

УДК 681.7.08

Оптический зонд для измерения фотоэлектрической связи в средневолновом ИК-диапазоне

В.И. Демидов, Н.Б. Залетаев, А.В. Полесский, Е.А. Смирнова,
Н.А. Семенченко, К.А. Хамидуллин

Статья посвящена разработке проекционного зеркально-линзового объектива оптического зонда для стенда измерения фотоэлектрической связи инфракрасных многоэлементных фотоприемных устройств диапазона спектра 2,7–3,2 мкм. В ходе работы было проведено математическое моделирование, подтвердившее возможность контроля фотоприемных устройств диапазона 2,7–3,2 мкм по методике, приведенной в ГОСТ 17772, а также определены основные требования к качеству изображения и точности позиционирования объектива, проведен синтез оптической системы.

PACS: 42.79.Pw

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

Введение

Создание специализированного стендового оборудования для измерения различных фотоэлектрических параметров является неотъемлемой частью разработки многоэлементных фотоприемных устройств (МФПУ) [1, 2]. Для МФПУ орбитального базирования, помимо измерения основных фотоэлектрических параметров (удельная обнаружительная способность, вольтовая чувствительность, пороговый поток), чрезвычайно важным является измерение коэффициента фотоэлектрической связи.

Качество изображения, определяемое модуляционной передаточной функцией (МПФ) оптико-электронной системы, определяется передаточными функциями всех звеньев системы. Появление фотоэлектрической связи приводит к падению

МФПУ МФФ. Результаты теоретических расчетов показывают [3, 4], что наличие фотоэлектрической связи в 15% приводит к трехкратному падению МФФ МФПУ, а, соответственно, и всей МФФ оптико-электронной системы, на средних частотах.

В связи с этим важной задачей является создание специализированного стендового оборудования для измерения и паспортизации величины коэффициента фотоэлектрической связи ИК МФПУ орбитального базирования. Паспортизация и контроль коэффициента фотоэлектрической связи позволит произвести отбор МФПУ и тем самым обеспечить предельные характеристики оптико-электронных систем по дальности обнаружения и распознавания.

Стенд измерения фотоэлектрической связи

Принципиальная схема стенда измерения фотоэлектрической связи приведена на рис. 1. Его структурная схема и методика измерения соответствует ГОСТ 17772–88 [5].

Разработанный в ОАО «НПО «Орион» стенд 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.

Демидов Владимир Ильич, нач. испыт. лаборатории¹
Залетаев Николай Борисович, вед. научн. сотрудник¹
Полесский Алексей Викторович, главный метролог^{1,2}
Самвелов Андрей Витальевич, начальник НТЦ МКС¹
Семенченко Наталья Александровна, техник¹, студент³
Смирнова Елизавета Александровна, техник¹, студент³
Хамидуллин Камиль Алиевич, начальник отдела¹

¹ ОАО «НПО «Орион»,
Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.
E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский государственный технический
университет радиотехники, электроники
и автоматики (МГТУ МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78

³ Московский государственный технический
университет им. Н.Э.Баумана.

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

Статья поступила в редакцию 15 октября 2013 г.

© Демидов В.И., Залетаев Н.Б., Полесский А.В., Семенченко Н.А., Смирнова Е.А., Хамидуллин К.А., 2013

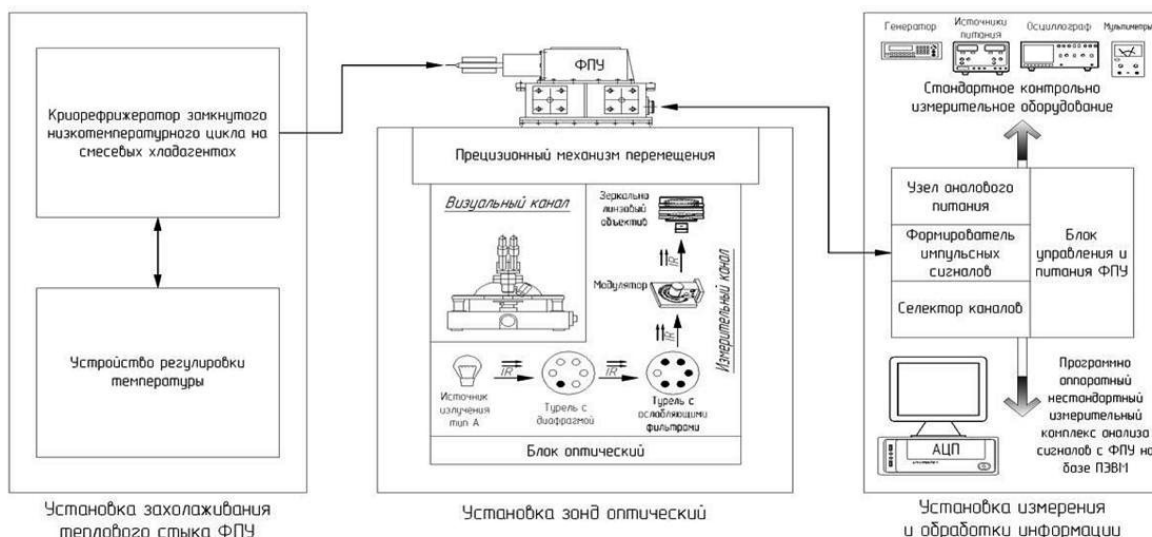


Рис. 1. Принципиальная схема установки измерения фотоэлектрической связи.

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.

Наиболее сложно обеспечиваемым метрологическим требованием к стенду является требование на величину изображения круглой диафрагмы в плоскости ФЧЭ, которое, 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, 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.

Основные требования к оптической системе

Габаритные параметры оптической схемы, которые должен обеспечить разрабатываемый оптический зонд, были взяты из оптической схемы аналогичного зонда стенда, использовавшегося для контроля МФПУ орбитального базирования предыдущего поколения. Необходимость разработки нового оптического зонда вызвана не-

обходимостью 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 aberrаций. 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 схему, степень aberrационной коррекции и выбор материалов, т.е. они должны обеспечивать работу как в видимом, так и в инфракрасном диапазоне.

Математическая модель

Для определения возможности обеспечения заданного размера изображения диафрагмы и необходимой степени aberrационной 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 α , коэффициент центрального экранирования η , диаметр точечной диафрагмы d , линейный коэффициент увеличения β и длина волны излучения λ . Следует отметить, что апертура объектива α 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 (т.е. шаг

и размер ФЧЭ по обоим направлениям), можно определить значение ошибки измерения фотоэлектрической связи.

Согласно теории линейной фильтрации [6, 7], функция распределения энергии в изображении является сверткой функции рассеяния точки (ФРТ) и геометрического изображения. Так как изображение 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 [8].

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

где $U(r)$ — амплитуда излучения.

Определим амплитуду излучения через дифракционный интеграл Фраунгофера для дифракционно-ограниченной оптической системы с круглым входным зрачком [9]:

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

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

Выполнив 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 ηD .

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:

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

Геометрическое изображение однозначно задано диаметром точечной диафрагмы d и линейным коэффициентом увеличения β .

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

Вид геометрического изображения точечной диафрагмы приведен пунктирной линией на рис. 2.

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. 2. Функция рассеяния точки на нем обозначена штрихпунктирной линией, распределение энергии в изображении диафрагмы изображено сплошной линией.

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

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

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. 3). 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.

С помощью полученной модели можно определить предельный размер шага ФЧЭ перспективных МФПУ, которые возможно контролировать с помощью дифракционно-ограниченного опти-

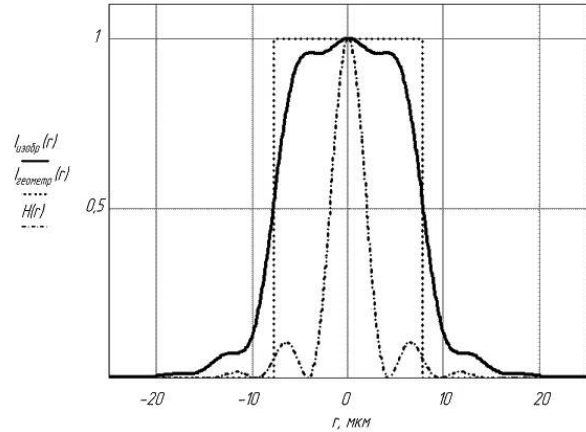


Рис. 2. Распределение энергии в изображении.

ческого зонда с указанными характеристиками. Для этого необходимо построить зависимость концентрации энергии в ФЧЭ в зависимости 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.

Оптическая схема зонда

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

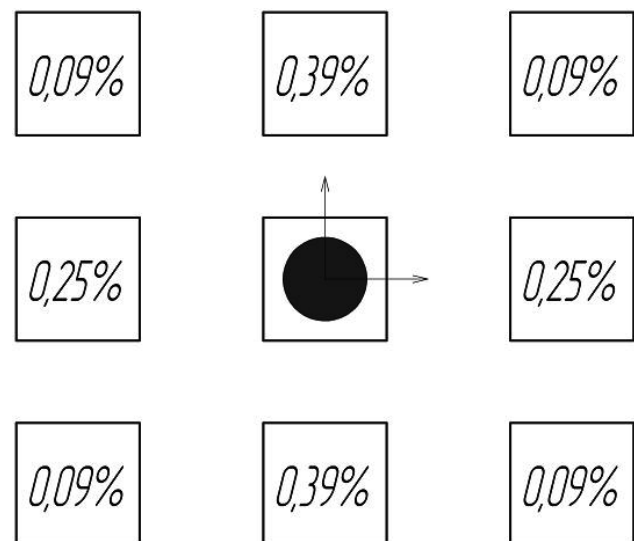


Рис. 3. Величина «паразитного» коэффициента фотоэлектрической связи для соседних ФЧЭ. Облученный ФЧЭ — центральный.

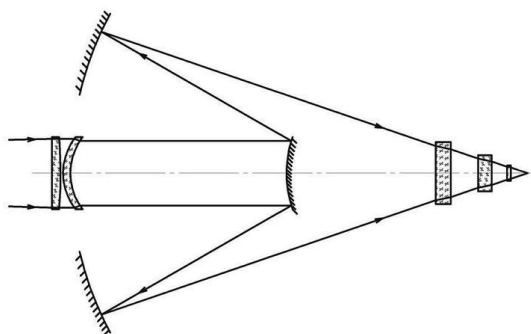


Рис. 4. Оптическая схема объектива.

оптической схемы проекционного объектива составляет схема Шварцшильда [10], в которую был введен линзовый компенсатор для компенсации полевых aberrаций (астигматизм, кривизна поля). Поскольку компенсатор близок к афокальному, он практически не вносит хроматических aberrаций [11], что позволяет проводить измерение пятна рассеяния объектива в видимом диапазоне, с соответствующим пересчетом. При синтезе схемы объектива были учтены aberrации, вносимые входными окнами фотоприемника, путем введения в схему соответствующих им плоскопараллельным пластинок.

Разработанный зеркально-линзовый объектив состоит из двух зеркал и компенсатора, включающего в себя две линзы. Оптическая схема объектива приведена на рис. 4.

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.

Заключение

В результате проведенной работы показана возможность контроля МФПУ спектрального диапазона 2,7–3,2 мкм с углом поля зрения 40° и шагом до 24 мкм по методике, приведенной в ГОСТ 17772–88, определены требования на качество изображения и на точность его позиционирования.

Было проведено математическое моделирование, позволяющее получить распределение энергии в изображении точечной диафрагмы, формируемом зеркально-линзовым объективом с центральным экранированием, а также оценить погрешность измерения коэффициента фотоэлектрической связи, вносимую объективом.

Данные, полученные в результате математического моделирования, позволили разработать оптическую схему объектива, пригодного для использования в качестве оптического зонда для установки измерения фотоэлектрической связи МФПУ орбитального базирования с шагом чувствительного элемента до 24 мкм.

Литература

1. Акимов В.М., Болтарь К.О., Бурлаков И.Д. и др. // Прикладная физика. 2005. № 2. С. 7
2. Дирочка А.И., Корнеева М.Д., Филачев А.М. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 37
3. Полесский А.В., Соляков В.Н., Хамидуллин К.А.. Влияние фотоэлектрической взаимосвязи в матричных фотоприемных устройствах на модуляционную передаточную функцию / Труды 54-й международной конференции МФТИ. 2011
4. Ллойд Дж. Системы тепловидения. — М.: Издательство «Мир», 1978
5. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик, ГОСТ 17772–88, 1988 г.
6. Болтарь К.О., Яковлева Н.И. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 23
7. Домненко В.М., Бурсов М.В., Иванова Т.В.. Моделирование формирования оптического изображения: Учебное пособие. — СПб.: НИУ ИТМО, 2011
8. Гудмен Дж.. Введение в Фурье-оптику. — М., Мир, 1970
9. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1973
10. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем — М., Машиностроение, 1975
11. Шеннон Р., Вайант Дж. Проектирование оптических систем. — М.: Мир, 1983

Optical probe for the crosstalk measuring in MWIR

V.I. Demidov¹, N.B. Zaletaev¹, A.V. Polesskiy^{1,2}, E.A. Smirnova^{1,3},
N.A. Semenchenko^{1,3}, and K.A. Khamidullin¹

¹ Orion Research-and-Production Association
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

² State Technical University MIREA
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

³ Bauman Moscow State Technical University
5 2-nd Bauman str., 105005, Moscow, Russia

The results of experimental research about influence of microcryogenic system's (MCS) operation on quality of optical-electronic systems are given. MCS with an integrated Stirling gas cryogenic machine are used in focal plane arrays (FPA) that is cooled to cryogenic temperature. The research measurements of the displacements and incline of cooling pin of MCS were made. Opportunities of using existing MCS for the development of advanced FPA with a small pixel pitch are determined.

PACS: 42.79.Pw

Keywords: microcryogenic system, cooling pin, focal plane array.

Bibliography — 11 references

Received October 15, 2013