

УДК 621.397

Стенд для исследования качества формирователей сигналов изображения на основе многорядных матричных фотоприемных устройств с временной задержкой и накоплением

М. Г. Мазин, П. С. Лазарев, Г. Г. Деева, В. Н. Соляков, К. А. Хамидуллин, А. Д. Юдовская

Разработан и изготовлен стенд для исследования качества формирователей сигналов изображения на основе многорядных матричных фотоприемных устройств с временной задержкой и накоплением. Для оценки качества формирователей сигналов изображения использован критерий: уширение функции рассеяния линии, возникающее при различных ошибках несогласованной работы сканера и блока цифровой обработки сигналов. Приведены состав, структура стенда и результаты моделирования на серийно выпускаемом матричном фотоприемном устройстве ФЭМ10М на основе $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ формата 4×288 .

PACS: 42.79Sz, 8530.-Z

Ключевые слова: ВЗН, МФПУ, функция рассеяния линии, FPA, TDI.

Введение

Многорядные матричные фотоприемные устройства (МФПУ) с временной задержкой и накоплением (ВЗН) получили широкое применение в тепловизионных и теплопеленгационных системах со сканированием [1—6]. Суть режима ВЗН состоит в запоминании и суммировании сигналов от N фоточувствительных элементов (ФЧЭ), расположенных в направлении сканирования изображения. В МФПУ, построенных по этому принципу, появляется ряд преимуществ:

- возрастает отношение сигнал/шум в \sqrt{N} раз в случае некоррелированной шумовой составляющей в сигналах отдельных ФЧЭ;

- уменьшается разброс чувствительности по каналам МФПУ;

- наличие дефектных ФЧЭ не приводит к дефектности строки изображения, а только к незначительному снижению отношения сигнал/шум в строке, содержащей дефектный элемент.

В результате, многорядные МФПУ в настоящее время вытеснили однорядные и являются конку-

рентоспособными в сравнении с матричными МФПУ "смотрящего" типа. Применение таких МФПУ за счет коррелированного суммирования сигналов с нескольких фоточувствительных элементов позволяет увеличить соотношение сигнал/шум и, тем самым, чувствительность самого оптико-электронного прибора. В связи с этим актуальна задача разработки исследовательского и стендового измерительного оборудования, позволяющего проводить оценку качества формирователей сигналов изображения на основе многорядных МФПУ с ВЗН. Под формирователем сигналов изображения будем понимать МФПУ с блоком цифровой обработки сигналов.

В настоящей работе представлены результаты разработки стенда для исследования качества работы формирователя сигналов изображения (ФСИ) на основе МФПУ с ВЗН, работающих в спектральных диапазонах 3—5 и 8—12 мкм.

Исследовательский стенд

Блок-схема стенда показана на рис. 1, а внешний вид оптико-электронной части стенда представлен на рис. 2.

В качестве критерия корректной работы МФПУ с соответствующим блоком цифровой обработки (БЦО) в составе ФСИ предлагается проведение сравнения аппаратной функции рассеяния линии конкретного ФСИ с "идеальным", в котором обеспечено полное согласование работы сканера и БЦО. В этом случае исследуется аппаратная функция рассеяния линии (ФРЛ) на выходе ФСИ.

Мазин Максим Геннадьевич, аспирант.
Лазарев Павел Сергеевич, инженер.
Деева Галина Григорьевна, инженер.
Соляков Владимир Николаевич, главный научный сотрудник.
Хамидуллин Камиль Алиевич, аспирант.
Юдовская Александра Дмитриевна, инженер.
ФГУП «НПО "Орион"».
Россия, 111123, Москва, ш. Энтузиастов, 46/2.
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 5 апреля 2012 г.

© Мазин М. Г., Лазарев П. С., Деева Г. Г., Соляков В. Н., Хамидуллин К. А., Юдовская А. Д., 2012

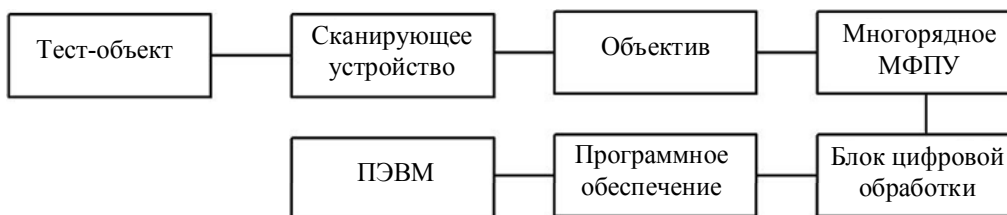


Рис. 1. Блок-схема стенда

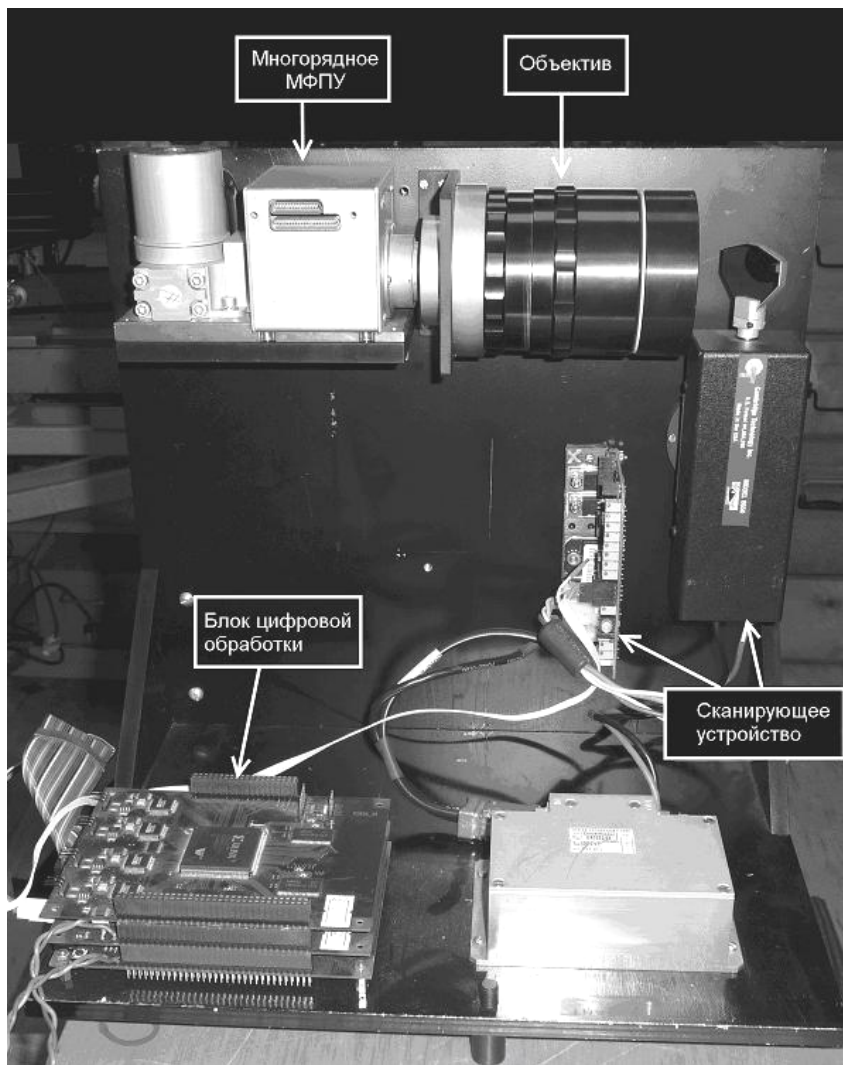


Рис. 2. Внешний вид оптико-электронной части стенда

В соответствии с теорией линейной фильтрации [1], преобразование распределения яркости объекта в распределение яркости изображения происходит в результате свертки, и результирующая функция рассеивания будет результатом свертки всех функций рассеивания, входящих в состав системы. Согласно теореме свертки, преобразование Фурье свертки двух функций равно произведению преобразований этих функций. Таким образом, ФРЛ всей системы равна:

$$F\{S_{\text{сум}}\} = F\{S_{\text{об}}\} * F\{S_{\text{пи}}\} * F\{S_{\text{бцо}}\}, \quad (1)$$

где последовательно подвергаются свертке импульсные реакции объектива, МФПУ и блока

цифровой обработки, соответственно. Таким образом, необходимо известные импульсные реакции объектива, приемника излучения и БЦО перевести посредством преобразования Фурье в частотную область, перемножить их и совершить обратное преобразование Фурье полученной функции, которая и будет аппаратной функцией всей системы. Рассмотрим каждый узел в отдельности.

Тест-объектом является нагретая нихромовая нить (тест-объект типа "светящаяся линия"), находящаяся на расстоянии нескольких метров от исследуемого ФСИ. При этом угловой размер нити существенно меньше (более чем в 4 раза) мгновенного поля зрения фоточувствительного эле-

мента (ФЧЭ), и ее можно считать точечным источником. Для проведения исследований ФСИ с режимом ВЗН, работающих в диапазоне 3—5 мкм, используется разработанный в ФГУП «НПО "Орион"» объектив "Орион-80", а в диапазоне 8—12 мкм объектив МАКРО-70. Качество изображения применяемых объективов достаточно высоко: для "Орион-80" — концентрация энергии в пятне 18 мкм составляет 80 %; для МАКРО-70 — концентрация энергии в пятне 34 мкм составляет 80 %. Вследствие того, что размер сканирующего зеркала меньше входного зрачка объектива, названные выше объективы работают с пониженными относительными отверстиями. Поэтому их качество становится практически дифракционным, и в анализе можно использовать ФРЛ как изображение идеальной линии для дифракционно-ограниченных систем.

В дифракционно-ограниченной оптической системе распределение интенсивности в изображении светящейся точки, найденное из дифракции Фраунгофера на круглом зрачке, показывает, что энергия излучения испытывает дифракционное рассеяние по всему пространству изображений, в том числе и на всей фокальной плоскости. Функция рассеяния точки (ФРТ) в нормированных (канонических) координатах η будет выглядеть следующим образом [2]:

$$h(\eta') = \left[\frac{2J_1(2\pi\eta')}{2\pi\eta'} \right]^2, \quad (2)$$

где $h(\eta')$ — нормированная ФРТ;

J_1 — функция Бесселя 1-го рода, 1-го порядка.

Бесконечно тонкую светящуюся линию можно представить в виде совокупности светящихся точек. Так как световые колебания во всех точках линии некогерентны, то функцию распределения интенсивности в любом сечении, перпендикулярном линии, можно получить сложением ординат всех ФРТ, расположенных справа или слева от сечения. Таким образом, ФРЛ представляет собой интеграл от ФРТ по одному из направлений:

$$S(\eta') = \int_{-\infty}^{\infty} h(\eta'_x \eta'_y) d\eta'_y = \frac{H_1(4\pi\eta'_x)}{(2\pi\eta'_x)^2}, \quad (3)$$

где H_1 — функция Струве 1-го порядка.

Ограниченные размеры зеркала, применяемого в стенде сканера, позволяют использовать световой диаметр до 20 мм. По этой причине относительное отверстие объективов будет существенно уменьшено (до 1/3,5—1/4), и их качество изображения становится практически "идеальным". Для объектива МАКРО-70 ФРЛ будет выглядеть следующим образом:

$$S(x) = \frac{H_1 \left(4\pi \left[\frac{Dx}{2f'\lambda} \right] \right)}{\left(2\pi \left[\frac{Dx}{2f'\lambda} \right] \right)^2}, \quad (4)$$

где $D = 20$ мм — диаметр входного зрачка объектива;

$f' = 70$ мм — фокусное расстояние объектива;

λ — длина волны.

ФРЛ объектива МАКРО-70 показана на рис. 3.

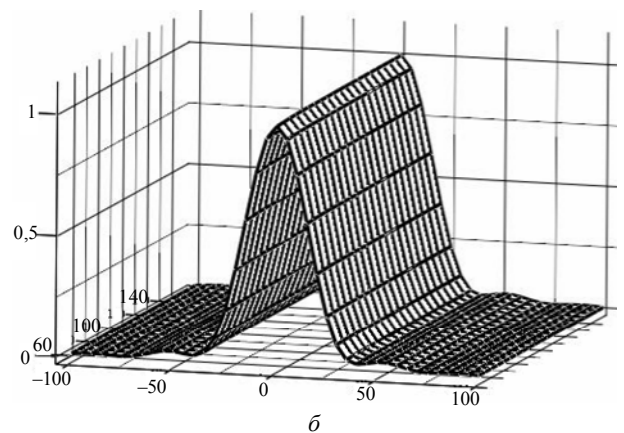
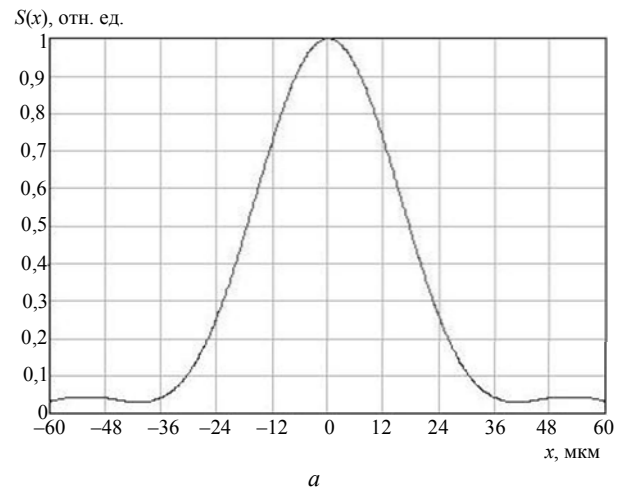


Рис. 3. ФРЛ объектива МАКРО-70:

a — одномерный случай; b — двухмерный случай

Найдем передаточную функцию приемника излучения. Поскольку в нашем случае сканирование производится только в одном направлении, то оптической передаточной функцией (ОПФ) приемника будет результат преобразования Фурье от функции $\text{rect}(x/a)$, где a — размер фоточувствительной площадки. В МФПУ на основе CdHgTe формата 4×288 имеем $a = 28$ мкм.

Функция rect для данного фотоприемника представлена на рис. 4.

Фурье-образ функции rect приемника выглядит следующим образом:

$$\tilde{S}_{\text{ПИ}} = \frac{\sin(\pi a f_x)}{\pi a f_x} = \text{sinc}(\pi a f_x). \quad (5)$$

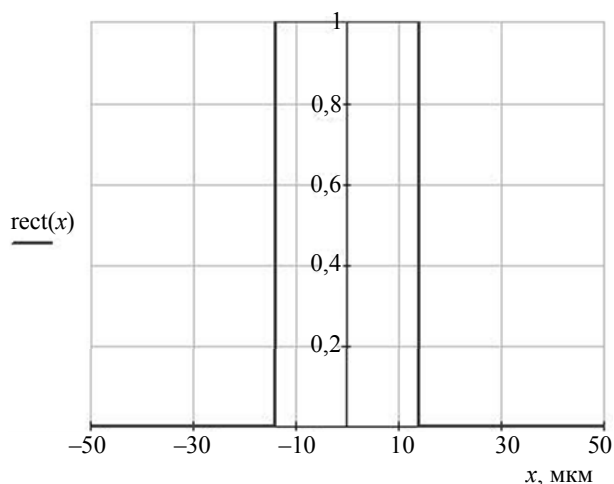


Рис. 4. Импульсная реакция чувствительного приемника формата 4×288 на основе КРТ

Графически эта функция показана на рис. 5.

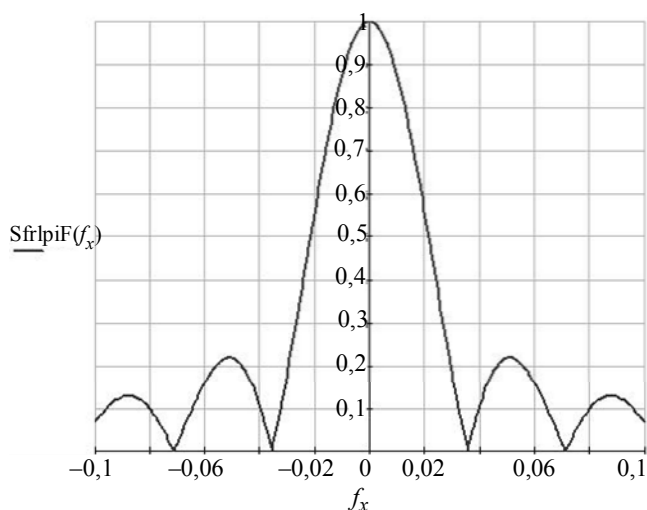


Рис. 5. ОПФ приемника излучения формата 4×288 на основе КРТ

На основе вышеизложенного проводилось вычисление аппаратной функции системы, включающей объектив и МФПУ. Основные искажения аппаратной функции исследуемого ФСИ возникают за счет несогласованной работы БЦО со сканером реального тепловизионного прибора. В этом случае, когда период опроса не синхронизирован полностью с перемещением изображения в фокальной плоскости, это может привести к уширению функции и как следствие — к падению суммарного сигнала. Учитывая, что размеры ФЧЭ составляют около 28 мкм, а максимальное расстояние между элементами, по которым происходит накопление в режиме ВЗН, равно 168 мкм, то допустимое рассогласование скорости сканирования с периодом опроса ФЧЭ должно быть много меньше 16 % (28 мкм/168 мкм). Рассогласование может иметь как систематическую составляющую, так и случайную, обусловленную системой управления движением сканера.

Проверка качества ФСИ на разработанном стенде проводится следующим образом.

1. При регистрации сигналов от отдельных линеек МФПУ (выключенном режиме ВЗН) измеряется аппаратная функции отдельных линеек ФЧЭ.

2. Полученные аппаратные функции с элементов нормируются, и определяется их ширина по уровню 0,5 от максимума. В случае отсутствия влияния фотоэлектрической связи и неоднородности чувствительности элементов, нормированные импульсные реакции должны быть одинаковы.

3. При включенном режиме ВЗН измеряется интегральная импульсная реакция.

4. Полученная интегральная импульсная реакция нормируется и сравнивается с сигналом без режима ВЗН, полученным в п. 2.

5. Критерием согласованности сканирования и суммирования сигналов в режиме ВЗН является согласованный с потребителем ФСИ допустимый уровень уширения интегральной аппаратной функции по сравнению с аппаратными функциями отдельных линеек.

На рис. 6 приведены результаты моделирования аппаратных функций, полученных для "идеального" ФСИ и при несинхронной работе сканера и БЦО (рассогласование скорости сканирования и периода опроса линеек составляло 10 %).

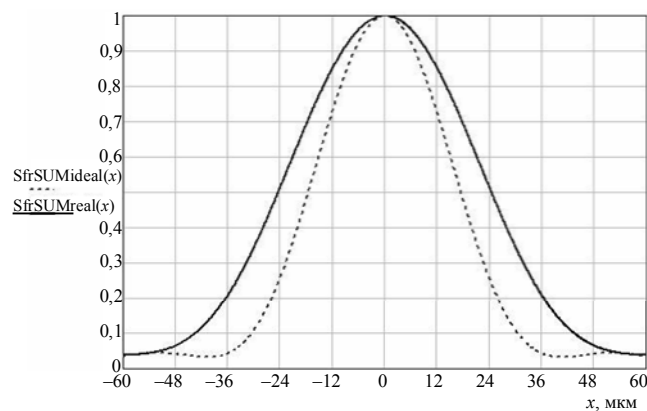


Рис. 6. ФРЛ "идеального" ФСИ и модель ФРЛ с несинхронной работой БЦО и сканера:

----- "идеальный" ФСИ;
 — модель несинхронной работы БЦО и сканера

Заключение

На основании проведенного анализа разработан и изготовлен стенд для исследования качества формирователей сигналов изображения на основе многорядных матричных фотоприемных устройств с временной задержкой и накоплением. Для оценки качества формирователей сигналов изображения использован критерий: уширение функции рассеяния линии, возникающее при различных ошибках несогласованной работы сканера и блока цифровой обработки сигналов. Приведены

состав, структура стенда и результаты моделирования на серийно выпускаемом матричном фотоприемном устройстве ФЭМ10М на основе $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ формата 4×288 .

Литература

1. Ллойд Дж. Системы тепловидения. – М.: Мир, 1978.

2. Кирилловский В. К. Оптические измерения. Часть 2. Теория чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения. — СПб.: ГИТМО, 2003.

3. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. – М.: Мир, 1988.

4. Хадсон Р. Инфракрасные системы. – М.: Мир, 1972.

5. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. — М.: Мир, 1970.

6. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. – М.: Физматкнига, 2005.

Equipment for quality research of imaging devices based on multirow matrix photodetectors with time delay and accumulation

M. G. Mazin, P. S. Lazarev, G. G. Deeva, V. N. Solyakov,

K. A. Khamidullin, A. D. Judovskaya

Orion R&P Association,

46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru

The stand for study of imaging devices based on multirow matrix photodetectors with time delay and accumulation has been developed and fabricated. It has been used the criterion for estimation of imaging devices quality: broadening a line spread function, which appears under different unmatched work errors of scanner and digital processing unit. In this article are given composition, structure of equipment and model estimated value on the serial $4 \times 288 Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ photodetector.

PACS: 42.79Sz, 8530.-Z

Keywords: time delay and accumulation, FPA, line spread function, TDI.

Bibliography — 6 references.

Received April 5, 2012

* * *