

# Физическая аппаратура и ее элементы

УДК 681.7.08

## Разработка оптического зонда для стенда измерения фотоэлектрической связи

В.И. Демидов, А.А. Колесова, А.В. Полесский, Е.А. Смирнова, К.А. Хамидуллин

*В статье представлены результаты разработки проекционного зеркально-линзового объектива оптического зонда, стенда измерения коэффициента фотоэлектрической связи инфракрасных многоэлементных фотоприемных устройств орбитального базирования. В ходе работы разработана математическая модель распределения энергии в формируемом объективом изображении круглой диафрагмы, определены основные требования к качеству изображения и точности позиционирования объектива. На основании полученных данных проведен синтез оптической системы.*

PACS: 42.79.Pw

*Ключевые слова:* фотоэлектрическая связь, оптический зонд, проекционный объектив, фотоприемное устройство.

### Введение

Разработка инфракрасных многоэлементных фотоприемных устройств (МФПУ) орбитального базирования новых поколений невозможна без создания стендового оборудования для измерения их основных параметров. Для данных МФПУ, помимо основных фотоэлектрических параметров (удельная обнаружительная способность, вольт-во-чувствительность, пороговый поток), чрезвычайно важным является измерение коэффициента фотоэлектрической связи.

Наличие фотоэлектрической связи в МФПУ приводит к падению модуляционной передаточной функции (МПФ) МФПУ и, как следствие, оптико-электронной системы в целом. Влияние фотоэлектрической связи на МПФ МФПУ приведено на рис. 1, из которого видно, что наличие фотоэлектрической связи в 15% приводит к падению МПФ МФПУ на средних частотах, примерно, в 3 раза, соответственно, и МПФ оптико-электронной системы, в котором данный МФПУ будет использован, упадет во столько же раз.

Поэтому с целью обеспечения предельных характеристик оптико-электронных систем по дальности обнаружения и распознавания важной задачей является создание специализированного стендового оборудования для измерения и паспортизации величины коэффициента фотоэлектрической связи ИК МФПУ орбитального базирования.

### Установка для измерения фотоэлектрической связи

Принципиальная схема установки для измерения коэффициента фотоэлектрической связи приведена на рис. 2. Его структурная схема и методика измерения соответствуют ГОСТ 17772–88.

Разработанная в ОАО «НПО «Орион» установка измерения фотоэлектрической связи работает следующим образом. Источник излучения освещает круглую диафрагму, которая с помощью зеркально-линзового объектива (оптического зонда) проецируется в плоскости фоточувствительных элементов (ФЧЭ) для засветки единичного элемента. Ослабляющие фильтры предназначены для согласования мощности полезного излучения и динамического диапазона МФПУ. Селекция полезного и паразитного потоков ИК-излучения осуществляется путем модуляции полезного потока с помощью оптико-механического модулятора. Перемещение изображения круглой диафрагмы по поверхности ФЧЭ осуществляется путем подвижки блока, включающего источник излучения, оптический зонд, модулятор и ослабители, относительно МФПУ, с помощью двухкоординатного механизма перемещения.

Полесский Алексей Викторович, начальник отдела<sup>1</sup>

Демидов Владимир Ильич, главный метролог<sup>1</sup>

Колесова Анастасия Александровна, техник<sup>1,2</sup>

Смирнова Елизавета Александровна, техник<sup>1,2</sup>

Хамидуллин Камилъ Алиевич, инженер I категории<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, Шоссе Энтузиастов, 46/2.

E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5

Статья поступила в редакцию 10 октября 2013 г.

© Полесский А.В., Демидов В.И., Колесова А.А., Смирнова Е.А., Хамидуллин К.А., 2013

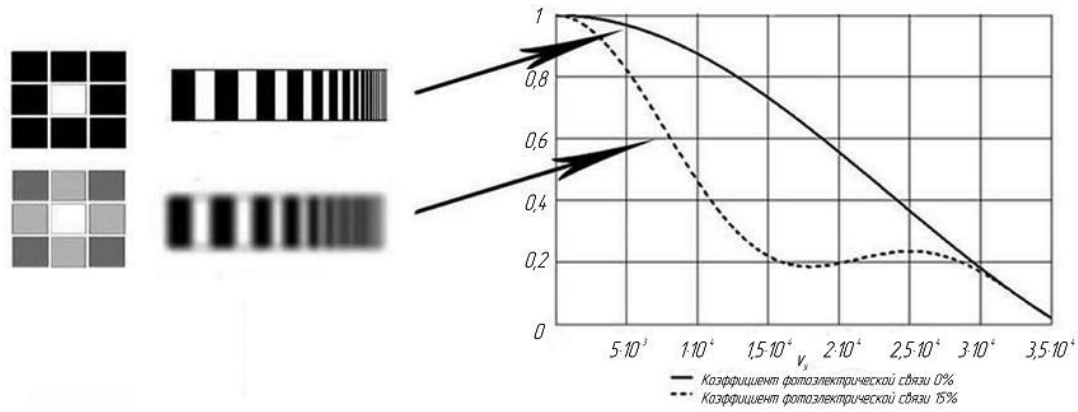


Рис. 1. МФФ фотоприемника с фотоэлектрической связью и без нее.

Наиболее сложно обеспечиваемым метрологическим требованием к стенду является размер изображения круглой диафрагмы в плоскости ФЧЭ, который согласно ГОСТ 17772–88 не должен превышать суммарного размера площадки и зазора между ФЧЭ по уровню 90% мощности падающего излучения. Это требование связано с тем, что засветка слишком большим пятном приведет к облучению не только нужного элемента ФЧЭ, но и соседних, т. е. к ошибке измерения.

Сложность обеспечения малого размера изображения диафрагмы на поверхности ФЧЭ в ИК-диапазоне связана со сравнительно большой длиной волны излучения, что приводит к значительному размеру дифракционного пятна рассеяния. Уменьшение пятна возможно за счет увеличения выходной апертуры оптического зонда, однако её величина ограничена апертурой измеряемого МФПУ.

**Определение основных требований к оптическому зонду**

Габаритные параметры оптической схемы, которые должен обеспечить разрабатываемый оп-

тический зонд, были взяты из оптической схемы аналогичного зонда стенда, использовавшегося для контроля МФПУ орбитального базирования предыдущего поколения. Необходимость разработки нового оптического зонда вызвана необходимостью контроля МФПУ с уменьшенным шагом.

Основное метрологическое требование к оптическому зонду заключается в том, что он должен обеспечивать проецирование диафрагмы, выполненной в виде отверстия диаметром 0,2 мм, в изображение заданных размеров на поверхность ФЧЭ измеряемого МФПУ, причем с учетом дифракции и аберраций. Для решения этой задачи было проведено математическое моделирование, о котором будет рассказано ниже.

Ещё одна задача, которая должна быть решена при разработке объектива — измерение размера пятна рассеяния в инфракрасном диапазоне. Поскольку в настоящее время в России решение данной задачи представляет определенные проблемы, то измерение пятна рассеяния необходимо проводить косвенными методами в видимом диапазоне. Это налагает ограничения на оптическую

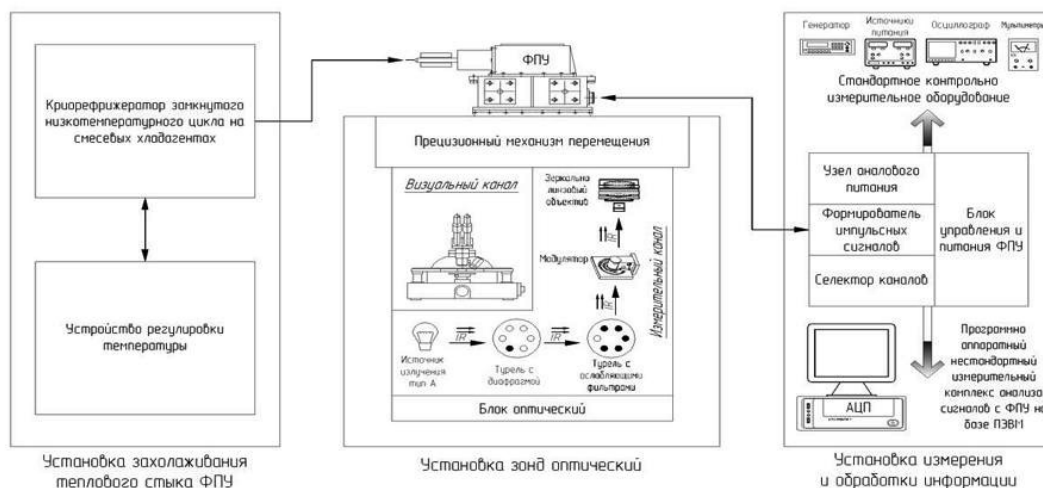


Рис. 2. Принципиальная схема установки измерения фотоэлектрической связи.

схему, степень абберационной коррекции и выбор материалов — они должны обеспечивать работу как в видимом, так и в инфракрасном диапазоне.

### Математическое моделирование

Для определения возможности обеспечения заданного размера изображения диафрагмы и необходимой степени абберационной коррекции, которую должен обеспечивать оптический зонд, была разработана математическая модель, позволяющая оценить, какая доля энергии излучения попадет на соседние элементы при засветке единичного ФЧЭ.

Основная задача математической модели — построение двумерной функции распределения энергии в изображении точечной диафрагмы, создаваемом оптическим зондом с учетом дифракции и центрального экранирования. При проведении моделирования объектив считается дифракционно-ограниченным, что вполне достижимо в случае, если число Штреля оптической системы будет близко к единице.

Входными параметрами модели служат апертура объектива  $\alpha$ , коэффициент центрального экранирования  $\eta$ , диаметр точечной диафрагмы  $d$ , линейный коэффициент увеличения  $\beta$  и длина волны излучения  $\lambda$ . При этом следует отметить, что апертура объектива  $\alpha$  может быть ограничена диафрагмой контролируемого МФПУ. На выходе модель имеет двумерную функцию распределения энергии в пятне, на основании которой рассчитывается доля энергии излучения, падающего в заданные области (фоточувствительные элементы). Таким образом, зная топологию МФПУ (шаг и размер ФЧЭ по обоим направлениям), можно определить значение ошибки измерения фотоэлектрической связи.

Согласно теории линейной фильтрации, функция распределения энергии в изображении является сверткой функции рассеяния точки (ФРТ) и геометрического изображения. Так как изобра-

жение симметрично относительно оси, будем использовать полярные координаты.

$$I_{\text{ИЗОБР}}(r) = \int_{-\infty}^{\infty} I_{\text{ГЕОМЕТР}}(u) \cdot H(u-r) du, \quad (1)$$

где  $H(r)$  — ФРТ оптической системы.

ФРТ связано с распределением амплитуды излучения следующим образом:

$$H(r) = \frac{I(r)}{I_0} = \frac{[U(r)]^2}{I_0}, \quad (2)$$

где  $U(r)$  — амплитуда излучения.

Определим амплитуду излучения через дифракционный интеграл Фраунгофера для дифракционно-ограниченной оптической системы с круглым входным зрачком:

$$U_D(r) = C \int_0^{D/2} \int_0^{2\pi} \exp(-i \cdot k \cdot \rho \cdot r \cdot \cos[\theta - \psi]) \cdot \rho d\rho d\theta, \quad (3)$$

где  $\theta, \rho$  — полярные координаты на входном зрачке,  $r, \psi$  — полярные координаты в плоскости изображения,  $k$  — волновое число,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $D$  — диаметр входного зрачка.

Выполнив необходимые преобразования, выразим амплитуду излучения через функцию Бесселя  $I_1$ :

$$U_D(r) = C \cdot \pi \cdot (D/2)^2 \cdot \left[ \frac{2 \cdot I_1\left(2 \cdot \frac{\pi \cdot \alpha}{\lambda} \cdot r\right)}{2 \cdot \frac{\pi \cdot \alpha}{\lambda} \cdot r} \right] \quad (4)$$

Выражение (4) описывает распределение амплитуды излучения в плоскости изображения в дифракционно-ограниченной оптической системе без экранирования.

Рассчитаем амплитуду при центральном экранировании. Согласно теореме Бабине:

$$U(r) = U_D(r) - U_{\eta D}(r), \quad (5)$$

где  $U_D(r)$  — амплитуда излучения при диаметре входного зрачка  $D$ ,  $U_{\eta D}(r)$  — амплитуда излучения при диаметре входного зрачка  $\eta D$ .

Таким образом,

$$U(r) = C \cdot \pi \cdot (D/2)^2 \cdot \left( \left[ \frac{2 \cdot I_1\left(2 \cdot \frac{\pi \cdot \alpha}{\lambda} \cdot r\right)}{2 \cdot \frac{\pi \cdot \alpha}{\lambda} \cdot r} \right] - \eta^2 \cdot \left[ \frac{2 \cdot I_1\left(2 \cdot \eta \cdot \frac{\pi \cdot \alpha}{\lambda} \cdot r\right)}{2 \cdot \eta \cdot \frac{\pi \cdot \alpha}{\lambda} \cdot r} \right] \right) \quad (6)$$

Интенсивность связана с амплитудой излучения через выражение:

$$I(r) = U^2(r) \quad (7)$$

Нормировав интенсивность к единице, получим выражение для ФРТ:

$$H(r) = \frac{1}{(1 - \eta^2)^2} \cdot \left( \left[ \frac{2 \cdot I_1\left(2 \cdot \frac{\pi \cdot \alpha}{\lambda} \cdot r\right)}{2 \cdot \frac{\pi \cdot \alpha}{\lambda} \cdot r} \right] - \eta^2 \cdot \left[ \frac{2 \cdot I_1\left(2 \cdot \eta \cdot \frac{\pi \cdot \alpha}{\lambda} \cdot r\right)}{2 \cdot \eta \cdot \frac{\pi \cdot \alpha}{\lambda} \cdot r} \right] \right)^2 \quad (8)$$

Геометрическое изображение однозначно задано диаметром точечной диафрагмы  $d$  и линейным коэффициентом увеличения  $\beta$ , т. е.

$$d_{\text{ИЗОБР}} = d \cdot \beta \tag{9}$$

Вид геометрического изображения точечной диафрагмы приведен пунктирной линией на рис. 3.

Применяя формулу (1), получим выражение для распределения энергии в плоскости изображения.

$$I_{\text{ИЗОБР}}(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{circ}\left(\frac{u}{d \cdot \beta}\right) \cdot H(u-r) du \tag{10}$$

где  $\text{circ}(r)$  — круговая функция, выражающая геометрическое изображение.

Подставляя в математическую модель следующие параметры объектива: задняя апертура объектива  $\alpha = 0,352$ , коэффициент центрального экранирования  $\eta = 0,53$ , диаметр точечной диафрагмы  $d = 0,2$  мм, линейный коэффициент увеличения  $\beta = -0,0776$ , длина волны излучения  $\lambda = 3$  мкм, получим результат, приведенный на рис. 3. Функция рассеяния точки на нем обозначена штрихпунктирной линией, распределение энергии в изображении диафрагмы обозначена сплошной линией.

Для вычисления процента энергии излучения, попадающей на данный прямоугольный пиксель, перейдем из полярной системы координат в декартову.

$$\text{Energy}(x_1, x_2, y_1, y_2) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} I_{\text{ИЗОБР}}(x, y) dx dy \tag{11},$$

где  $x_1, x_2, y_1, y_2$  — границы прямоугольной области в декартовой системе координат.

Для наглядного примера работы модели возьмем размер ФЧЭ по оси  $OX$  и по оси  $OY$ , равный 40 мкм. Шаг ФЧЭ по оси  $OX$  — 50 мкм, шаг ФЧЭ по оси  $OY$  — 45 мкм. Рассчитаем величину «паразитной засветки» соседних ФЧЭ, обусловленную лишь распределением энергии в изображении точечной диафрагмы (рис. 4). Как видно, в случае, когда качество изображения оптического зонда ограничено дифракцией, доля излучения, попадающая на соседние элементы, незначительна. В случае смещения пятна на 10 мкм по вертикали и по горизонтали от центра элемента максимальная величина «паразитной засветки» составит 1,06%, что говорит о достаточно жестких требованиях к точности позиционирования оптического зонда.

Так с помощью полученной модели можно определить предельный размер шага перспективных МФПУ, которые возможно контролировать с помощью дифракционно-ограниченного оптического зонда с указанными характеристиками.

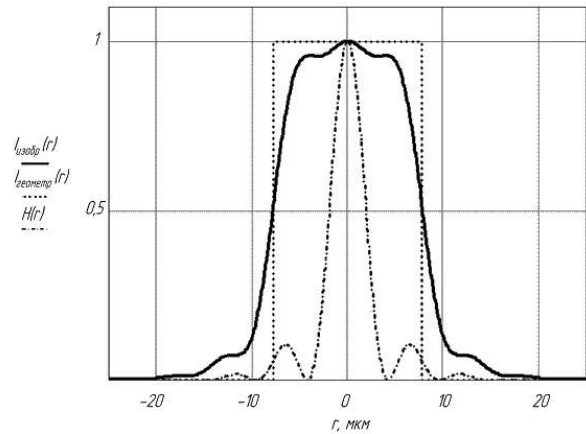


Рис. 3. Распределение энергии в изображении.

Для этого необходимо построить зависимость концентрации энергии в ФЧЭ от его размера. Если представить ФЧЭ в виде квадрата, то 90% энергии пятна будет приходиться на пиксель размером 24 мкм, т. е. теоретически возможный шаг перспективных МФПУ, которые можно контролировать с помощью данного зонда, составляет 24 мкм.

Все полученные данные являются весьма точной, но, все же, оценкой, поскольку в математической модели не учтены монохроматические и хроматические aberrации, сложная форма центрального экранирования и искажения, вызванные ошибками при сборке и юстировке.

**Разработка оптической схемы объектива**

За основу оптической схемы был взята схема аналогичного оптического зонда стенда, использовавшегося для контроля МФПУ орбитального базирования предыдущего поколения. Основа оптической схемы проекционного объектива со-

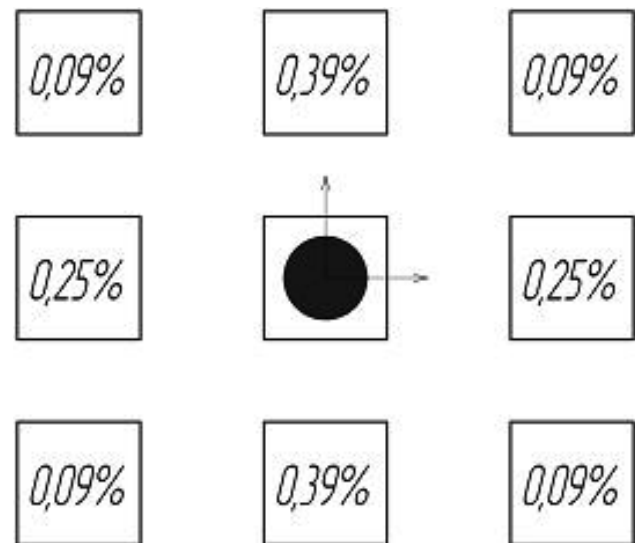


Рис. 4. Величина «паразитного» коэффициента фотоэлектрической связи для соседних ФЧЭ. Облученный ФЧЭ — центральный.

ставляет схема Шварцшильда, в которую был введен линзовый компенсатор для компенсации полевых аберраций (астигматизм, кривизна поля). Поскольку компенсатор близок к афокальному, он практически не вносит хроматических аберраций, что позволяет проводить измерение пятна рассеяния объектива в видимом диапазоне с соответствующим пересчетом. При синтезе схемы объектива были учтены аберрации, вносимые входными окнами фотоприемника, путем введения в схему соответствующих им плоскопараллельных пластин.

Разработанный зеркально-линзовый объектив состоит из двух зеркал, выполненных из стекла К8, и компенсатора, включающего в себя две линзы (фтористый кальций и кварц). Оптическая схема объектива приведена на рисунке 5.

Качество изображения данной оптической схемы можно оценить с помощью числа Штреля, которое составляет 0,94 (ошибка волнового фронта менее  $\lambda/25$ ) в спектральном диапазоне 2,7–3,2 мкм.

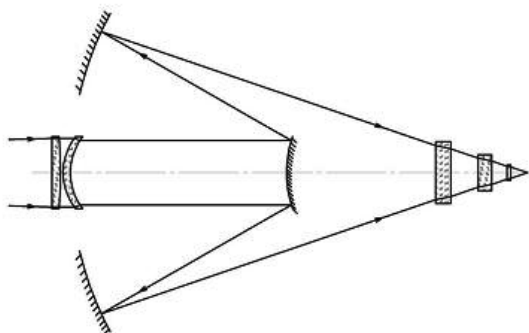


Рис. 5. Оптическая схема объектива.

## Заключение

В результате проведенных исследований была разработана математическая модель, которая позволяет произвести оценку требований к объективу, являющимся оптическим зондом в стендах измерения фотоэлектрической связи, а также оценку требований на точность его позиционирования.

Разработана оптическая схема объектива для установки измерения фотоэлектрической связи МФПУ орбитального базирования с высоким качеством изображения и показано, что разработанный объектив пригоден для контроля перспективных МФПУ с шагом до 24 мкм.

## Литература

1. Ллойд Дж. Системы тепловидения. — М.: Издательство «Мир», 1978.
2. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик, ГОСТ 17772–88, 1988 г.
3. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения, ГОСТ 21934-, 1983 г.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1973
5. Шеннон Р., Вайант Дж. Проектирование оптических систем. — М.: Мир, 1983
6. Домненко В.М., Бурсов М.В., Иванова Т.В.. Моделирование формирования оптического изображения: Учебное пособие. — СПб.: НИУ ИТМО, 2011
7. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. — М., Мир, 1970
8. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем — М., Машиностроение, 1975

## Development and research of the optical probe for a measuring stand of crosstalk

V.I. Demidov, A.A. Kolesova, A.V. Polesskiy,  
E.A. Smirnova, and K.A. Khamidullin

Orion Research-and-Production Association  
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: orion@orio-ir.ru

*In this paper, the results of development of the projection catadioptric lens, which is an optical probe for crosstalk measuring bench are given. A mathematical model of energy distribution in the formed image of a circle test figure was developed. The basic requirements of the lens and the accuracy of its positioning as well as the synthesis of the optical system were determined.*

PACS: 42.79.Pw

Keywords: crosstalk, optical probe, FPA.

Bibliography — 8 references

Received October 10, 2013