

мистические перспективы для создания на основе СКЯ широкоформатных МФПУ, обладающих качественно более высокими характеристиками, чем на основе структур из узкозонных либо примесных полупроводников.

Л и т е р а т у р а

1. Филачёв А. М., Пономаренко В. П., Таубкин И. И., Ушакова М. Б. Инфракрасные матрицы и тенденции их развития// Прикладная физика. 2003. № 1. С. 105.
2. Ишанин Г. Г., Панков Э. Д., Андреев А. Л. Кн.: Источники и приемники излучения. — С.-Петербург: Политехника. 1991. — 240 с.
3. Васильев В., Голенков А. Г., Дворецкий С. А., Есеев Д. Г. и др. Фотоприемники на основе гетероэпитаксиальных слоев CdHgTe, для среднего и дальнего ИК-диапазонов// Микроэлектроника. 2002. Т. 31. № 6.

4. Timothy F., Thomas E. et al. A high performance 30 TDI scan reversible MWIR InSb hybrid scanning array on focal plane dynamicrange compression// Pros. SPIE. 1992. V. 1685. P. 296—304.

5. Nelson M., Jonson J., Ljmheim T. General noise processes in hybrid infrared focal plane arrays// Optical engineering. 1991. V. 30. № 11. P. 1682—1700.

6. Hite Y. Comparison of NETD Performance of Staring and partial-scanning infrared focal plane arrays// Infrared Phys. 1989. V. 29. № 6. P. 971—984.

7. Haining A. Use of two-dimensional infrared detector array in TDI mode// Pros. SPIE. 1992. V. 1191. P. 270—274.

8. Timothy F. A high performance 30 TDI scan reversible MWIR InSb hybrid scanning array// Ibid. 1992. V. 1685. P. 117—126.

9. Голубь Б. И., Гусев А. Н. Информационные возможности приемников излучения// Тепловидение. — М., 2002. № 14. С. 14—28.

10. Акимов В. М. и др. Матричное фотоприемное устройство на основе InSb форматом 128×128 элементов// Прикладная физика. 1999. № 3.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

Large-format photodetective assemblies based on IR focal plane arrays

A. V. Boroshnev

Kometa Central Research Institute, Moscow, Russia

Consideration is made to a state and problems of perfection of photodetective assemblies based on IR focal plane arrays.

УДК 621.384.3:536.3

Требования к перспективным фотоприемным устройствам ИК-диапазона

Ю. И. Белоусов

Филиал ФГУП «ЦНИИ "Комета"» — "Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения", С.-Петербург, Россия

Рассмотрены проблемы выработки облика нового поколения фотоприемных устройств (ФПУ) и создания системы параметров, необходимой и достаточной для исчерпывающей характеристики современных и перспективных ФПУ. Одной из существенных черт облика ФПУ нового поколения является способность оперативного изменения их характеристик для обеспечения адаптации ИК-приборов к условиям наблюдения не только по времени экспозиции, но и по спектральным, поляризационным и другим характеристикам. Предложено приступить к выработке современной единой системы параметров ФПУ и методик их измерения.

Цель настоящей работы — вынести на обсуждение проблемы создания ФПУ нового поколения, облик которых определяет облик перспективных инфракрасных приборов (ИКП).

В соответствии с местом и ролью ФПУ как ключевого функционального узла ИКП, развитие ФПУ должно иметь опережающий характер как по

времени реализации, так и в части выработки технической идеологии облика перспективных ФПУ. С позиций разработчика ИКП, т. е. потребителя ФПУ, на первый план выделяются две проблемы, связанные с развитием ИК-техники и решение которых возможно лишь при объединении усилий разработчиков и потребителей ФПУ. Эти пробле-

мы в самом общем виде можно было бы обозначить как выработку облика нового поколения ФПУ и создание системы параметров, необходимой и достаточной для исчерпывающей характеристики современных и перспективных ФПУ.

Новое поколение ФПУ — не есть результат простого увеличения количества и чувствительности элементов. Они должны иметь новое качество, состоящее в возможности регистрировать те физические параметры оптического поля, которые в текущей фоновой ситуации являются носителями отличительных признаков целей и фонов.

В какой степени оправдан пересмотр традиционных требований к фотоприемникам?

Для реалистичной оценки перспектив развития оптико-электронных систем (ОЭС) нужно определить их роль и место в совокупности других технических средств получения информации. Из самых общих соображений задача ОЭС состоит в получении такой информации, которая позволила бы оператору делать надежный прогноз развития наблюдаемой ситуации, причем, чем больше длительность надежного заблаговременного прогноза, тем лучше система в целом.

Количественным критерием эффективности информационной системы может служить время такого прогноза, а надежность традиционно оценивается вероятностными характеристиками. Время заблаговременного прогноза развития ситуации должно быть больше времени, необходимого для принятия решения и выполнения оператором ответных упреждающих действий.

Такой подход приемлем и для медицинских тепловизионных приборов, и для энергетических обследований, и для военного применения ОЭС. Более того, для большинства других технических средств такой подход тоже возможен, и поэтому можно сравнивать эффективность различных по физическому принципу приборов, например, радиолокационных, гидроакустических и ИК-систем обнаружения, ультразвуковых и тепловизионных приборов медицинской диагностики и т. д.

Таким образом, обобщенным критерием эффективности информационных систем, и ИК ОЭС в частности, можно принять время и надежность прогноза развития наблюдаемой ситуации или процесса.

Надежность прогноза обеспечивается в первую очередь достоверностью получаемой информации. Речь идет не о битах или энтропии, т.е. шенноновском подходе, а о содержательной структуре воспринимаемой оператором информации, которая понятна ему без дополнительной расшифровки, достоверна и не нуждается в перепроверке или уточнениях.

Понятие достоверности интерпретации информации наиболее просто выражается в количест-

венном виде в задачах, связанных с обнаружением, распознаванием и классификацией объектов, где могут быть рассчитаны или измерены соответствующие вероятности правильного решения этой задачи на данном иерархическом уровне принятия решений, или дистанции, на которых такое решение принимается с заданной вероятностью. Более сложная трактовка понятия интерпретации информации присуща задачам, где оператор на основе содержательной структуры тепловизионного изображения выбирает решение из многих альтернатив, и она характерна для медицинских, промышленных и экологических областей применения ИК-термографии. Здесь повышение достоверности интерпретации результатов термографического обследования прямо связано с извлечением в явном виде количественной информации из тепловизионного изображения.

В настоящее время повышение достоверности информации, получаемой с помощью современных ИК-приборов, прямым образом связано с увеличением их чувствительности и разрешающей способности. Однако для некоторых приложений этого уже сейчас не достаточно, нужна дополнительная информация в виде количественных — радиометрических данных, характеризующих температуру излучения объекта в рабочем спектральном диапазоне, или же соотношение интенсивностей его излучения в нескольких участках ИК-диапазона.

Кроме того, в военной области достоверность определяется не столько пороговой чувствительностью прибора, сколько его помехозащищенностью, способностью выделять нужные объекты в присутствии сложных фоновых и организованных помех и маскировки целей.

Повышение чувствительности и количества элементов остается сегодня магистральным направлением развития ФПУ, однако мы приблизились к тому уровню, когда прямое наращивание потенциальной пороговой чувствительности и разрешающей способности уже не дает пропорционального прироста эффективности ОЭС. Накопленные сведения о физических особенностях и динамике формирования и распространения ИК-излучения природных и антропогенных объектов позволяют ставить вопрос о целесообразности и пропорциях обмена потенциально возможной сверхчувствительности ФПУ на их способность регистрировать специфические характеристики оптического излучения.

Это направление в определенной мере уже сейчас реализуется в виде создания моноспектральных фотоприемников. Однако есть и другие специфические характеристики оптического поля объектов, претендующие на роль носителей устойчивых отличительных признаков излучения

целей и фонов. К ним можно отнести поляризационные характеристики, статистические характеристики флуктуаций излучения целей и фонов в пределах элементарного пикселя ФПУ.

Если исходить из задачи повышения достоверности интерпретации получаемой информации, то регистрация дополнительного устойчивого отличительного признака может дать качественный выигрыш. Именно таким путем может быть реализован переход к *ОЭС следующего поколения, отличительная особенность которых в том, что при прочих равных условиях они позволяют решать более сложные задачи, т.е. принимать решения более высокого иерархического уровня*, в частности, осуществлять распознавание малоразмерных объектов одновременно с их обнаружением. Именно это можно считать основным показателем того, относится ли вновь созданный ИКП к новому поколению или же является более совершенным вариантом предыдущего поколения.

Пассивные ОЭС нынешнего поколения не обладают такой способностью без привлечения дополнительной информации. Если взять в качестве примера современные многоспектральные ИК-приборы, то следует признать, что в настоящее время нет ясного понимания, существуют ли вообще универсальные рентабельные методы совместной обработки информации от нескольких спектральных диапазонов, т. е. методы, применимые для разных условий наблюдения и одновременно дающие выигрыш, оправдывающий неизбежные технические затраты. Современный подход к комплексированию тепловизионных каналов 3—5 и 8—12 мкм основан на интуитивной аналогии с цветными и черно-белыми визуальными изображениями, когда менее четкие цветные изображения могут содержать больше устойчивых отличительных признаков объектов, чем четкие черно-белые изображения.

Однако в ИК-области тепловизионные изображения некоторых объектов могут иметь разные знаки контраста в диапазонах 3—5 и 8—12 мкм, который может изменяться при изменении пропускания атмосферной трассы, например при изменении дистанции. Это не позволяет выработать единый алгоритм интерпретации многоспектральной информации о наблюдаемом сюжете при априорно неизвестных условиях наблюдения.

Имеющийся опыт показал, что простые операции сложения, вычитания, деления, выполненные над изображениями, полученными в двух спектральных диапазонах, не дают того эффекта, который оправдывал бы применение двух спектральных каналов вместо одного. Кроме того, методы удачного использования двух и более спектральных диапазонов носят частный характер, но в дру-

гих, априорно неизвестных условиях наблюдения, могут оказаться проигрышными и не гарантируют увеличения эффективности ИКП в целом.

Результаты исследований фоноцелевой обстановки на море показывают, что наиболее целесообразно было бы регистрировать одновременно спектральный состав и поляризационные особенности излучения природных образований и антропогенных объектов. Совместный анализ этих характеристик оптического поля существенным образом повышает помехоустойчивость ИКП и позволяет оператору за более короткое время оценивать развитие наблюдаемой ситуации. Очевидно, что ключевым звеном при реализации такой возможности выступает ФПУ, обладающее существенно новыми качествами, пусть даже при формально более низких значениях пороговой чувствительности в каждом из поддиапазонов.

Другой аспект влияния условий наблюдения на работу ИКП проявляется в существенной зависимости соотношения собственных шумов ФПУ и шумов внешнего фона от наблюдаемого сюжета. Эти шумы могут иметь сугубо различные вероятностные законы распределения. Из-за этого на основе анализа амплитуды сигнала, т. е. первого момента, невозможно построить универсальный алгоритм выделения полезных сигналов и принятия решений.

Например, матричный ИКП имеет широкое и узкое поля зрения и направлен на линию горизонта. В широком поле зрения ИКП размах сигналов весьма велик, а флуктуации фоновых помех имеют сугубо негауссов характер и даже могут иметь бимодальное распределение. Даже в пределах единичного мгновенного поля зрения чувствительного элемента фоновые шумы преобладают над внутренними шумами ФПУ и могут определять их негауссовский характер. Если для того же ИКП оптическая система уменьшила мгновенное поле зрения, что делается для наблюдения удаленных объектов, то размах фоновых сигналов существенно уменьшается, так как вступают в действие сразу несколько факторов. Из-за этого возрастает относительная роль внутренних шумов ФПУ и, главное, изменяется вероятностный закон суммарных внутренних и внешних шумов, на фоне которых необходимо выделять, например, малоразмерную цель.

Алгоритмы, оптимизированные, например, на гауссовские шумы, могут дать проигрыш по темпу ложных тревог в 1—2 порядка, если шумы будут иметь другой характер. И здесь не поможет простое увеличение чувствительности ФПУ.

Уже сейчас реальная фоноцелевая обстановка, как правило, заставляет автоматику либо загроублять прибор, либо работать в узком температур-

ном окне, из-за чего максимальная чувствительность ФПУ реализуется лишь при достаточно узком круге условий наблюдения или в лабораторных условиях. Простое наращивание традиционных технических параметров приборов, таких как чувствительность и разрешающая способность, уже не дает того прироста эффективности, которое оправдывало бы осуществляемые затраты, как это было ранее. Улучшение этих характеристик должно рассматриваться как обязательное условие, обеспечивающее возможность ОЭС нового поколения оперативно адаптироваться к изменяющимся условиям наблюдения.

Применительно к перспективным ФПУ эта общая задача конкретизируется. Совместно с оптической системой и электронной обработкой ФПУ должны обеспечивать оперативное (за время между двумя опросами матрицы) изменение следующих характеристик:

- ширины и положения рабочего спектрального диапазона ИКП;
- чувствительности к ориентации поляризации;
- времени накопления (экспозиции) сигнала;
- размера углового мгновенного поля зрения чувствительного элемента.

Определение приоритетов, границ вариаций и степени взаимосвязи этих и других фотоэлектрических характеристик и является той конкретной работой, которая подразумевается под выработкой технического облика ФПУ. Общий вектор исследований должен быть ориентирован на поиск технических путей реализации новых требований. Неизбежный вопрос, который нужно решать в каждом конкретном случае, заключается в определении рациональных соотношений между тем, какую часть потенциальных возможностей перспективных ИКП допустимо направить на повышение привычных параметров — чувствительности и разрешающей способности, а какую часть — на придание им способности регистрировать новые дополнительные особенности оптического поля наблюдаемой обстановки.

Определение указанных пропорций должно ориентироваться на решение основной проблемы — повышение достоверности интерпретации информации, получаемой с помощью перспективных ИКП. Именно это должно определять логику выработки количественных значений параметров, которые необходимо достигнуть при создании ФПУ нового поколения.

С этим связана вторая проблема, проявляющаяся в том, что нет общего согласия, какие же это параметры.

В современной практике для описания характеристик ФПУ используется слишком большое количество параметров, удобных конкретному раз-

работчику, но не позволяющих нетривиальным образом сравнивать разные ФПУ или оценивать эффективность их применения в ИКП. Кроме того, существующая система параметров ИКП бесполезна при попытках оценить качество перспективных ФПУ, например работающих одновременно в двух и более спектральных диапазонах.

Необходимость разработки современной системы параметров ФПУ и общепринятых методик их измерения стала очевидной уже достаточно давно. Поэтому в практику вошли многочисленные частные критерии качества ФПУ, понятные специалистам, но не узаконенные никакими нормативными документами и не имеющими общепризнанных методик измерения.

Например, чувствительность в единицах Кельвина (МРРТ, РТЭШ и т. д.) исходно и по определению была характеристикой тепловизионного прибора в целом как устройства. Сейчас же эта величина стала общепринятой характеристикой матрицы. Однако даже при таком упрощенном подходе существует ряд неоднозначностей при ее использовании. Например, если формально сравнивать чувствительность МКБМ и QWIP матриц по приводимым в паспортах значениям порогового температурного контраста в Кельвинах, то совершенно невозможно правильно предсказать, какую чувствительность будут иметь оба эти прибора, если им нужно регистрировать малые контрасты на фоне АЧТ с температурой, например, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Особенности формирования лучистого теплообмена в МКБМ ставят их в особое положение. Уникальность МКБМ состоит в том, что если он "смотрит" на холодный фон, то его температура формируется за счет радиационного охлаждения чувствительного слоя через оптическую систему в свободное пространство. В этом процессе важнейшую роль играет собственная спектральная излучательная способность матрицы. При размерах чувствительных элементов и зазоров между ними, соизмеримых с длиной волны максимума собственного излучения, матрица в целом может рассматриваться как двухмерная дифракционная решетка, поскольку проявляются волновые свойства ИК-излучения. Оптические свойства матрицы как оптического элемента принципиально отличаются от ламбертовского излучателя и имеют сложную периодическую и сугубо селективную индикатрису поглощательной и излучательной способностей. К тому же здесь в определенной мере присутствуют поляризационные особенности. Эти особенности имели второстепенное значение, когда речь шла о грубых ФПУ, но для чувствительных матричных МКБМ VLIP с малыми чувствительными площадками они, скорее всего, должны проявляться.

Очевидно, что новая система параметров ФПУ должна опираться на ясное понимание физической картины работы фотоприемного слоя совместно с электроникой первичной обработки и считывания сигнала в реальной оптической системе. Она должна обеспечить и стимулировать взаимопонимание разработчиков и пользователей как современных, так и перспективных ФПУ. В качестве первого конкретного шага предлагается организовать инициативную группу, задачей которой будет

обобщение существующих представлений по проблемам технического облика ФПУ нового поколения и разработки новой системы параметров ФПУ и методик их измерения, и которая вынесет на обсуждение научно-технической общественности свое видение основных нерешенных проблем с тем, чтобы эти ключевые проблемы были поставлены государством для решения способным на это организациям и специалистам.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

The general features required of future generation IR-detectors

Yu. I. Belousov

Scientific Design Centre "Electro-Optical Surveillance Systems" —
The Branch of «Central Scientific Research Institute "Kometa"», St.-Petersburg, Russia

IR detectors (IRD) must have ahead developing in according with highly important function at opto-electronics systems designing. It is appropriate to discuss the most significant properties of foreseeable future generation IRD, as they determinate the appearance of the newest IR devices. There are two problems that can be solved only by joint efforts of originators and consumers of IRD. In general terms the first problem may be designated as the problem of predicating new potentials of modern IRD. The second problem is to determinate the set of necessary and sufficient properties IRD and their measurement methods for completely characterization the same objects. The future generation of IRD is not result of ordinary increasing the number and sensitivity of FPA elements only. IRD must have capability to register such physical parameters of optical fields that are distinctive features of real targets contrary to the false same and to background.

УДК 621.384.3

Оценка эффективности использования одно- и двухспектральных матричных фотоприемников на основе структур с квантовыми ямами

А. А. Солодков

Федеральное государственное унитарное предприятие "22 ЦНИИИ МО РФ",
Мытищи, Московская обл., Россия

В. Б. Куликов

Федеральное государственное унитарное предприятие «НИИ "Полус" им. М. Ф. Стельмаха»,
Москва, Россия

Приведены методика и результаты расчетной оценки эффективности применения в приборном комплексе матричных фотоприемников (МФП) на основе многослойных структур с квантовыми ямами (МСКЯ).

Матричные фотоприемники на основе МСКЯ представляют динамично развивающееся современное направление создания изделий фотоэлектроники. Ряд положительных качеств данных МФП (повышенная стойкость к воздействию ионизирующих и лазерных излучений, простота