

УДК 621.383

Аналитическая модель облученности многоспектральных матричных фотоприемных устройств

И. Д. Бурлаков, К. В. Козлов, А. И. Патрашин, В. Н. Соляков, А. М. Филачев

Разработана аналитическая модель облученности фотослоя сканирующих и смотрящих матричных фотоприемных устройств (МФПУ). Плоскость фотослоя МФПУ в общем случае представляет собой любой заданный набор матриц фоточувствительных элементов (МФЧЭ) с различными спектральными характеристиками и расположением. Конструкция оптического тракта также представляет собой набор заданных плоскостей с любыми заданными окнами (диафрагмами), светопоглощающими экранами и светофильтрами, согласованными с заданным объективом и МФЧЭ. Учтены такие паразитные компоненты, как облученность от объектива, от всех светопоглощающих экранов и внешнего корпуса, от окон, с учетом их спектральных коэффициентов пропускания. Рассмотрены случаи с однородным и неоднородным внешним фоном, с изображением объектов с низкими и высокими пространственными частотами вплоть до точечных изображений.

PACS: 42.79.Sz, 85.30.-Z

Ключевые слова: аналитическая модель, сканирующее МФПУ, смотрящее МФПУ, ФЧЭ.

Введение

При проектировании инфракрасных матричных фотоприемных устройств (ИК МФПУ) необходимо производить оценку основных фотоэлектрических параметров каждого из вариантов изделия. Данная процедура позволяет оптимизировать конструкцию и подобрать оптимальные параметры оптико-электронного тракта прибора. Теоретическая оценка фотоэлектрических параметров необходима и при испытаниях опытных образцов для выявления и устранения потенциальных неисправностей изделия и средств измерений.

Фундаментальным (неустраняемым) фактором, ограничивающим пороговые характеристики МФПУ, является дробовой шум, равный \sqrt{n} , где n — количество фотонов, регистрируемых фоточувствительным элементом (ФЧЭ) за единицу времени. Источниками падающего на фоточувствительный элемент излучения являются объекты наблюдаемой сцены и элементы самой конструкции МФПУ. Облученность фотослоя может быть рассчитана по классическим методикам [1—5] в ряде простейших задач. Универсальным и эффективным инструментом для расчета параметров ИК МФПУ со стандартной оптической схемой, с учетом однородного фона и реальной облученности фотослоя, является аналитическая модель, представленная в работе [6]. Основные физически значимые результаты, полученные с помощью данной аналитической модели, представлены в работах [7, 8]. Существует ряд известных программ зарубежного производства, реализующих оптическое моделирование объективов, например, Zemax. Кроме того, существуют иностранные работы, описывающие расчет фотоэлектрических параметров МФПУ [9—12]. Однако эти работы, предназначенные для простейших конструкций МФПУ, не могут дать возможности рассчитать подробное распределение интегральной облученности в плоскости фотослоя МФПУ со сложной оптической схемой. Для таких МФПУ, включающих произвольный набор МФЧЭ

Бурлаков Игорь Дмитриевич, зам. генерального директора по инновациям и науке¹.

Козлов Кирилл Владимирович, инженер 1 кат.¹, аспирант².

Патрашин Александр Иванович, ведущий научный сотрудник¹.

Соляков Владимир Николаевич, главный научный сотрудник¹, профессор².

Филачев Анатолий Михайлович, генеральный директор¹.

¹АО «НПО «Орион».

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

E-mail: orion@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, г. Долгопрудный МО, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 8 июля 2016 г.

© Бурлаков И. Д., Козлов К. В., Патрашин А. И., Соляков В. Н., Филачев А. М., 2016

с различными спектральными характеристиками и расположением, набор заданных плоскостей с произвольными окнами (диафрагмами), светопоглощающими экранами и светофильтрами, согласованными с заданным объективом, подобные работы отсутствуют.

Для решения указанной задачи требуется разработка аналитической модели для точного расчета распределения облученности в плоскости фотослоя таких сложных приборов, как многоспектральные крупноформатные МФПУ, имеющие сложную конструкцию.

Было поставлена задача разработать вычислительный комплекс для расчета параметров сканирующих и смотрящих фотоприемных устройств с полностью отечественным программным обеспечением (ПО) для его использования как в закрытых, так и открытых проектах. Разработка разбивается на четыре этапа. Первый этап — разработка математической модели процесса регистрации излучения сканирующими и смотрящими (в том числе многоспектральными) МФПУ. Данный этап реализован в части сканирующих МФПУ с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) [13—15]. Второй — разработка аналитической модели с математическим аппаратом, пригодным для реализации сквозного программного обеспечения (ПО), описывающего полную модель облученности, в т. ч. и в сложных МФПУ. Третий — разработка специализированного ПО для персонального компьютера (ПК), позволяющего рассчитать полную облученность для любой из существующих моделей МФПУ. Четвертый — экспериментальное исследование работы указанного комплекса.

В данной работе представлена аналитическая модель облученности МФЧЭ сканирующих и смотрящих гиперспектральных МФПУ при произвольных значениях конструктивных и эксплуатационных параметров.

Постановка задачи

В работе решается задача определения макроструктуры распределения облученностей. Вначале облученность вычисляется в опорных точках фотослоя, причем период расположения точек существенно больше периода пространственной дискретизации изображения фотоприемным устройством. Затем эта процедура повторяется в центральной локальной области фотослоя с мень-

шим периодом расположения точек для точного определения максимума облученности. Для получения квазинепрерывного распределения в плоскости фотослоя будет применена процедура интерполяции данных. Предложенный подход применим для расчета распределения по площади фоточувствительного слоя как паразитных компонент облученности, так и полезной компоненты облученности (изображение сцены). Паразитными компонентами мы называем облученности от внешнего и внутренних корпусов изделия, от входного окна, от промежуточных окон и светофильтров, от односвязной или многосвязной диафрагмы и от объектива, формирующего изображение в плоскости фотослоя. Полезная компонента облученности формируется однородной сценой, или сценой, в которой существует возможность пренебрежения высокими пространственными частотами. Изображение сцены, требующее высокой детализации, рассматривается отдельно с необходимым периодом пространственной дискретизации без процедуры интерполяции.

Такие операции, как свертки распределения облученностей с импульсной характеристикой оптической системы, регистрация оптических сигналов и дальнейшее их преобразование в электронном тракте МФПУ реализованы в других частях программного обеспечения, входящих в состав комплекса, и в данной работе рассматриваться не будут.

Обобщенная схема оптического тракта МФПУ

Схема оптического тракта МФПУ может быть представлена в виде набора следующих плоскостей (рис. 1): плоскость фоточувствительного слоя с матрицей (или набором матриц) ФЧЭ, плоскости экранов с диафрагмами и спектральными фильтрами, плоскость фонового излучения.

Номера экранов q находятся в диапазоне $[1; J]$ (см. рис. 1). На каждой из плоскостей расположена область прямоугольной формы с центром в точке $(x_{c_q}, y_{c_q}, z_{c_q})$. Области разделены на элементарные сегменты $(sq_{i,j})$ с номерами $(i;j)$ и площадью $dS_q = \delta x_q \cdot \delta y_q$, для каждого из которых определен набор параметров:

$Tq_{i,j}$ — температура (К);

$Fq_{i,j}(\lambda)$ — спектральная характеристика пропускания;

$\epsilon q_{i,j}$ — коэффициент серости.

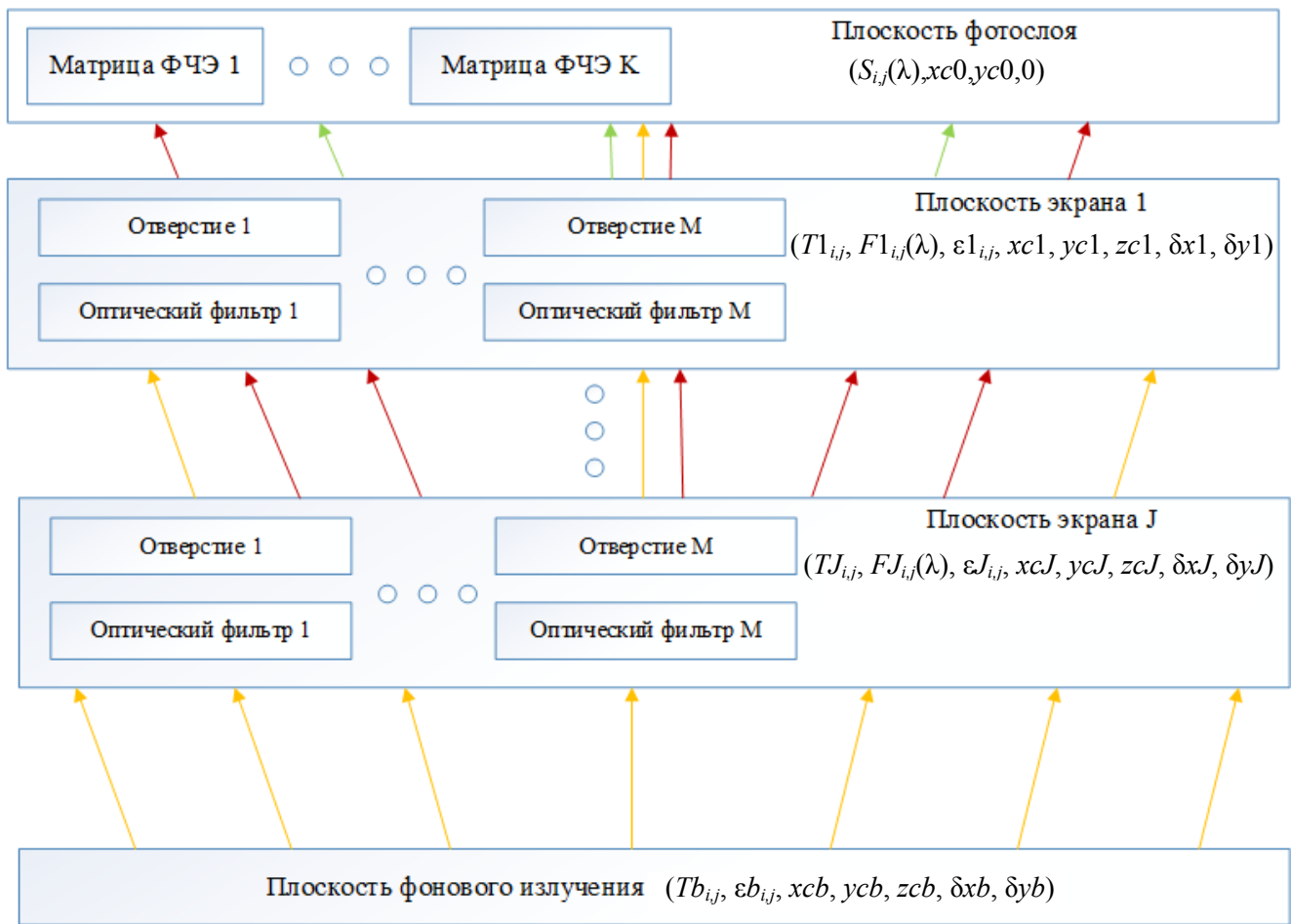


Рис. 1. Блок схема аналитической модели облученности фотослоя ИК МФПУ.

Параметры задаются функционально, либо передаются в модель в виде графических данных. Будем считать, что спектральная плотность энергетической светимости элементарного сегмента определяется выражениями (1) с размерностью [Вт·см⁻³] и (2) с размерностью [квант·см⁻³·с⁻¹]:

$$R(i, j, \lambda) = \epsilon_{i,j} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp(\frac{hc}{\lambda k_B T_{i,j}}) - 1]}, \quad (1)$$

$$N(i, j, \lambda) = \epsilon_{i,j} \frac{2\pi c}{\lambda^4 [\exp(\frac{hc}{\lambda k_B T_{i,j}}) - 1]}, \quad (2)$$

где $c = 2,998 \cdot 10^{10}$ см·с⁻¹ — скорость света;
 $k_B = 1,381 \cdot 10^{-23}$ Вт·с·К⁻¹ — постоянная Больцмана;
 $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Вт·с² — постоянная Планка.

Функции, стоящие в выражениях (1) и (2), введены Планком [2] и выражают спектральную плотность мощности излучения абсолютно черного тела (АЧТ).

В плоскости фотослоя расположена прямоугольная область с центром в точке $(xc_0; yc_0; 0)$, разделенная на сегменты $(s_{0,ij})$ с номерами (i, j) .

Шаги пространственной сетки данных в плоскости фотослоя равны δx_0 и δy_0 и выбираются оптимальным образом для достижения компромисса между временем вычислений и точностью результатов после интерполяции. Каждому сегменту соответствует относительная спектральная характеристика чувствительности $S_{ij}(\lambda)$, т. е. облученность вычисляется в максимуме спектральной характеристики чувствительности.

В данной работе под термином фоновое излучение следует понимать излучение совокупности объектов, расположенных перед входным окном МФПУ (плоскость экрана номер 1). Информативная компонента фонового излучения поступает с выходного зрачка проекционного объектива, остальные объекты, попадающие в поле зрения МФПУ, создают дополнительную паразитную фоновую облученность фотослоя. Излучение объектов сцены и элементов внешней оптической системы должно быть приведено к плоскости фонового излучения и представлено в виде распределения эффективных параметров: температур $(T_{b,ij})$ и коэффициентов серости $(\epsilon_{b,ij})$. Расположение центра области данных задается координатами $(xc_b; yc_b; zc_b)$, а площадь элементарного сегмента (sb_{ij}) равна $dS_b = \delta x_b \cdot \delta y_b$.

Задача расчета распределения облученностей в плоскости фотослоя сводится к определению мощности излучения, падающего на каждый сегмент $s0_{i,j}$ в плоскости фотослоя от внешнего фона (сегментов $sb_{i,j}$) и элементов конструкции МФПУ (сегментов $sq_{i,j}$). Точкам плоскостей, попадающим в поле зрения ФЧЭ и находящимся вне заданных областей данных, присваиваются значения по умолчанию.

$$dE_f(x_0, y_0) = \left[\int_0^\infty F_{tot}(x_0, y_0, x_b, y_b, \lambda) B(x_b, y_b, \lambda) d\lambda \right] \cos \alpha_0 d\Omega, \quad (3)$$

где $F_{tot}(x_0, y_0, x_b, y_b, \lambda)$ — интегральный энергетический коэффициент пропускания оптического тракта на длине волны λ ;

$B(x_b, y_b, \lambda)$ — спектральная плотность энергетической яркости АЧТ на длине волны λ .

α_0 — угол между нормалью к поверхности и прямой, соединяющей площадку;

$d\Omega$ — телесный угол, под которым виден элемент $sb_{ib,jb}$ из $s0_{i_0,j_0}$.

$$dE_f(x_0, y_0) = \int_0^\infty F_{tot}(x_0, y_0, x_b, y_b, \lambda) B(x_b, y_b, \lambda) d\lambda \frac{z_c b^2 dS_b}{[(x_0 - x_b)^2 + (y_0 - y_b)^2 + z_c b^2]^2}. \quad (6)$$

Интегральный коэффициент пропускания на длине волны λ определяется выражением (7):

$$F_{tot}(x_0, y_0, x_b, y_b, \lambda) = \prod_{p=1}^J F_p(x_{b-p}, y_{b-p}, \lambda), \quad (7)$$

где (x_{b-p}, y_{b-p}) — точка пересечения прямой, соединяющей точки (x_b, y_b) и (x_0, y_0) , и плоскости экрана номер p (см. рис. 2).

Точки пересечения указанной прямой и плоскости экрана определяются по формулам:

$$x_{b-p} = (x_b - x_0) \frac{z_{c-p}}{z_c b} + x_0, \quad (8)$$

$$y_{b-p} = (y_b - y_0) \frac{z_{c-p}}{z_c b} + y_0. \quad (9)$$

Расчет распределения фоновой облученности

Запишем выражение для расчета распределения фоновой облученности в плоскости фотослоя. В дальнейшем будем считать, что все тела излучают по закону Ламберта.

Облученность сегмента $s0_{i_0,j_0}$ с координатами $(x_0; y_0; 0)$ в плоскости фотослоя от сегмента $sb_{ib,jb}$ с координатами $(x_b; y_b; z_c b)$ в плоскости фонового излучения (см. рис. 2) определяется выражением:

Учитывая, что справедливы соотношения:

$$\cos \alpha_0 = z_c b / [(x_0 - x_b)^2 + (y_0 - y_b)^2 + z_c b^2]^{0.5}, \quad (4)$$

$$d\Omega = dS_b \cos \alpha_0 / [(x_0 - x_b)^2 + (y_0 - y_b)^2 + z_c b^2], \quad (5)$$

получим:

Перевод координат в индексы массивов данных для любой из плоскостей осуществляется с помощью следующих преобразований.

$$i = x / \delta x + im / 2, \quad (11)$$

$$j = y / \delta y + jm / 2, \quad (12)$$

где im и jm — максимальные значения индексов массивов данных.

Спектральная плотность энергетической яркости связана со спектральной плотностью энергетической светимости следующим выражением, если источник излучает по закону Ламберта:

$$B(x_b, y_b, \lambda) = \frac{1}{\pi} R(x_b, y_b, \lambda). \quad (13)$$

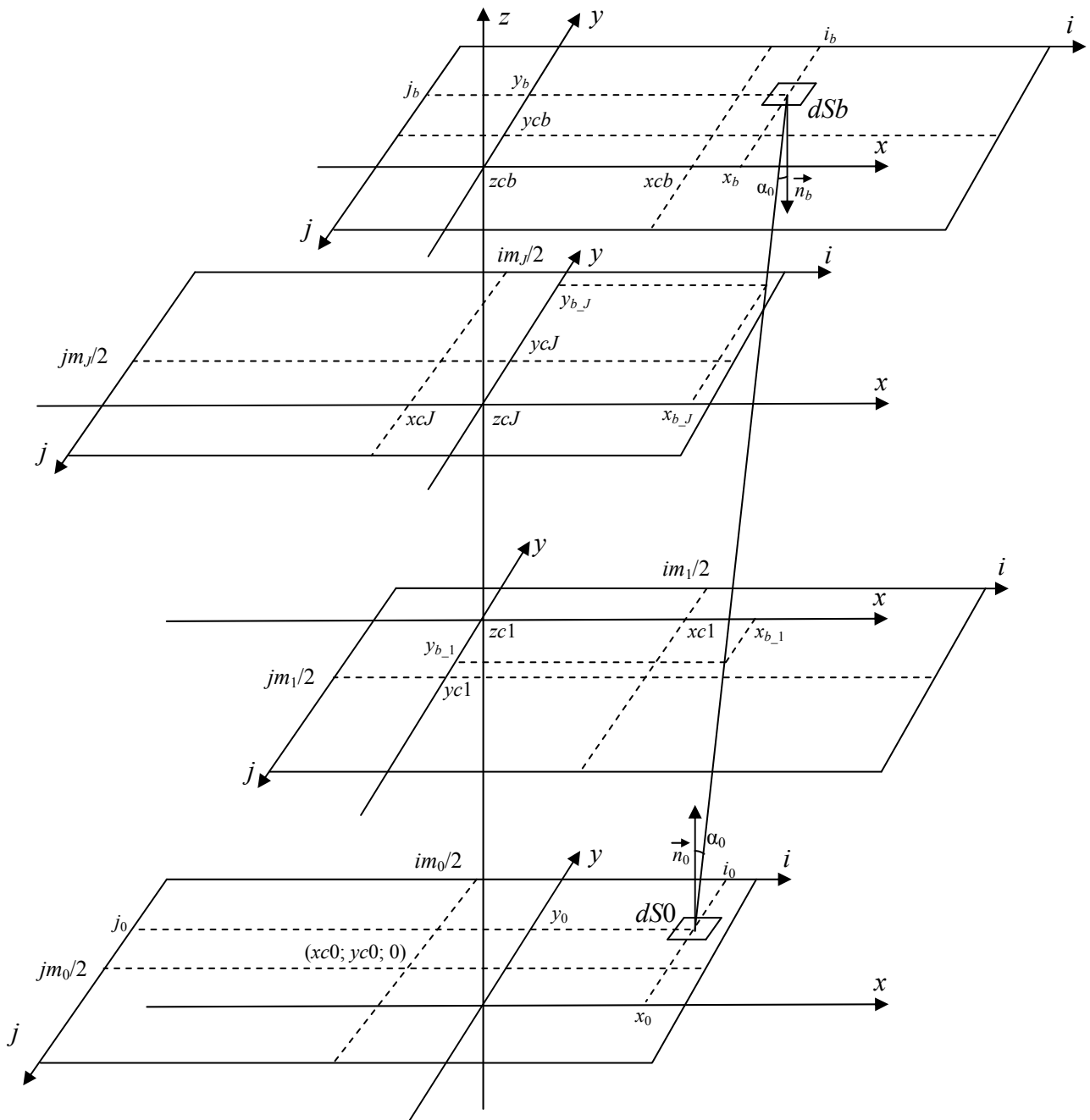


Рис. 2. Схема оптического тракта ИК МФПУ.

Распределение фоновой облученности в плоскости фотослоя находим, суммируя облученности

от каждой элементарной площадки плоскости фонового излучения в пределах заданной области:

$$E_f(x_0, y_0) = \iint_{\Lambda_f(x_0, y_0)} \left(\int_0^\infty F_{tot}(x_0, y_0, x_b, y_b, \lambda) R(x_b, y_b, \lambda) d\lambda \frac{z_c^2}{\pi[(x_0 - x_b)^2 + (y_0 - y_b)^2 + z_c^2]} dS_b \right). \quad (14)$$

Область $\Lambda_f(x_0, y_0)$ является прямоугольной и определяется как проекция области данных в плоскости экрана J на плоскость фонового излучения относительно точки (x_0, y_0) . Необходимым условием для правильного проектирования МФПУ является центральная симметрия каждой рабочей плоскости относительно перпендикулярной оси,

проходящей через центр плоскости объектива и центр фоточувствительной плоскости.

Расчет распределения облученности от экранов и оптических фильтров

Запишем выражение для расчета распределения облученности фотослоя от экранов и свето-

фильтров. Отметим, что в отличие от фоновой облученности, рассматриваемая в данном подразделе компонента облученности не содержит полезной информации о внешнем излучении и является полностью паразитной. Задачей разработчика ИК МФПУ является минимизация данной компонен-

ты. Аналогично (14), запишем выражение для распределения облученностей в плоскости фотослоя от всех элементарных площадок плоскости экрана $q \in [1; J]$, расположенных в пределах области $\Lambda_q(x_0, y_0)$:

$$E_q(x_0, y_0) = \iint_{\Lambda_q(x_0, y_0)} \left(\int_0^{\infty} F_{tot}(x_0, y_0, x_q, y_q, \lambda) R(x_q, y_q, \lambda) d\lambda \frac{zc_q^2}{\pi[(x_0 - x_q)^2 + (y_0 - y_q)^2 + zc_q^2]^2} dS_q \right). \quad (15)$$

Область $\Lambda_q(x_0, y_0)$ является прямоугольной и определяется как область данных в плоскости экрана с номером q для $q \neq 1$ и $\Lambda_1 = \{(x, y), \text{ для } -\infty < x < +\infty, -\infty < y < +\infty\}$ при $q = 1$.

Справедливо следующее выражение для $q \neq 1$:

$$F_{tot}(x_0, y_0, x_q, y_q, \lambda) = \prod_{p=1}^{q-1} F_p(x_{q-p}, y_{q-p}, \lambda), \quad (16)$$

где $(x_{q-p}; y_{q-p})$ — точка пересечения прямой, соединяющей точки $(x_q; y_q)$ и $(x_0; y_0)$, и плоскости экрана с номером p .

Результирующее распределение облученности от экранов и светофильтров определяется выражением (17).

$$E_2(x_0, y_0) = \sum_{q=1}^J E_q(x_0, y_0). \quad (17)$$

Результаты моделирования

Проведено моделирование распределений облученности в плоскости МФЧЭ для тестовых схем оптического тракта МФПУ при равномерном фоне. В алгоритме расчета не применялась процедура двумерной интерполяции выходных распределений. Данный вопрос будет подробно рассмотрен в следующих работах.

Трехмерная оптическая схема простейшего МФПУ представлена на рис. 3. Круглая диафрагма с оптическим фильтром расположена непосредственно над плоскостью фоточувствительного слоя. Нормированное распределение фоновой облученности в плоскости МФЧЭ показано на рис. 4. Полученное распределение совпадает с результатом аналитического расчета.



Рис. 3. Схема оптического тракта простейшего ИК МФПУ.

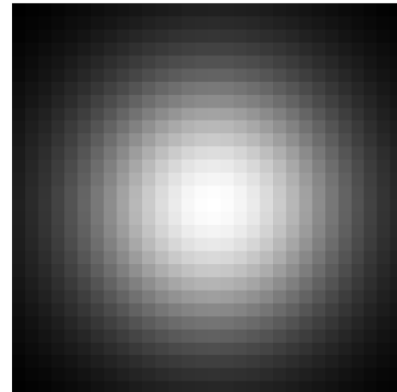


Рис. 4. Нормированное распределение фоновой облученности в плоскости МФЧЭ простейшего МФПУ.

Уменьшим расстояние между МФЧЭ и диафрагмой без изменения других размеров (рис. 5). Полученное в результате моделирования распределение фоновой облученности в плоскости МФЧЭ представлено на рис. 6 и совпадает с результатом аналитического расчета.

Рассмотрим схему многоспектрального сканирующего ИК МФПУ (рис. 7). В плоскости экрана расположены четыре диафрагмы с двумя типами оптических фильтров на различные (но близкие) спектральные диапазоны. Полученное в результате моделирования распределение фоновой облученности в плоскости МФЧЭ представлено на рис. 8 и соответствует результату аналитического расчета.

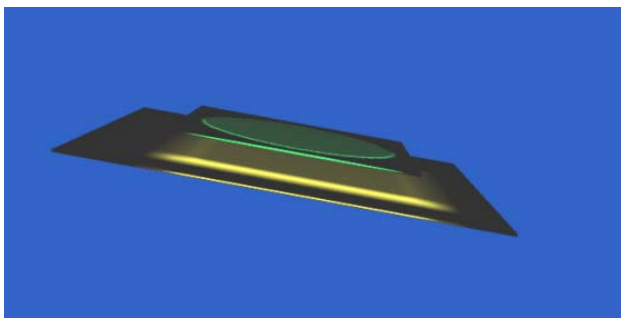


Рис. 5. Схема оптического тракта простейшего ИК МФПУ с диафрагмой, расположенной вблизи МФЧЭ.

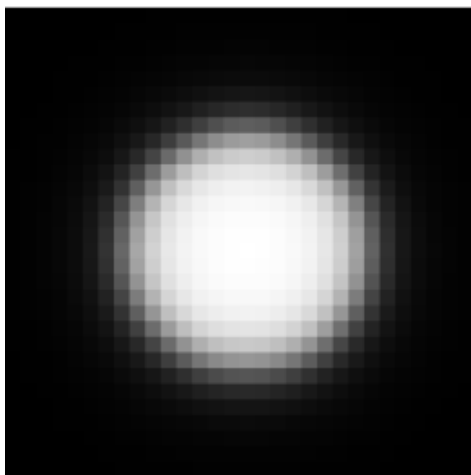


Рис. 6. Нормированное распределение фоновой облученности в плоскости МФЧЭ простейшего ИК МФПУ с диафрагмой, расположенной вблизи МФЧЭ.

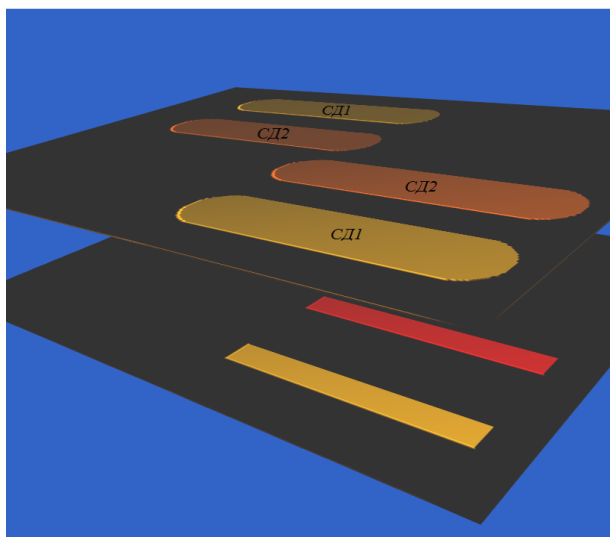


Рис. 7. Схема оптического тракта многоспектрального ИК МФПУ.

Усложним схему оптического тракта многоспектрального ИК МФПУ и добавим в нее дополнительную диафрагму, частично экранирующую внешнее фоновое излучение (рис. 9). Полученное распределение фоновой облученности плоскости МФЧЭ представлено на рис. 10. Видно, что добавление диафрагмы существенно ослабило облучен-

ность в центральной области МФЧЭ и привело к образованию двух отдельных кластеров.

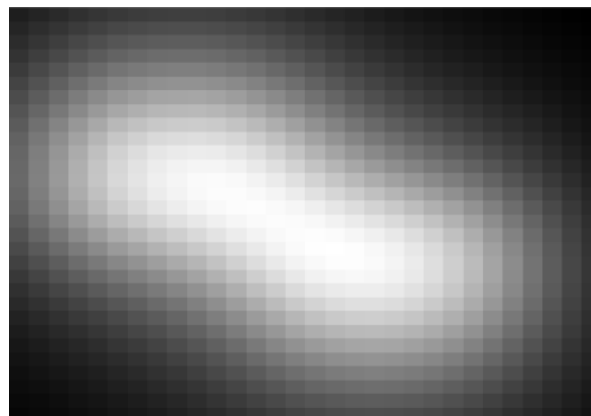


Рис. 8. Нормированное распределение фоновой облученности в плоскости МФЧЭ многоспектрального ИК МФПУ.

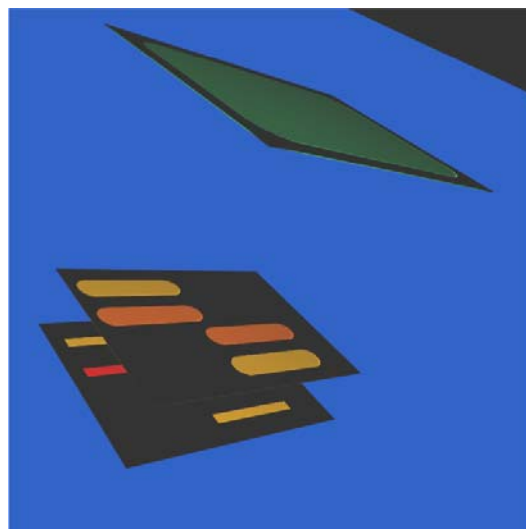


Рис. 9. Схема оптического тракта многоспектрального ИК МФПУ с дополнительной общей диафрагмой.

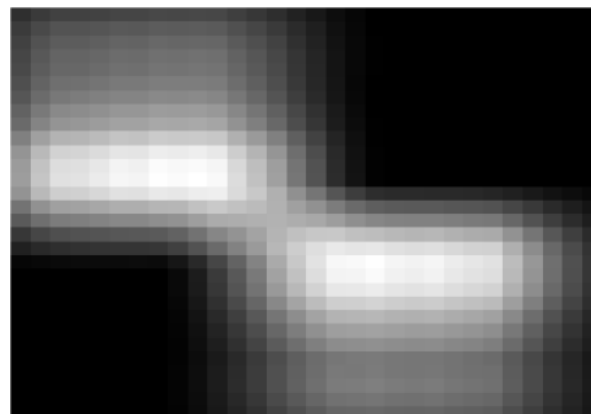


Рис. 10. Нормированное распределение фоновой облученности в плоскости МФЧЭ многоспектрального ИК МФПУ с дополнительной общей диафрагмой.

Итак, полученные распределения показывают возможность построения распределений облученности в плоскости МФЧЭ с использованием ана-

литической модели. Показано, что корректный результат может быть получен при произвольной конструкции оптического тракта МФПУ, что обуславливает универсальность модели.

Заключение

Разработана аналитическая модель облученности фотослоя сканирующих и смотрящих матричных фотоприемных устройств (МФПУ). Плоскость фотослоя МФПУ в общем случае представляет собой любой заданный набор матриц фоточувствительных элементов (МФЧЭ) с различными спектральными характеристиками и расположением. Конструкция оптического тракта также представляет собой набор заданных плоскостей с любыми заданными окнами (диафрагмами), светопоглощающими экранами и светофильтрами, согласованными с заданным объективом и МФЧЭ. Учтены такие паразитные компоненты, как облученность от объектива, от всех светопоглощающих экранов и внешнего корпуса, от окон, с учетом их спектральных коэффициентов пропускания.

Корректность представленной модели подтвердили результаты моделирования, которые совпали с аналитическими расчетами в частных случаях. Показано, что модель применима для расчета сложных приборов, таких как крупноформатные многоспектральные МФПУ.

В следующих работах будет подробно рассмотрен вопрос интерполяции выходных распределений аналитической модели, будет выбран оптимальный алгоритм интерполяции, обеспечи-

вающий наилучшее быстродействие при минимальной погрешности. Также будет представлено подробное описание программного обеспечения, реализующего данную аналитическую модель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трищенко М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. — М.: Радио и связь, 1992.
2. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. — М.: Физматкнига, 2005.
3. Ллойд Дж. Системы тепловидения. — М.: Мир, 1978.
4. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. Пер. с франц. — М.: Мир, 1988.
5. ГОСТ 17772. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик, 1988. С. 32.
6. Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Корнеева М. Д., Шабаров В. В. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 38.
7. Патрашин А. И., Балиев Д. Л., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Лазарев П. С., Полунеев В. В., Яковлева Н. И. // Успехи прикладной физики. 2014. Том 2. № 4. С. 367.
8. Патрашин А. И. // Прикладная физика. 2011. № 4. С. 65.
9. Dereniak E. L., Borman G. D. Infrared Detectors and Systems. — N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
10. Cooke B. J., Laubscher B. E., Borel C. C. et. al. // Proc. SPIE. 1996. Vol. 2743. P. 52.
11. Wan W. // Proc. SPIE. 1996. Vol. 2743. P. 325.
12. Wan W. // Proc. SPIE. 2009. Vol. 7300. P. 730005-1.
13. Козлов К. В., Соляков В. Н., Кузнецов П. А., Полесский А. В., Хамидуллин К. А., Семенченко Н. А., Бедарева Е. А. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 4. С. 55.
14. Козлов К. В., Кузнецов П. А. // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 61.
15. Дрожников Б. Н., Козлов К. В., Кузнецов П. А., Соляков В. Н. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 6. С. 566.

The analytical model of irradiance for focal plane of multispectral FPA

I. D. Byrlakov, K. V. Kozlov, A. I. Patrashin, V. N. Solyakov, and A. M. Filachev

Orion R&P Association, Inc.
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received July 8, 2016

The analytical model of irradiance for focal plane of the staring and scanning multispectral FPA was developed. The focal plane array generally contains a set of arrays of photosensitive elements with different spectral characteristics and location. The design of the optical path is a set of specified planes of shields with diaphragms and filters, and also with a given lens and focal plane array matrix. Two cases of high-frequency and low-frequency background scenes are considered. In case of low-frequency background the 2D interpolation method is used.

PACS: 42.79.Sz, 85.30.-Z

Keywords: analytical model, scanning FPA, staring FPA, photosensitive element.

REFERENCES

1. M. A. Trishenkov, *Photodetectors* (Radio Svyaz, Moscow, 1992) [in Russian].
2. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid State Photoelectronics. Physical Foundations* (Fizmatkniga, Moscow, 2005) [in Russian].
3. J. Lloid, *Systems of Thermo Vision* (Mir, Moscow, 1978) [in Russian].
4. J. Gossorg, *Infrared Thermograph* (Mir, Moscow, 1988) [in Russian].
5. GOST 17772. (1988).
6. A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, M. D. Korneeva, and V. V. Shabarov, *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 38 (2014).
7. A. I. Patrashin, D. L. Baliev, K. O. Boltar, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki*, **2**, 367 (2014).
8. A. I. Patrashin, *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 65 (2011).
9. E. L. Dereniak and G. D. Borman, *Infrared Detectors and Systems*. (N. Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1996).
10. B. J. Cooke, B. E. Laubscher, C. C. Borel, et. al., *Proc. SPIE* **2743**, 52 (1996).
11. W. Wan, *Proc. SPIE* **2743**, 325 (1996).
12. W. Wan, *Proc. SPIE* **7300**, 730005-1 (2009).
13. K. V. Kozlov, V. N. Solyakov, P. A. Kuznetsov, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 55 (2014).
14. K. V. Kozlov and P. A. Kuznetsov, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 61 (2015).
15. B. N. Drazhnikov, K. V. Kozlov, P. A. Kuznetsov, and V. N. Solyakov, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki*, **3**, 566 (2015).