

УДК 621.383.4/5

Метод расчета фоновой облученности МФПУ с холодной диафрагмой произвольной формы

А. И. Патрашин

Представлен метод расчета и доказано, что фоновая облученность в заданной точке матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ), расположенной в холодном экране с диафрагмой произвольной формы, равна фоновой облученности от плоского источника, расположенного в плоскости холодной диафрагмы, имеющего распределение температуры по площади диафрагмы, определяемое проекцией источника фоновой облученности сквозь диафрагму в заданную точку МФЧЭ. Показано, что фоновая облученность в заданной точке МФЧЭ прямо пропорциональна интегралу по площади диафрагмы, содержащему координаты заданной точки, или коэффициенту пропускания диафрагмы.

PACS: 85.60. Gz

Ключевые слова: расчет, диафрагма, облученность, температура, плоский источник.

Патрашин Александр Иванович, ведущий научный сотрудник.
ФГУП «НПО "Орион"».

Россия, 111402, Москва, ул. Косинская, 9.
Тел. (495) 374-48-71. E-mail: orion@orion-ir.ru;
apatrashin@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2009 г.

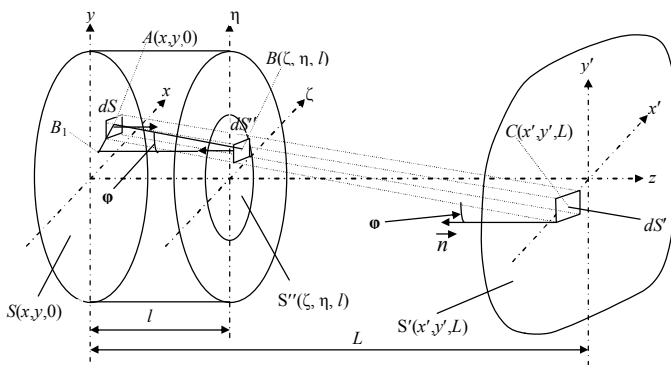
Введение

Для оценки качества матричных фотоприемных устройств (МФПУ) необходимо знать величину входного воздействия (излучения) на фотоприемник. Она необходима для оценки эффективности

инфракрасных (ИК) МФПУ. В этих устройствах входное излучение содержит фоновую компоненту. Облученность МФЧЭ фоновым излучением многократно превосходит облученность от полезного сигнала. Поэтому величину облученности МФЧЭ необходимо знать и уметь регулировать. В ИК МФПУ эта регулировка осуществляется с помощью холодного экрана с диафрагмой заданной формы. Весьма просто фоновая облученность оценивается при круглой форме диафрагмы [1]. Однако в литературе отсутствуют данные о ее расчете для диафрагм с формой, отличной от круга. Ниже представлен метод, позволяющий рассчитать уровень фоновой облученности МФЧЭ при холодной диафрагме любой формы.

Исходные данные

Фоновое излучение рассматривается как излучение абсолютно черного тела (АЧТ) с ламбертовским распределением излучения [2]. Геометрия задачи показана на рисунке.



Геометрия задачи расчета фоновой облученности

Плоскость МФЧЭ $S(x, y)$ расположена внутри полости с диафрагмой произвольной формы, расположенной в плоскости $S''(\xi, \eta)$, параллельной плоскости $S(x, y)$ и отстоит от нее на расстоянии l . Внутренняя поверхность полости является неизлучающей и неотражающей. Холодный экран МФПУ удовлетворяет данному условию, так как внутренняя поверхность его покрыта антиотражающим покрытием, а температура много ниже средней температуры фонового излучения.

Бесконечная плоскость $S'(x', y')$, параллельная плоскости $S(x, y)$ и расположенная снаружи полости на расстоянии L от плоскости S , имеет ламбертовское распределение излучения и распределение температуры $T(x', y')$ по ее поверхности.

Наша задача — рассчитать облученность в произвольной точке плоскости $S(x, y)$.

Эквивалентность элементарных излучателей

Спроектируем бесконечно малый элемент dS' плоскости $S'(x', y')$ с температурой T_0 на бесконечно малый элемент dS плоскости $S(x, y)$. Проектирование проведем вдоль линии, проходящей сквозь диафрагму и соединяющую точку $A(x, y)$, в которой необходимо рассчитать облученность, и точку $C(x', y')$ излучающей плоскости $S'(x', y')$.

Мощность излучения в спектральном интервале $d\lambda$, попадающая на элемент плоскости dS от элемента излучающей поверхности площадью dS' с температурой T_0 , определяется следующим соотношением:

$$dW' = \frac{1}{\pi} M_{2\pi}(\lambda, T_0) \frac{\cos^2 \varphi}{AC^2} dS' dS,$$

где AC — длина прямой, соединяющей точку $C(x', y')$ в плоскости S' и точку $A(x, y)$ в плоскости S , см;

φ — угол между нормалью к плоскости $S'(x', y', L)$ и прямой AC ;

$M_{2\pi}(\lambda, T)$ — спектральная энергетическая светимость АЧТ [2], Вт·см⁻²·мкм⁻¹.

Мощность излучения в спектральном интервале $d\lambda$, попадающая на площадку dS искомой плоскости от элемента плоского излучателя dS'' , расположенного в плоскости диафрагмы и являющегося промежуточной проекцией элемента плоского излучателя dS' , с той же температурой T_0 определяется соотношением

$$dW'' = \frac{1}{\pi} M_{2\pi}(\lambda, T_0) \frac{\cos^2 \varphi}{AB^2} dS'' dS, \quad (1)$$

где AB — длина прямой, соединяющей точку $B(\xi, \eta)$ в плоскости S'' и точку $A(x, y)$ в плоскости S , см.

При указанном проектировании

$$dS'' = dS' \frac{l^2}{L^2} = dS' \frac{AB^2}{AC^2}.$$

Подставляя выражение для dS'' в (1), получим

$$dW'' = \frac{1}{\pi} M_{2\pi}(\lambda, T) \frac{\cos^2 \varphi}{AB^2} dS \frac{AB^2}{AC^2} dS' = dW'. \quad (2)$$

Выражение (2) показывает, что световая мощность, падающая на бесконечно малый элемент dS плоскости $S(x, y)$, от элемента dS' бесконечной излучающей поверхности $S'(x', y')$ равна мощности от бесконечно малого элемента dS'' , расположенного в плоскости диафрагмы и являющегося проекцией излучателя dS' в направлении элемента dS .

Расчет облученности

Суммируя излучатели dS'' по площади диафрагмы, получим, что облученность бесконечно

малого элемента dS плоскости $S(x, y)$ от бесконечной излучающей плоскости $S'(x', y')$ равна облученности, создаваемой плоским излучателем $S''(\xi, \eta)$, расположенным в плоскости диафрагмы. При этом излучатель является проекцией излучающей поверхности $S'(x', y')$ вдоль линий, проходящих сквозь диафрагму и соединяющих элементы ее поверхности с бесконечно малым облучаемым элементом dS плоскости $S(x, y)$, а температура каждого элемента этого излучателя равна температуре соответствующего проецируемого элемента поверхности S' .

Тогда спектральная плотность интегральной фоновой облученности элемента фоточувствительного поля приемника с координатами x и y представляет собой интеграл по площади диафрагмы от элементарных источников dS'' , расположенных в ее плоскости. При этом каждый источник представляет собой проекцию соответствующего элементарного источника, находящегося за диафрагмой в плоскости S' .

$$E(x, y, l, \lambda, \dot{O}) = \frac{1}{dS} \times \iint_{S''} dW'' = \frac{1}{\pi} \int_{2\pi} (\lambda, \dot{O}) \iint_{S''} \frac{\cos^2 \varphi(x, y, l, \xi, \eta)}{AB^2} dS'' \quad (3)$$

Для нахождения $\cos \varphi$ рассмотрим прямоугольный треугольник ABB_1 на рисунке

$$AB^2 = BB_1^2 + AB_1^2$$

или

$$AB^2 = l^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 \quad (4)$$

Теперь найдем $\cos^2 \varphi$.

$$\cos^2 \varphi = \frac{BB_1^2}{AB^2} = \frac{l^2}{l^2 + (\xi - a_x)^2 + (\eta - a_y)^2} \quad (5)$$

Подставим (4) и (5) в (3) и получим спектральную плотность фоновой облученности фоточувствительного элемента матрицы, расположенной в неизлучающем и неотражающем экране, от фонового излучения с температурой T :

$$W(x, y, l) = \frac{l^2}{\pi} M_{2\pi}(\lambda, T) \iint_{S''} \frac{dS''}{[l^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]^2},$$

где ξ, η — координаты в плоскости диафрагмы;
 x, y — координаты точки A в плоскости приемника;

l — расстояние от плоскости диафрагмы до плоскости приемника;

$M_{2\pi}$ — спектральная плотность мощности или спектральная плотность потока фотонов в телесном углу 2π , выражаемые законом Планка.

Полезные следствия

Выражение для интегральной фоновой облученности, полученное интегрированием в спектральном диапазоне $[\lambda_1, \lambda_2]$, будет иметь следующий вид:

$$E(x, y, l) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \dot{I}_{2\pi}(\lambda, \dot{O}) d\lambda \iint_{S''} \frac{l^2 dS''}{\pi [l^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]^2}$$

или

$$E(x, y, l) = K_{trans}(x, y, l) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{2\pi}(\lambda, T) d\lambda, \quad (6)$$

где $K_{trans}(x, y, l)$ — коэффициент пропускания фонового излучения холодной диафрагмой.

Интеграл в выражении (6) описывает облученность единичной площадки в углу 2π и имеет либо размерность $Вт \cdot см^{-2}$,

$$P(T, \lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{ch}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]} d\lambda, \quad (7)$$

либо размерность фотон $\cdot см^{-2} \cdot с^{-1}$

$$N(T, \lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c}{\lambda^4 \left[\exp\left(\frac{ch}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]} d\lambda, \quad (8)$$

где $c = 2,998 \cdot 10^{10} см \cdot с^{-1}$ — скорость света;

$k_B = 1,381 \cdot 10^{-23} Вт \cdot с \cdot К^{-1}$ — постоянная Больцмана;

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} Вт \cdot с^2$ — постоянная Планка.

Функции, стоящие под знаком интеграла в выражениях (7) и (8), выражают спектральную плотность излучения АЧТ, описанную в законе Планка [3], обозначенную в выражении (6) как $M_{2\pi}$.

Выражения для $K_{trans}(x, y, l)$ в прямоугольных и полярных координатах имеют следующий вид:

$$K_{trans}(x, y, l) = \iint_{S''} \frac{l^2 d\xi d\eta}{\pi [l^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]^2},$$

$$K_{trans}(x, y, l) = \iint \frac{l^2 r dr d\varphi}{\pi [l^2 + (r \cos \varphi - x)^2 + (r \sin \varphi - y)^2]^2}.$$

Применение соответствующего выражения определяется аналитическим видом описания формы диафрагмы. Коэффициент пропускания является безразмерной величиной.

Использование $K_{trans}(x, y, l)$ позволяет рассчитывать зависимость фоновой облученности по площади МФЧЭ, зависимость облученности от расстояния между МФЧЭ и диафрагмой и величину паразитной облученности, исходящей не из объектива. Примеры расчета фоновой облученно-

сти МФЧЭ для некоторых форм диафрагм рассмотрены в работе [4]. Знание $K_{trans}(x, y, l)$ совершенно необходимо также и для расчета параметров МФПУ [5].

Заключение

Описан метод расчета фоновой облученности МФЧЭ, расположенной в экране с неотражающей и неизлучающей внутренней поверхностью и диафрагмой произвольной формы.

Доказано, что фоновая облученность в заданной точке МФЧЭ равна облученности, создаваемой плоским АЧТ, расположенным в плоскости диафрагмы, с температурой, равной температуре фонового излучения.

Показано, что фоновая облученность является произведением фоновой облученности в углу 2π ,

описанной в законе Планка, на коэффициент пропускания диафрагмы $K_{trans}(x, y, l)$.

Выведены выражения для расчета $K_{trans}(x, y, l)$ в зависимости от аналитического вида записи формы диафрагмы (прямоугольные или полярные координаты).

Литература

- 1 Dereniak E. L., Borman G. D. Infrared Detectors and Systems. — N.Y.: John Wiley&Sons, Inc., 1996.
- 2 Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. — М.: Физматкнига, 2005.
- 3 Курбатов Л. Н. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. — М.: МФТИ, 1999.
- 4 Патрашин А. И. Фоновые облученности ИК МФПУ с холодными диафрагмами заданных типов//XX Международ. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения: Тез. докл. А03. — М.: ФГУП «НПО "Орион"», 2008.
- 5 Патрашин А. И. Метод расчета фотоэлектрических параметров ИК МФПУ//Там же. Тез. докл. А25.

Background irradiance calculation method for IR array with cold diaphragm of arbitrary shape

A. I. Patrashin

Orion Research-and-Production Association, 9 Kosinskaya str., Moscow, 111402, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru; apatrashin@rambler.ru

The calculation method of background irradiance of IR array with cold diaphragm of the arbitrary shape is presented. It is proved, that background irradiance in the given point of IR array, located in the cold screen with diaphragm of the arbitrary shape, is equal to background irradiance from the flat source of radiation located in plane of cold diaphragm, and this flat source has the distribution of temperature on the area of the diaphragm, defined by projection of background radiation source through diaphragm in the given point of IR array. It is shown that the background irradiance in the given point of IR array is directly proportional to integral on the area of the diaphragm, containing coordinates of the given point.

PACS: 85.60. Gz

Keywords: calculation, diaphragm, exposure, seat source.

Bibliography — 5 references.

Received 18 November 2009

* * *