

УДК 621.384.3

**ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ СИСТЕМ 3-ГО ПОКОЛЕНИЯ, РАБОТАЮЩИХ АКТИВНО-ПАССИВНЫМ МЕТОДОМ**

Ю.Г. Якушенок

Рассматриваются основные тенденции развития малогабаритных инфракрасных систем 3-го поколения. Приводятся примеры разработок таких систем, базирующихся на использовании многоэлементных фотоприемных устройств, чувствительных в ближневолновом, коротковолновом и длинноволновом инфракрасных диапазонах оптического спектра.

**Ключевые слова:** инфракрасная система, спектральный диапазон, матричное фотоприемное устройство.

**Введение**

Инфракрасными системами (ИКС) 3-го поколения (ИКС-3) принято называть оптико-электронные системы, работающие в двух или нескольких спектральных инфракрасных (ИК) диапазонах и использующие матричные фотоприемные устройства (ФПУ) достаточно большого формата [1]. Большинству ИКС-3 свойственно хорошее энергетическое, пространственное, спектральное и временное разрешение, что позволяет осуществлять автоматическое или полуавтоматическое распознавание и идентификацию различных источников излучения при наличии помех. В таких системах эффективно используются различия в характере собственного и отраженного оптического излучения разных объектов в различных спектральных диапазонах. Иногда к ИКС-3 относят системы, в которых один из спектральных каналов работает в видимой области спектра, а остальные – в инфракрасной.

**Рабочие спектральные диапазоны ИКС-3**

Наиболее распространенными рабочими спектральными диапазонами современных ИКС являются:

- ближний ИК-диапазон (NWIR с длинами волн 0,7–0,9 мкм);
- коротковолновый ИК-диапазон (SWIR – 0,9–3,0 мкм);
- средневолновый ИК-диапазон (MWIR – 3–5 мкм);
- длинноволновый ИК-диапазон (LWIR – 8–14 мкм).

При работе в NWIR-диапазоне используется излучение, создаваемое естественными или искусственными источниками. Отраженное от объектов наблюдаемой сцены излучение принимается неохлаждаемыми ФПУ на базе сравнительно дешевых приборов с зарядовой связью или комплементарных структур металл–оксид–полупроводник, обладающих хорошим пространственным разрешением.

При работе в SWIR-диапазоне часто используется освещенность, создаваемая свечением ночного неба, вызванного фотохимической реакцией гидроксидов в верхней атмосфере на высотах около 85 км. Она в несколько раз превышает освещенность, создаваемую звездным небом, что позволяет ИКС работать в безлунные ночи. Здесь возможно применять неохлаждаемые ФПУ, которые могут работать при температурах окружающей среды с использованием сравнительно простой системы их термостабилизации. В этом диапазоне, по сравнению с видимым, меньше ослабление проходящего излучения из-за дымки, тумана и пыли. Кроме того, здесь используется не собственное излучение объектов сцены, а отраженное от них излучение, создаваемое посторонними естественными или искусственными источниками. Если сравнить диапазон SWIR с MWIR- или LWIR-диапазонами, то необходимо отметить, что контрасты между объектами сцены в MWIR- и LWIR-диапазонах заметно отличаются от контрастов в видимом диапазоне, где, как и в SWIR-диапазоне, используется отраженное излучение, что может заметно повлиять на распознавание, классификацию и идентификацию объектов человеком-наблюдателем.

Средневолновый MWIR-диапазон часто используется в качестве рабочего для систем обнаружения излучения ракетных двигателей, вспышек боеприпасов артиллерии и стрелкового вооружения, обнаружении очагов возгорания, в термографии при контроле строительных конструкций, различных материалов, пищевых продуктов и т.д. Важно отметить, что для работы многих ФПУ, чувствительных в этом диапазоне, не требуется их охлаждение до криогенных температур, что заметно снижает габариты, массу, энергопотребление, время выхода на рабочий режим после включения питания, а также стоимость ИКС на их основе.

При работе в длинноволновом LWIR-диапазоне по собственному (тепловому) излучению объектов используются как охлаждаемые до криогенных температур фотоприемники, так и неохлаждаемые ФПУ, чаще всего на базе микроболометров. Такие ИКС работают на сравнительно больших дальностях обнаружения и распознавания объектов (целей). При этом используется контраст между целью и фоном (ок-

ружающей средой). Круг их применения чрезвычайно широк – от разнообразных военных применений до термографии, используемой в медицине, промышленном контроле и многих других областях науки и техники [1–3].

Применение двух- и многодиапазонных матричных ФПУ, в которых выделение рабочих участков спектра (спектральных диапазонов) осуществляется непосредственно в приемнике излучения, позволяет упростить оптико-механическую схему современных ИКС, заметно уменьшить их габариты, массу и энергопотребление, увеличить быстродействие. Наряду с такими системами в настоящее время успешно функционируют двух- и многоканальные ИКС, в которых разделение на отдельные спектральные каналы происходит в оптической системе [2].

### Направления совершенствования ИКС-3 активно-пассивного типа

Отдельным направлением развития ИКС-3 является совершенствование систем активно-пассивного типа, в которых активный канал включает генератор излучения (обычно – лазер), облучающий сцену (обнаруживаемые или наблюдаемые объекты) и работающий, как правило, в ближнем ИК-диапазоне. В пассивном канале обычно принимается собственное излучение объектов в среднем и длинноволновом ИК-диапазонах. Часто пассивный канал используется для предварительного обнаружения целей, а активный, обладающий принципиально более высоким пространственным разрешением, – для распознавания и идентификации целей. Кроме того, активный канал используется для локации объектов, что позволяет получать трехмерную информацию в «смотрящем» режиме, т.е. без механического сканирования. Хорошо известными системами такого типа являются лазерные локаторы (ладары).

Основные узлы ИКС, работающих активно-пассивным методом:

- осветитель (система подсветки сцены), как правило, на основе лазера;
- оптическая приемо-передающая система;
- фотоприемное устройство.

На примерах недавних разработок ряда ведущих фирм можно рассмотреть основные тенденции развития ИКС-3, работающих в активно-пассивном режиме, как в целом, так и отдельных их каналов.

Компания Raytheon Vision Systems (RVS) разрабатывает ряд ИКС активного типа, работающих в NWIR-диапазоне с использованием импульсной лазерной подсветки (длина волны излучения 1,55 мкм) при частоте импульсов 60 Гц. Приемный канал построен на базе быстродействующих КРТ (кадмий–ртуть–теллур) лавинных фотодиодов (КРТ-ЛФД) форматов 256×4 пикселей (сканирующая линейка) и 256×256 пикселей (ИКС «смотрящего» типа) [4]. Размеры пикселей ФПУ равны 60 мкм, коэффициент усиления лавинных фотодиодов – порядка 20, а квантовая эффективность – 0,7. Полоса приема частот у опытного образца составила 1 ГГц, а динамический диапазон принимаемых сигналов – 12 бит. Используется термоэлектрическая схема стабилизации рабочей температуры ФПУ на уровне температуры окружающей среды. Для опытного образца чувствительность на приеме составила более 15 А/Вт, а пороговая чувствительность – менее 0,5 нВт.

Система разрабатывается в рамках проекта NASA для осуществления автономной посадки спускаемого аппарата на поверхность Луны и других небесных тел. Ожидается, что трехмерный импульсный ладар должен работать на расстояниях от поверхности от 20 км до 100 м, обеспечивая просмотр поверхности и обнаружение препятствий в зоне посадки с радиусом 204 м с погрешностью определения расстояний в 5–10 см, что соответствует погрешности измерения времени прихода отраженных импульсов в десятые доли наносекунды.

Можно привести в качестве еще одного примера ИКС-3 компании SEA-Leti, созданную для получения двух- и трехмерных изображений (2D- и 3D-режимы) с помощью импульсного ладара и работающую в MWIR-диапазоне [5]. Высокая чувствительность при работе в 3D-режиме была получена за счет использования ФПУ на базе КРТ-ЛФД с линейно изменяющимся коэффициентом усиления, охлаждаемых до 80 К. Формат ФПУ составил 320×256 пикселей размером 30 мкм. Схема считывания и накопления зарядов имела емкость ячеек порядка  $3,6 \cdot 10^6$  электронов и низкий уровень шума. Граничная длина волны равнялась 4,6 мкм. В качестве источника подсветки в системе используется импульсный лазер с рабочей длиной волны 1,57 мкм и энергией 8 мДж в импульсе длительностью 8 нс. Частота кадров составляет 7 Гц, расходимость лазерного пучка – 65 мрад. Такая ИКС-3 позволяет осуществлять как тепловизионный 2D-режим, так и локационный 3D-режим работы. Однако дальность действия описанной в [5] системы невелика – несколько десятков метров.

Известны и другие разработки ИКС, работающих в активном режиме, в том числе и в LWIR-диапазоне, однако практически все они используют мощные лазеры и охлаждаемые до криогенных температур ФПУ, т.е. их габариты, масса и энергопотребление велики [6].

В настоящее время малогабаритные и экономичные лазеры достаточной мощности созданы только для работы в видимом, NWIR- и SWIR-диапазонах. По этой причине представляется целесообразным разрабатывать приемо-передающий канал малогабаритных ИКС-3 активно-пассивного типа для использования в этих спектральных областях (коротковолновый канал), а пассивный (только приемный) тепло-

визионный канал строить для работы в MWIR- и LWIR-диапазонах. В первом из этих каналов можно использовать существующие в настоящее время неохлаждаемые ФПУ, например, на базе InGaAs, InSb, HgCdTe и SiGe [1, 7–9]. Для второго канала наиболее приемлемыми представляются неохлаждаемые микроболометрические приемники [1–3, 10–12].

При использовании ФПУ на базе InGaAs, работающих в SWIR-диапазоне, можно заметно улучшить ряд параметров и характеристик ИКС. В них можно использовать термоэлектрические охладители (ТЭО), поддерживающие рабочую температуру ФПУ такой, чтобы не возникали большие темновые токи. Энергопотребление ТЭО, зависящее от перепада температур между ФПУ и окружающей средой, у них гораздо меньше, чем в криогенных охладителях, используемых для обеспечения работоспособности большинства ФПУ, работающих в MWIR- и LWIR-диапазонах. При температуре ФПУ 298 К и температуре окружающей среды 338 К мощность, потребляемая типовой ТЭО, составляет всего несколько ватт [3].

Системы подсветки (осветители) в ИКС активно-пассивного типа могут работать в нескольких режимах, а именно:

- без использования ТЭО, когда помимо естественной освещенности не требуется дополнительной подсветки, например, в дневных условиях;
- с использованием ТЭО, когда естественной освещенности недостаточно;
- без использования ТЭО, но с подсветкой.

При работе в этих режимах для оценки чувствительности ИКС, в частности, достижимого отношения сигнал/шум, важно учитывать следующие факторы:

- темновые токи ФПУ;
- шумы схем считывания сигналов с пикселей ФПУ и их последующей обработки;
- энергетическую эффективность системы подсветки.

Для оценки возможностей применения в ИКС-3 фотоприемников на базе InGaAs следует отметить, что уже сейчас разрабатываются такие ФПУ с форматами 1280×1024 пикселей и 640×512 пикселей, работающие в коротковолновом ИК-диапазоне (SWIR). Сегодня без использования ТЭО в матричных ФПУ на InGaAs с пикселями размером 25 мкм достигнуты уровни плотности темнового тока менее 1,5 нА/см<sup>2</sup> при температурах 293 К, при температуре 280 К – менее 0,5 нА/см<sup>2</sup>. Размеры пикселей предполагается довести до 8,5–10 мкм [7].

Если проанализировать многочисленные сообщения ведущих зарубежных фирм-производителей микроболометрических ФПУ, то можно привести некоторые усредненные на сегодня их параметры:

- питание постоянным напряжением порядка 4–5 В (до 17 В в отдельных случаях);
- эквивалентная шуму разность температур – менее 50 мК при температуре фона 300 К, диафрагменном числе объектива  $K=1$  и частоте кадров 60 Гц;
- диапазон окружающих температур – от 233 К до 343 К;
- время выхода на рабочий режим после включения – менее 10 с;
- потребляемая мощность – менее 2,0–2,4 Вт (при форматах 384×288 пикселей и 640×480 пикселей для частоты кадров 30 Гц).

В большинстве современных и перспективных ИКС алгоритмы обработки сигналов, снимаемых с ФПУ и используемых для визуализации изображения, включают в себя такие операции, как коррекция напряжения смещения и коэффициента усиления, коррекция неоднородности и замещение дефектных пикселей ФПУ, динамическое сжатие, сегментирование, гамма-коррекция, управление контрастом в различных участках изображения просматриваемой сцены, т.е. адаптивное локальное динамическое сжатие сигналов в реальном масштабе времени или от кадра к кадру, и ряд других. В ИКС-3 к ним добавляются алгоритмы управления масштабом изображений, получаемых в различных спектральных диапазонах, и их совмещение, т.е. управление форматом изображения и размерами пикселей. Учитывая непрерывное увеличение формата ФПУ и уменьшение его пикселей, эти задачи заметно усложняются.

С точки зрения уменьшения габаритов, массы и энергопотребления ИКС-3, работающих активно-пассивным методом, большой интерес представляют попытки создать такую конструкцию системы, в которой используются единая приемо-передающая оптическая система и интегрированное ФПУ. В первых образцах ИКС-3 передающая и приемная оптические системы были разнесены. Затем появились совмещенные приемо-передающие оптические системы, что устранило возникновение параллакса при работе на различных расстояниях. В приемной системе для разделения рабочих спектральных диапазонов использовалось цветоделение и два или более приемника излучения [3]. В последнее время появились опытные образцы систем с единой для всех диапазонов приемной оптической системой и интегрированным ФПУ [7, 8].

С 2009 г. Агенство по перспективным оборонным научно-исследовательским работам США (DARPA) спонсирует разработку интегрированного двухдиапазонного ФПУ, проводимую совместно компаниями DRS и Sensor Unlimited, Inc. Goodrich Corporation, ISR Systems при участии университета Дюка (Duke University) [8]. Система на основе этого ФПУ состоит из светосильного зеркального объектива с малыми продольными габаритами, работающего в широком спектральном диапазоне, следующего

за ним микроболометра на основе VO<sub>2</sub>, поглощающего длинноволновое ИК-излучение (7–14 мкм) и пропускающего на расположенный ниже фотоприемник на базе InGaAs коротковолновое ИК-излучение (0,4–1,6 мкм). Последний вместе с кремниевой схемой накопления и считывания зарядов с пикселей ФПУ выполнен в гибридном исполнении. Формат разрабатываемого устройства равен 640×512 пикселей размером 20 мкм.

Со схемы считывания и накопления сигналы поступают на аналого-цифровой преобразователь с динамическим диапазоном 14 бит. Предусмотрена коррекция неоднородности и замены дефектных пикселей, автоматический контроль уровня сигналов, их обработка в реальном масштабе времени. В сигнальном процессоре могут быть предусмотрены контроль движения, обработка локальных участков изображения сцены, ввод специальных символов, а также объединения изображений, получаемых в каждом спектральном диапазоне. Такая конструкция удобна для применения в ИКС-3, работающих активно-пассивным методом, поскольку может работать как в дневных, так и в ночных условиях; обладает небольшими габаритами, массой и потребляемой для обработки сигналов мощностью; не нуждается в раздельной юстировке каждого из спектральных каналов; упрощает алгоритмы обработки сигналов в электронном тракте и системе отображения ИКС.

Компания DRS разрабатывает также ФПУ с короткофокусным (на 30% короче, чем в первом варианте) объективом для спектрального диапазона 0,7–14 мкм.

Программа DARPA рассматривает возможность создания двухдиапазонных ФПУ с отношениями размеров пикселей, чувствительных в SWIR- и LWIR-диапазонах, 1:1 при формате 640×512 и 4:1 при форматах 1280×1024 пикселей и 2048×1536 пикселей.

### Заключение

К основным тенденциям развития малогабаритных ИК систем 3-го поколения, работающих активно-пассивным методом, можно отнести:

- использование в передающем канале малогабаритных и экономичных полупроводниковых лазеров, работающих в ближнем и коротковолновом инфракрасных диапазонах;
- применение в ближнем и коротковолновом ИК диапазонах неохлаждаемых фотоприемных устройств с термостабилизацией рабочей температуры, а в длинноволновом ИК диапазоне – микроболометров;
- стремление интегрировать как приемо-передающую оптическую систему, так и фотоприемное устройство, работающее одновременно во всех спектральных рабочих диапазонах.

### Литература

1. Тарасов В.В., Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы 3-го поколения. – М.: Логос, 2011. – 240 с.
2. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы. – М.: Логос, 2007. – 192 с.
3. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
4. McKeag W., Veeder T., Wang J. et al. New development in HgCdTe APDS and LADAR receivers // Proc. of SPIE. – 2011. – V. 8012. – P. 801230-1...14.
5. de Borniol E., Castelen P., Guellec F. et al. A 320×256 HgCdTe avalanche photodiode focal plane array for passive and active 2D and 3D imaging // Proc. of SPIE. – 2011. – V. 8012. – P. 801232-1...7.
6. Breiter R., Wendler J., Lutz H. et al. High operating temperature IR-modules with reduced pitch for SWaP sensitive applications // Proc. of SPIE. – 2011. – V. 8012. – P. 80122V-1...14.
7. MacDougal M., Hood A., Geske J. et al. InGaAs focal plane arrays for low light level SWIR imaging // Proc. of SPIE. – 2011. – V. 8012. – P. 801221-1...10.
8. Dixon P., Hess C.D., Chuan L. et al. Dual-band technology on indium gallium arsenide focal plane arrays // Proc. of SPIE. – 2011. – V. 8012. – P. 80121V-1...7.
9. Sood A.K., Richwine R.A., Sood A.W. et al. Characterization of SiGe-detector arrays for visible-NIR imaging sensor applications // Proc. of SPIE. – 2011. – V. 8012. – P. 80124D-1...10.
10. Mounier E. Technical and market trends for microbolometers for thermography and night vision // Proc. of SPIE. – 2011. – V. 8012. – P. 80121U-1...6.
11. Fritze J., Munzberg M. The new megapixel thermal imager family // Proc. of SPIE. – 2011. – V. 8012. – P. 801205-1...8.
12. Li C., Skidmore G.D., Han C.J. Uncooled VOx infrared sensor development and application // Proc. of SPIE. – 2011. – V. 8012. – P. 80121N-1...8.

**Якушенков Юрий Григорьевич** – Московский государственный университет геодезии и картографии, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, yakush@miigaik.ru