

Системы микросканирования для тепловизоров третьего поколения

*И. И. Кремис, В. А. Моисеев, К. П. Шатунов, Е. О. Ульянова,
Р. А. Гладков, А. А. Горшков*

Представлены результаты разработки систем микросканирования для тепловизоров третьего поколения на основе пьезоэлектрического и электромагнитного приводов. Приведены основные технические характеристики микросканеров, дана их сравнительная оценка.

Ключевые слова: микросканер, неоднородность, пиксель, двухточечная коррекция, матричное фотоприемное устройство.

Введение

Практическое применение идеи микроперемещения проекции сцены наблюдения относительно матрицы фоточувствительных элементов определяется перспективой решения актуальных проблем, возникающих при построении тепловизионных приборов (ТВП) на базе матричных фотоприемных устройств (МФПУ).

Фоточувствительный кристалл МФПУ состоит из периодически расположенных фотоэлементов. При проецировании сцены наблюдения на матрицу фотоэлементов фотоприемник действует как фильтр пространственных частот [1–3]. При этом предел разрешаемых МФПУ пространственных частот ограничивается периодом расположения фотоэлементов приемника. В данном случае микросканирование сцены наблюдения на половину периода расположения пикселей матрицы позволяет улучшить геометрическое разрешение, повысить угловую разрешающую способность и дальность действия ТВП на базе МФПУ [4].

Ещё одним аспектом применения микросканирования в ТВП на базе матричных фотоприем-

ных устройств является возможность коррекции геометрического шума МФПУ.

При регистрации сцены матричными приемниками излучения в них, помимо временного шума, обычно наблюдается и так называемый «геометрический шум». Этот шум обусловлен характером зависимости отклика фотоэлементов от потока излучения [5, 6]. При этом использование традиционных эталонных схем коррекции неоднородности чувствительности элементов МФПУ имеет ряд недостатков, связанных с допущением стационарности и линейности процессов формирования сигналов ФПУ [7]. Обзор существующих методов позволяет определить тенденцию в разработке методов коррекции неоднородности чувствительности фотоприемников, нечувствительных к временным флуктуациям сигнала фотоэлементов и основанных на использовании идеи микросканирования. Здесь идея методов микросканирования состоит в получении соотношения между пикселями по всей матрице. По полученным соотношениям изображение выделяется из смеси с геометрическим шумом. Коррекция проводится непрерывно, т. е. по сигналам сцены и в каждом кадре изображения [8].

К числу основных источников геометрического шума также относятся дефекты материала фоточувствительного слоя и дефекты, вызванные несовершенством технологии гибридации микросборки МФПУ [5, 9]. В связи с этим крайне важной при работе с МФПУ задачей является микросканирование с расширенным диапазоном перемещения с целью устранения влияния на изображение дефектных фоточувствительных элементов МФПУ. Проблема усугубляется сложным температурным режимом работы МФПУ (с постоянным глубоким термоциклированием), причем в процессе наработки количество локальных дефек-

Кремис Игорь Иванович, заведующий отделом, к.т.н.
Моисеев Владимир Александрович, зам. заведующего
отделом.

Шатунов Константин Павлович, заведующий отделом.
Ульянова Елена Олеговна, младший научный сотрудник.
Гладков Роман Александрович, старший инженер-
электроник.

Горшков Александр Юрьевич, ведущий инженер.
Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ».
Россия, 630090, г. Новосибирск, просп. Академика
Лаврентьева, 2/1.
E-mail: igor21738@ngs.ru

Статья поступила в редакцию 26 января 2017 г.

© Кремис И. И., Моисеев В. А., Шатунов К. П., Ульянова Е. О.,
Гладков Р. А., Горшков А. Ю., 2017

тов увеличивается. Кроме того, дефекты способны образовывать кластеры из прилегающих дефектных ячеек.

Для устранения указанного эффекта необходимо производить микросканирование с перемещением большим, чем на размер ячейки ФПУ. Для устранения влияния кластеров дефектов желательно использовать шаги сканирования больше полутора-двух размеров ячейки ФПУ, т. е. диапазон микросканирования следует увеличить втрое от величины, необходимой для задачи повышения разрешения, либо сделать регулируемым шаг сканирования на соответствующие величины.

Таким образом, режим микросканирования дает возможность при использовании дополнительных управляемых электромеханических оптических устройств реализовать сдвиг изображения сцены наблюдения относительно фотоприемного устройства на дискретную величину. Данный режим позволяет:

- повысить разрешение тепловизионной системы при сканировании на величину, кратную половине шага фоточувствительных элементов фотоприемного устройства;
- уменьшить количество дефектных элементов в изображении при сканировании на величину, кратную шагу фоточувствительных элементов фотоприемного устройства;
- выполнить коррекцию неоднородности чувствительности элементов МФПУ по сигналам сцены.

В Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ» разработаны и изготовлены три типа устройств микросканирования, осуществляющих четырехточечную диаграмму микроперемещения (по квадрату):

- на основе двух плоскопараллельных пластин с электромагнитным приводом;

- на основе смещения оптического компонента с электромагнитным приводом;
- на основе смещения оптического компонента с пьезоэлектрическим приводом.

Все разработанные макеты устройств микросканирования изготовлены в исполнении, предназначенном для использования в лабораторных условиях.

Цель данной статьи – изложение результатов разработки систем микросканирования для тепловизоров третьего поколения.

Схема оптического тракта для ТВП с микросканированием

Для того чтобы предотвратить попадание на МФПУ собственного или рассеянного излучения оптических деталей, их оправ или других элементов конструкции и тем самым не снизить контраст наблюдаемого изображения и чувствительность ТВП в целом, в конструкции криостата МФПУ предусмотрена охлаждаемая диафрагма. При сопряжении оптической системы с охлаждаемым МФПУ эта диафрагма также выполняет функцию апертурной, т. е. не допускает попадание на МФПУ постороннего излучения вне пределов заднего апертурного угла [5].

С учетом данных особенностей конструкции криостата оптимальной оптической системой для МФПУ будет система, у которой выходной зрачок совмещен с охлаждаемой диафрагмой криостата. Наиболее подходящей для реализации вышеизложенных требований является оптическая схема с промежуточным изображением [10–12].

На рис. 1 показана схема оптического тракта с промежуточным изображением.

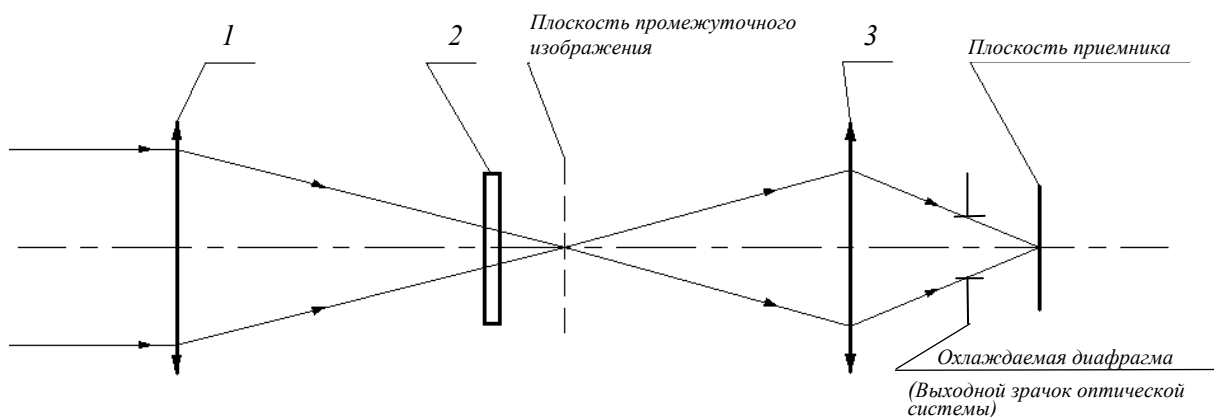


Рис. 1. Схема оптического тракта: 1 – первый компонент системы, 2 – плоскопараллельная пластина, 3 – второй компонент системы.

Оптическая система с промежуточной плоскостью изображения является наиболее оптимальной и для реализации различных видов микросканирования, т. к. позволяет установку устройств микросканирования вблизи промежуточной плоскости изображения, где световые диаметры имеют наименьшие значения, что позволяет снизить массогабаритные характеристики устройств микросканирования.

Обеспечение развертки микросканированием для данной компоновки оптической системы возможно организовать следующими способами:

- наклонами плоскопараллельной пластинки позиция 2;
- подвижкой всего оптического компонента (проекционного) позиция 3, находящегося за плоскостью промежуточного изображения.

В принципе, существует возможность размещения устройства микросканирования на основе плоскопараллельных пластинок после проекционного компонента (позиция 3), т. е. непосредственно перед ФПУ, однако в этом случае оптическая система должна иметь задний отрезок значительной величины, позволяющей разместить устройство микросканирования между конструктивными элементами оптической системы и криостата ФПУ. Увеличение заднего отрезка приводит к значительному усложнению оптической системы, а именно: к увеличению габаритов, увеличению количества оптических элементов, применению асферических поверхностей и, как следствие, к значительному удорожанию объектива и всего прибора в целом.

Следует также отметить, что данная компоновка оптической системы позволяет применить (при необходимости) взаимозаменяемые фронтальные компоненты (позиция 1) с другим фокусным расстоянием, что позволяет построить объек-

тив с переменным фокусным расстоянием (полем зрения), не меняя при этом проекционную часть (позиция 3). Кроме того, оптическая система с промежуточной плоскостью изображения позволяет значительно уменьшить массогабаритные характеристики фронтальных оптических компонентов (позиция 1) и, как следствие, объектива в целом.

Микросканер на основе двух плоскопараллельных пластин с электромагнитным приводом

Микросканер состоит из двух плоскопараллельных пластин, приводимых в движение электромагнитным приводом. Одновременный поворот пластин на заданные углы позволяет сместить проекцию изображения сцены наблюдения в плоскости матрицы ФПУ в нужном направлении относительно исходного положения. В исходном состоянии пластины перпендикулярны направлению потока тепловой энергии.

На рис. 2 приведен внешний вид микросканера, а в табл. 1 даны его основные параметры.



Рис. 2. Внешний вид электромагнитного микросканера на основе двух плоскопараллельных пластин со снятой крышкой.

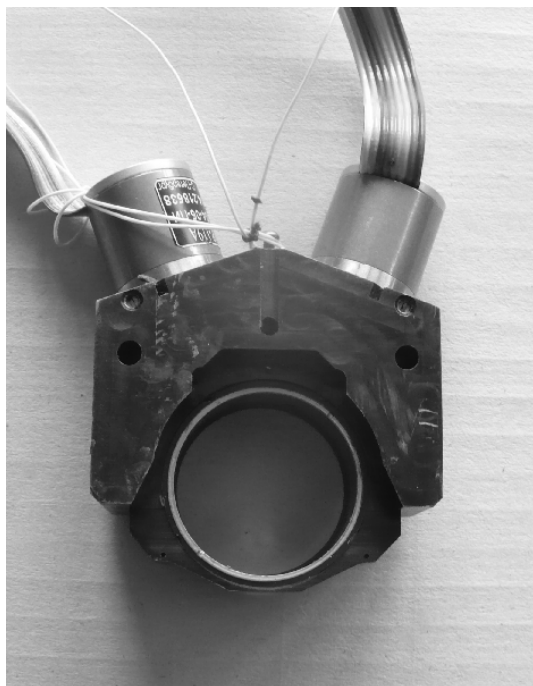
Таблица 1

Основные параметры электромагнитного микросканера на основе двух плоскопараллельных пластин

Наименование параметра, единица измерения	Значение
Частота переключения полей, Гц	до 100
Диапазон смещения проекции изображения, мкм:	
– по Y	От ± 7 до ± 40
– по X	От ± 7 до ± 60
– максимальный вписанный квадрат перемещений, мкм	до 80×80
Время переключения полей, мс	1,5–2,5
Точность позиционирования, % от шага перемещения	± 5 %
Максимальный вес оптических элементов, г	40
Диаметр рабочей апертуры, мм	25 (возможны исполнения до 40)
Габариты микросканера, мм	
– высота	75
– ширина	55
– толщина	24
Вес микросканера, г	220
Потребляемая мощность (с блоком управления) при частоте переключений 100 Гц в квадрате 60×60 мкм, Вт	4

Микросканер на основе смещения оптического компонента с электромагнитным приводом

Микросканер осуществляет сдвиг проекции изображения в плоскости матрицы ФПУ за счёт



смещения линз оптического компонента, входящего в состав оптического канала тепловизионного прибора. Перемещение оптического компонента выполняется электромагнитным приводом.

На рис. 3 приведен внешний вид микросканера, а в табл. 2 даны его основные параметры.

Рис. 3. Внешний вид электромагнитного микросканера на основе смещения оптического компонента.

Таблица 2

**Основные параметры электромагнитного микросканера на основе смещения
оптического компонента**

Наименование параметра, единица измерения	Значение
Частота переключения полей, Гц	до 100
Диапазон перемещения оптического компонента, мкм	От ± 7 до ± 40
Время переключения полей, мс	1,5–2,3
Точность позиционирования, % от шага перемещения	± 5 %
Максимальный вес объектива (оптического элемента), г	40 (до 80 с деградацией времени на 50 %)
Максимальный диаметр объектива (оптического элемента), мм	30 (возможны исполнения до 50–100)
Габариты микросканера, мм	
– высота	75
– ширина	55
– толщина	24
Вес микросканера, г	250 (уточняется)
Потребляемая мощность (с блоком управления) при частоте переключений 100 Гц, скачках до 60 мкм, Вт	4

Микросканер на основе смещения оптического компонента с пьезоэлектрическим приводом

Микросканер осуществляет сдвиг проекции изображения в плоскости матрицы ФПУ за счёт смещения линз оптического компонента, входяще-

го в состав оптического канала тепловизионного прибора, приводимых в движение посредством воздействия пьезокерамических элементов на плоские пружины и рычаги.

На рис. 4 приведен внешний вид микросканера, а в табл. 3 даны его основные параметры.

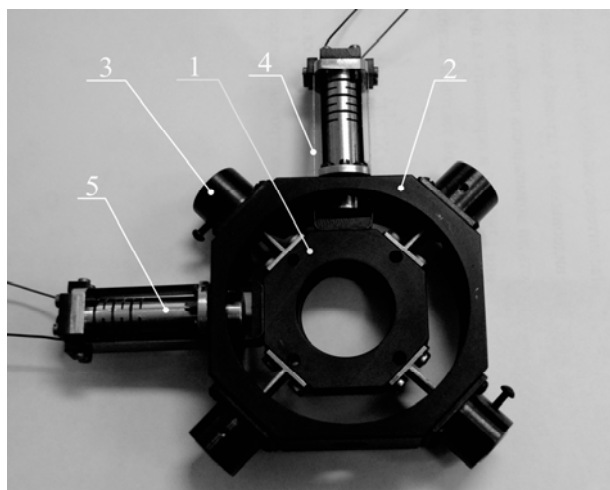


Рис. 4. Внешний вид пьезоэлектрического микросканера: 1 – оправа, 2 – корпус, 3 – опора, 4 – тяга, 5 – пружина-толкатель.

Таблица 3

Основные параметры микросканера с пьезоэлектрическим приводом

Наименование параметра, единица измерения	Значение
Частота переключения полей, Гц	до 200
Диапазон перемещения, мкм	От ± 1 до ± 20
Время переключения полей, мс	1–2
Точность позиционирования, % от шага перемещения	± 5 %
Максимальный вес объектива (оптического элемента), г	100
Максимальный диаметр объектива (оптического элемента), мм	30 (возможны исполнения до 100)
Габариты микросканера, мм	
– высота	102
– ширина	102
– толщина	22
Вес микросканера, г	150
Потребляемая мощность (с блоком управления) при частоте переключений 100–200 Гц, Вт	5–9

Практические результаты исследования эффективности работы устройств микросканирования

Проведенные исследования были нацелены на решение задачи уменьшения геометрического шума в изображении. Задача увеличения разрешения тепловизионной системы не исследовалась – эти работы будут проведены позднее.

Исследования проводились с использованием электромагнитного микросканера на основе двух плоскопараллельных пластин.

В качестве объекта исследования использовано МФПУ производства ИФП СО РАН форматом КРТ384×288 элементов с шагом 25 мкм.

На рис. 5, а приведено изображение, полученное без использования устройства микросканирования. На изображении наблюдается остаточная неоднородность чувствительности элементов МФПУ, а также дефектные элементы МФПУ, проходящие диагонально через поле зрения. На рис. 5, б приведено изображение, полученное с использованием электромагнитного микросканера на основе двух плоскопараллельных пластинок.



Рис. 5. Результаты фильтрации: а – исходное изображение; б – изображение после фильтрации.

Как видно из приведенных рисунков, в результате применения микросканера совместно со специальными алгоритмами обработки информации из изображения удаляется остаточная неоднородность чувствительности элементов МФПУ, а эффективность компенсации дефектных элементов достигает 100 %.

Заключение

В результате проведенных разработок были созданы системы микросканирования трех типов, осуществляющие четырехточечную диаграмму микроперемещения – по квадрату. Микросканеры позволяют осуществлять гибкое регулирование шага сканирования. Конструкция сканеров позволяет заменять узлы крепления перемещаемых оптических компонентов под необходимые размеры.

Преимущество микросканеров на электромагнитных приводах – большой шаг перемещения проекции. Для микросканера с использованием плоскопараллельных пластин – до 120 мкм, для микросканера с использованием смещения оптического компонента – до 80 мкм.

Преимущество микросканеров на пьезоприводах – высокая частота переключения полей (до 200 Гц).

Недостатки: микросканеров на электромагнитных приводах – низкая частота переключения полей (до 100 Гц), микросканеров на пьезоприводах – малый шаг перемещения проекции (до 40 мкм).

Дальнейшее развитие данной работы будет направлено на решение следующих задач:

- исследование устройств микросканирования на воздействие внешних воздействующих факторов и безотказность;
- увеличение смещения проекции изображения микросканером на пьезопроводе до 150 мкм;

- увеличение частоты переключения полей микросканеров с электромагнитным приводом до 200 Гц;

- исследование эффективности применения устройств микросканирования для увеличения пространственного разрешения ТВП;

- создание опытного образца сканера.

Авторы выражают благодарность Александру Сергеевичу Мартынову за разработку устройств микросканирования с электромагнитным приводом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шакинов А. К., Будеев Д. Е. // Сборник статей по материалам XXXVI международной 67 научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике». 2014. № 7 (32). С. 61.
2. Мальцев Г. Н. // Информационно управляющие системы. 2004. № 2.
3. Блажевич С. В., Селютин Е. С. // Научные ведомости. Серия: Математика. Физика. 2014. № 5 (176).
4. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. // Специальная техника. 2004. № 2.
5. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос. 2004.
6. Кремис И. И., Толмачев Д. А. // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 109.
7. Жегалов С. И., Соляков В. Н., Фетюхина В. Г. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 80.
8. Жегалов С. И., Соляков В. Н., Фетюхина В. Г. // Прикладная физика. 2011. № 6. С. 149.
9. Акимов В. М., Болтарь К. О. // Прикладная физика. 2015. № 1. С. 51.
10. Ульянова Е. О. // Сборник материалов VIII Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2012», 10–20 апреля 2012 г. Т. 1. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии – Новосибирск: СГГА. 2012. С. 142.
11. Ульянова Е. О. / Труды 22-ой Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. 22–25 мая 2012 г., «НПО «Орион», Москва. С. 305.
12. Ульянова Е. О. // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 6. С. 14.

Microscanning systems for third-generation thermal imagers

*I. I. Kremis, V. A. Moiseev, K. P. Shatunov, E. O. Ulyanova,
R. A. Gladkov, and A. A. Gorshkov*

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics «Technological Design Institute of Applied Microelectronics», Siberian Branch of The Russian Academy of Sciences (NB ISP SB RAS «TDIAM»)
8 Nikolaeva str., Novosibirsk, 630090, Russia
Email: ktipm@oesd.ru

Received January 26, 2017

The results of development of the microscanning system for the third-generation thermal imagers based on piezoelectric and electromagnetic actuators are presented. The main technical characteristics of microscanners are evaluated and are compared.

Keywords: microscanning, heterogeneity, pixel, point-to-point correction, matrix photodetector, thermal imaging.

REFERENCES

1. A. K. Shakenov and E. E. Budeev, *Tekhn. Nauki*, No 7(32), 61 (2014).
2. G. N. Maltsev, *Inform. Upravl. Sist.*, No. 2 (2004).
3. S. V. Blazevic and E. S. Selyutina. *Nauchn. Vedomosti. Ser. Matematika*, No. 5, 176 (2014).
4. V. V. Tarasov and Y. G. Yakushenkov, *Spetsial. Tekhn.*, No. 2 (2004).
5. V. V. Tarasov and Y. G. Yakushenkov, *IR Systems of the Looking Class* (Logos, 2004) [in Russian].
6. I. I. Kremis, D. A. Tolmachev, *Prikl. Fiz.*, No. 6 (2016).
7. S. I. Zhegalov, V. N. Solyakov, and V. G. Fetyukhina, *Prikl. Fiz.*, No. 2 (2011).
8. S. I. Zhegalov, V. N. Solyakov, and V. G. Fetyukhina, *Prikl. Fiz.*, No. 1 (2015).
9. V. M. Akimov and K. O. Boltar, *Prikl. Fiz.*, No. 1 (2015).
10. E. O. Ulyanova, in *Proc. VIII Intern. Scient. Congress «GEO-Sibir-2012»* (April 10–12, 2012) P. 142.
11. E. O. Ulyanova, in *Proc. 22-nd Intern. Conf. Photoelectronics* (May 22–25, 2012, NPO Orion, Moscow) P. 305.
12. E. O. Ulyanova, *Optich. Zhurn.* **80** (6), 14 (2013).