

УДК 621.383
EDN: YWFWEC

PACS: 85.60.-q



Основные области применения инфракрасных матричных фотоприемных устройств и оптико-электронных систем на их основе

А. В. Полесский, А. А. Астапова, С. В. Корнилов, К. А. Хамидуллин

Рассмотрены основные области применения оптико-электронных систем коротковолнового, средневолнового и длинноволнового инфракрасных диапазонов на основе матричных фотоприемных устройств. Приведена обобщенная схема работы оптико-электронной системы, обобщенный анализ инфракрасных спектральных диапазонов с указанием решаемых задач, текущий технический уровень матричных фотоприемных устройств и требования к ним для решения различных задач.

Ключевые слова: ИК-диапазон, ИК МФПУ, оптико-электронные системы (ОЭС), объективы.

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-2-187-200

Введение

Оптико-электронные системы предназначены для решения важной задачи – обнаружения различных объектов, как с участием человека-оператора, так и в автономном режиме. Для обнаружения объектов с заданной вероятностью оптико-электронная система должна обеспечить отношение сигнал/шум, значение

которого должно быть больше некоторого порога, и чем выше вероятность, тем более высокое отношение сигнал/шум требуется. Таким образом, при разработке любой оптико-электронной системы необходимо решить задачу получения максимального отношения сигнал/шум. Величиной сигнала в большинстве случаев является разница между фотооткликами от объекта и фона, т. е. оптико-электронная система фактически фиксирует контраст между соседними пикселями, а в величину шума входят все имеющиеся шумы (временный шум, пространственный шум, шум электронного тракта и т. д.) с учетом места их появления. Обобщенная схема работы оптико-электронной системы приведена на рисунке 1.

Как видно из рисунка 1 на отношение сигнал/шум влияют характеристики излучения объекта и фона, пропускание атмосферы, характеристики объектива, пороговый поток фиксируемый фотоприемным устройством. При учете влияния атмосферы, как правило, рассматривают поглощение излучения молекулами газа и рассеяние на частицах. Основными характеристиками объектива, влияющими на отношение сигнал/шум, являются светосила (определяет сколько света попадает в оптико-электронную систему) и величина

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

E-mail: poleskiyav@orion-ir.ru

Астапова Анна Александровна¹, вед. инженер.

Корнилов Сергей Владимирович², в.н.с., к.т.н., доцент.

Хамидуллин Камиль Алиевич¹, нач. отдела.

¹ АО «НПО «Орион».

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

² ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский институт радиоэлектроники.

Россия, 141002, Московская обл., г. Мытищи,

ул. Колпакова, 2а, литера Б1.

E-mail: vniir@vniir-m.ru

Статья поступила в редакцию 19.04.2024

После доработки 3.05.2024

Принята к публикации 7.05.2024

Шифр научной специальности: 1.3.11

© Полесский А. В., Астапова А. А., Корнилов С. В., Хамидуллин К. А., 2024

пятна рассеяния (влияет на резкость перехода между объектом и фоном, т. е. на контраст). Матричное фотоприемное устройство (ФПУ) описывается величиной порогового потока и спектральной характеристикой чувствитель-

ности. Дальнейшее прохождение сигнала можно не рассматривать, при условии, что оптимальное отношение между человеком-оператором и устройством индикации в системе обеспечивается.

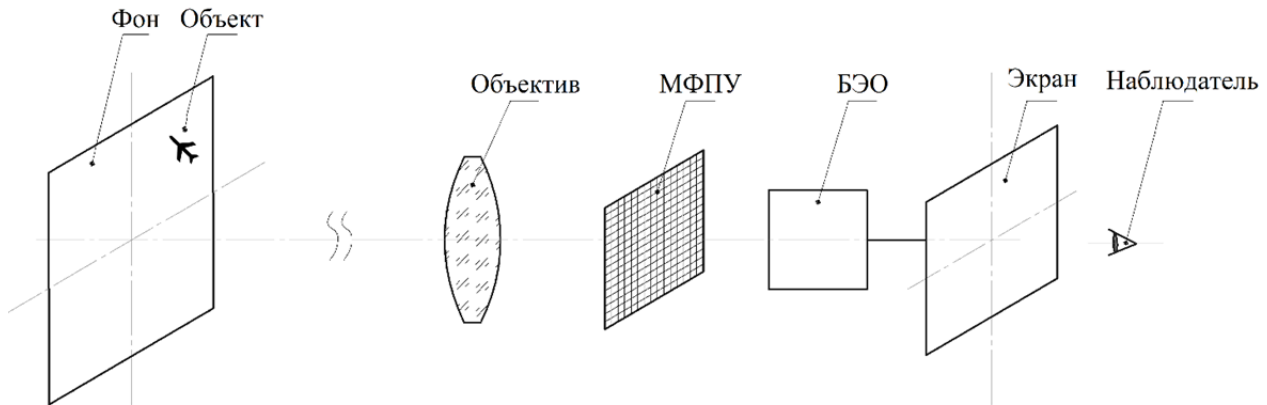


Рис. 1. Схема работы оптико-электронной системы

В настоящее время условно выделяют три поколения ИК ФПУ:

- первое поколение – ФПУ на основе однорядных и многорядных линеек фоточувствительных элементов, работающих в режиме временной задержки и накопления сигнала;
- ко второму поколению относятся матричные ФПУ многорядного типа для сканирующих систем, а также односпектральные матричные ФПУ смотрящего типа с числом элементов до 10^6 (1 Мп);

– к третьему поколению в перспективе возможно отнести ФПУ, работающие в двух или нескольких спектральных ИК-диапазонах, а также матричные ФПУ большого формата (свыше 1 Мп) с уменьшенным шагом элементов.

Для создания матричных фотоприемных устройств ИК-диапазона используются следующие материалы:

- тройное полупроводниковое соединение кадмий-ртуть-теллур (HgCdTe) для спектральных диапазонов 1–2,5 мкм; 3–5 мкм; 8–14 мкм;
- двойное полупроводниковое соединение антимонид индия (InSb) для спектрального диапазона 3–5 мкм;
- тройное полупроводниковое соединение индий-галлий-арсенид (InGaAs) для спектрального диапазона 0,4–2,3 мкм;

– сверхрешетки 2-го типа T2SL – считается перспективным материалом, ведутся исследования;

– оксид ванадия (VOx), аморфный кремний (α -Si) для неохлаждаемых ФПУ диапазона 7–14 мкм.

Оптико-электронные системы коротковолнового ИК-диапазона

Диапазон длин волн от 1 до 2,5 мкм называется коротковолновым ИК-диапазоном (SWIR, КВ ИК). Большинство ФПУ КВ ИК-диапазона позволяют регистрировать диапазон длин волн от 0,9 до 1,7 мкм. Также существуют так называемые ФПУ с расширенным КВ ИК-диапазоном, которые обеспечивают прием оптического сигнала в диапазоне от 0,4 до 1,7 мкм.

В большинстве случаев изображение в КВ ИК-диапазоне формируется, как и в видимом диапазоне, за счет отраженного от объектов излучения (рис. 2а, 2б), в отличие от изображений с тепловизора, для формирования которых используется собственное излучение тел (рис. 2в). Изображения в КВ ИК-диапазоне сопоставимы с видимым по разрешающей способности и деталям, что делает объекты достаточно узнаваемыми [1].

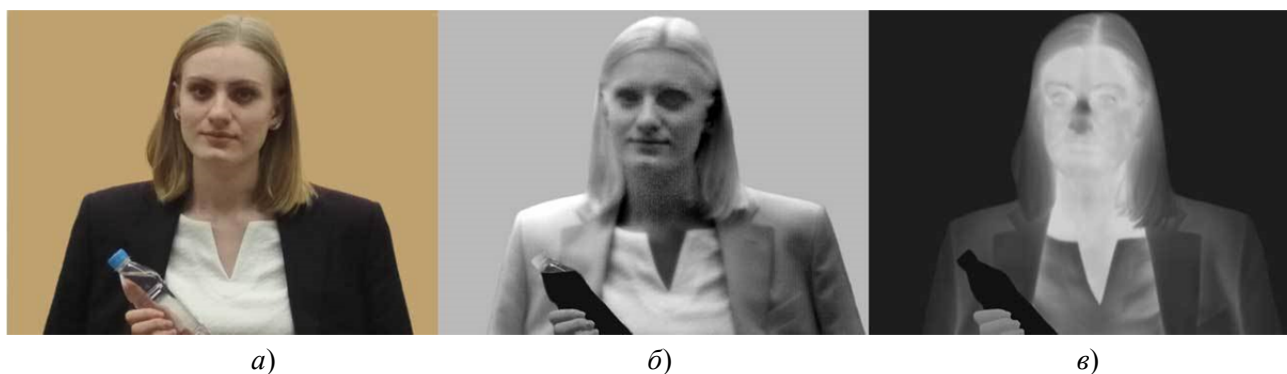


Рис. 2. Изображение в видимом (а), коротковолновом ИК (б) и средневолновом ИК (в) диапазонах спектра

Основными особенностями КВ ИК-диапазона являются:

- меньше, по сравнению с видимым диапазоном, рэлеевское рассеяние в атмосфере;
- наличие в спектральном диапазоне чувствительности камеры характерных полос поглощения большого количества материалов, в т. ч. воды;
- специфические коэффициенты отражения и пропускания различных материалов, которые отличаются от коэффициентов отражения и пропускания в видимом диапазоне спектра, что дает дополнительную информацию о наблюдаемых объектах и обуславливает большое количество применений (согласно зарубежным исследованиям наибольшее различие в поведении спектров поглощения/отражения наблюдается в спектральном диапазоне 2,2–2,4 мкм);
- возможность обнаружения большинства типов лазеров, используемых для дальнометрии и целеуказания;
- возможность использования диапазона для высокотемпературной термографии, поскольку собственное излучение в КВ ИК-диапазоне (0,9–1,7 мкм) образуется у объектов с температурой свыше 100 °С;
- высокая способность обнаружения процессов горения;

– сильная зависимость изображения от интенсивности солнечного излучения и очень высокие контрасты днем в солнечную погоду.

Исходя из перечисленного выше, основными областями применения оптико-электронных систем коротковолнового ИК-диапазона являются:

- системы наблюдения;
- системы обнаружения лазерного излучения;
- системы спектрального анализа;
- системы высокотемпературной термографии.

Системы наблюдения КВ ИК-диапазона, как правило, являются дополнительным каналом наблюдения (для ОЭС видимого диапазона и тепловизоров). Вследствие уменьшенного рэлеевского рассеяния света на более длинных волнах, чем в видимой области спектра, камеры КВ ИК-диапазона обеспечивают наблюдение в условиях задымления и тумана, когда контраста объектов сцены недостаточно для телевизионного и теплового каналов (рис. 3а–в).

Также в коротковолновом ИК-диапазоне возможно обнаружение очагов возгорания: огонь дает высокий контраст изображения, а дым в КВ ИК-диапазоне более «прозрачен» чем в видимом, что позволяет быстро и точно определить очаг возгорания (рис. 4а–в).

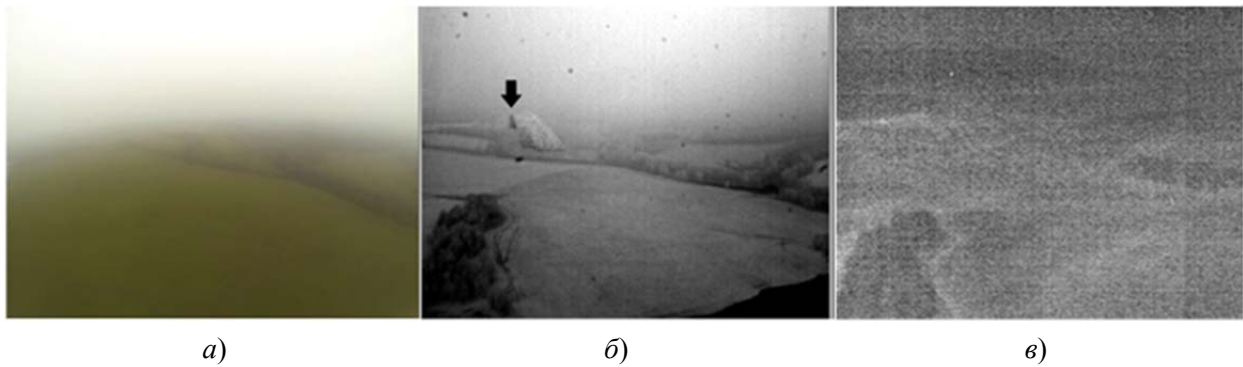


Рис. 3. Изображение бетонной взлетно-посадочной полосы через туман в видимом (а), коротковолновом ИК (б) и средневолновом ИК (в) диапазонах спектра.

(Нижняя граница облаков 80 метров, температурный контраст объекта и фона 0,6 °С)

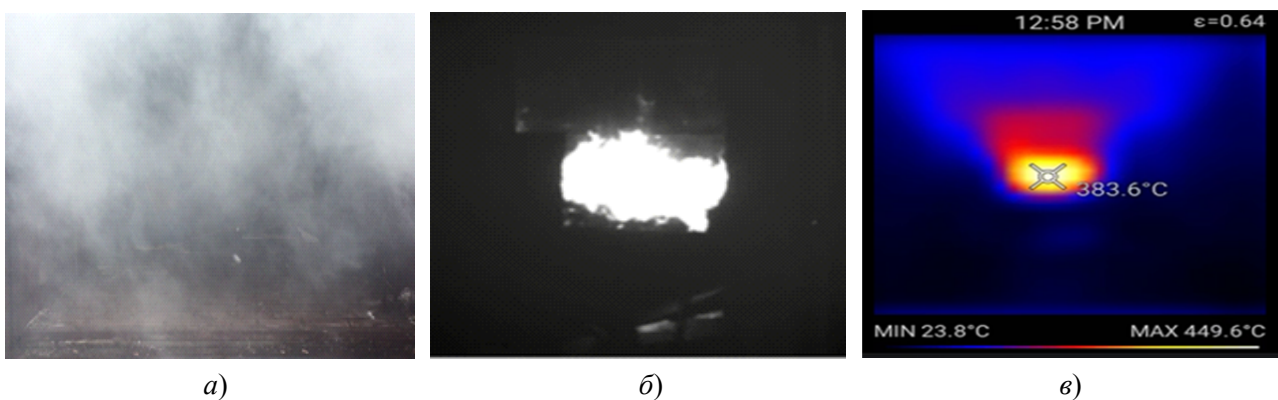


Рис. 4. Изображение очага возгорания через дым в видимом (а), коротковолновом ИК (б) и средневолновом ИК (в) диапазонах спектра

Наиболее используемым спектральным диапазоном ФПУ второго поколения КВ ИК-диапазона для задач наблюдения является 0,95–1,65 мкм. Такие ФПУ выполнены на основе $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ на подложке InP [1]. Вместе с тем для повышения отношения сигнал/шум системы довольно часто расширяют спектральный диапазон путем смещения его коротковолновой границы. Расширение коротковолновой границы чувствительности обеспечивается путем утонения подложки InP , которая в данном случае является оптическим фильтром, поглощающим излучение с длиной волны менее $\sim 0,95$ мкм.

Для систем наблюдения, предназначенных для решения задач посадки в сложных метеоусловиях и обнаружения выстрелов [2], требуются ФПУ второго поколения с расширенной длинноволновой границей излучения (до 2,5 мкм). ФПУ, чувствительные в данном спектральном диапазоне, менее распространены

из-за их высокой стоимости, которая обусловлена необходимостью применения другого состава InGaAs [3] или ФПУ на основе КРТ, имеющих значительно более сложную технологию изготовления [4].

В современных оптико-электронных системах коротковолнового ИК диапазона используются матричные ФПУ формата 640×512 [5]. При этом уже заметна тенденция перехода в системах наблюдения на матрицы формата 1280×1024 с уменьшенным шагом (10–12 мкм) [6]. Увеличение формата матриц позволяет повысить дальность обнаружения и распознавания, а также отказаться от «механического» зума в пользу «цифрового», уменьшение шага позволяет уменьшить габариты оптико-электронных систем за счет уменьшения габаритов оптики. При этом стоит отметить, что уменьшение шага имеет и негативную сторону: пиксели меньшего размера обеспечивают худший пороговый поток.

Передовой разработкой в области ФПУ для систем наблюдения является IMX992 компании Sony. Данное ФПУ имеет шаг пикселя 5,32 мкм, формат 2592×2056 и спектральный диапазон 0,4–1,7 мкм [7]. В Российской Федерации разработкой ФПУ и камер КВ ИК-диапазона на их основе занимается АО «НПО «Орион» [30].

Также в настоящее время активно развиваются ФПУ на основе коллоидных квантовых точек [8].

Системы обнаружения лазерного излучения являются отдельным классом систем и решают одну из двух задач:

- обнаружение места попадания луча лазерного подсветчика системы наведения;
- детектирование работы по охраняемым объектам «чужих» лазерных подсветчиков или дальномеров (системы обнаружения факта лазерного облучения).

Оптико-электронные системы для решения задачи поиска «своего» лазерного луча во многом схожи с системами наблюдения, дополнением является необходимость установки дополнительного оптического фильтра для выделения длины волны подсветчика и подавления паразитного излучения, образуемого, в первую очередь, солнечным излучением и его переотражением от окружающих объектов. При этом в подавляющем числе случаев используются матричные ФПУ такие же, как в смотрящих системах.

Оптико-электронные системы для обнаружения факта лазерного облучения КВ ИК диапазона на основе матричных ФПУ находят все более широкое применение. Системы на основе матриц позволяют определять одновременно азимут и угол места, за счет наличия большего количества элементов (по сравнению с ФП и ФПУ первого поколения) они позволяют более точно определять угловое положение подсветчика или дальмера. Основными рабочими длинами волн современных лазерных подсветчиков являются 0,85, 1,06, 1,55 и 10,6 мкм. В устаревших системах используются лазеры с длиной волны 0,63 мкм, а в перспективных возможно использование 1,9 и 2,1 мкм. Дополнительным требованием к ФПУ, используемым в этих системах, является обеспечение высокой кадровой частоты, приводит к необходимости ис-

пользовать матрицы малых форматов 160×120 и 320×256 элементов. Матрицы формата 320×256 в составе системы с горизонтальным полем зрения 60° обеспечивают мгновенное поле зрения около 10', а в случае применения их в широкоугольных системах (горизонтальное поле обзора ~140°) мгновенное поле зрения составит ~0,5°.

Системы спектрального анализа необходимо поделить на два основных класса:

- не изображающие спектральные приборы;
- изображающие спектральные приборы.

Не изображающие спектральные приборы – это «обычные» спектрометры/спектрофотометры/ и т. д., в которых используется ФПУ второго поколения в виде длинных линеек (256 или 512 элементов), с вытянутыми в одном направлении элементами.

Изображающие спектральные приборы – это гиперспектральная аппаратура, предназначенная для измерения спектральной яркости излучения в каждой точке наблюдаемой сцены. Данные системы формируют, так называемый, гиперспектральный куб данных. ФПУ для данных систем, как правило, имеют формат 1024×256, 512×256 и т. д. [9].

Помимо стандартного спектрального диапазона (0,9–1,7 мкм) системы не изображающих спектральных приборов, как правило, имеют смещенную коротковолновую границу (до 0,6 мкм). Требования к длинноволновой границе определяются из специфики наблюдаемых объектов, при этом согласно зарубежным исследованиям наибольшее различие в поведении спектров поглощения/отражения наблюдается в спектральном диапазоне 2,2–2,4 мкм.

Системы высокотемпературной термографии во многом схожи с системами наблюдения, но предъявляют дополнительные требования к стабильности параметров ФПУ второго поколения, которая нужна для проведения достоверных измерений. Требования по формату и спектральному диапазону довольно часто не являются принципиальными, однако, чем больше формат, тем более детально можно рассмотреть измеряемый объект, чем длиннее длинноволновая граница, тем меньше температура, которая может быть измерена.

Оптико-электронные системы средневолнового ИК-диапазона

Диапазон длин волн от 3 до 5 мкм называется средневолновым (СВ) ИК-диапазоном, основными особенностями СВ ИК-диапазона являются:

- изображение в этом диапазоне формируется как за счет собственного излучения тел, так и за счет отраженного солнечного излучения;

- довольно высокие перепады яркости днем в солнечную погоду из-за наличия солнечного излучения (особенно на облаках);

- процессы горения в СВ ИК-диапазоне за счет излучения нагретых атомов углекислого газа дают заметный вклад за счет люминесценции в диапазоне 4,0–4,2 и 4,4–4,8 мкм (в том числе авиационные двигатели) [10];

- наблюдаемые в тепловизионный прибор тепловые контрасты при температуре объектов менее 40 °С в диапазоне 3–5 мкм ниже, чем в 8–12 мкм;

- в случае высокой влажности без наличия аэрозолей (дымок, туманов) пропускание в диапазоне 3–5 мкм значительно лучше, чем в 8–12 мкм;

- при наличии аэрозолей пропускание в средневолновом ИК-диапазоне лучше, чем в коротковолновом, но хуже, чем в длинноволновом ИК;

- теоретический диаметр пятна рассеяния (пятно Эри, для $D/f' = 1:4$ и длины волны 4 мкм) составляет ~40 мкм, при этом разрешения достаточно для формирования разрешаемого наблюдаемого изображения;

- ряд газов имеет области поглощения в диапазоне 3–5 мкм, что позволяет проводить их обнаружение при применении специализированных спектральных фильтров;

- ФПУ СВ ИК-диапазона могут работать как при охлаждении до температуры 80 К [11], так и при повышенной температуре [12] (при применении специализированных фоточувствительных структур с пониженными темновыми токами). Такие ФПУ делают малогабаритными и малопотребляющими;

- в большинстве случаев доминирующий вклад в шум системы вносит величина флуктуации числа падающих фотонов, которая в 3–5 раз больше собственного шума / темнового тока ФПУ.

Системы наблюдения средневолнового ИК-диапазона являются тепловизорами и, как правило, используются в качестве второго информационного канала. Как тепловизионный канал системы СВ ИК-диапазона конкурируют с системами длинноволнового (ДВ) ИК-диапазона, при этом СВ ИК-диапазон был освоен раньше вследствие относительной дешевизны и простоты устройства ФПУ по сравнению с аналогичными устройствами ДВ ИК-диапазона, которые активно развиваются в настоящее время. Поэтому выбор рабочего диапазона зависит от решаемых задач и бюджета. Также известны случаи применения в тепловизионном канале ОЭС ФПУ, чувствительных сразу в двух этих диапазонах.

Спектральный диапазон систем наблюдения, как правило, ограничен пропусканием охлаждаемых фильтров и составляет примерно 3,6–4,9 мкм. Такой спектральный диапазон обеспечивает оптимальное подавление фоновых помех и атмосферы, а также лежит вблизи максимальной спектральной чувствительности ФПУ.

Без применения охлаждаемого фильтра спектральная чувствительность ФПУ как на основе InSb, так и на основе КРТ составляет примерно 1,2–5,1 мкм. Столь широкий спектральный диапазон используется в системах помощи при посадке в сложных метеоусловиях или гиперспектрометрах. Далее в статье будут рассматриваться системы диапазона 3,6–4,8 мкм.

Основной особенностью тепловизоров СВ ИК-диапазона является невысокое относительное отверстие объектива (до 1:5,5), что позволяет делать малогабаритную, «дешевую» оптику с большим фокусным расстоянием и хорошим разрешением. При этом стоимость охлаждаемого ФПУ второго поколения СВ ИК-диапазона существенно выше, чем у неохлаждаемого микроболометра ДВ ИК-диапазона, однако ниже, чем у охлаждаемого ДВ ИК-ФПУ. По этим причинам экономическая целесообразность использования тепловизионных систем СВ ИК-диапазона имеется только при задачах распознавания объектов на дальностях выше 4 км, а обнаружения свыше 10 км. При этом системы наблюдения СВ ИК-диапазона позволяют распознать объекты на расстоянии до 10–15 км.

Отдельно стоит отметить, что системы наблюдения средневолнового ИК-диапазона считаются идеальными для наблюдения в ночных условиях летом, поскольку летом высокие тепловые контрасты, а ночью солнце не создает дополнительно подсветки. Наиболее затруднено применение этих систем в условиях, когда надо смотреть «против» Солнца, в частности – в морских условиях, когда видно на воде «солнечную дорожку». Сравнение изображений в диапазоне 3–5 и 8–10 мкм, получаемое днем в солнечную летнюю погоду (для задач обнаружения самолетов в переднюю полусферу), приведено на рисунке 5а–б.

На рисунке 7 показаны расчетные зависимости ЭШРТ оптико-электронных систем, ра-

ботающих в диапазоне 3–5 и 8–10 мкм. В качестве ФПУ были выбраны матрицы Scorpio-MW и Scorpio-LW, с относительными отверстиями 1:4 и 1:2 соответственно с учетом пропускания объектива (коэффициент пропускания принят равным 0,5). Граничными условиям были:

- глубина заполнения ячейки накопления 0,5;
- время накопления не может быть выше времени кадра (20 мс).

Сравнение изображений в диапазоне 3–5 и 8–10 мкм от пламени (пламя дает сильные линии люминесценции в диапазоне 3–5 мкм) приведено на рисунке 6а–б [13].



Рис. 5. Сравнение изображений в диапазоне 3–5 (а) и 8–10 мкм (б) получаемое днем в солнечную летнюю погоду (для задач обнаружения самолетов в переднюю полусферу)

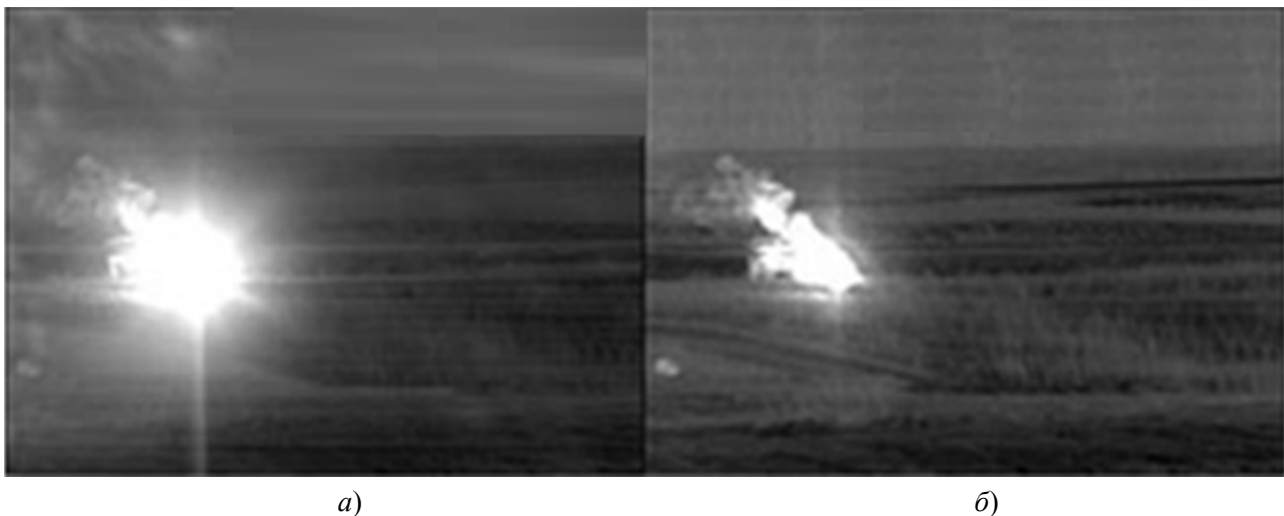


Рис. 6. Сравнение изображений в диапазоне 3–5 (а) и 8–10 мкм (б) от пламени

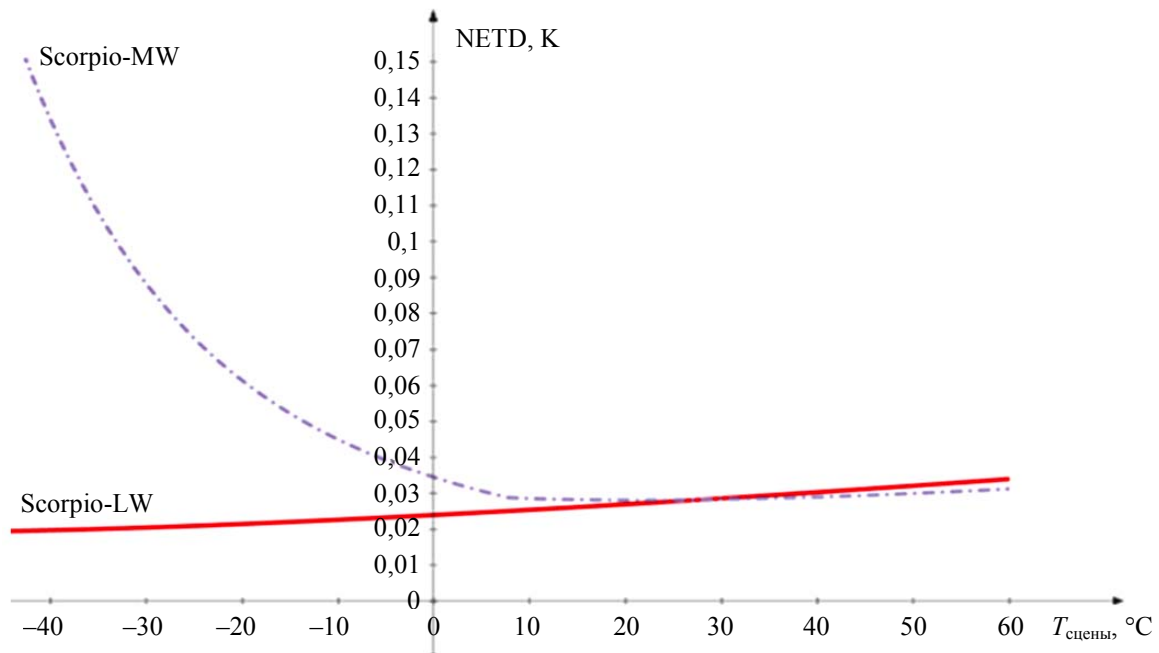


Рис. 7. Зависимость ЭШРТ оптико-электронных систем диапазона на основе ФПУ второго поколения (Scorpio-MW и Scorpio-LW) от температуры сцены

Как видно из рис. 7 эффективность систем по температурному разрешению в диапазонах температур от $10\text{ }^\circ\text{C}$ и выше сопоставима. Ниже $\sim 10\text{ }^\circ\text{C}$ время накопления в диапазоне 3-5 мкм становится равным времени кадра (20 мс) и дальше не может увеличиваться, поэтому происходит резкое падение ЭШРТ системы. И при наблюдении сцен с температурой ниже $\sim 0\text{ }^\circ\text{C}$ эффективность систем ДВ ИК-диапазона резко возрастает. Аналогичные результаты приведены в работе В. А. Овсянни-

кова и Я. В. Овсянникова «О влиянии температуры фона на пороговую чувствительность современных тепловизионных приборов» [14].

Все перечисленные эффекты также приведены на рис. 8а, 8б. В диапазоне 3-5 мкм хорошо виден «выхлоп» самолета за счет люминесценции, при этом холодный корпус самолета практически не различим на фоне неба. В диапазоне 8-12 мкм виден как «выхлоп», так и холодный корпус самолета на фоне неба.



Рис. 8. Сравнение изображения самолета в диапазоне 3–5 (а) и 8–10 мкм (б)

Из-за высоких входных перепадов яркости наблюдаемой сцены с целью реализации своего потенциала (особенно днем) системам среднего волнового ИК-диапазона необходимы специализированные алгоритмы «сжатия» динамического диапазона, например, локальное

контрастирование. Их применение необходимо для адаптации наблюдаемой сцены к зрительному аппарату наблюдателя. На рис. 9а, 9б приведено сравнение изображений в диапазоне 3–5 мкм без локального контрастирования и с локальным контрастированием.



а)



б)

Рис. 9. Сравнение изображений в диапазоне 3–5 мкм без локального контрастирования (а) и с локальным контрастированием (б)

Реализация возможности охлаждения ФПУ до температур 110–140 К [15] создает отдельный класс малогабаритных тепловизионных систем. За рубежом малогабаритными оптико-электронными системами среднего волнового ИК-диапазона на основе матриц формата 640×512 оснащаются БПЛА (дальность распознавания до 6 км), например, Jim LR (Sagem, Франция), Sophie XF (Tales, Франция), Nestor (Airbus DS Optronics, ЮАР), Coral-CR (Elbit Systems, США-Израиль), Recon B2 и Recon V (FLIR, США) [16], а также аналогичные системы входят в состав индивидуальных переносных приборов разведки. Такие малогабаритные системы по своей эффективности в теплое время года аналогичны стационарным приборам наблюдения на основе ФПУ охлаждаемых до 80 К [17, 18], однако имеют проблемы при использовании при наблюдении в «холодных» сценах. Также при увеличении температуры с 110 К до 140 К охлаждения часто приходится жертвовать спектральным диапазоном работы с 3,6–4,9 мкм до 3,4–4,2 мкм [19]. Наибольшие успехи в части увеличения рабочей температуры матричных ФПУ получены при применении фоточувствительных элементов на основе коротко-

периодных сверхрешеток (T2SL) [20].

Как и в коротковолновом ИК-диапазоне, основной тенденцией развития систем наблюдения среднего волнового является увеличение формата матриц до 1280×1024 и уменьшение шага до 10 мкм. Передовой матрицей в данном направлении является SCD Crane [21], которая имеет шаг 5 мкм, формат 2560×2048, использование данного ФПУ позволяет практически полностью отказаться от оптического зума в пользу электронного. Вместе с тем из-за малого шага данное ФПУ обеспечивает ЭШРТ только ~47 мК, что существенно уступает ФПУ с шагом 15 мкм, у которых ЭШРТ составляет ~20 мК.

Системы наведения боеприпасов среднего волнового ИК-диапазона, в основном, предназначены для поражения самолетов. Данные системы являются расходным материалом и не должны иметь высокой стоимости, обеспечивать готовность к использованию за несколько секунд. По этим причинам ФПУ для систем такого класса имеют:

- малый формат;
- дроссельную систему охлаждения;
- малое количество дефектных элемен-

тов (особенно в центральной части, кластеры не допустимы).

Типичным представителем ФПУ данного типа является ФПУ формата 128×128 элементов [22].

Системы обнаружения утечек газов средневолнового ИК-диапазона [23, 24] имеют в своем составе узкополосные фильтры, настроенные на спектральные линии погло-

щения газов. Линии поглощения газов приведены в таблице 1.

Системы обнаружения утечек газов требуют высокой чувствительности, поэтому построены на основе охлаждаемых ФПУ (причем активно используются ФПУ формата 320×256 с шагом 30 мкм). Для компенсации низкой освещенности из-за наличия узкополосного фильтра, как правило, «холодную» диафрагму делают примерно 1:2.

Таблица 1

Линии поглощения газов в спектральном диапазоне 3–5 мкм

№	Спектральный диапазон	Перечень газов
1	3,2–3,4 мкм	Углеводороды (СхНх) Метан, Метанол, Пропан, Бензол, Этан, Пропилен, Этанол, Пентан, Пентен-1, Изопрен Бутан Этилбензол, Метилэтилкетон, Метилизобутилкетон, Толуол, Октан
2	4,2–4,4 мкм	Углекислый газ
3	4,52–4,67 мкм	Угарный газ (окись углерода), Ацетонитрил, Цианистый ацетил, Арсин, Бром-изоцианат, Бутил-изоцианид, Хлор-изоцианат, Хлордиметилсилан, Бромциан, Дихлорметилсилан, Кетен, Роданистый этил, Германоводород, Гексил-изоцианид, Метилтиоцианат, Оксид азота, Силан

Оптико-электронные системы длинноволнового ИК-диапазона

Диапазон длин волн от 8 до 14 мкм называется длинноволновым ИК диапазоном. При этом оптико-электронные системы ДВ ИК-диапазона на основе охлаждаемых ФПУ, как правило, чувствительны в диапазоне 8–10 мкм.

Основными особенностями ДВ ИК-диапазона являются:

- изображение в подавляющем большинстве случаев формируется за счет собственного излучения тел;
- невысокие контрасты наблюдаемых объектов даже в солнечную погоду;
- наблюдаемые в тепловизионный прибор тепловые контрасты при температуре объектов менее 40 °С в диапазоне 8–12 мкм выше, чем в 3–5 мкм;
- в случае наличия аэрозолей (дымок, туманов) пропускание в диапазоне в 8–12 мкм самое высокое;
- теоретический диаметр пятна рассеяния (пятно Эри, для $D/f' = 1:3$ и длинны волны 9 мкм) составляет ~65 мкм, при этом разрешения не всегда достаточно для формирования хорошо наблюдаемого изображения;

– ряд газов имеет области поглощения в диапазоне 8–12 мкм, что позволяет проводить их обнаружение при применении специализированных спектральных фильтров;

– ФПУ второго поколения ДВ ИК-диапазона, работающие на принципе внутреннего фотоэффекта, требуют глубокого охлаждения (65–90 К).

Системы наблюдения длинноволнового ИК-диапазона являются тепловизорами и используются в качестве второго информационного канала, при этом они обеспечивают максимальную эффективность решения задач наблюдения.

Системы наблюдения ДВ ИК-диапазона строят или на основе охлаждаемого ФПУ, или на основе неохлаждаемой микроболометрической матрицы. Приборы на основе микроболометрических матриц имеют малую чувствительность, для компенсации которой применяют светосильную оптику (1:0,7–1:1,4) и большую инерциальность (частота кадров менее 50 Гц), при этом стоимость и энергопотребление микроболометрических матриц низкие.

ФПУ второго поколения ДВ ИК-диапазона, работающие на основе внутреннего фо-

тоэффекта, имеют высокое быстродействие (единицы миллисекунд), сравнительное низкое относительное отверстие (1:2–1:3), но требуют охлаждения до криогенных температур. Наиболее распространенным форматом в данном диапазоне является 640×512 (охлаждаемые ФПУ) или 640×480 (микроболометрические матрицы). При этом системы на основе микроболометрических матриц активно переходят на формат 1280×960 с шагом 12 мкм, а передовыми являются микроболометрические матрицы формата 1920×1080 с шагом 8 мкм, например, модель FHD1920 [25]. Охлаждаемые мегапиксельные ФПУ также разработаны и производятся Super LUKAS [26], но из-за высокой стоимости активно не применяются, их применение можно оправдать в морских системах. Основными материалами для изготовления охлаждаемых матричных ФПУ длинноволнового ИК-диапазона являются KPT (состава $x \sim 0,2$), QWIP-структуры и T2SL. Проблемами производства охлаждаемых матричных ФПУ данного диапазона являются или высокая сложность получения высококачественных структур (KPT, T2SL), или низкая квантовая эффективность и необходимость глубокого охлаждения (QWIP). Единственным российским охлаждаемым матричным ФПУ ДВ ИК-диапазона является ФУК25М производства АО «НПО «Орион», выполненный на основе QWIP-структур, имеющий шаг 25 мкм и формат 384×288 [27]. Формат 384×288 для современных систем наблюдения недостаточен, поэтому в таких системах требуется применять микросканирование для «удвоения» формата (768×576).

Экономическая целесообразность использования тепловизионных систем ДВ ИК-диапазона на основе охлаждаемых ФПУ второго поколения появляется только для решения за-

дач распознавания объектов на дальностях выше 4 км, или обнаружения малоразмерных целей (БПЛА) с приемлемой дальностью обнаружения.

Системы наблюдения длинноволнового ИК-диапазона имеют большие габариты и массу по сравнению с системами средневолнового ИК-диапазона, приоритетное применение – на основе охлаждаемых ФПУ.

Системы наведения боеприпасов длинноволнового ИК-диапазона в основном предназначены для поражения бронетанковой техники [28]. Данные системы являются расходным материалом и не должны иметь высокую стоимость, обеспечивать готовность к использованию за несколько секунд. Современные системы наведения боеприпасов выполняются или на основе микроболометров, или на основе охлаждаемых ФПУ.

Охлаждаемые ФПУ для систем такого класса имеют:

- малый формат;
- дроссельную систему охлаждения (для охлаждаемых ФПУ);
- малое количество дефектных элементов (особенно в центральной части, кластеры не допустимы).

Системы обнаружения утечек газов длинноволнового ИК-диапазона имеют в своем составе узкополосные фильтры, настроенные на спектральные линии поглощения газов. Линии поглощения газов приведены в таблице 2.

Системы обнаружения утечек газов ДВ ИК-диапазона довольно часто строятся или на основе микроболометрических матриц с фильтрами, или на охлаждаемых ФПУ на основе QWIP-структур, при этом параметры структур подбираются для обеспечения заданного спектрального диапазона [29].

Таблица 2

Линии поглощения газов в спектральном диапазоне 8–12 мкм

№	Спектральный диапазон	Перечень газов
1	7,0–8,5 мкм	Метан, Пропан, Диоксид серы, окислы азота, Фреоны (R-134a, R-152a)
2	8,0–8,6 мкм	Фреоны: R404A, R407C, R410A, R134A, R417A, R422A, R507A, R143A, R125, R245fa
3	10,3–10,7 мкм	Гексафторид серы, Аммиак, Ацетилхлорид, Уксусная кислота, Аллилбромид, Аллилхлорид, Аллилфторид, Бромистый метил, Диоксид хлора, Этил-цианокрилат, Этилен, Фуран, Гидразин, Метилсилан, Метилэтилкетон, Метилвинилкетон, Акролеин, Пропен, Тетрагидрофуран, Трихлорэтилен, Фторид уранила, Винилхлорид, Винилцианид, Виниловый эфир

Заключение

К современным ОЭС помимо требований максимальной дальности обнаружения и наблюдения, круглогодичности и всепогодности при минимальных массе и габаритах предъявляют и новые требования:

- расширение номенклатуры обнаруживаемых объектов;
- увеличение информационной производительности;
- повышение вероятности обнаружения и классификации целей в условиях противодействия их обнаружению (маскировка, постановка помех и другие мероприятия);
- распознавание и сопровождение целей в сложной фоноцелевой обстановке.

Для обеспечения эффективной работы ОЭС требуется совершенствование их компонентной базы, в первую очередь – датчиков изображения. В настоящее время основными тенденциями развития матричных ФПУ для смотрящих систем является переход с формата 640×512 элементов на формат 1280×1024 и уменьшение шага до 10 мкм с некоторой потерей пороговых характеристик. Наиболее перспективные системы коротковолнового и средневолнового ИК-диапазонов реализуются на основе ФПУ формата не менее 1280×1024 с шагом 5 мкм. В длинноволновом ИК-диапазоне разработаны охлаждаемые ФПУ формата 1280×1024 с шагом 12 мкм и микроболометрические матрицы формата 1980×1024 с шагом 8 мкм. Перспективным фоточувствительным материалом для охлаждаемых матричных ФПУ СВ и ДВ ИК-диапазонов является T2SL. В этом направлении ведутся активные исследования.

Для современных систем наведения боеприпасов и систем обнаружения факта лазерного облучения требуются малоформатные матричные фотоприемные устройства (64×64, 128×128, 160×120, 256×256 и 320×256) с кадровой частотой не менее 500 Гц.

Развитие систем вооружения и военной техники, робототехники и беспилотного транспорта требует совершенствования систем технического зрения, способных работать круглосуточно, в любое время года и при любых погодных условиях. Это расширяет области применения оптико-электронных си-

стем коротковолнового, средневолнового и длинноволнового ИК-диапазонов на основе матричных фотоприемных устройств и способствует их устойчивому развитию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хамидуллин К. А., Балиев Д. Л., Лазарев П. С., Болтарь К. О., Полесский А. В., Бурлаков И. Д., Ченурнов Е. Л., Гусарова Н. И., Попов С. В. / Прикладная физика. 2017. № 6. С. 95.
2. Brannlund Carl, Brorsson Andreas, Bergstrom David, Gustafsson David, Oja Martin, Olsson Sebastian. Swedish Defence Research Agency (FOI) <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-SET-265/MP-SET-265-02.pdf>
3. <https://www.techbriefs.com/component/content/article/11983-5654-201>
4. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Яковлева Н. И., Полесский А. В., Кузнецов П. А., Лазарев П. С., Рудневский В. С., Седнев М. В. / Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 6. С. 479.
5. <https://orion-ir.ru/production/opticheskie-pribory/kamera-korotkovolnovogo-ik-diapazona-formata-640kh512-elementov/>
6. <https://scdusa-ir.com/products/cardinal-1280/>
7. <https://www.sony-semicon.com/en/products/is/industry/swir/imx992-993.html>
8. Пономаренко В. П., Попов В. С., Попов С. В. / Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 1. С. 25.
9. https://www.aim-ir.com/fileadmin/files/Data_Sheets_Dual_Use/SWIR_Modules/2018_AIM_datenblatt_A4_1024-SWIR_engl.pdf
10. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение / Пер. с франц. – М.: Мир, 1988.
11. <https://scdusa-ir.com/wp-content/uploads/2021/11/Hercules-1280.pdf>
12. https://scdusa-ir.com/wp-content/uploads/2019/07/15um-XBn-Detector_SPIE-DSS.pdf
13. <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10177/101770T/Advances-in-III-V-based-dual-band-MWIR-LWIR-FPAs/10.1117/1.2266278.short>
14. Овсянников В. А., Овсянников Я. В. / Успехи прикладной физики. 2024. Т. 12. № 1. С. 82.
15. <https://www.lynred-usa.com/media/products/leo-mw/sofec-leo-lp-mw-may2016-final-web.pdf>
16. https://ownthenight.com/media/mageplaza/product_attachments/attachment_file/r/e/recon_b2-fo_datasheet.pdf
17. https://www.pergam.ru/catalog/cctv/oem/thermal_modules/ucore275z.htm?
18. https://www.pergam.ru/catalog/cctv/oem/thermal_modules/met-3000.htm
19. https://scdusa-ir.com/wp-content/uploads/2019/07/15um-XBn-Detector_SPIE-DSS.pdf
20. <https://vigophotonics.com/product/eagle/>
21. https://scdusa-ir.com/wp-content/uploads/2022/06/Optro-2022_HOT-MWIR-detector-with-5um-pitch-FINAL.pdf

22. <https://www.gst-ir.net/ru/products/cooled-infrared-detectors/mid-wave-infrared-detectors/209.html>
 23. https://www.pergam.ru/catalog/thermal_imagers/or_gas_leaks/flir-gfx320-lmm.htm
 24. https://www.pergam.ru/catalog/thermal_imagers/or_gas_leaks/pergam-gasfir-fx.htm
 25. https://lasercomponents.ru/?s=FHD1920&ct_bot_detector_event_token=3365f41886847367abd8ffb2f86e96cacab24eabdd3bce5b07baa7fabac15c5
 26. <http://i3system.com/wp-content/uploads/2023/08/i3system-Catalog-v2.7.pdf>

27. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Власов П. В., Чалый В. П., Кацавец Н. И. / Труды XXIV Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – АО «НПО «Орион». 2016. С. 33–36.
 28. Dr. James “Ralph” Teague, David Schmieder. THE HISTORY OF FORWARD-LOOKING INFRARED (FLIR). DSIAC PUBLICATION DSIAC-2021-1342. 2021.
 29. https://www.pergam.ru/catalog/thermal_imagers/or_gas_leaks/pergam-gasfir-sf6.htm
 30. <https://rostec.ru/news/swir-kamera-kak-uvidet-nevidimoe/>

PACS: 85.60.-q

Applications of infrared FPA and optoelectronic systems based on them

A. V. Polessky¹, A. A. Astapova¹, S. V. Kornilov² and K. A. Khamidullin¹

¹ Orion R&P Association, JSC
 9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
 E-mail: polesskiyav@orion-ir.ru

² FSBI All-Russian Research Institute of Radio Electronics
 2a Kolpakova st., Moscow Region, Mytishchi, 141002, Russia
 E-mail: vniir@vniir-m.ru

Received 19.04.2024; revised 3.05.2024; accepted 7.05.2024

Applications infrared FPA and based on them optoelectronic systems for short-wave, medium-wave and long-wave IR ranges in this article were discusses. The optoelectronic system operation scheme and comparison infrared spectral ranges comparison and solved tasks were given. Current technical level of FPA's and their requirements for solving various tasks are presented.

Keywords: IR range, IR FPA, optical-electronic systems, lens.

REFERENCES

1. Khamidullin K. A., Baliev D. L., Lazarev P. S., Boltar K. O., Polessky A. V., Burlakov I. D., Chepurnov E. L., Gusarova N. I. and Popov S. V., Applied Physics, № 6, 95 (2017) [in Russian].
2. Brannlund Carl, Brorsson Andreas, Bergstrom David, Gustafsson David, Oja Martin and Olsson Sebastian, Swedish Defence Research Agency (FOI) <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-SET-265/MP-SET-265-02.pdf>
3. <https://www.techbriefs.com/component/content/article/11983-5654-201>
4. Boltar K. O., Burlakov I. D., Yakovleva N. I., Polessky A. V., Kuznetsov P. A., Lazarev P. S., Rudnevsky V. S. and Sednev M. V., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) 9 (6), 479 (2021) [in Russian].
5. <https://orion-ir.ru/production/opticheskie-pribory/kamera-korotkovolnovogo-ik-diapazona-formata-640kh512-elementov/>
6. <https://scdusa-ir.com/products/cardinal-1280/>
7. <https://www.sony-semicon.com/en/products/is/industry/swir/imx992-993.html>
8. Ponomarenko V. P., Popov V. S. and Popov S. V., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) 9 (1), 25 (2021) [in Russian].
9. https://www.aim-ir.com/fileadmin/files/Data_Sheets_Dual_Use/SWIR_Modules/2018_AIM_datenblatt_A4_1024-SWIR_engl.pdf
10. J. State Agency. Infrared thermography. Fundamentals, technique, application: Trans. see, Moscow, Mir, 1988.
11. <https://scdusa-ir.com/wp-content/uploads/2021/11/Hercules-1280.pdf>

12. https://scdusa-ir.com/wp-content/uploads/2019/07/15um-XBn-Detector_SPIE-DSS.pdf
13. <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10177/101770T/Advances-in-III-V-based-dual-band-MWIR-LWIR-FPAs/10.1117/12.2266278.short>
14. Ovsyannikov V. A. and Ovsyannikov Ya. V., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **12** (1), 82 (2024) [in Russian].
15. <https://www.lynred-usa.com/media/products/leo-mw/sofec-leo-lp-mw-may2016-final-web.pdf>
16. https://ownthenight.com/media/mageplaza/product_attachments/attachment_file/r/e/recon_b2-fo_datasheet.pdf
17. https://www.pergam.ru/catalog/cctv/oem/thermal_modules/ucore275z.htm?
18. https://www.pergam.ru/catalog/cctv/oem/thermal_modules/mct-3000.htm
19. https://scdusa-ir.com/wp-content/uploads/2019/07/15um-XBn-Detector_SPIE-DSS.pdf
20. <https://vigophotonics.com/product/eagle/>
21. https://scdusa-ir.com/wp-content/uploads/2022/06/Optro-2022_HOT-MWIR-detector-with-5um-pitch-FINAL.pdf
22. <https://www.gst-ir.net/ru/products/cooled-infrared-detectors/mid-wave-infrared-detectors/209.html>
23. https://www.pergam.ru/catalog/thermal_imagers_for_gas_leaks/flir-gfx320-lmm.htm
24. https://www.pergam.ru/catalog/thermal_imagers_for_gas_leaks/pergam-gasfir-fx.htm
25. https://lasercomponents.ru/?s=FHD1920&ct_bot_detector_event_token=3365f41886847367abd8ffba2f86e96cacab24eabdd3bce5b07baa7fabac15c5
26. <http://i3system.com/wp-content/uploads/2023/08/i3system-Catalog-v2.7.pdf>
27. Boltar K. O., Burlakov I. D., Vlasov P. V., Chaly V. P. and Katsavets N. I. Proc. of the XXIV International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices. JSC NPO Orion, 2016, pp. 33–36.
28. Dr. James “Ralph” Teague and David Schmieder. THE HISTORY OF FORWARD-LOOKING INFRARED (FLIR). DSIAC PUBLICATION DSIAC-2021-1342. 2021.
29. https://www.pergam.ru/catalog/thermal_imagers_for_gas_leaks/pergam-gasfir-sf6.htm
30. <https://rostec.ru/news/swir-kamera-kak-uidet-nevidimoe/>