Оптико-электронный модуль средневолнового ИК-диапазона на основе отечественного InSb фотоприемного устройства формата 640×512

Д. Э. Драгунов, И. П. Курганов, А. В. Полесский, А. Д. Юдовская, А. Д. Деомидов,
Н. А. Соломонова, П. С. Лазарев, К. О. Болтарь, К. А. Шарганов

Приведены результаты разработки оптико-электронного модуля на основе отечественного охлаждаемого матричного фотоприемного устройства формата 640×512 элементов, работающего в спектральном диапазоне 3,6–4,9 мкм, на основе InSb. В работе описаны основные применяемые алгоритмы обработки видеоизображения, описаны основные блоки разработанного устройства, описаны методики проведения измерений ЭШРТ и пространственного разрешения, приведены характеристики прибора.

Ключевые слова: InSb, MWIR-диапазон, MWIR-модуль, средневолновый, тепловизор, оптико-электронный модуль.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-5-410-416

Введение

В современном мире существует тренд на системы, которые готовы работать сразу

после подачи питания. В ИК-технике этот тренд выражается в заинтересованности потребителя получить готовый бескорпусный оптико-электронный канал для дальнейшей интеграции в мультиспектральную систему, а не отдельно фотоприемное устройство (ФПУ) и объектив.

Для применения устройств такого типа становится необязательным тратить временные и человеческие ресурсы на такие специфичные задачи, как включение современных фотоприемных устройств, наладку работ по настройке и калибровке приборов, разработку электронных блоков оцифровки и обработки видеоизображения. Такие приборы значительно сокращают расходы потребителя на разработку конечного продукта.

Подобные системы имеются в каталогах всех ведущих компаний-производителей матричных фотоприемных устройств, например, таких как FLIR, LynRed, SCD и т. д.

Современные оптико-электронные модули имеют продвинутые встроенные алгоритмы обработки видеоизображения, в частности, такие как алгоритмы локального контрастирования, алгоритмы подчеркива-

Драгунов Денис Эдуардович¹, инженер 1-й кат.

E-mail: dragunov.de@gmail.com

Курганов Илья Павлович¹, инженер 2-й кат.

Полесский Алексей Викторович¹, гл. метролог,
гл. конструктор по НИОКР, к.т.н.

Юдовская Александра Дмитриевна¹, вед. инженер.

Деомидов Александр Дмитриевич¹, вед. инженер.

Соломонова Наталья Алексеевна¹, инженер-
конструктор 1-й кат.

Лазарев Павел Сергеевич¹, вед. инженер,
и.о. нач. отдела разработки МФТВ.

Болтарь Константин Олегович¹, нач. НТК, д.ф.-м.н.

Шарганов Кирилл Александрович², нач. отдела.

¹ АО «НПО «Орион».

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

² ФГБУ «Главный научный метрологический центр»
Минобороны России.

Россия, 141006, Московская область, г. Мытищи,
ул. Комарова, 13.

Статья поступила в редакцию 15 октября 2021 г.

© Драгунов Д. Э., Курганов И. П., Полесский А. В.,
Юдовская А. Д., Деомидов А. Д., Соломонова Н. А.,
Лазарев П. С., Болтарь К. О., Шарганов К. А., 2021

ния границ, алгоритмы подавления шума, алгоритмы сужения динамического диапазона для работы с устройствами вывода изображения и т. д., а также удовлетворяют необходимость наличия унифицированных выходных интерфейсов типа Ethernet, CameraLink, PAL, SDI и т. д.

Наиболее близким по функционалу устройством, производимым в АО «НПО «Орион», является модуль ФЭМ18М-03. Данный модуль представляет собой фотоприемное устройство с блоком питания и с блоком электронной обработки стороннего производителя. В такой системе не представляется возможным без разработки дополнительного оборудования разместить объектив. Зависимость от стороннего производителя затрудняет работы по внедрению современ-

ных алгоритмов обработки видеоизображения и развитию системы в целом. При всем при этом модуль имеет достаточно большие габариты.

С целью решения задачи импортозамещения опτικο-электронных модулей, в АО «НПО «Орион» была проведена разработка соответствующей системы опτικο-электронного (ОЭ) модуля на основе отечественного охлаждаемого матричного фотоприемного устройства.

Описание модуля

Параметры разработанного модуля представлены в таблицу, а его структурная схема приведена на рис. 1.

Таблица

Основные параметры ОЭ-модуля

Наименование параметра	Единица измерения	Значение	
		не менее	не более
Значение ЭШРТ	мК	—	25
Напряжение питания	В	18	36
Потребляемая ОЭ модулем мощность во время выхода на режим; при работе в стационарном режиме	Вт	—	30 20
Габаритные размеры, В×Ш×Д	мм	—	145×110×280
Масса	кг		3,9

Рис. 1. Блок-схема ОЭ-модуля.

Базой данного устройства является охлаждаемое матричное фотоприемное устройство второго поколения формата 640×512 на основе InSb – ФУК40, работающего в спектральном диапазоне $3,6\text{--}4,9\text{ мкм}$ с охлаждаемой диафрагмой. Для охлаждения до температуры жидкого азота используется микрокриогенная система, работающая по циклу Стирлинга интегрального типа. На базе ФУК40 сделан фотоэлектронный модуль ФЭМ33М, в состав которого, помимо фотоприемного устройства, входят 4 блока: управления, обработки и работы с периферией.

В ходе разработки были рассмотрены следующие фирмы-производители подходящих объективов: IRZOOM (США), RP Optical Lab Ltd. (Израиль) и Ophir Optronics Solutions Ltd. (Израиль). Из-за конструктивных особенностей объективов компаний IRZOOM и Ophir Optronics Solutions Ltd., оказалась невозможной их интеграция, и единственным подходящим вариантом оказался объектив RP Optical Lab Ltd. ODEM IRIS-P с фокусным расстоянием $18\text{--}330\text{ мм}$, с возможностью установки экстендера для увеличения максимального фокусного расстояния до 460 мм . Объектив управляется по интерфейсу RS-422, имеет обратную связь по своим параметрам (текущее положение мотора фокуса и зума) и передает данные о статистике, а именно, положение, время наработки, температура и т. д.

На рис. 2 и 3 представлены соответственно внешний вид ОЭ-модуля и пример получаемого изображения.

Рис. 2. Внешний вид ОЭ-модуля.

Рис. 3. Пример изображения.

Описание электронных блоков

Блок сопряжения состоит из следующих основных узлов: 8-канальный 14-битный АЦП с частотой выборки 65 миллионов выборок в секунду, узел сопряжения, который служит для преобразования аналогового сигнала с фоточувствительной матрицы в сигнал, подходящий для работы с АЦП, узел подстройки питающих напряжений.

Блок электронной обработки генерирует набор питающих напряжений и тактовых диаграмм для ФЧЭ и АЦП, осуществляет коммуникацию с управляющим блоком посредством интерфейса I2C, а также имеет возможность управляться и передавать изображения по интерфейсу USB. Основной частью блока является ПЛИС. На базе этого блока проводится технологическая калибровка прибора. В нее входит подбор оптимального смещения входного каскада ячеек считывания, оптимального смещения блока сопряжения, составления таблиц оптимальных времен интегрирования и смещения матрицы фотодиодов для различных фонов. Также производится двухточечная коррекция с составлением таблиц аддитивных и мультипликативных коэффициентов для выравнивания линейной зависимости сигнала от фона, а также в одну из таблиц записываются координаты дефектных элементов, которые были выявлены по одному из трех параметров: по сигналу, по шуму или по нелинейности. В этом же блоке реализованы алгоритмы обработки видеоизображения.

Блок управления служит для реализации алгоритмов совместной работы блока электронного управления и объектива, таких как автофокус и калибровка по расфокусиро-

ванному изображению, прямого управления этими узлами, формирования пакетов данных и управляющих пакетов для работы выходных интерфейсов.

Интерфейсный блок несет на борту разъемы для подключения питания и внешних устройств, микросхемы физического уровня интерфейсов RS485 и RS422, а также видео-ЦАП.

Блок питания обеспечивает гальванически-развязанные выходные напряжения 5 В, 12 В и 24 В с защитой от короткого замыкания и перегрева при диапазоне входных напряжений от 18 В до 36 В.

Алгоритмы обработки изображения

В системе реализованы следующие алгоритмы обработки изображения: замена дефектных элементов, линейная автоматическая регулировка усиления (АРУ), алгоритм медианной фильтрации, алгоритм повышения резкости изображения, алгоритм подчеркивания границ, автофокус по произвольной области.

В оптико-электронном модуле реализованы три алгоритма текущей калибровки: заводская, стандартная текущая, заводская.

На рис. 4 продемонстрированы недостатки стандартной текущей калибровки.

При расфокусировке объектива в изображении присутствуют яркие объекты (рис. 4, а). После фокусировки объектива и калибровки вокруг наблюдаемых объектов заметны темные ареалы (рис. 4, б). Эти же ареалы видны при перекрытом объективе. Использование оптического затвора помогло бы избежать появления темных ареалов в изображении, но повышенные требования к покрытию шторки затвора, а также невозможность обеспечения идентичной освещенности шторки и наблюдаемой сцены затрудняет использование оптического затвора для решения данной проблемы. Таким образом, появляется необходимость разработки нового адаптивного алгоритма для устранения недостатков стандартной текущей калибровки. На рис. 5 приведены изображения, иллюстрирующие работу алгоритма.

а *б* *в*

Рис. 4. а – при расфокусированном объективе; б – после калибровки и фокусировки; в – при перекрытом входном окне.

а

б

в

г

Рис. 5. а – исходное неоткалиброванное изображение; б – изображение при расфокусированном объективе; в – изображение после калибровки; г – изображение при перекрытом входном окне.

На рис. 5, а представлено изображение до калибровки, имеется пространственная неравномерность яркостей пикселей, не оптимально подобрано смещение фотодетекторов и время интегрирования; на рис. 5, б показано изображение при полной расфокусировке объектива. Именно из такого состояния будет производиться дальнейшая калибровка. Также стоит обратить внимание, что на сцене присутствуют те же яркие объекты, соответствующие компьютеру и осциллографу. На рис. 5, в показано получившееся изображение; рис. 5, г показывает,

что яркие объекты, присутствующие на рис. 5, б, не дают инвертированных ареалов, как при использовании стандартной калибровки.

Заводская калибровка применяет аддитивную добавку, полученную при технологической калибровке, и не представляет практического интереса.

Помимо алгоритма аддитивной калибровки, основным из нововведений в обработке видеоизображения является алгоритм подчеркивания границ. Результат его работы представлен на рис. 6.

а

б

Рис. 6. а – исходное изображение; б – обработанное изображение.

Управление модулем

Управление ОЭ-модулем осуществляется при помощи специально разработанного программного обеспечения (ПО), главное окно которого показано на рис. 7.

Рис. 7. Главное окно управляющего ПО.

Измерение параметров

В ходе разработки модуля были проведены измерения таких параметров ОЭ-модуля, как разрешающая способность и эквивалентная шуму разность температур (ЭШРТ).

Контроль ЭШРТ проводился при температуре фона 300 К, получившееся значение составило 19,8 мК.

Контроль пространственного разрешения проводился на ИК-коллиматоре при температурном контрасте миры 1 К. В ходе измерений получились следующие результаты: при наблюдении миры в центре изображения – 27,5 пар линий/мм, а при наблюдении миры по краям изображения – 22,2 пар линий/мм.

Заключение

Результатом проведенной работы является первый подобный оптико-электронный модуль на основе отечественного фото-

приемного устройства, который по своим техническим характеристикам приближен к иностранным аналогам.

В ходе разработки были решены следующие задачи: разработаны печатные платы для интерфейсного блока и блока питания, проведена стыковка с объективом, разработаны прошивки ПЛИС для блока электронной обработки и интерфейсного блока. Добавлены следующие функции: алгоритмы калибровки по расфокусированному изображению, автофокусировка по окну. Также были доработаны уже существующие алгоритмы. В настоящий момент дорабатывается алгоритм подчеркивания границ. Были проведены как стендовые, так и полевые испытания прибора. Также совместно с АО «НИИ ОЭП» была проведена работа по разработке варифокального объектива с относительным отверстием $D/f' = 1:4$ и фокусным расстоянием 30–450 мм.

Дальнейшие перспективы связаны с улучшением работы уже имеющихся алгоритмов обработки изображения, а также с добавлением новых, а именно, для подавления шумов и «горячей» дефектовки неисправных элементов «на лету», для самотестирования прибора и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. RP Optical Lab Ltd. [Электронный ресурс]. URL: <https://rp-optical-lab.com/products/odem/> (дата обращения: 13.10.2021).
2. IRZOOM. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.acalbf.com/se/Imaging-for-Security-and-Military/Thermal-lenses/p/MWIR-Continuous-Zoom-Lens--15-330mm--X22--F-4/00000027JI> (дата обращения: 13.10.2021).
3. Ophir Optronics Solutions Ltd. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ophiropt.com/infrared/lenses/supir-21-420mm-f-4-0/> (дата обращения: 13.10.2021).
4. Flir [Электронный ресурс]. <https://www.flir.com/support/products/x6800sc-mwir/#Overview> (дата обращения: 13.10.2021).
5. Болтарь К. О., Киселева Л. В., Лопухин А. А. и др. // Прикладная физика. 2010. № 3. С. 116.
6. Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 6. С. 733.
7. Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А. и др. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 67.

MWIR optoelectronic module based on the Russian 640×512 InSb photodetector

*D. E. Dragunov¹, I. P. Kurganov¹, A. V. Polesskiy¹, A. D. Yudovskaya¹, A. D. Deomidov¹,
N. A. Solomonova¹, P. S. Lazarev¹, K. O. Boltar¹, and K. A. Sharganov²*

¹ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: dragunov.de@gmail.com

² FSBI «RF MD MHC»
13 Komarova st., Mytishi, Moscow region, 141006, Russia

Received October 15, 2021

Consideration is given to the results of the development of an optoelectronic module based on a Russian cooled matrix photodetector of 640×512 elements format, operating in the spectral range of 3.6–4.9 microns, based on InSb. The paper describes the basic algorithms used for video image processing, describes the main blocks of the developed device, describes the methods for measuring NETD and spatial resolution, and gives the characteristics of the device.

Keywords: InSb, MWIR range, MWIR module, mid-wavelength, thermal imager, optoelectronic module.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-5-410-416

REFERENCES

1. <https://rp-optical-lab.com/products/odem/>
2. <https://www.acalbf.com/se/Imaging-for-Security-and-Military/Thermal-lenses/p/MWIR-Continuous-Zoom-Lens--15-330mm--X22--F-4/00000027JI>
3. <https://www.ophiropt.com/infrared/lenses/supir-21-420mm-f-4-0/>
4. <https://www.flir.com/support/products/x6800sc-mwir/#Overview>
5. K. O. Boltar, L. V. Kiseleva, A. A. Lopokhin, et al., Applied Physics, No. 3, 116 (2010) [in Russian].
6. K. O. Boltar, P. V. Vlasov, A. A. Lopokhin, et al., Usp. Prikl. Fiz. **1** (6), 733 (2013).
7. K. O. Boltar, P. V. Vlasov, A. A. Lopokhin, et al., Applied Physics, No. 6, 67 (2013) [in Russian].