

Использование приближенных формул расчёта величины потока излучения от «протяженного» абсолютно черного тела

А. В. Полесский, И. В. Агафонов, Е. А. Лопатина, Е. А. Худолеева

Статья посвящена получению формул, которые позволяют проводить приближенный расчет величины потока излучения, падающего на каждый элемент фотоприемных устройств (ФПУ). Применение оптимизированных формул дает возможность сократить машинное время, затрачиваемое для расчетов величины падающего потока при проведении измерений инфракрасных (ИК) ФПУ. Также был проведен анализ оценки дополнительной погрешности, вносимой приближенной формулой вычисления величины падающего потока при измерении параметров ФПУ с «холодной» диафрагмой круглой формы.

Ключевые слова: фотоприемное устройство второго поколения, погрешность измерения, поток излучения, холодная диафрагма.

Ссылка: Полесский А. В., Агафонов И. В., Лопатина Е. А., Худолеева Е. А. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 3. С. 224.

Reference: A. V. Polesskiy, I. V. Agafonov, E. A. Lopatina, and E. A. Khudoleeva, Usp. Prikl. Fiz. 8 (3), 224 (2020).

Введение

При измерении ФПУ ИК-диапазона с «холодной» диафрагмой в качестве источника излучения, как правило, используется модель абсолютно черного тела (АЧТ). Использование модели АЧТ как источника обусловлено тем, что она довольно близка к идеальному тепловому источнику излучения, для которого известна зависимости потока излучения и его спектрального состава от температуры [1].

У ФПУ первого поколения средневолнового и длинноволнового ИК-диапазона размер фоточувствительной зоны небольшой и он меньше отверстия «холодной» диафрагмы, поэтому для их контроля используются АЧТ с малым размером излучающей поверхности.

Для ФПУ второго поколения средневолнового и длинноволнового ИК-диапазона из-за большого размера фоточувствительной зоны (порядка 12,3 мм) и малого отверстия в «холодной» диафрагме (порядка 4–8 мм) применение АЧТ с малым размером излучающей поверхности привело бы к тому, что часть фоточувствительных элементов (ФЧЭ) не засвечивалась, поскольку «холодная» диафрагма выступает в роли экрана. Поэтому для обеспечения измерения параметров фоточувствительных элементов используют «протяженные» модели АЧТ [2], которые обеспечивают засветку всех фоточувствительных элементов во всем апертурном угле «холодной» диафрагмы ФПУ.

В ряде работ [3, 4] было выведено

Полесский Алексей Викторович¹, гл. метролог, к.т.н.

Агафонов Иван Васильевич¹, техник.

Лопатина Екатерина Алексеевна², с.н.с.

Худолеева Елена Алексеевна², с.н.с.

¹ АО «НПО «Орион».

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

E-mail: orion@orion-ir.ru, av22236@bk.ru

² ФГБУ «Главный научный метрологический центр»

Минобороны России.

Россия, 141006, Московская область, г. Мытищи,

ул. Комарова, 13.

E-mail: e.a.lopatina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 мая 2020 г.

аналитическое выражение для определения ФЧЭ (1) величины потока излучения, падающего на

$$\Phi_{ij} = \frac{M}{\pi} \cdot dQ_2 \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{\rho \cdot l^2}{\left[l^2 + \rho \cdot \cos \varphi - x^2 + \rho \cdot \sin \varphi - y^2 \right]^2} d\rho \cdot d\varphi, \quad (1)$$

где x, y – координаты ФЧЭ с индексами i и j ; M – светимость АЧТ в заданном спектральном диапазоне; l – расстояние от диафрагмы до матрицы; dQ_2 – площадь фоточувствительного элемента; R – радиус диафрагмы; ρ и φ – радиус и угол интегрирования в полярных координатах в плоскости диафрагмы.

Однако практическое использование данной формулы является затруднительным, из-за сложного аналитического выражения, вычисление которого для каждого фоточувствительного элемента занимает значительную величину машинного времени.

Целями данного исследования было получение формул, позволяющих проводить приближенный расчет величины потока излучения, падающего на каждый элемент ФПУ с «холодной» диафрагмой круглой формы, и оценка дополнительной погрешности, вносимой этой приближенной формулой вычисления.

Описание расчетной модели

В ряде исследований [3, 4] было показано, что в случае полного перекрытия апертурного угла ФПУ поверхностью АЧТ, облученность ФЧЭ не зависит от расположения АЧТ и при расчете величины потока можно представить, что отверстие в «холодной» диафрагме является АЧТ с заданной температурой.

Для проведения расчетов разобьём «холодную» диафрагму ФПУ на набор элементарных излучателей, каждый из которых излучает как АЧТ с температурой T (рис. 1).

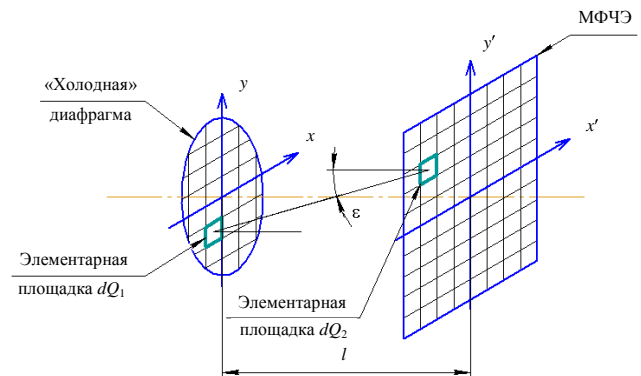


Рис. 1. Схема разбиения «холодной» диафрагмы ФПУ на элементарные излучатели.

Для расчета величины падающего потока воспользуемся формулами фотометрии, приведенными в [5]. Для элементарного излучателя, излучающего согласно закону Ламберта, величина потока $d^2\Phi$ падающего на элементарную площадку dQ_2 выражается формулой (2)

$$d^2\Phi = L \cdot dQ_1 \cdot d\Omega_1 \cdot \cos(\varepsilon), \quad (2)$$

где $d^2\Phi$ – величина потока, падающего на элементарную площадку dQ_2 ; L – яркость источника; dQ_1 – площадь элементарного излучателя; $d\Omega_1$ – величина телесного угла, соответствующего элементарной площадке dQ_2 ;

ε – угол между нормалью и направлением на площадку.

Для случая, когда элементарный излучатель и элементарная площадка ориентированы в одной плоскости формула распределение освещенности по поверхности будет иметь вид (3)

$$E = E_0 \cdot \cos^4(\varepsilon), \quad (3)$$

где E_0 – освещённость в центре (когда излучатель и площадка расположены на одной оси); E – освещенность в точке, которая расположена под углом ε ; ε – угол между

нормалью и направлением на площадку.

Умножив правую и левую часть выражения на dQ_2 , можно получить выражение (4)

$$d\Phi = d\Phi_0 \cdot \cos^4(\varepsilon), \quad (4)$$

где $d\Phi_0$ – величина потока в центре (когда

$$\Phi = \sum_n d\Phi_0 \cdot \cos^4(\varepsilon) = \sum_n \frac{M}{\pi} \cdot dQ_1 \cdot \frac{dQ_2}{l^2} \cdot \cos^4(\varepsilon), \quad (5)$$

где Φ_0 – величина потока в центре; M – светимость АЧТ в заданном спектральном диапазоне; dQ_1 – площадь элементарного излучателя; dQ_2 – площадь фоточувствительного элемента; l – высота «холодной» диафрагмы; ε – угол между нормалью и направлением на площадку.

Поскольку величины M , dQ_1 , dQ_2 , l являются константами, то можно получить (6)

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{M}{\pi} \cdot \frac{dQ_2}{l^2} \cdot \sum_n dQ_1 \cdot \cos^4(\varepsilon) = \\ &= \frac{M}{\pi} \cdot Q_1 \cdot \frac{dQ_2}{l^2} \cdot \frac{\sum_n \cos^4(\varepsilon)}{n} = \\ &= \Phi_{\text{хд}} \cdot \frac{\sum_n \cos^4(\varepsilon)}{n}, \end{aligned} \quad (6)$$

где Φ – величина потока в центре; M – светимость АЧТ в заданном спектральном диапазоне; dQ_1 – площадь элементарного излучателя; Q_1 – площадь «холодной» диафрагмы; dQ_2 – площадь фоточувствительного элемента; l – высота «холодной» диафрагмы; ε – угол между нормалью и направлением на площадку; $\Phi_{\text{хд}}$ – величина потока, падающего на центральный элемент ФПУ от отверстия «холодной» диафрагмы, являющегося АЧТ.

Оценка дополнительной погрешности, вносимой приближенной формулой вычисления величины падающего потока

Для проведения оценки необходимо задаться реальными значениями диаметра и высоты «холодной» диафрагмы, а также

излучатель и площадка расположены на одной оси); $d\Phi$ – величина потока в точке, которая расположена под углом ε ; ε – угол между нормалью и направлением на площадку.

В этом случае поток, падающий на любой элемент ФПУ можно выразить следующим образом (5, 6):

размера матрицы фоточувствительных элементов.

На основе данных производителя объективов «RP Optical Lab Ltd.» о положении холодной диафрагмы и размере матрицы ФЧЭ рассмотрим наиболее распространенные виды ФПУ:

1) Размер матрицы 9,6×7,68, диафрагма высотой 20,5 мм и диаметром 5,1 мм (ФПУ № 1) [6].

2) Размер матрицы 9,6×7,68, диафрагма высотой 19,8 мм и диаметром 10,2 мм (ФПУ № 2) [7].

3) Размер матрицы 19,2×15,36, диафрагма высотой 28 мм и диаметром 9,5 мм (ФПУ № 3) [8].

Приближенное вычисление величины потока для круглой «холодной» диафрагмы [5] проводится следующим образом:

– величина потока излучения для центрального элемента рассчитывается по формуле (7);

– потока излучения для элемента находящегося не на оси рассчитывается по формуле (8).

$$\begin{aligned} \Phi_0 &= \frac{M}{\pi} \cdot Q_1 \cdot \sin^2(\sigma) = \\ &= \frac{M}{\pi} \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{D_{\text{хд}}}{2} \right)^2 \right) \cdot \sin^2(\sigma) \equiv \Phi_{\text{хд}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где Φ_0 – величина потока на центральном элементе; M – светимость АЧТ в заданном спектральном диапазоне; Q_1 – площадь «холодной» диафрагмы; σ – плоский угол соответствующий телесному углу центрального элемента ФПУ; $D_{\text{хд}}$ – диаметр

«холодной» диафрагмы; $\Phi_{\text{хд}}$ – величина потока, падающего на центральный элемент ФПУ отверстия «холодной» диафрагмы, являющегося АЧТ.

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \cos^4(\epsilon), \quad (8)$$

где Φ – величина потока элемента; Φ_0 – величина потока попадающего на рассматриваемый элемент ФПУ; ϵ – угол между нормалью отверстия в «холодной» диафрагме и направлением на площадку.

При расчетах использовалась сетка на холодной диафрагме размером 201×201 элемент. Такая сетка вносит погрешность в расчеты менее 0,003 %, что является пренебрежительно малой величиной.

Результаты сравнительных расчетов величин потока для ФПУ № 1 приведены в таблице 1. За единицу принят поток, рассчитанный по формулам (7, 8) для центрального элемента ФПУ № 1.

Таблица 1

Результаты сравнительных расчетов величин потока для ФПУ № 1 по обычным и приближенным формулам

Координата элемента ФПУ*, мм	Относительное значение величины потока по формулам (5, 6)	Относительное значение величины потока по приближенным формулам (7, 8)	Дополнительно вносимая погрешность, %
0	1,015	1	1,544
1	1,011	0,995	1,529
2	0,996	0,982	1,486
3	0,973	0,96	1,417
4	0,942	0,93	1,325
5	0,905	0,894	1,213
6	0,862	0,852	1,087
7	0,814	0,807	0,952

* За «0» принят центр ФПУ.

Результаты сравнительных расчетов величин потока для ФПУ № 2 приведены в табл. 2. За

единицу принят поток, рассчитанный по формулам (7, 8) для центрального элемента ФПУ № 2.

Таблица 2

Результаты сравнительных расчетов величин потока для ФПУ № 2 по обычным и приближенным формулам

Координата элемента ФПУ*, мм	Относительное значение величины потока по формулам (5, 6)	Относительное значение величины потока по приближенным формулам (7, 8)	Дополнительно вносимая погрешность, %
0	1,066	1	6,631
1	1,061	0,996	6,566
2	1,045	0,982	6,373
3	1,019	0,961	6,063
4	0,984	0,932	5,65
5	0,942	0,896	5,154
6	0,894	0,855	4,596
7	0,843	0,81	3,998

* За «0» принят центр ФПУ.

Результаты сравнительных расчетов величин потока для ФПУ № 3 приведены в табл. 3. За единицу принят поток, рассчитанный по

формулам (7, 8) для центрального элемента ФПУ № 3.

Таблица 3

Результаты сравнительных расчетов величин потока для ФПУ № 3

по обычным и приближенным формулам

Координата элемента ФПУ*, мм	Относительное значение величины потока по формулам (5, 6)	Относительное значение величины потока по приближенным формулам (7, 8)	Дополнительно вносимая погрешность, %
0	1,029	1	2,874
2	1,018	0,99	2,817
4	0,988	0,962	2,651
6	0,94	0,918	2,392
8	0,879	0,862	2,065
10	0,809	0,796	1,696
12	0,734	0,725	1,313
14	0,658	0,652	0,936

* За «0» принят центр ФПУ.

Величины дополнительной ошибки измерения среднего значения потока и его дисперсии, приведены в таблице 4.

Полученные в табл. 4 результаты показывают, что использование формул (7) и (8) при вычислении среднего значения вольтовой чувствительности, порогового потока и удельной обнаружительной способности приведет к занижению их значений на величину ~ 1,5 %

при измерении ФПУ с «холодной» диафрагмой 1:4, на ~ 6 % для ФПУ с «холодной» диафрагмой 1:2 и на ~ 22 % для ФПУ с «холодной» диафрагмой 1:1.

Основная причина появления ошибок, приведенных в таблице 4 – отсутствие учета среднего значения суммы косинусов из формулы (6), и ошибка тем больше, чем больше апертурный угол ФПУ.

Таблица 4

Результаты вычисления дополнительной ошибки измерения среднего значения потока

Величина	Ошибка измерения при использовании приближенных формул		
	ФПУ № 1	ФПУ № 2	ФПУ № 3
Среднее значение потока излучения	+1,4 % *	+5,9 %	+2,3 %
СКО потока излучения	0,0009	0,004	0,03

* Полученное по формулам (7) и (8) значение больше фактического.

С целью получения аналитического выражения значения поправки для формулы (7), в случае круглой «холодной» диафрагмы, проведем интегрирование в полярных координатах по ее поверхности (9):

$$\begin{aligned}
 \Phi &= \frac{M}{\pi} \cdot \frac{dQ_2}{l^2} \cdot \left(2 \cdot \pi \int_0^{\frac{D_{хд}}{2}} r \cdot \cos^4(\varepsilon) dr \right) = \\
 &= \frac{M}{\pi} \cdot \frac{dQ_2}{l^2} \cdot \left(2 \cdot \pi \int_0^{\frac{D_{хд}}{2}} r \cdot \frac{l}{\sqrt{l^2 + \left(\frac{D_{хд}}{2}\right)^2}} dr \right) = \quad (9) \\
 &= \frac{M}{\pi} \cdot \frac{dQ_2}{l^2} \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot \left[\frac{l^2}{2} - \frac{l^4}{2 \cdot \left(l^2 + \left(\frac{D_{хд}}{2}\right)^2 \right)} \right] \right),
 \end{aligned}$$

где Φ – величина потока в центре; M –

светимость АЧТ в заданном спектральном диапазоне; dQ_2 – площадь фоточувствительного элемента; l – высота «холодной» диафрагмы; $D_{хд}$ – диаметр «холодной» диафрагмы; ε – угол между нормалью и направлением на площадку.

Анализ формулы (9) показывает, что для приближенного метода расчета необходимо вместо фактической площади «холодной» диафрагмы Q_1 в формуле (7) использовать «эквивалентную» площадь холодной диафрагмы $Q_{1_экв}$ (10), в которой учтена поправка на косинус в четвертой степени. Это означает что облученность в плоскости ФПУ с «холодной» диафрагмой площадью Q_1 , рассчитанная по точным формулам с использованием интегрирования, равна облученности ФПУ с площадью $Q_{1_экв}$, рассчитанной по приближенным формулам

для точечного источника

$$Q_{1_экв} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{l^2}{2} - \frac{l^4}{2 \cdot \left(l^2 + \left(\frac{D_{хд}}{2} \right)^2 \right)} \right), \quad (10)$$

где $Q_{1_экв}$ – «эквивалентная» площадь холодной диафрагмы; l – высота «холодной» диафрагмы; $D_{хд}$ – диаметр «холодной» диафрагмы.

Затраты машинного времени на проведение расчета величины потока излучения по формуле (1) и формулам (7), (8) и (10) приведены в таблице 5. Расчеты проводились в однопоточном режиме на процессоре Core i5 8400 на языке программирования C Sharp, точность расчета интеграла была задана не менее 10^{-6} .

Таблица 5

Затраты машинного времени на проведение расчета величины потока излучения

Формат ФПУ	Время выполнения расчетов, с	
	По формуле (1)	По формулам (7), (8) и (10)
640×512	81,84	0,05
1280×2014	299,74	0,21

Заключение

В результате исследования были получены формулы, которые позволяют проводить приближенный расчет величины потока излучения, падающего на каждый элемент ФПУ при «холодной» диафрагме в форме круга. Применение формул (7) с поправкой (10) и (8) позволяют сократить машинное время, затрачиваемое на расчеты примерно в 100 раз для матриц формата 640×512 и 400 раз для матриц формата 1280×1024 по сравнению с выражением (1), доведя его до единиц секунд.

Внесение поправки позволило уменьшить ошибку измерения среднего значения потока излучения для ФПУ № 1 до 0,2 %, для ФПУ № 2 – до 0,7 %, для ФПУ № 3 – до 0,6 %, и для ФПУ с «холодной» диафрагмой 1:1 до 2 %. Полученные величины дополнительной погрешности являются приемлемыми.

Анализ таблиц 1–3 показывает значительное падение величины потока излучения от центра к краю ФПУ, что

позволяет предположить о наличии зависимости значения ЭШРТ элементов от их расположения.

Вместе с тем отдельного изучения требуют: исследование процесса измерения ЭШРТ ФПУ и влияния неоднородности АЧТ на величину потока излучения и ЭШРТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. – М.: Мир, 1988.
2. Полесский А. В. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 350.
3. Патрашин А. И., Козлов К. В., Ковшов В. С., Никонов А. В., Стрельцов В. А. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 349.
4. Филачев А. М., Патрашин А. И., Бурлаков И. Д.,

Болтарь К. О., Шабаров В. В. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 3. С. 272.

5. Заказнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. И. Теория оптических систем. – М.: Машиностроение, 1992.

6. RP Optical Lab Ltd. [Электронный ресурс]. URL: <http://rp-optical-lab.com/products/odem-series-lens/> (дата обращения: 10.04.2020).

7. RP Optical Lab Ltd. [Электронный ресурс]. URL: <http://rp-optical-lab.com/products/cactus-cooled/> (дата обращения: 10.04.2020).

8. RP Optical Lab Ltd. [Электронный ресурс]. URL: <http://rp-optical-lab.com/products/garnet-hd/> (дата обращения: 10.04.2020).

PACS: 06.20.Dk, 02.60.–x, 85.60.Gz

Using approximate formulas for calculating the radiation flux from an extended Absolute Black Body

A. V. Polesskiy¹, I. V. Agafonov¹, E. A. Lopatina², and E. A. Khudoleeva²

¹ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

² FSBI «RF MD MHC»
13 Komarova st., Mytishchi, Moscow region, 141006, Russia

Received May 20, 2020

The article is devoted to obtain the formulas allow approximate calculations of radiation flux incident on each element of the IR FPA. Obtained formulas allow reducing machine calculating time and could be used for IR FPA measurement. Analysis of the additional error estimation was carry out by an approximate formula for calculating the value of the radiation flux for IR FPA with circular «cold-stop».

Keywords: second generation FPA, the measurement error, calculation of radiation flux, cold-stop.

REFERENCES

1. W. Gossorg, *Infrared thermography* (Mir, Moscow, 1988).
2. A. V. Polesskiy, Usp. Prikl. Fiz. **5** (4), 350 (2017).
3. A. I. Patrashin, K. V. Kozlov, V. I. Kovshov, A. V. Nikonov, and V. A. Strelshov, Usp. Prikl. Fiz. **6** (4), 349 (2018).
4. A. M. Filashev, A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, K. O. Boltar, and V. V. Shabarov, Usp. Prikl. Fiz. **4** (3), 272 (2016).
5. N. P. Zakaznov, S. I. Kirushin, and V. I. Kuzichev, *Theory of Optical Systems* (Mashinostroenie, Moscow, 1992) [in Russian].
6. RP Optical Lab Ltd. URL: <http://rp-optical-lab.com/products/odem-series-lens/> (10.04.2020).
7. RP Optical Lab Ltd. URL: <http://rp-optical-lab.com/products/cactus-cooled/> (10.04.2020).
8. RP Optical Lab Ltd. URL: <http://rp-optical-lab.com/products/garnet-hd/> (10.04.2020).

