

УДК 621.383.4/5

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz,  
07.57.Kp, 85.60.Dw

## Оценка максимальной дальности обнаружения объектов с помощью пассивного фотоприемного устройства

Н. И. Яковлева

*В работе на основе энергетических характеристик оптико-электронной системы (ОЭС) предложена модель расчета максимальной дальности обнаружения  $I(\lambda, T)$  объекта наблюдения с учетом характеристик ОЭС, таких как: освещенность  $E_i(\lambda, T)$  в плоскости изображения, апертура, диаметр входного зрачка и параметров ФПУ, таких как отношение сигнал/шум, пороговая мощность, площадь фоточувствительного элемента (ФЧЭ), площадь матрицы. Проведена оценка дальности обнаружения объекта наблюдения в спектральном диапазоне 8–10 мкм, максимальное значение которой составило порядка 3,4 км.*

*Ключевые слова:* энергетические характеристики, оптико-электронная система, максимальная дальность, CdHgTe, матрица фоточувствительных элементов (МФЧЭ), темновой ток.

**Ссылка:** Яковлева Н. И. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 5. С. 341.

**Reference:** N. I. Iakovleva, Usp. Prikl. Fiz. **8** (5), 341 (2020).

### Введение

При работе в длинноволновом и средневолновом инфракрасных (ИК) диапазонах (LWIR, MWIR) по собственному (тепловому) излучению объектов чаще всего используются охлаждаемые до криогенных температур фотоприемные устройства (ФПУ). Область их применения чрезвычайно широка – от разнообразных военных систем до многих гражданских изделий в различных отраслях науки и техники.

В основу принципа работы ИК ФПУ положено двумерное преобразование из-

лучения от объектов наблюдения и фоновой обстановки в электрические сигналы, на основе которых можно создать изображение или задать механизмы обработки, выполняя задачи обнаружения, распознавания и измерения параметров наблюдаемых объектов в сложных метеоусловиях, при наличии тепловых или других помех (дыма, дождя, тумана, снега, пыли) [1].

В последние годы огромное значение приобрели ФПУ для круглосуточного всепогодного наблюдения, измерений, разведки и решения специальных задач, позволяющие не только регистрировать излучение объектов, но и проводить измерение дальности до них.

В работе на основе уравнений энергетического расчета ОЭС показан вывод формулы для определения дальности обнаружения объекта наблюдения с учетом

---

Яковлева Наталья Ивановна, г.н.с., к.т.н.

АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 04 сентября 2020 г.

© Яковлева Н. И., 2020

характеристик оптико-электронной системы: освещенность  $E_i(\lambda, T)$  в плоскости изображения, апертура, диаметр входного зрачка и параметров ФПУ: отношение сигнал/шум, пороговая мощность ФЧЭ, площадь фоточувствительного элемента, площадь матрицы.

### Расчет энергетических характеристик идеальной оптико-электронной системы

Для вывода формулы дальности рассмотрим схему преобразования излучения в идеальной оптико-электронной системе (рис. 1), формирующей изображение  $A_i$  объекта с площадью  $A_s$ , где  $l$  – дальность обнаружения объекта;  $f'$  – фокусное расстояние в пространстве изображений [2].

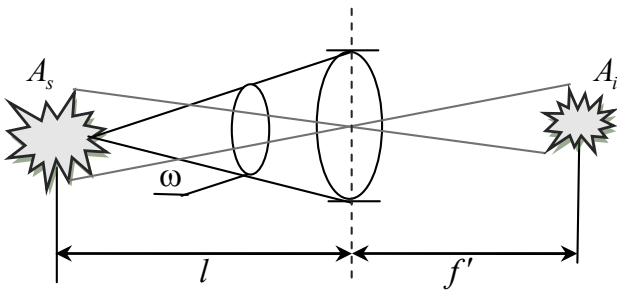


Рис. 1. Построение изображения в идеальной ОС.

Определим поток оптического излучения от объекта площадью  $A_s$

$$\Phi_s(\lambda, T) = I_s(\lambda, T)\omega = L_s(\lambda, T)A_s\omega \quad (1)$$

где  $I_s$  – сила излучения;  $L_s$  – энергетическая яркость объекта площадью  $A_s$  в направлении ОЭС;  $\omega$  – пространственный угол, определяемый входной диафрагмой.

Рассчитаем характеристики ОЭС, основными из которых являются: освещенность в плоскости изображения  $E_i$ , коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_0$ . Величина потока  $\Phi_i(\lambda, T)$  в плоскости изображения ОС составит

$$\begin{aligned} \Phi_i(\lambda, T) &= \tau_a(\lambda, T)\tau_0(\lambda, T)\Phi_s(\lambda, T)A_i = \\ &= \tau_a(\lambda, T)\tau_0(\lambda, T)L_s(\lambda, T)A_sA_i\omega. \end{aligned} \quad (2)$$

Заменяя пространственный угол  $\omega$  на отношение площади входного зрачка на квадрат расстояния до цели  $\omega = \frac{A_0}{l^2}$ , получим выражение, из которого выводим формулу для определения дальности

$$\begin{aligned} \Phi_i(\lambda, T) &= \tau_a(\lambda, T)\tau_0(\lambda, T)\Phi_s(\lambda, T)A_i = \\ &= \tau_a(\lambda, T)\tau_0(\lambda, T)L_s(\lambda, T)A_s\omega A_i = \\ &= \tau_a(\lambda, T)\tau_0(\lambda, T)L_s(\lambda, T)A_sA_i\frac{A_0}{l^2}, \\ l(\lambda, T) &= \\ &= \sqrt{\frac{\tau_a(\lambda, T)\tau_0(\lambda, T)L_s(\lambda, T)A_sA_0A_i}{\Phi_i(\lambda, T)}} \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\tau_a(\lambda, T)$  – коэффициент пропускания атмосферы;  $\tau_0(\lambda, T)$  – коэффициент пропускания оптической системы.

Данная формула широко используется в различных исследовательских целях [3], в частности, она особенно интересна, если из начальных условий известна высота цели, например, когда определяется дальность обнаружения человека или средства передвижения.

Из геометрических соотношений (рис. 1) определим угол  $\omega$  (допускаем, что углы в пространстве предметов и изображений одинаковы).

$$2\omega = \frac{\pi D_{\text{вх.зр.}}^2}{4f'^2}. \quad (4)$$

Комбинируя уравнения (2) и (4), получим уравнение для потока в пространстве изображений

$$\begin{aligned} \Phi_i(\lambda, T) &= \tau_a(\lambda, T)\tau_0(\lambda, T) \times \\ &\times L_s(\lambda, T)A_sA_i \times \frac{1}{2} \frac{\pi D_{\text{вх.зр.}}^2}{4f'^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Используя соотношение  $\frac{A_s}{A_i} = \frac{l^2}{f'^2}$ , из уравнения (5) выведем выражение для освещенности  $E_i(\lambda, T)$  в плоскости изображения

$$E_i(\lambda, T) = \frac{\Phi_i(\lambda, T)}{A_i} = \frac{\tau_a(\lambda, T)\tau_0(\lambda, T)L_s(\lambda, T)A_sA_i \times \frac{1}{2} \frac{\pi D_{\text{вх.зр.}}^2}{4f'^2}}{A_i} = \frac{A_s}{2} \frac{\pi\tau_a(\lambda, T)\tau_0(\lambda, T)L_s(\lambda, T)}{4} \left(\frac{D_{\text{вх.зр.}}}{f'}\right)^2, \tag{6}$$

откуда  $2E_i(\lambda, T) = \frac{\pi\tau_a(\lambda, T)\tau_0(\lambda, T)L_s(\lambda, T)A_s}{4} \left(\frac{D_{\text{вх.зр.}}}{f'}\right)^2.$  (7)

Из уравнения (7) видно, что освещенность в плоскости изображения зависит от диаметра входного зрачка.

Следует заметить, что коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_0$  определяется как соотношение интегралов

$$\tau_0(\lambda, T) = \frac{\int_0^\infty \Phi_0(\lambda, T)\tau_0(\lambda, T)d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_0(\lambda, T)d\lambda}, \tag{8}$$

где  $\Phi_0(\lambda, T)$  – поток оптического излучения на входном зрачке ОС.

Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a$  определяется как соотношение интегралов

$$\tau_a(\lambda, T) = \frac{\int_0^\infty \Phi_s(\lambda, T)\tau_a(\lambda, T)d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_s(\lambda, T)d\lambda}, \tag{9}$$

где  $\Phi_s(\lambda, T)$  – поток оптического излучения объекта.

Из соотношения  $\frac{A_s}{A_i} = \frac{l^2}{f'^2}$  находим  $A_s$

и подставляем в формулу освещенности (7), получаем освещенность в плоскости изображения ОЭС

$$E_i(\lambda, T) = \frac{A_s}{2} \frac{\tau_a(\lambda, T)\tau_0(\lambda, T)L_s(\lambda, T)\pi \left(\frac{D_{\text{вх.зр.}}}{f'}\right)^2}{4} = \frac{A_i l(\lambda, T)^2}{2f'^2} \frac{\tau_a(\lambda, T)\tau_0(\lambda, T)L_s(\lambda, T)\pi \left(\frac{D_{\text{вх.зр.}}}{f'}\right)^2}{4}. \tag{10}$$

Формулу (3) используем для окончательного вывода формулы для дальности  $l(\lambda, T)$  обнаружения объекта наблюдения, при этом учитываем уравнение (4) и вычитая фоновую составляющую, получаем

$$l(\lambda, T) = \sqrt{\frac{\pi D_{\text{вх.зр.}}^2 A_s A_i [L_s(\lambda, T_T) - L_s(\lambda, T_B)] \tau_a(\lambda, T) \tau_0(\lambda, T)}{4 \times \Phi_i(\lambda, T)}}. \tag{11}$$

Поток в плоскости изображения  $\Phi_i(\lambda, T)$  заменим на произведение  $\Phi_i(\lambda, T) = SNR(\lambda, T, N_A, N_D, \tau) \times P_{\text{пор}}(\lambda, T_T, T_3)$ , т. е. на отношение сигнал/шум  $SNR$  умноженное на пороговую мощность  $P_{\text{пор}}(\lambda, T_T, T_3)$ . Излучение фона и объекта заменяем на эквивалентные уравнения для

излучения черного тела. Вычитаем фоновую составляющую, и, вводя поправочные коэффициенты, задающие коэффициент использования фотоприемным устройством излучения фона, излучения объекта и ухудшение чувствительности в реальных условиях функционирования, получим формулу для расчета дальности обнаружения в виде

$$l(\lambda, T) = \sqrt{\frac{A_s A_i D_{\text{вх.зр.}}^2 \times \left( \left[ \frac{(2\pi hc^2 \lambda^{-5}) K(\lambda, T_T)}{\exp(hc/\lambda k T_T) - 1} \right] - \left[ \frac{(2\pi hc^2 \lambda^{-5}) K(\lambda, T_B)}{\exp(hc/\lambda k T_B) - 1} \right] \right) \tau_a(\lambda, T) \tau_0(\lambda, T)}{\left[ SNR(\lambda, T, N_A, N_D, \tau) \times P_{\text{пор}}(\lambda, T_T, T_3) \right] K(\lambda, \Phi_B) K(\Delta f) K(\lambda, T_3)}, \quad (12)}$$

где  $A_s$  – площадь объекта;  $A_i$  – площадь изображения;  $D_{\text{вх.зр.}}$  – диаметр входного зрачка ОЭС;  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура;  $K(\lambda, T_T)$  – коэффициент использования ФПУ излучения цели;  $K(\lambda, T_B)$  – коэффициент использования ФПУ излучения фона;  $T_T$  – температура цели;  $T_B$  – температура фона;  $T_3$  – температура эталонного источника излучения;  $SNR(\lambda, T, N_A, N_D, \tau)$  – отношение «сигнал/шум» для ФПУ с учетом его характерных параметров: концентраций акцепторов и доноров в квазинейтральных областях фотодиодов и времени жизни неосновных носителей заряда;  $P_{\text{пор}}(\lambda, T_T, T_3)$  – пороговая мощность, измеренная к источнику эталонного излучения с температурой  $T_3$ ;  $K(\lambda, \Phi_B)$  – коэффициент, характеризующий ухудшение чувствительности приемника излучения при засветке фоном;  $K(\lambda, T_3)$  – коэффициент использования приемником излучения эталонного источника с температурой  $T_3$ ;  $K(\Delta f)$  – коэффициент, характеризующий ухудшение передачи ФПУ временных частот.

### Отношение сигнал/шум

Определение отношения тока фотосигнала к току шума ФПУ с учетом его

характеристических параметров является отдельной задачей. В общем виде сигнал/шум определяется уравнением

$$SNR(\lambda, T, N_A, N_D, \tau) = \frac{I_s(\lambda, T_T, T_B)}{I_n(\lambda, T, N_A, N_D, \tau)},$$

где  $I_s(\lambda, T_T, T_B)$  – ток фотосигнала;  $I_n(\lambda, T, N_A, N_D, \tau)$  – ток шума.

Далее представлены зависимости для расчета токов сигнала и шума, при этом учитываются особенности ФПУ, изготовленного на основе выбранного фоточувствительного материала, в нашем случае это CdHgTe.

### Расчет фототока

Для вывода фототока  $I_s(\lambda, T_T, T_B)$  для фоточувствительного элемента матрицы фотодиодов рассмотрим рис. 2, на котором представлена схема ОЭС, включающая источник излучения (1) площадью  $A_s$ , источник окружен фоном (2); оптическую систему (3) с площадью входного зрачка  $A_0$  и ФПУ (4) с эффективной площадью  $A_i$ . Расстояние от источника до оптической системы обозначим  $R_1$ , расстояние от плоскости входного зрачка до плоскости изображения обозначим  $R_2$ .

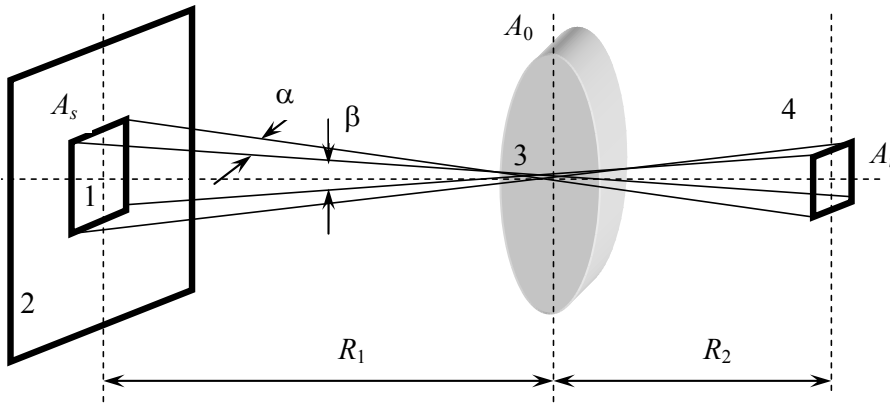


Рис. 2. Упрощенная схема оптико-электронной системы.

В соответствии с рис. 2 поток излучения  $\Phi_o(\lambda, T)$  в плоскости входного зрачка оптической системы рассчитывается как

$$\Phi_o(\lambda, T) = L_s(\lambda, T) \frac{A_0}{R_1^2} A_s \tau_a(\lambda, T)$$

где  $A_0$  – площадь входного зрачка оптической системы;  $A_s$  – площадь источника излучения;  $L_s(\lambda, T)$  – яркость источника излучения;  $\tau_a(\lambda, T)$  – коэффициент пропускания атмосферы;  $R_1$  – расстояние от источника до оптической системы.

Оптическую яркость  $L_s(\lambda, T)$  источника излучения  $A_s$  или плотность потока излучения в пространственном угле  $d\Omega$  определим в соответствии с формулой

$$L_s(\lambda, T) = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial A_s \partial \Omega}, \text{ Вт/(м}^2 \text{ Стер).}$$

Поток в плоскости изображения равен

$$\Phi_i(\lambda, T) = L_s(\lambda, T) \frac{A_0}{R_2^2} A_i \tau_a(\lambda, T) \tau_0(\lambda, T)$$

где  $A_i$  – площадь изображения в фокальной плоскости оптической системы;  $\tau_0(\lambda, T)$  – коэффициент пропускания оптической системы.

Поток излучения, падающий на ФЧЭ, задается как

$$\Phi_d(\lambda, T) = L_s(\lambda, T) \frac{A_0}{R_2^2} A_d \tau_a(\lambda, T) \tau_0(\lambda, T),$$

где  $A_d$  – площадь ФЧЭ.

Используя уравнение из геометрической оптики

$$\frac{A_s}{R_1^2} = \frac{A_i}{R_2^2}.$$

Выразим расстояние  $R_2^2$  через усиление оптической системы  $M = \frac{R_2}{R_1}$  и заднее фокусное расстояние ( $f'$ )

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{f'}$$

$$\frac{R_2}{R_1} + 1 = \frac{R_2}{f'} \Rightarrow M + 1 = \frac{R_2}{f'} \Rightarrow (M + 1)^2 = \frac{R_2^2}{f'^2}.$$

Таким образом, поток излучения, падающий на ФЧЭ, преобразуется к уравнению [4]

$$\Phi_d(\lambda, T) = L_s(\lambda, T) \frac{A_0}{f'^2 (M + 1)^2} \times A_d \tau_a(\lambda, T) \tau_0(\lambda, T).$$

При этом оптическое увеличение определяется как

$$M = \frac{R_2}{R_1}$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – расстояния от объекта и изображения объекта до плоскости оптического зрачка.

$$A_p = \frac{f'}{D_{\text{вх.зр.}}}$$

Допускаем, что апертура вычисляется по формуле

Заменяем площадь входного зрачка ОС на  $A_0 = \frac{\pi D_{\text{вх.зр.}}^2}{4}$ , а фокусное расстояние на  $f' = A_p \times D_{\text{вх.зр.}}$ , получаем

$$\begin{aligned} \Phi_d(\lambda, T) &= L_s(\lambda, T) \times \frac{\pi D_{\text{вх.зр.}}^2}{4(A_p \times D_{\text{вх.зр.}})^2 (M+1)^2} A_d \tau_a(\lambda, T) \tau_0(\lambda, T) = \\ &= \frac{\pi}{4} \times \frac{L_s(\lambda, T) A_d \tau_a(\lambda, T) \tau_0(\lambda, T)}{A_p^2 (M+1)^2}. \end{aligned}$$

Определим ток фотосигнала в плоскости ФЧЭ как произведение токовой чувствительности и потока в плоскости ФЧЭ

$$I_{\text{sig}}(\lambda, T) = R_i(\lambda, T) \Phi_d(\lambda, T)$$

где  $R_i(\lambda, T)$  – токовая чувствительность.

Интегрируя ток фотосигнала в заданном спектральном диапазоне ( $\lambda_1 \dots \lambda_2$ ), вычитая фоновую составляющую излучения, получим

$$I_{\text{sig}}(\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_i(\lambda, T) \frac{\pi}{4} \times \frac{[L_s(\lambda, T_T) - L_s(\lambda, T_B)] A_d \tau_a(\lambda, T) \tau_0(\lambda, T)}{A_p^2 (M+1)^2} d\lambda.$$

При условии, что расстояние до цели существенно больше расстояния в пространстве изображений  $R_1 \gg R_2$ , коэффициентом  $(M+1)$  – можно пренебречь. Заменяя источник излучения и фон эквивалентными АЧТ, получим уравнение для фототока

$$I_{\text{sig}}(\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_i(\lambda, T) \frac{[M_e(\lambda, T_T) - M_e(\lambda, T_B)] A_d \tau_a(\lambda, T) \tau_0(\lambda, T)}{4A_p^2} d\lambda.$$

На рис. 3 представлена рассчитанная зависимость фототока от температуры объекта наблюдения (цели).

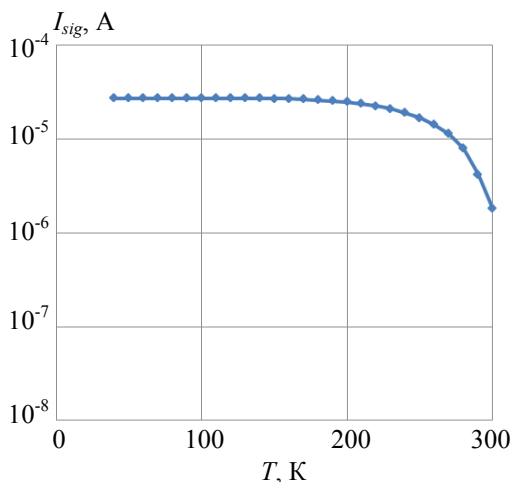


Рис. 3. Зависимость фототока от температуры.

Как представлено на рис. 3 фототок от температуры практически не изменяется, незначительное изменение наблюдается только в области высоких температур.

### Расчет тока шума

В уравнение для тока шума элемента ИК-фотодиодной матрицы  $I_n(\lambda, T, N_A, N_D, \tau)$  входит, как минимум, три составляющих: тепловой шум Джонсона, темновой ток и ток, обусловленный поглощением фотонов фона, который в длинноволновой области спектра, как правило, существенно больше сигнала [5]

$$I_n(\lambda, T, N_A, N_D, \tau) = \sqrt{\frac{4k_b T}{R_d A_d} + 2qJ_d(\lambda, T, N_A, N_D, \tau) + 2q^2 \eta \Phi_b}$$

В данной статье более подробно рассмотрим ток шума матрицы ИК-фотодиодов, обусловленный темновым током. Плотность темнового тока фотодиода задается суммой двух токов: диффузионной в квазинейтральных областях и генерационно-рекомбинационной Шокли-Рида-Холла (ШРХ) в ОПЗ.

Уравнение для плотности тока диффузии, ограниченного рекомбинационными процессами в квазинейтральных областях фотодиода, запишем в виде [6]

$$J_{dif}(\lambda, T) = qB(T) \left[ N_c(\lambda, T) \times N_v(\lambda, T) \right]^{0,5} d \exp\left(\frac{-E_g(\lambda, T)}{kT}\right)$$

где  $q$  – заряд электрона;  $B(T)$  – коэффициент излучательной рекомбинации в  $\text{см}^3 \text{с}^{-1}$ ;  $d$  – толщина квазинейтральной области  $p$ -типа;  $N_v(\lambda, T)$  – эффективная плотность состояний в валентной зоне;  $N_c(\lambda, T)$  –

эффективная плотность состояний в зоне проводимости;  $T$  – температура (К);  $k$  – постоянная Больцмана,  $E_g(\lambda, T)$  – ширина запрещенной зоны.

Уравнение для плотности тока в ОПЗ  $J_{dep}(\lambda, x, T, N_A, N_D, \tau)$  определяется как [7]:

$$J_{dep}(\lambda, x, T, N_A, N_D, \tau) = \frac{qW(\lambda, T, N_A, N_D) n_i(\lambda, T)}{2\tau_{SRH}(\lambda, T, \tau)}$$

где  $n_i(\lambda, T)$  – собственная концентрация носителей заряда;  $\tau_{SRH}(\lambda, T, \tau)$  – время жизни ШРХ.

Ширина обедненного слоя задается уравнением [8]

$$W(\lambda, T, N_A, N_D) = \left( \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r (V_{bi}(\lambda, T, N_A, N_D) \pm V)}{qN_A N_D} \right) \times (N_A + N_D)^{1/2}$$

где  $N_A$  и  $N_D$  – концентрации акцепторов и доноров соответственно;  $V_{bi}(\lambda, T, N_A, N_D) =$

$$= \frac{kT}{q} \times \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2(\lambda, T)}\right) - \text{разность потенциалов в области обеднения и } V - \text{напряжение смещения; } \varepsilon_0, \varepsilon_r - \text{диэлектрические постоянные.}$$

Проведем расчет темнового тока фотодиода на основе CdHgTe с граничной длиной волны  $\lambda_{0,5} = 10$  мкм. Суммарный темновой ток, являющийся суммой выше упомянутых токов, представлен на рис. 4.

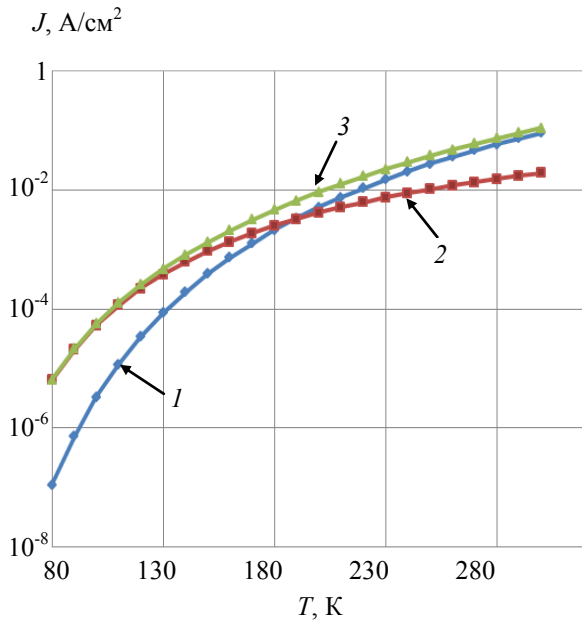


Рис. 4. Зависимость плотности темнового тока от температуры; 1 – ток диффузии ( $J_{diff}$ ); 2 – ток генерации рекомбинации ШРХ в ОПЗ ( $J_{dep}$ ); 3 – суммарный темновой ток ( $J_{sum}$ ).

Плотность суммарного темнового тока в диапазоне температур 80–300 К изменяется от  $10^{-5}$  до  $10^{-1}$  А/см<sup>2</sup>. При температуре  $T \approx 80$  К плотность тока примерно составляет  $10^{-5}$  А/см<sup>2</sup>, что позволяет достигать отношения сигнал/шум  $\sim 500$  отн. ед.

#### Дальность обнаружения

Проведена оценка дальности обнаружения объекта наблюдения с помощью

тепловизионного канала в спектральном диапазоне 8–10 мкм. Параметры расчета следующие: температура объекта наблюдения  $T_0 = 310$  К, температура фона  $T_2 = 300$  К, диаметр входного зрачка  $D_{вх.зр.} = 4,5$  см, отношение «сигнал/шум»  $SNR = 500$  отн. ед., пороговая мощность  $P_{пор} = 10^{-12}$  Вт,  $F/\# = 1/2$ , площадь ФЧЭ  $A_f = 4 \times 10^{-6}$  см<sup>2</sup>, формат МФЧЭ 640×512 элементов, коэффициенты: коэффициент пропускания атмосферы –  $\tau_a(\lambda, T) = 0,2$ , коэффициент пропускания ОС –  $\tau_0(\lambda, T) = 0,5$ , коэффициент использования ФПУ излучения цели  $K(\lambda, T_T) = 2,5$ , коэффициент использования ФПУ излучения фона  $K(\lambda, T_B) = 8,0$ . Остальные коэффициенты приняты равными 1,0. Для учета реального распределения коэффициента пропускания атмосферы использовалась функция распределения фона, измеренная при НКУ.

На рис. 5 представлена характеристика дальности обнаружения объекта наблюдения с температурой  $T = 310$  К в зависимости от длины волны излучения объекта.

Из рис. 5 следует, что максимальная дальность обнаружения объекта при выбранных параметрах ОЭС и ФПУ составила  $\sim 4$  км, на граничной длине волны 10 мкм дальность обнаружения составит  $\sim 3,4$  км.

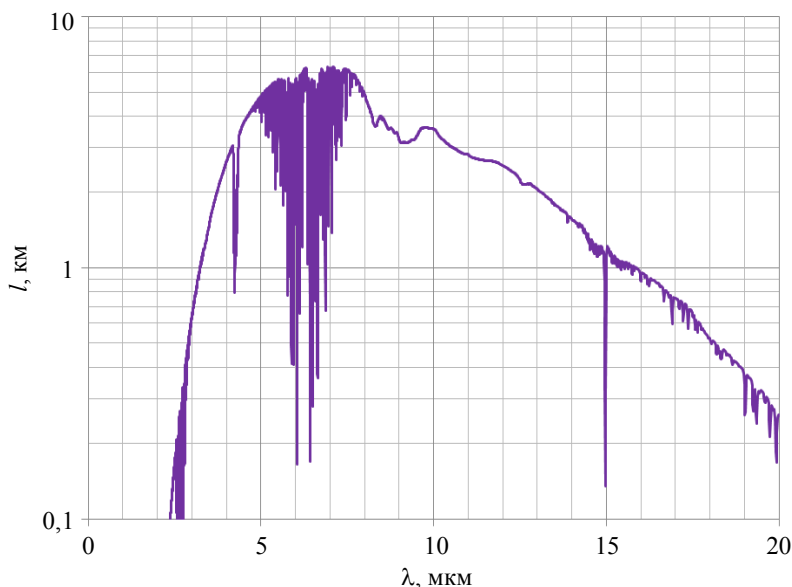


Рис. 5. Дальность обнаружения в зависимости от длины волны излучения объекта.



## Заключение

Из геометрических уравнений эквивалентной оптико-электронной системы выведены с учетом энергетических характеристик ОЭС формула расчета дальности обнаружения и освещенности  $E_i(\lambda, T)$  в плоскости изображения, позволяющие проводить анализ эффективности работы ФПУ. Проведен расчет темнового тока фотодиода на основе CdHgTe с граничной длиной волны 10 мкм. При температуре  $T \approx 80$  К плотность тока составила  $10^{-5}$  А/см<sup>2</sup>, что позволяет достигать отношения сигнал/шум  $\sim 500$  отн. ед. и дальности обнаружения объектов  $\sim 3,4$  км.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Кузнецов П. А., Моцев И. С., Болтарь К. О., Яковлева Н. И. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 383.
2. Тымкул В. М., Тымкул Л. В. Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета: учебное пособие. – Новосибирск: СГГА. 2005.
3. Изнар А. Н., Павлов А. В., Федоров Б. Ф. Оптико-электронные приборы космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1972.
4. Holst G. C. Electro-optical imaging system performance. Second edition. A publication of SPIE. – Bellingham, Washington USA, 2000. P. 61–66.
5. Rogalski A. Infrared detectors. – Taylor and Francis Group, LLC, 2011, p. 202.
6. DeWames R. E., Pellegrino J. G. // Proc. of SPIE. 2012. Vol. 8353. P. 83532P-1-10.
7. Kinch M. A. // Journal of Electronic Materials. 2010. Vol. 39. № 7. P. 1043.
8. Зу С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. / Пер. с англ. – 2-е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1984.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

## Estimation of the maximum distance to observation objects using a staring FPA

*N. I. Iakovleva*

Orion R&P Association, JSC  
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

*Received September 04, 2020*

***Based on the energy characteristics of the optoelectronic system (OES), a model proposed for calculating the maximum distance to the observation object, taking into account the characteristics of the OES, such as: irradiance  $E_i(\lambda, T)$  on a passive receiver surface, aperture, diameter of the entrance pupil, and FPA parameters, such as signal-to-noise ratio, photosensitive element area, format, threshold power. The estimation of the maximum distance to the observation object in the spectral range of 8–10  $\mu\text{m}$ , the maximum value was about 3.4 km.***

***Keywords:*** energy characteristics, optoelectronic system, maximum distance, CdHgTe, FPA, dark current.

## REFERENCES

1. I. D. Burlakov, P. A. Kuznetsov, I. S. Moschev, K. O. Boltar, and N. I. Yakovleva, *Usp. Prikl. Fiz.* **5** (4), 383 (2017).
2. V. M. Tymkul and L. V. Tymkul, *Optoelectronic devices and systems. Theory and methods of energy calculation: textbook* (SGGA, Novosibirsk, 2005).
3. A. N. Iznar, A. V. Pavlov, and B. F. Fedorov, *Optoelectronic devices of spacecraft* (Mashinostroyeniye, Moscow, 1972).
4. G. C. Holst, *Electro-optical imaging system performance. Second edition* (Bellingham, Washington USA, A publication of SPIE, 2000), pp. 61–66.
5. A. Rogalski, *Infrared detectors* (Taylor and Francis Group, LLC, 2011), p. 202.
6. R. E. DeWames and J. G. Pellegrino, *Proc. of SPIE* **8353**, 83532P-1-10 (2012).
7. M. A. Kinch, *Journal of Electronic Materials* **39** (7), 1043 (2010).
8. S. Zi, *Physics of semiconductor devices: In 2 books*. (New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, USA, 1984).