000	0.75239
0.310	0.10000	0.14136	0.670	0.24000	0.73324
0.320	0.18000	0.26265	0.680	0.23300	0.72248
0.330	0.23000	0.34610	0.690	0.21800	0.68591
0.340	0.27500	0.42636	0.700	0.20800	0.66393
0.350	0.29500	0.47082	0.710	0.19500	0.63133
0.360	0.29800	0.48919	0.720	0.18300	0.60082
0.370	0.30600	0.51628	0.730	0.17300	0.57588
0.380	0.33000	0.57182	0.740	0.16300	0.55002
0.390	0.35200	0.62599	0.750	0.15300	0.52326
0.400	0.37500	0.68399	0.760	0.14300	0.49558
0.410	0.39000	0.72914	0.770	0.13300	0.46699
0.420	0.39500	0.75650	0.780	0.12200	0.43393
0.430	0.40500	0.79412	0.790	0.11100	0.39986
0.440	0.41500	0.83265	0.800	0.10100	0.36845
0.450	0.43000	0.88235	0.810	0.09100	0.33611
0.460	0.43700	0.91664	0.820	0.08400	0.31409
0.470	0.43700	0.93657	0.830	0.07700	0.29143
0.480	0.44000	0.96306	0.840	0.06800	0.26047
0.490	0.44300	0.98983	0.850	0.06100	0.23643
0.500	0.43600	0.99407	0.860	0.05500	0.21569
0.510	0.43000	1.00000	0.870	0.05000	0.19836
0.520	0.41500	0.98404	0.880	0.04400	0.17656
0.530	0.40500	0.97880	0.890	0.04000	0.16233
0.540	0.38200	0.94063	0.900	0.03500	0.14364
0.550	0.37000	0.92795	0.910	0.03000	0.12449
0.560	0.35800	0.91418	0.920	0.02500	0.10488
0.570	0.35300	0.91751	0.930	0.02200	0.09330
0.580	0.34000	0.89922	0.940	0.02000	0.08573
0.590	0.33000	0.88782	0.950	0.01800	0.07798
0.600	0.31000	0.84815	0.960	0.01200	0.05253
0.610	0.30000	0.83447	0.970	0.01200	0.05308
0.620	0.29000	0.81988	0.980	0.01000	0.04469
0.630	0.27500	0.79001	0.990	0.00800	0.03611
0.640	0.26200	0.76461	1.000	0.00500	0.02280
0.650	0.26000	0.77063	1.010	-	-

Таблица 4. Квантовая эффективность и относительная спектральная чувствительность матрицы Philips FTF2030M

$Max[\eta(\lambda) \cdot \lambda] = 0.146$ $S_{max} = 7.35e17 \text{ Джс}^{-1}$

λ , мкм	$\eta(\lambda)$	$S_{отн}(\lambda)$	λ , мкм	$\eta(\lambda)$	$S_{отн}(\lambda)$
0.400	0.08500	0.23310	0.610	0.21000	0.87824
0.410	0.11800	0.33169	0.620	0.19700	0.83738
0.420	0.14000	0.40313	0.630	0.18400	0.79473
0.430	0.16900	0.49822	0.640	0.17000	0.74592
0.440	0.18000	0.54299	0.650	0.16500	0.73529
0.450	0.21000	0.64788	0.660	0.15600	0.70588
0.460	0.24000	0.75689	0.670	0.14800	0.67983
0.470	0.25400	0.81846	0.680	0.14300	0.66667
0.480	0.26500	0.87207	0.690	0.13900	0.65755
0.490	0.28000	0.94063	0.700	0.13800	0.66228
0.500	0.28300	0.97011	0.710	0.13200	0.64253
0.510	0.28600	1.00000	0.720	0.12500	0.61703
0.520	0.27500	0.98039	0.730	0.11500	0.57555
0.530	0.26000	0.94474	0.740	0.10700	0.54285
0.540	0.24000	0.88852	0.750	0.10200	0.52448
0.550	0.23400	0.88235	0.760	0.09300	0.48457
0.560	0.23800	0.91375	0.770	0.08500	0.44872
0.570	0.24000	0.93789	0.780	0.08000	0.42781
0.580	0.23500	0.93446	0.790	0.07600	0.41163
0.590	0.22800	0.92225	0.800	0.07000	0.38393
0.600	0.22100	0.90909	0.810	-	-

Таблица 5. Относительная спектральная чувствительность глаза (дневное зрение)

λ , мкм	$V(\lambda)$	λ , мкм	$V(\lambda)$	λ , мкм	$V(\lambda)$
0.370	0.000000	0.520	0.710000	0.660	0.061000
0.380	0.000040	0.530	0.862000	0.670	0.032000
0.390	0.000120	0.540	0.954000	0.680	0.017000
0.400	0.000400	0.550	0.995000	0.690	0.008200
0.410	0.001200	0.555	1.000000	0.700	0.004100
0.420	0.004000	0.560	0.995000	0.710	0.002100
0.430	0.011600	0.570	0.952000	0.720	0.001050
0.440	0.023000	0.580	0.870000	0.730	0.000520
0.450	0.038000	0.590	0.757000	0.740	0.000250
0.460	0.060000	0.600	0.631000	0.750	0.000120
0.470	0.091000	0.610	0.503000	0.760	0.000060
0.480	0.139000	0.620	0.381000	0.770	0.000030
0.490	0.208000	0.630	0.265000	0.780	0.000015
0.500	0.323000	0.640	0.175000	0.790	0.000000
0.510	0.503000	0.650	0.107000	0.800	0.000000

4.2. Методика расчета.

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

Вычисление интегралов $\int X(\lambda, T) \cdot S_{\text{отн}}(\lambda) \cdot d\lambda$ и $\int X(\lambda, T) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$ производится методом прямоугольников в диапазоне $\Delta\lambda = 0.35 \div 1.0$ мкм с шагом 0.01 мкм.

Значение $X(\lambda, T)$ вычисляется по формуле (11). Значения $S_{\text{макс}}$ и $S_{\text{отн}}(\lambda_i)$ вычисляются на основе табличных паспортных значений квантовой эффективности $\eta(\lambda_i)$ матриц и приведены в таблицах 2, 3, 4. Значение относительной спектральной чувствительности глаза $V(\lambda_i)$ приведено в таблице 5. Промежуточные значения относительной спектральной чувствительности глаза $V(\lambda)$ и матриц $S_{\text{отн}}(\lambda)$ вычисляются 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).

4.3. Результаты расчета.

Результаты расчета сведены в таблицы 6 и 7.

Таблица 6. Результаты расчета пороговых значений освещенности и потока излучения для источника с цветовой температурой $T = 2865^{\circ} K$.

Параметр		Приемник излучения		
		КАИ-1003М	КАИ-1020	FTF3020М
$S_{\text{макс}}, Дж^{-1}$		1.23e+18	1.10e+18	7.35e+17
$A_{\text{ПШ}}, м^2$		1.64e-10	5.48e-11	1.44e-10
$N_{\text{Ш}}$		40	42	30
$t_{\text{нак}}, с$		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		
$K_{\text{ГЛ}}$		0.024		
$\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{\text{омн}}(\lambda) \cdot d\lambda$		0.169	0.155	0.121
$K_{\text{ПШ}}$		0.11	0.1	0.078
Матрица	$E_{\text{э}}^{\text{нор}}, Вт/м^2$	5.47e-5	2.1e-4	1.09e-4
	$\Phi_{\text{э}}^{\text{нор}}, Вт$	8.97e-15	1.15e-14	1.58e-14
	$E_{\text{св}}^{\text{нор}}, лк$	9.02e-4	3.46e-3	1.81e-3
	$\Phi_{\text{св}}^{\text{нор}}, лм$	1.48e-13	1.9e-13	2.61e-13
Объект	$E_{\text{э}}^{\text{нор}}, Вт/м^2$	7.15e-4	2.74e-3	1.43e-3
	$E_{\text{св}}^{\text{нор}}, лк$	1.17e-2	4.52e-2	2.37e-2

Таблица 7. Результаты расчета пороговых значений освещенности и потока излучения для источника с цветовой температурой $T = 6000^0 K$.

Параметр	Приемник излучения			
	КАИ-1003М	КАИ-1020	FTF3020М	
$S_{\text{макс}}, Дж^{-1}$	1.23e+18	1.10e+18	7.35e+17	
$A_{\text{ПШ}}, м^2$	1.64e-10	5.48e-11	1.44e-10	
$N_{\text{Ш}}$	40	42	30	
$t_{\text{нак}}, с$	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			
$\int_0^{\infty} X(\lambda, T) \cdot S_{\text{омн}}(\lambda) \cdot d\lambda$	0.299	0.324	0.251	
$K_{\text{ПШ}}$	0.47	0.441	0.342	
Матрица	$E_3^{\text{нор}}, Вт/м^2$	1.47e-5	4.77e-5	2.52e-5
	$\Phi_3^{\text{нор}}, Вт$	2.42e-15	2.62e-15	3.62e-15
	$E_{\text{св}}^{\text{нор}}, лк$	1.38e-3	4.48e-3	2.36e-3
	$\Phi_{\text{св}}^{\text{нор}}, лм$	2.27e-13	2.46e-13	3.4e-13
Объект	$E_3^{\text{нор}}, Вт/м^2$	1.92e-4	6.24e-4	3.29e-4
	$E_{\text{св}}^{\text{нор}}, лк$	1.81e-2	5.86e-2	3.09e-2

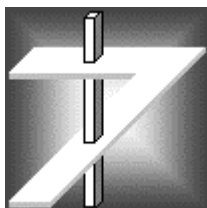
5. Выводы

Наименьшие значения пороговых освещенности и потока излучения, согласно расчету, имеет матрица *KAI-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. Обидно, что изготовитель матрицы привел график квантовой эффективности лишь в диапазоне $\Delta\lambda = 0.4 \div 0.8$ мкм. Третье место занимает матрица *KAI-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 *KAI-1003M* составит $E_{\text{св}}^{\text{нор}} \approx 10^{-5}$ лк.

6. Список литературы

1. Коротков В.П. Учебный курс «Теория формирования, распространения и приема оптического излучения», кафедра РЛ2, МГТУ имени Н.Э. Баумана, 1990.
2. Криксунов Л.З. «Справочник по основам инфракрасной техники», Сов. Радио, 1978.- 396 с.
3. Уваров Н.Е. «Секреты высокой чувствительности ТВ камер», «Алгоритм безопасности» №6, 2002.
4. Крутик М.И., Майоров В.П. «Люмены, канделы, ватты и фотоны. Различные единицы – различные результаты измерения чувствительности телевизионных камер на основе ЭОП и ПЗС», «Специальная техника» №5, 2002.
5. Неизвестный С.И., Никулин О.Ю. «Приборы с зарядовой связью - основа современной телевизионной техники. Основные характеристики ПЗС», «Специальная техника», № 5, 1999.
6. **KAI - 1003M. Megapixel Interline CCD Image Sensor. Performance Specification.**, Eastman Kodak Company, Image Sensor Solutions, Revision 3, September 22, 2000.
7. **Kodak KAI-1020. Image sensor. Device performance specification.**, January 16, 2004, Revision 4.1.
8. **FTF 3020-M. Full Frame CCD Image Sensor. Data Sheet.** November 22, 1999.



ООО «РАСТР ТЕХНОЛОДЖИ»

(495) 789-93-67, 425-73-26

www.rastr.net

rastr_support@mail.ru, rastr_support@rastr.net