

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 681.78:004.421

Алгоритм и программа расчета ОЭС с матричным фотоприемником в ИК-диапазоне

И.В. Знаменский¹, А.А. Тихомиров^{2*}

¹ НПК «Системы прецизионного приборостроения»
111024, Москва, ул. Авиамоторная, 53

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

Поступила в редакцию 26.06.2020 г.

Представлен алгоритм энергетического расчета пороговой освещенности входного зрачка оптико-электронной системы (ОЭС) в диапазоне 0,9 ÷ 5,3 мкм. Получены зависимость времени накопления τ_{ac} на матричном фотоприемнике от скорости счета сигнальных фотонов n_s , а также зависимость n_s от отношения сигнал/шум. Произведен расчет освещенности входного зрачка объектива ОЭС от космического объекта сферической формы, подсвеченного Солнцем. Разработана программа для энергетического расчета ОЭС в различных участках ИК-диапазона и представлен ее интерфейс.

Ключевые слова: оптико-электронная система, матричный фотоприемник, ИК-диапазон, пороговая освещенность, время накопления, отношение сигнал-шум, алгоритм и программа расчета; optoelectronic system, photodetector array, IR range, threshold illumination, time of accumulation, signal-to-noise ratio, calculation algorithm and program.

Введение

В настоящее время в оптико-электронных системах (ОЭС) наземных комплексов обзора космического пространства и слежения за космическими объектами (КО) широко применяются приборы, работающие в ИК-диапазоне, поскольку угловое разрешение в нем выше, чем в радиодиапазоне. У ИК-диапазона есть и другие преимущества: 1) пониженный уровень фона солнечной радиации; 2) наличие «око» прозрачности атмосферы; 3) возможность применения серийно выпускаемых фотоприемных матриц с большим числом элементов, малыми собственными шумами и высокой квантовой эффективностью. В [1] обсуждаются состояние и перспективы развития ОЭС. В [2] представлен энергетический расчет облучения объекта сферической формы прожектором с отражением рассеянного назад излучения. При подсвечивании такого объекта Солнцем угол между последним и ОЭС в направлении на объект больше 0°, что не учитывается в [2].

В статье рассмотрены алгоритм и программа для определения пороговой освещенности ОЭС с матричным фотоприемником в спектральном диапазоне 0,9 ÷ 5,3 мкм. Проведена оценка различных участков этого диапазона с целью определения минимальной пороговой освещенности на входном зрачке приемной системы ОЭС. Произведен расчет отношения сигнал/шум (с/ш) при регистрации сигналов от КО сферической формы, подсвеченного Солнцем.

* Игорь Всеволодович Знаменский (06-21@npk-spp.ru); Александр Алексеевич Тихомиров (tikhomirov@imces.ru).

Основные математические соотношения для определения пороговой освещенности на входном зрачке

Особенностью предлагаемого энергетического расчета является нахождение допустимого времени накопления τ_{ac} на фотоприемной матрице с последующим определением соответствующей скорости счета сигнальных фотонов при заданном отношении с/ш.

Скорость счета фотонов n_b , с⁻¹, на пикселе (элементе матрицы), связанная с излучением атмосферы в спектральном диапазоне $\Delta\lambda$, имеет вид [2–4]:

$$n_b = L_\lambda \Delta\lambda (a/F_{ob})^2 T_{opt} S_{ob} / E_q, \quad (1)$$

где L_λ – спектральная яркость дневного неба, Вт × см⁻² · мкм⁻¹ · ср⁻¹; $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ – полоса спектрального диапазона, мкм; a – размер пикселя, см; F_{ob} – фокусное расстояние приемного объектива, см; $T_{opt} = T_{ob} \cdot T_{IF}$; T_{opt} , T_{ob} и T_{IF} – коэффициенты пропускания приемной оптики, объектива и интерференционного фильтра (ИФ); $S_{ob} = \pi(D_{ob}/2)^2$ – площадь приемного объектива диаметром D_{ob} , см²; $E_q = hc/\lambda_0 \cdot 10^{-6}$ Дж – энергия кванта; $h = 6,6256 \times 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света; $\lambda_0 = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$ – средняя длина волны, мкм.

В [3] представлены графики зависимости L_λ для дискретных углов места: 0; 7,2; 30°. Графики были

оцифрованы, также была проведена сплайн-аппроксимация [6] для любого значения угла. При углах больше 30° уровень фона атмосферы уменьшается. Поэтому в этом случае в расчетах значение уровня фона берется равным его значению при 30°.

Если ИК-объектив специально не охлаждается, то он будет источником фона и его можно рассматривать как абсолютно черное тело (АЧТ) с температурой T . При этом будем считать, что полевая диафрагма установлена в охлаждаемом матричном приемнике.

Закон излучения АЧТ для плотности испускания фотонов $F(\lambda)$, $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$, имеет вид [2–4, 7]:

$$F(\lambda) = (C_3/\lambda^4)/[\exp(C_2/\lambda T) - 1]. \quad (2)$$

Здесь $C_3 = 1,88365 \cdot 10^{23} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^3$; $C_2 = 1,43879 \times 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}$; T – температура АЧТ, К.

Скорость счета фотонов n_r , с^{-1} , от объектива в заданном спектральном диапазоне [1–3]:

$$n_r = S_p K_{\text{ем}} (D_{\text{об}}/2F_{\text{об}})^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где $S_p = a^2$ – площадь пикселя, см^2 ; $K_{\text{ем}} = 1 - T_{\text{об}}$ – коэффициент излучения объектива.

Максимальное время наблюдения $\tau_{\text{ас}}$ ограничено емкостью насыщения пикселя C_i :

$$\tau_{\text{ас}} \leq (C_i K_z - N_{\text{ге}})/[\eta(n_b + n_r + n_s) + n_t], \quad (4)$$

где $K_z = 0,7 \div 0,8$ – коэффициент запаса; $N_{\text{ге}}$ – число электронов шума считывания; η – квантовая эффективность матрицы; n_s – скорость счета сигнальных фотонов на элементе матрицы; n_t – скорость счета темновых электронов; $n_t = i_t/e$, i_t – темновой ток матрицы, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона.

Используя зависимость (4) $\tau_{\text{ас}} = f(n_s)$, на рис. 1 построен график для матрицы Falcon (фирма SCD, Израиль) и объектива с относительным отверстием $D_{\text{об}}/F_{\text{об}} = 1:2,875$ в полосе фона $3,6 \div 4,9 \text{ мкм}$.

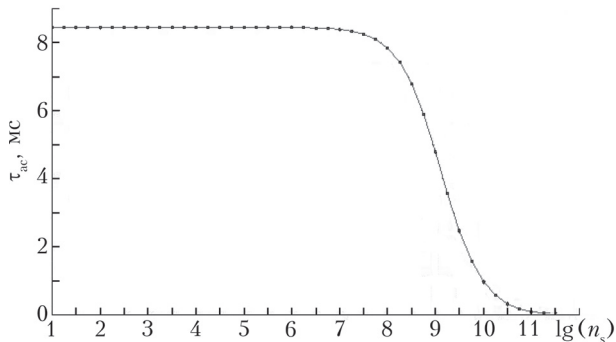


Рис. 1. Зависимость времени накопления сигнала от скорости счета сигнальных фотонов

Отношение с/ш по мощности на выходе матрицы определим в виде

$$Q_p = (\eta n_s \tau_{\text{ас}})^2 / [\eta F \tau_{\text{ас}} (n_b + n_r + n_s) + n_t \tau_{\text{ас}} + (N_{\text{ге}})^2]. \quad (5)$$

Скорость счета сигнальных фотонов находится из выражения (5):

$$n_s = (F Q_p / 2 \eta \tau_{\text{ас}}) (1 + A), \quad (6)$$

где $A = \{1 + (4/F Q_p) [\eta \tau_{\text{ас}} (n_b + n_r) + n_t \tau_{\text{ас}} + (N_{\text{ге}})^2]\}^{1/2}$; $F = 1 + 2$ – коэффициент увеличения шума.

На основании соотношения (6) построен график зависимости отношения с/ш по мощности от скорости счета сигнальных фотонов n_s (рис. 2). Расчет сделан для тех же исходных данных, которые использованы для рис. 1.

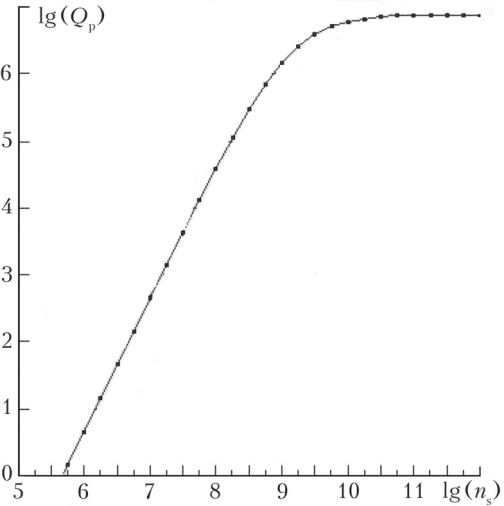


Рис. 2. Зависимость отношения с/ш по мощности от скорости счета сигнальных фотонов

Из рис. 2 видно, что при $n_s = 10^{10}$ и более отношение с/ш практически не меняется из-за уменьшения времени наблюдения в соответствии с выражением (4).

Рассмотрим распределение поля непосредственно на фоточувствительной поверхности матрицы. Для монохроматической плоской волны, нормальной к поверхности объектива, дифракционное изображение поля в фокальной плоскости в зависимости от радиального расстояния ρ можно описать функцией Бесселя 1-го рода, 1-го порядка [5]: $f(X) = |2J_1(X)/X|$, где $X = \pi D_{\text{об}} \rho / (\lambda F_{\text{об}})$; $\rho = (U^2 + V^2)^{1/2}$; U, V – координаты поля в фокальной плоскости. При этом размер пикселя должен быть сопряжен с главным лепестком функции $f(X)$ (рис. 3), т.е.

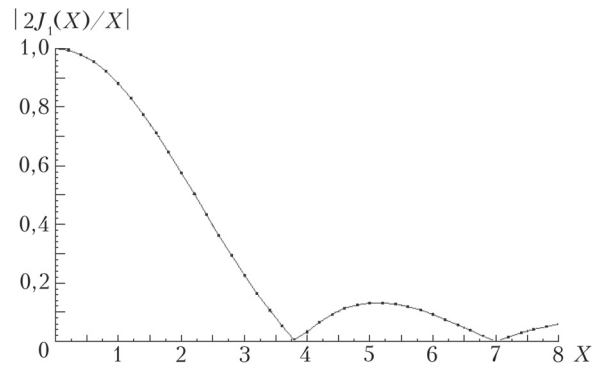


Рис. 3. Зависимость дифракционной картины от радиального расстояния

0,837 падающей энергии должно попадать на пиксель, с которого считывается сигнал. Но даже в этом случае теряется часть энергии принимаемого сигнала. Эта потеря учитывается коэффициентом χ . Для выбранных характеристик объектива и матрицы $\chi = 0,837$.

Используя правило сложения дисперсий случайных величин [8], находим среднеквадратическое отклонение числа шумовых фотоэлектронов, поступающих на пиксель матрицы:

$$\sigma_{\Sigma} = [\eta F \tau_{ac}(n_b + n_r + n_s) + n_t \tau_{ac} + (N_{re})^2]^{1/2}. \quad (7)$$

Мощность шума P_n , Вт, приведенная к пикселю матрицы, при которой $Q_p = 1$,

$$P_n = \sigma_{\Sigma} E_q / \eta \tau_{ac}. \quad (8)$$

Выражение для величины пороговой освещенности объектива E_{th} , Вт/см², имеет вид

$$E_{th} = P_n / T_{opt} \chi \pi (D_{ob}/2)^2. \quad (9)$$

Если считать, что $Q_i = 10$ – минимальное отношение с/ш по току, при котором обнаруживается сигнал, то можно определить значение минимальной освещенности

$$E_{min} = P_{s\ min} / [T_{opt} \chi \pi (D_{ob}/2)^2], \quad (10)$$

где

$$P_{s\ min} = E_q n_{s\ min}; \quad (11)$$

$n_{s\ min}$ – скорость счета сигнальных фотонов, определяется из выражения (6) при $Q_p = 100$.

Для выбора спектрального диапазона нужно учитывать окна прозрачности в атмосфере. На рис. 4 представлена зависимость коэффициента пропускания атмосферы от длины волны излучения в диапазоне 0,9 ÷ 5,3 мкм. График рассчитан и построен с помощью разработанной программы (см. далее рис. 6).

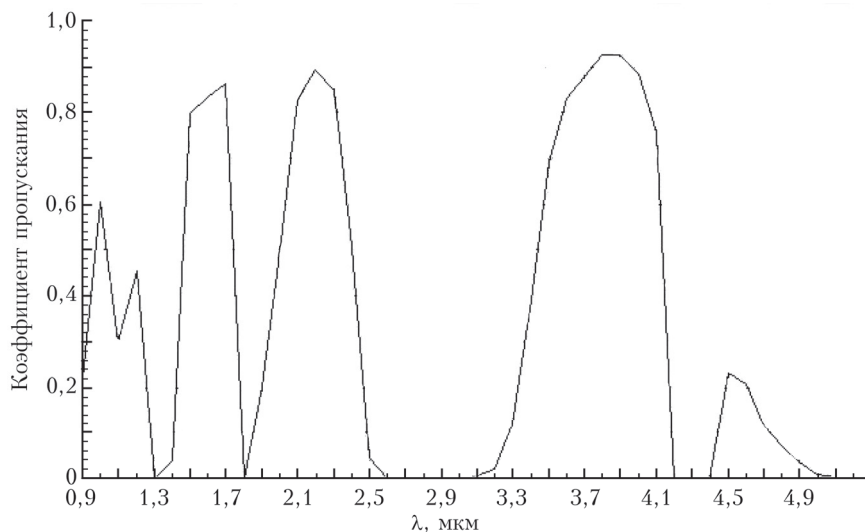


Рис. 4. Зависимость коэффициента пропускания атмосферы от длины волны излучения

При выборе спектрального диапазона нужно учитывать и окна прозрачности атмосферы, и характеристики серийно выпускаемых матриц, содержащих встроенный ИФ. Матрица Falcon имеет встроенный заводской ИФ в диапазоне 3,6–4,9 мкм. Охлаждаемый ИФ – не сменный, так как он установлен в герметичный корпус. Фирма Selex ES изготавливает аналогичные по характеристикам матрицы. При этом поддиапазон ИФ может быть выбран по спецзаказу. Для максимизации отношения с/ш важен уровень внешнего фона.

На рис. 5 представлена зависимость спектральной яркости фона дневного неба при угле места 30° в диапазоне 0,9 ÷ 5,3 мкм.

Для сравнительного анализа спектральных диапазонов были выбраны следующие участки: 0,9 ÷ 1,7; 1,4 ÷ 1,7; 1,8 ÷ 2,7; 1,0 ÷ 3,0; 3,2 ÷ 4,2; 3,6 ÷ 4,9; 4,5 ÷ 5,3; 3,0 ÷ 5,3 мкм. При этом исходные данные для всех участков выбраны одинаковыми:

- параметры матрицы Falcon, работающей в интервале 3,0–5,3 мкм (для участков ближнего ИК-диапазона используем аналогичные параметры);
- объектив ($D_{ob} = 40$ см, $D_{ob}/F_{ob} = 1:2,875$ и $T_{ob} = 0,7$);
- угол места наблюдаемого объекта 30°;
- параметры атмосферы: метеорологическая дальность видимости 20 км, температура воздуха 22° С, относительная влажность 80%;
- максимальное время накопления 20 мс.

При расчете ОЭС ИК-диапазона применяются три ограничения:

- число электронов накопления, ограниченное величиной емкости накопления пикселя;
- максимальное время накопления, ограниченное длительностью кадра;
- минимальное время накопления, ограниченное параметром матрицы, $\tau_{min} = 10^{-5}$ с.

Пороговая освещенность на входном зрачке минимальна в диапазонах 3,2 ÷ 4,2 и 1,8 ÷ 2,7 мкм, немного больше в интервале 1,4 ÷ 1,7 мкм.

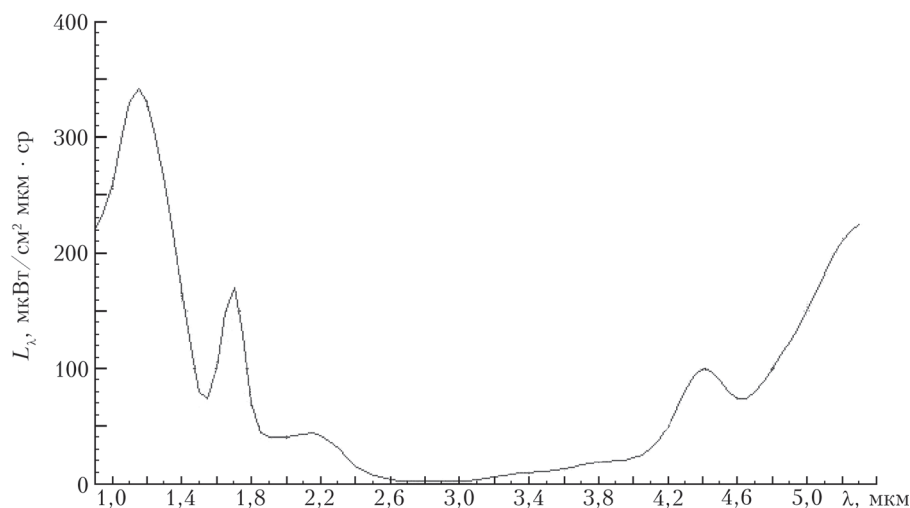


Рис. 5. Зависимость спектральной яркости фона неба при угле места 30°

Результаты расчета представлены в табл. 1. Они не учитывают спектральное пропускание атмосферы. Минимальная освещенность сигналом входного зрачка без учета поглощения в атмосфере (при $Q_p = 100$ в диапазоне 3,2 ÷ 4,2 мкм) составляет $2,78 \times 10^{-16}$ Вт/см²; в диапазонах 1,4 ÷ 1,7 и 1,8 ÷ 2,7 мкм – $4,48 \cdot 10^{-16}$ и $5,0 \cdot 10^{-16}$ Вт/см².

Из табл. 1 видно, что пропускание атмосферы в диапазоне 3,2 ÷ 4,2 мкм в ~5,5 раз лучше, чем в интервале 4,5 ÷ 5,3 мкм. Минимальная освещен-

ность сигналом на входном зрачке в диапазоне 3,2 ÷ 4,2 мкм меньше приблизительно в 3 раза, чем в интервале 4,5 ÷ 5,3 мкм. В итоге при одинаковом вне атмосферы входном сигнале для обоих диапазонов отношение с/ш в диапазоне 3,2 ÷ 4,2 мкм в 16,4 раза выше, чем диапазоне 4,5 ÷ 5,3 мкм при учете пропускания атмосферы. Но окончательный вывод можно сделать только с учетом спектрального распределения сигнала, так как окончательной оценкой является максимум отношения с/ш.

Таблица 1

Результаты расчета ИК-системы

Параметр	$\lambda_1 \div \lambda_2$, мкм							
	0,9 ÷ 1,7	1,4 ÷ 1,7	1,8 ÷ 2,7	1,0 ÷ 3,0	3,2 ÷ 4,2	3,6 ÷ 4,9	4,5 ÷ 5,3	3,0 ÷ 5,3
Освещенность, создаваемая фоном на пикселе $\times 10^{14}$, Вт/см ²	8,66	1,86	1,34	10,05	2,02	7,69	10,47	15,59
Мощность фона на пикселе $\times 10^{11}$, Вт	6,64	1,42	1,00	7,33	1,39	5,26	7,11	10,59
Пороговая мощность на входном зрачке $\times 10^{14}$, Вт	7,94	4,34	3,10	8,10	2,48	5,77	7,46	10,90
Время накопления, мс	17,93	20,0	20,0	12,00	20,0	8,43	5,69	4,60
Мощность сигнала на входном зрачке ($Q_p = 100$) $\times 10^{13}$, Вт	7,93	4,35	3,11	8,10	2,49	5,78	7,48	10,93
Пороговое число ф.-э. сигнала	3980	2890	2899	3972	3531	3968	3964	3962
Число ф.-э. фона $\times 10^{-6}$	5,45	1,56	1,58	6,20	3,61	6,64	6,98	7,12
Мощность сигнала на пикселе ($Q_p = 100$) $\times 10^{13}$, Вт	4,84	2,66	1,84	4,70	1,36	3,15	4,04	5,91
Среднее пропускание атмосферы	0,54	0,77	0,50	0,44	0,71	0,49	0,13	0,35
Пороговая освещенность на входном зрачке $\times 10^{17}$, Вт/см ²	6,32	3,45	2,47	6,45	1,98	4,59	5,94	8,67
Мин. освещен. сигналом на входном зрачке ($Q_p = 100$) $\times 10^{16}$, Вт/см ²	6,31	3,46	2,47	6,45	1,98	4,60	5,95	8,70

Примечание. ф.-э. – фотоэлектрон.

Излучение КО состоит из двух составляющих: 1) собственное тепловое излучение, 2) отраженное от КО излучение Солнца.

Собственное тепловое излучение КО $R(T, \Delta\lambda)$, Вт/см², с температурой T рассчитывается для АЧТ в заданном диапазоне $\Delta\lambda = (\lambda_2 - \lambda_1)$ по формуле [2]:

$$R(T, \Delta\lambda) = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (C_1/\lambda^5) [\exp(C_2/\lambda T) - 1]^{-1} d\lambda, \quad (12)$$

где $\varepsilon = 0,3$ — коэффициент излучения КО; $C_1 = 3,7415 \cdot 10^4$ Вт · см⁻² · мкм⁴; $C_2 = 1,43879 \cdot 10^4$ мкм · К.

Далее полагаем, что КО расположен на высоте 120 ÷ 150 км. Тогда его температура $T = 300$ К.

В табл. 2 представлен расчет энергетической светимости АЧТ с коэффициентом излучения 0,3 для $T = 300$ К.

Таблица 2

Собственное излучение КО	
$\lambda_1 \div \lambda_2$, мкм	$R(T, \Delta\lambda)$, Вт/см ²
0,9 ÷ 1,7	$2,975 \cdot 10^{-11}$
1,4 ÷ 1,7	$2,96 \cdot 10^{-11}$
1,8 ÷ 2,7	$2,73 \cdot 10^{-7}$
1,0 ÷ 3,0	$1,2 \cdot 10^{-6}$
3,2 ÷ 4,2	$4,287 \cdot 10^{-5}$
3,6 ÷ 4,9	$1,43 \cdot 10^{-4}$
4,5 ÷ 5,3	$1,8 \cdot 10^{-4}$
3,0 ÷ 5,3	$2,6 \cdot 10^{-4}$

Наибольшее значение $R(T, \Delta\lambda)$ достигается в диапазонах 3,6 ÷ 4,9; 4,5 ÷ 5,3 и 3,0 ÷ 5,3 мкм, но такого уровня сигнала недостаточно для его регистрации.

Сигнал от КО сферической формы

Рассмотрим освещенность входного зрачка прибора от КО сферической формы, освещенного Солнцем, в различных спектральных диапазонах. При расчете в качестве Солнца используем АЧТ при $T = 6000$ К. Далее в качестве КО рассматривается космический аппарат, летающий на высоте 400 км от Земли, радиусом 1 м и коэффициентом отражения 0,3.

Находим яркость Солнца, Вт · м⁻² · ср⁻¹:

$$B_S(T, \Delta\lambda) = R(T, \Delta\lambda) \cdot 10^4/\pi. \quad (13)$$

Затем определим яркость КО, Вт · м⁻² · ср⁻¹:

$$B_{so}(T, \Delta\lambda) = B_S(T, \Delta\lambda) \rho K_s (r_s/R_{S-so})^2, \quad (14)$$

где $r_s = 6,9599 \cdot 10^8$ м — радиус Солнца; K_s — коэффициент, равный отношению видимой с ОЭС площади КО, засвеченной Солнцем, к полной площади КО, засвеченной Солнцем; R_{S-so} — расстояние от Солнца до КО, м. Коэффициент K_s зависит от угла γ между направлениями Солнце — КО и КО — ОЭС, определяется в виде [9]:

$$K_s = (2/3\pi)[\sin \gamma + (\pi - \gamma)\cos \gamma];$$

$K_s = 0,5$ при $\gamma = 45^\circ$.

Освещенность входного зрачка, Вт/см²:

$$E_{in-pu} = 10^{-4} \pi B_{so}(T, \Delta\lambda) \tau_{atm}(\lambda) (r_{so}/D_{E-so})^2, \quad (15)$$

где r_{so} — радиус КО; D_{E-so} — расстояние Земля — КО, м; $\tau_{atm}(\lambda)$ — средний коэффициент пропускания атмосферы в спектральном диапазоне $\Delta\lambda$.

Результаты расчета по формулам (12–15) представлены в табл. 3.

В соответствии с табл. 3 минимальный сигнал зафиксирован на входном зрачке ОЭС в диапазоне 4,5 ÷ 5,3 мкм, максимальный — в интервале 0,9 ÷ 1,7 мкм, чуть меньше — в интервале 1,0 ÷ 3,0 мкм.

Характеристики обнаружения

Для расчета характеристик обнаружения используем критерий Неймана—Пирсона. Вероятность ложной тревоги при аппроксимации пуассоновского распределения нормальным гауссовым имеет вид

$$P_{er-d} = (1/\sigma\sqrt{2\pi}) \int_{N_{th}}^{\infty} \exp[-(N - N_n)^2/2\sigma^2] dN, \quad (16)$$

где N_n — среднее число шумовых ф.-э.; N_{th} — пороговое число ф.-э.; σ^2 — дисперсия шума при отсутствии сигнала:

$$\sigma^2 = F(N_b + N_r) + N_t + (N_{re})^2, \quad (17)$$

Таблица 3

Освещенность входного зрачка прибора от излучения КО, подсвеченного Солнцем, в различных спектральных диапазонах

Параметр	$\lambda_1 \div \lambda_2$, мкм							
	0,9 ÷ 1,7	1,4 ÷ 1,7	1,8 ÷ 2,7	1,0 ÷ 3,0	3,2 ÷ 4,2	3,6 ÷ 4,9	4,5 ÷ 5,3	3,0 ÷ 5,3
$R(T = 6000 \text{ К})$, Вт/см ²	$17,474 \cdot 10^2$	$3,452 \cdot 10^2$	$3,372 \cdot 10^2$	$17,858 \cdot 10^2$	$0,622 \cdot 10^2$	$0,495 \cdot 10^2$	$0,171 \cdot 10^2$	$1,116 \cdot 10^2$
E_{th} , Вт/см ²	$6,32 \cdot 10^{-17}$	$3,45 \cdot 10^{-17}$	$2,47 \cdot 10^{-17}$	$6,45 \cdot 10^{-17}$	$1,98 \cdot 10^{-17}$	$4,59 \cdot 10^{-17}$	$5,94 \cdot 10^{-17}$	$8,67 \cdot 10^{-17}$
E_{in-pu} , Вт/см ²	$31,87 \cdot 10^{-15}$	$9,02 \cdot 10^{-15}$	$5,65 \cdot 10^{-15}$	$26,59 \cdot 10^{-15}$	$1,5 \cdot 10^{-15}$	$0,813 \cdot 10^{-15}$	$0,074 \cdot 10^{-15}$	$1,30 \cdot 10^{-15}$
Q_i	504,3	261,4	228,7	412,2	75,8	17,7	1,25	15,0

где N_b , N_r , N_t – фотоэлектроны внешнего фона неба, объектива и темнового тока.

После преобразования выражение (16) можно записать в виде интеграла вероятности

$$P_{er-d} = 1 - \Phi(N_{th-s}\sigma), \quad (18)$$

где $N_{th-s} = N_{th} - N_n$. Интеграл вероятности [6] имеет вид

$$\Phi(U) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^U \exp(-X^2/2) dX. \quad (19)$$

Вероятность правильного обнаружения определится как

$$P_{cor-d} = (1/\sigma_\Sigma \sqrt{2\pi}) \int_{N_{th}}^{\infty} \exp[-(N - N_n - N_s)^2 / 2\sigma_\Sigma^2] dN. \quad (20)$$

После преобразования выражение (20) можно записать в виде интеграла вероятности (18) с учетом того, что $\Phi(U) = 1 - \Phi(-U)$:

$$P_{cor-d} = \Phi[(N_s - N_{th-s})/\sigma_\Sigma]. \quad (21)$$

Приравняв N_{th-s} из выражений (18) и (21), получим

$$\Phi^{-1}[1 - P_{er-d}] = (N_s/\sigma) - (\sigma_\Sigma/\sigma)\Phi^{-1}[P_{cor-d}].$$

При $N_s \ll N_n$ (т.е. прием происходит в режиме ограничения фоном) $\sigma_\Sigma/\sigma \approx 1$ и $Q_i = N_s/\sigma$ – отношение с/ш по току, и окончательно получим

$$\Phi^{-1}[P_{cor-d}] + \Phi^{-1}[1 - P_{er-d}] = Q_i. \quad (22)$$

Используя выражения (22) и (19), можно найти P_{cor-d} , если задать Q_i и P_{er-d} .

Если задать $Q_i = 7$ и $P_{er-d} = 10^{-7}$, то $P_{cor-d} = 0,96392$, а при $P_{er-d} = 10^{-6}$ $P_{cor-d} = 0,98758$. Принимаем, что минимальное отношение с/ш равно 7.

Если использовать временное осреднение кадров, регистрируемых ОЭС, то, как показано в [10], отношение с/ш возрастает в корень квадратный из числа кадров. При большой угловой скорости движения КО число кадров осреднения будет мало из-за смазывания изображения, но осреднение возможно использовать в послесенсной обработке.

Интерфейс программы

Интерфейс разработанной программы расчета инфракрасной системы (РИКС) показан на рис. 6. Входными для программы являются параметры матрицы, приемного объектива, цели и атмосферы. С помощью программы вводятся исходные данные для расчета, которые можно вывести как на экран монитора, так и бумажный носитель. По команде «Вычислить» проводится расчет. По команде «Исх. данные» можно посмотреть их на мониторе или распечатать по команде «Печать».

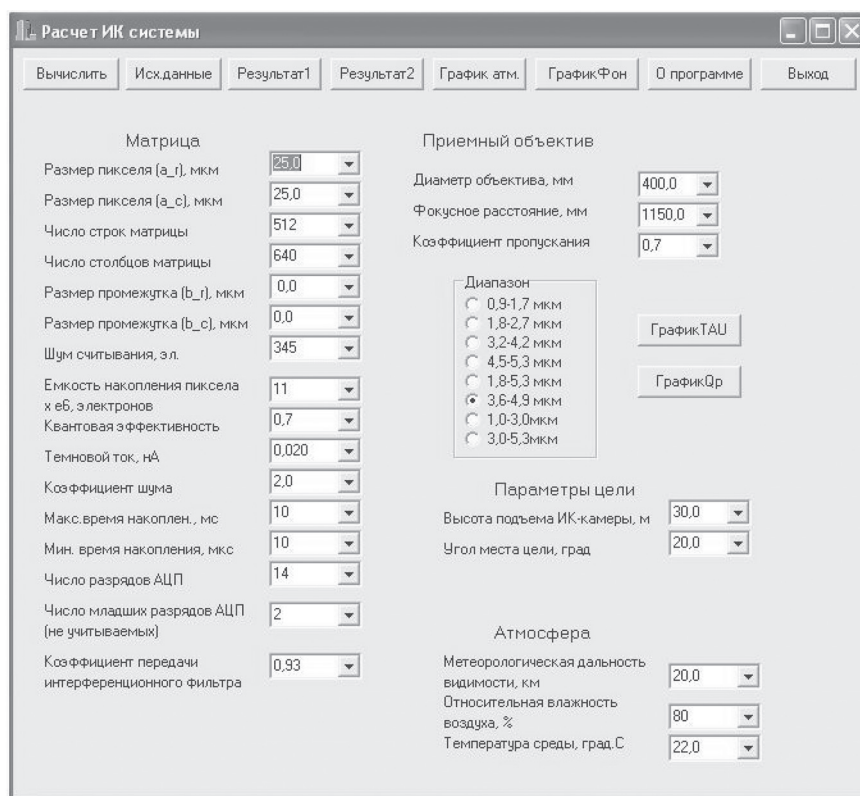


Рис. 6. Окно программы для расчета ИК-системы

При использовании команды «Результат 1» на экране отобразятся: спектральная яркость фона; освещенность, создаваемая фоном на пиксель; мощность фона на пиксель; пороговая мощность сигнала (при отношении $c/\text{ш} = 1$) при засветке одного пикселя и при делении сигнала на 4 пикселя; мощность сигнала при отношении $c/\text{ш}$ по мощности, равного 100 и 10000.

При использовании команды «Результат 2» на экране отобразятся: скорость отсчета фоновых + тепловых ф.-э.; скорость отсчета сигнальных ф.-э.; мощность сигнала при выходном отношении $c/\text{ш}$ по току, равном 10; пороговая освещенность на входном зрачке; минимальная мощность сигнала; минимальная освещенность на входном зрачке при отношении $c/\text{ш}$ по мощности, равном 100.

«Результат 1» и «Результат 2» можно распечатать. По команде «График Фон» на мониторе отображается зависимость спектральной яркости фона неба от длины волны излучения при выбранном значении угла места.

По команде «График атм.» на мониторе отображается зависимость спектрального коэффициента пропускания атмосферы от длины волны излучения. Спектральный коэффициент пропускания атмосферы рассчитан в диапазоне $0,9 \div 5,3$ мкм с применением алгоритма, представленного в [6], и экспериментальных таблиц [3] с использованием сплайн-аппроксимации.

Графики фона и пропускания атмосферы можно распечатать. При использовании команды «График ТАУ» на мониторе отобразится зависимость времени накопления от скорости отсчетов сигнальных фотонов (см. рис. 1), а по команде «График Q_p » на мониторе отобразится зависимость отношения $c/\text{ш}$ по мощности от скорости отсчета сигнальных фотонов (см. рис. 2).

Заключение

1. Представлены соотношения и алгоритм расчета пороговой освещенности на входном зрачке ОЭС ИК-диапазона.

2. Проведен анализ различных спектральных участков в интервале $0,9 \div 5,3$ мкм для максимизации отношения $c/\text{ш}$ на входном зрачке ОЭС.

3. Определено минимальное отношение $c/\text{ш}$, при котором по критерию Неймана–Пирсона для заданной вероятности ложной тревоги находится вероятность правильного обнаружения.

4. Разработана программа РИКС для расчета параметров ОЭС ИК-диапазона слежения за космическими объектами с матричным фотоприемником.

1. Тарасов В.В., Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Современные проблемы оптоэлектроники. М.: МИИГАиК, 2014. 82 с.
2. Павлов А.В. Опτικο-электронные приборы (Основы теории и расчета). М.: Энергия, 1974. 359 с.
3. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Советское радио, 1978. 400 с.
4. Хадсон Р. Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972. 535 с.
5. Гальярди Р.М., Карп III. Оптическая связь. М.: Связь, 1978. 424 с.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1984. 832 с.
7. Белоусов Ю.И., Постников Е.С. Инфракрасная фотоника. Часть 1. Особенности формирования и распространения ИК излучения. СПб: Университет ИТМО, 2019. 82 с.
8. Suzuki R., Tokoku C., Ichikawa T., Uchimoto Y.K., Konishi M., Yoshikawa T., Tanaka I., Yamada T., Omata K., Nishimura T. Multi-object infrared camera and spectrograph (MOIRCS) for the Subaru Telescope I. Imaging // Publ. Astron. Soc. Japan. 2008. V. 60. P. 1347–1362.
9. Тымкул В.М., Тымкул Л.В., Кудряшов К.В. Отражение оптического излучения поверхностью объемных тел с направленно-рассеивающим покрытием // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 10. С. 58–63.
10. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Родин В.Г., Солякин И.В., Стариков С.Н., Черемхин П.А., Шапкирина Е.А. Увеличение отношения сигнал/шум за счет пространственного усреднения при регистрации изображений // Вестн. РУДН. Сер. Математика. Информатика. Физика. 2012. № 4. С. 122–136.

I.V. Znamenskii, A.A. Tikhomirov. Algorithm and software for calculation of an IR optoelectronic system with a photodetector array.

An algorithm for energy calculation of the threshold illumination of the entrance pupil of an optoelectronic system (OES) in the range $0.9\text{--}5.3$ μm is presented. The dependence of the time of accumulation τ_{ac} on the photodetector array on the rate of counting signal photons n_s , as well as the dependence of n_s on the signal-to-noise ratio are derived. The illumination of the entrance pupil of the OES lens from a spherical space object illuminated by the Sun is calculated. The program is developed and its interface is presented for the energy calculation of the OES in various sections of the considered IR range.