

## К ВОПРОСУ О КЛАССИФИКАЦИИ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ ПО «ПОКОЛЕНИЯМ»

**Ведение.** Применение тепловизионных приборов (ТПВ), обеспечивающих наблюдение окружающей местности и объектов на ее фоне в течение любого времени суток, наиболее актуально для образцов техники специального назначения. Среди этих приборов есть образцы дающие изображение объекта - цели, например, грузового автомобиля наблюдаемого на дистанции 300 м, в виде размытого слабоконтрастного пятна даже отдаленно не напоминающего оригинал и, в то же время, есть образцы тепловизионных приборов, которые обеспечивают оператору изображение, позволяющее определить тип пулеметной установки на танке, расположенного на расстоянии порядка 2...3 км.

Следует особо подчеркнуть, что речь идет о тепловизионных приборах, устанавливаемых в объекты бронетанковой техники (БТТ) - бронетранспортеры, боевые машины пехоты, танки, основным критерием является требование **предельных** характеристик по дальностям обнаружения / распознавания / идентификации целей, при **минимальных** габаритах тепловизионного прибора. Стоимость подобных приборов составляет от 20 тыс. до 150 тыс. долларов. Таким образом, вопросы, касающиеся предварительной оценки характеристик тепловизионных приборов, в немалой степени интересуют разработчиков прицельных и наблюдательных комплексов системы управления огнем (СУО) объектов БТТ. Возникает вопрос - насколько в таком случае можно ориентироваться на такой широко используемый в рекламных проспектах и применяемый в специальной литературе термин, как «поколение» тепловизионного прибора? В данной статье этот вопрос будет рассматриваться с точки зрения имеющейся практики натуральных испытаний и применения тепловизионных приборов в составе изделий БТТ.

**Критерии деления ТПВ на поколения.** По результатам анализа информации по данному вопросу, полученной из различных источников, в настоящее время наиболее часто встречается деление тепловизионных приборов на четыре так называемые «поколения» (0-е и 1-е поколения объединяют в одну группу), основные характеристики которых представлены в Таблице 1.

*Таблица 1*

№ п/п	Поколение	Детектор ФПУ	Формирование изображения на ФПУ	Охлаждение детектора ФПУ
1	0	– одиночный приемник излучения.	сканер	(30...100) К
2	1	– линейка одиночных фоточувствительных элементов (ФЧЭ). Например: 64, 128.	сканер	(30...100) К
3	2	– многомерная линейка ФЧЭ группами по 2...6 элементов, расположенных в шахматном порядке с временной задержкой и накоплением сигналов (ВЗН). Например: 288×4, 480×6.	сканер	(30...100) К

№ п/п	Поколение	Детектор ФПУ	Формирование изображения на ФПУ	Охлаждение детектора ФПУ
4	3	– 2-мерная многоэлементная матрица ФЧЭ. Например: 384×288 элементов.	нет*)	(30...100) К
5	4	– 2-мерная многоэлементная матрица ФЧЭ на основе микроболометров. Например: 320×256 элементов.	нет	нет

\*) опционно в ТПВ 3-го поколения, может быть интегрирована система микросканирования, основное назначение которой - улучшение качества изображения (разрешения), но одновременно это ведет к увеличению стоимости прибора, приближая ее к стоимости приборов 2-го поколения со сканером.

По результатам рассмотрения Таблицы 1 несложно сделать выводы:

– Об «упрощении» конструкции ТПВ 3-его и 4-го поколений. В ТПВ 3-го поколения отсутствует сложная прецизионная система оптико - механической развертки изображения – сканер, а в ТПВ 4-го поколения кроме того, отсутствует также и газовая криогенная машина (ГКМ) системы глубокого охлаждения фотоприемника.

– О прямой связи понятия «поколение» с составом и архитектурой фотоприемного устройства (ФПУ) данного тепловизионного прибора. В ТПВ 3-его и 4-го поколений вместо линейки из  $n$  фоточувствительных элементов применяется матрица из  $m \times n$  ФЧЭ.

Стоит особо подчеркнуть:

1. ГКМ, работающие по циклу Стирлинга, а особенно портативные, относятся к прецизионным приборам критических технологий и подлежат практически тем же экспортным ограничениям, как и тепловизионные приборы военного назначения.

2. Понятие «упрощение» не относится к архитектуре площадки фоточувствительных элементов ФПУ и системе обработки сигналов с нее.

В перечень отличий ТПВ 2 - го поколения от приборов 3 - го поколения следовало бы включить также и рабочий спектральный диапазон. Существующие серийные образцы ТПВ 2 - го поколения могут обеспечивать поиск целей в диапазоне волн 3...5 и 8...12 мкм, а приборы 3-го поколения представлены в основном образцами с рабочим диапазоном волн 3...5 мкм, что связано с технологическими проблемами в получении дискретных фотоприемников диапазона 8...12 мкм.[4]

В связи с тем, что диапазон длин волн 8...12 мкм соответствует максимуму теплового излучения тел при окружающей температуре [6], ТПВ, предназначенные для поиска целей в диапазоне волн 8...12 мкм, в основном, используются в приборах военного назначения.

Основные характеристики серийных образцов тепловизионных приборов 1, 2, 3 и 4 –го поколений приведены в таблице 2.

Из таблицы 2, следует, что у ТПВ 2- го поколения Catherine-FC и ТПВ 3- го поколения MATIS-STD практически одинаковые результаты по дальностям обнаружения / распознавания / идентификации. Для матричного ТПВ 3- го поколения Catherine-XP в рекламных материалах приводятся следующие значения: 12,7/4,7/2,5.

ТПВ	Покоління	$\Delta\lambda$ , мкм	NETD, мК	Обнаружение/ распознавание/ идентификация, км *)	Габариты, мм / вес, кг
ALIS	1-е	8-12	н/д	5,0 / 2,3 3,0 / 1,2 / 0,6 **)	273×138×116 / 3,5
Catherine-FC	2-е	8-12	< 70	10,8 / 4,2 / 2,2 **)	250×180×120 / 5,5
MATIS-STD	3-е	3-5	< 50	~10,8 / 4,2 / 2,2 **)	297×136×146 / 4,5
Catherine-XP	3-е	8,5	< 10	12,7 / 4,7 / 2,5	277×170×99 / 3
IR 3137	4-е	8-14	н/д	4,0 / 2,5 / н/д	100×200×240 / 2

\*) согласно STANAG №4347 [1]

\*\*) по результатам испытаний.

При этом данный прибор позиционируется в информационном материале фирмы THALES за 2007 г., как «истинный тепловизор 3-го поколения»: «QWIP compact thermal imager: Catherine-XP and its evolutions» «Catherine-XP has now opened the way towards the true Third Generation Thermal Imager»: («Catherine-XP открыла дорогу к истинному Тепловизору Третьего Поколения»). [2]

Таким образом, характеристики ТПВ 3-го, а особенно 4-го поколений, по сравнению с ТПВ 2-го поколения не столь однозначны, т. е. нельзя сказать, что если поколение выше, то характеристики лучше.

**Вопросы практической реализации «матричного» тепловизора.** Различие между тепловизорами 1-го, 2-го поколений и 3-го, 4-го заключается не только в составе ФПУ, но и в самом принципе получения фотоприемником излучения от объекта.

Для тепловизоров 1-го, 2-го поколений получение изображения объекта на приемнике излучения производится путем последовательного проецирования (сканирование мгновенным полем зрения) всего объекта без пропусков на каждый из  $n$  фоточувствительных элементов линейки.

Для матричного тепловизора (к которым относятся тепловизоры 3-го, 4-го поколений) получение изображения объекта на ФПУ производится путем одномоментного проецирования всех точек объекта на дискретную  $m \times n$  структуру площадки фоточувствительных элементов, (ФЧЭ) т.е. с пропусками тех элементов изображения, которые попадают на промежутки между ФЧЭ.[4]

Таким образом:

- в тепловизоре со сканированием, регистрируемый сигнал пропорционален произведению интенсивности облучения и времени экспозиции изображения объекта на фотоприемной области.

- в несканирующем, матричном, тепловизоре регистрируемый сигнал пропорционален только интенсивности облучения изображения объекта фотоприемной области.

В приборах, использующих развертку изображения многоэлементной линейкой на выходе ФПУ (ТПВ 2-го поколения), получаем аналоговый сигнал, передающий изменение значения контраста сканируемой сцены с максимальной достоверностью. При этом возможна реализация обработки сигнала за счет его временной задержки и накоп-

ления (ВЗН) по группам элементов линейки, в результате чего происходит улучшение соотношения «сигнал/шум» и, соответственно, повышение чувствительности прибора.

В процессе практической реализации идеи создания несканирующего тепловизионного прибора, («матричного ТПВ», «ТПВ 3-го поколения») эти особенности получения изображения дискретным «матричным» приемником излучения привели к следующим проблемам:

1. Проблема снижения достоверности значения сигнала с матричного (дискретного) ФПУ от сканируемой сцены, зависящего в общем случае от плотности заполнения, которая меньше 100 % (из - за наличия пропусков между фоточувствительными элементами). Данные пропуски требуются для исключения фотоэлектрического и электрического взаимодействия между ФЧЭ элементами площадки ФПУ [4]. Негативным следствием этого является появление ложных низкочастотных составляющих в спектре сигнала (наложение спектров) из-за дискретной структуры матричного приемного элемента. Это в свою очередь ведет к искажению спектра изображения, т.е. видеосигнала, с последующим выводом на экран системы отображения «ложных», «побочных» изображений. (В многоэлементной линейке сканирующего тепловизора пропуски между ФЧЭ отсутствуют так как их располагают в шахматном порядке с некоторым их перекрытием.)

Одним из методов решения данной проблемы матричных тепловизоров, является введение в оптоэлектронный тракт тепловизора так называемого микросканера с обеспечением режима четырехпозиционного микросканирования  $2 \times 2$ . В результате микросканирования происходит выравнивание характеристик элементов матрицы и удвоение разрешения по каждой координате. Однако при этом из-за сокращения времени накопления зарядов в ФПУ эффективность тепловизора снижается.

2. Проблема обработки возросших объемов информации и разброса абсолютной чувствительности отдельных элементов матрицы. Типичная матрица  $640 \times 512$  содержит 327680 элементов, что на 2-3 порядка превышает количество элементов в тепловизоре со сканирующим ФПУ. Это в свою очередь требует резкого увеличения скорости обработки возросших объемов информации в реальном масштабе времени, в том числе и выравнивание разброса абсолютной чувствительности отдельных элементов матрицы аппаратным способом. Для сравнения - в ТПВ 2-го поколения многоэлементная линейка  $288 \times 4$  содержит «всего» 1152 элемента.

Таким образом, переход от сканирующих ТПВ с многомерными линейками и ВЗН к несканирующим системам на основе матриц (дискретных приемников) наряду с таким преимуществом, как отсутствие механической системы развертки, одновременно привел к необходимости учитывать ряд новых факторов и решать не встречавшиеся ранее задачи и даже проблемы.

В последнее время особые надежды разработчиков несканирующих ТПВ возлагаются на развитие технологии производства матричных фотоприемников на основе QWIP GaAs/AlGaAs - детекторов (Quantum Well Infrared Photodetector, - «инфракрасный детектор на квантовых ямах»), которые по электрофизическим свойствам относятся к структурам с внутренней фотоэмиссией. Данные структуры обладают высокой технологичностью, воспроизводимостью, и что особенно важно однородностью параметров по элементам с матрицами формата  $256 \times 256 \dots 640 \times 512$  и др. Следует отметить, что QWIP -детекторы при остальных положительных свойствах, обладают более низкой чувствительностью, и требуют более глубокого охлаждения, чем детекторы на КРТ (HgCdTe).

Одним из основных преимуществ QWIP-детекторов считается возможность их работы в т.н. «двухцветном» режиме, т.е. обеспечить одновременную работу в разных спектральных диапазонах. Образцы тепловизионных приборов 3-го поколения на QWIP

- матрицах диапазона 8..9 мкм, появились в 90-е годы XX века. К данному классу приборов относится несканирующий матричный ТПВ 3-го поколения Catherine-XP с рабочей длиной волны 8,5 мкм. [2]

**О тепловизорах 4-го поколения.** В настоящее время ведутся интенсивные работы по созданию образцов ТПВ 4-го поколения для военного применения. Главным достоинством, при этом является отсутствие у ТПВ 4-го поколения ГКМ, сканера, малое время (практически мгновенное) выхода на рабочий режим (Для тепловизоров 2-го и 3-поколений, для этого требуется порядка 5 минут). Главным же недостатком являются малые (по сравнению с приборами 2-го и 3-го поколений) дальности обнаружения/распознавания/идентификации объектов.

Это объясняется главным образом тем, что неохлаждаемые микроболометрические ИК-матрицы не имеют пока достаточно высокой чувствительности. Средняя чувствительность по NETD - 70 мК, в тоже время, как средняя чувствительность по NETD ИК-матриц на базе КРТ составляет 20 мК.

Существуют возможности получения для микроболометрических матриц NETD порядка 30 мК и уменьшения размеров ФЧЭ матрицы до 30 мкм для области спектра 8...14 мкм. [4]

Хотя неохлаждаемые ТПВ 4-го поколения обладают меньшей чувствительностью и разрешающей способностью, большей инерционностью по сравнению с охлаждаемыми фотоприемниками, системы с такими фоточувствительными элементами не используют дорогостоящих прецизионных систем глубокого охлаждения и в настоящее время находят применение, в качестве недорогих тепловизоров массового применения.

**Выводы.** До настоящего времени, сканирующие тепловизоры 2-го поколения на многоэлементных линейках HgCdTe с ВЗН имеют преимущества над несканирующими матричными тепловизорами 3-го поколения в спектральной области 8-12 мкм, что показывает и практика применения данных приборов в составе прицельно наблюдательных комплексов СУО танков. Однако считается, что преимущество матричных несканирующих тепловизоров 3-го поколения над тепловизорами с многоэлементными линейками и механической разверткой 2-го поколения с развитием технологии изготовления матриц и систем обработки информации будет реализовано так же и в области спектра 8..12 мкм. Определяющими факторами при этом является прогресс в области программного и аппаратного обеспечения, т.е. производительности процессора, объема памяти и высокого уровня программного обеспечения [4].

Тепловизионным приборам на неохлаждаемых микроболометрах «присвоено» наиболее «высокое» 4-е по счёту поколение, хотя в настоящее время они значительно уступают по требуемым характеристикам матричным ТПВ 3-го поколения, и, особенно сканируемым ТПВ 2-го поколения на многоэлементных линейках с ВЗН.

Таким образом, номер «поколения», это больше информация о конструкции и составляющих фотоприемного устройства тепловизионного прибора, или же о геометрическом формате детектора области приема излучения, а не информация об основных параметрах прибора, таких, как например, дальность видения объектов заданных геометрических размеров на фоне окружающей обстановки в различных метеоусловиях и в реальном масштабе времени.

Следует также отметить, что не дают приемлемой информации о характеристиках тепловизионного прибора и результаты, полученные методом расчета. Например, как отмечено в работе [3], такая важнейшая характеристика ТПВ, как дальности: обнаружения / распознавания / идентификации, полученные в результате расчета, с использованием данных, приводимых разработчиком – изготовителем ТПВ, оказались на 40%

ниже значений полученных в ходе натурных испытаний. В этой же работе отмечена и недостаточность данных приводимых фирмой – изготовителем.

### **Заклучение.**

1. Классификация тепловизионных приборов по «поколениям» в части информативности фактически не дает представления о требуемых характеристиках тепловизионных приборов.

3. О реальных характеристиках тепловизионного прибора можно судить только по результатам его сравнительных испытаний с тепловизионным прибором, характеристики которого в свою очередь были подтверждены результатами натурных испытаний.

**Литература:** 1. STANAG 4746 “Definition of nominal static range performance for thermal imaging system”. Edition 1, 13 July 1995, NATO. 2. Olivier Cocle, Christophe Rannou, Bertrand Forestier, Paul Jouglu Philippe F. Bois, Eric M. Costard, A. Manissadjian, D. Gohier. *Qwip compact thermal imager: CATHERINE-XP and its evolutions. SPIE Defense & Security 2007 - [6542-127] ORLANDO 2007.* 3. Гордиенко В.И., Колобродов В.Г. Оценка эффективности тепловизионного канала танкового прицельного комплекса. *Артиллерийское и стрелковое вооружение Вып.1, 2010 с. 17, 19.* 4. Сизов Ф.Ф. *Фотоэлектроника для систем видения. Киев, Академперіодика, 2008.* 5. Ллойд Дж. *Системы тепловидения. М.: Мир, 1987.* 6. Госсорг Ж. *Инфракрасная термомография. Основы, техника, применение. М.: Мир, 1988.* 7. Мирошников М.М. *Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1983.*

**Bibliography (transliterated):** 1. STANAG 4746 “Definition of nominal static range performance for thermal imaging system”. Edition 1, 13 July 1995, NATO. 2. Olivier Cocle, Christophe Rannou, Bertrand Forestier, Paul Jouglu Philippe F. Bois, Eric M. Costard, A. Manissadjian, D. Gohier. *Qwip compact thermal imager: CATHERINE-XP and its evolutions. SPIE Defense & Security 2007 - [6542-127] ORLANDO 2007.* 3. Gordienko V.I., Kolobrodov V.G. *Ocenka jeffektivnosti teplovizionnogo kanala tankovogo pricel'nogo kompleksa. Artillerijskoe i strelkovoje vooruzhenie Vyp.1, 2010 s. 17, 19.* 4. Sizov F.F. *Fo-tojelektronika dlja sistem videnija. Kiev, Akademperiodika, 2008.* 5. Llojd Dzh. *Siste-my teplovidenija. M.: Mir, 1987.* 6. Gossorg Zh. *Infrakrasnaja termografija. Osnovy, tehnika, primenenie. M.: Mir, 1988.* 7. Miroshnikov M.M. *Teoreticheskie osnovy op-tiko-jelektronnyh priborov. L.: Mashinostroenie, 1983.*

Сиренко С.М., Леснічук М.Й.

### **ДО ПИТАННЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ПРИЛАДІВ ЗА «ПОКОЛІННЯМИ»**

Проаналізована відповідність основних характеристик тепловізієних приладів з їх „поколіннями”.

Sirenko S.N., Lesnichuk N.J.

### **ON THE ISSUE OF CLASSIFICATION OF THERMAL IMAGING DEVICES BY "GENERATIONS"**

Analysis of main parameters of thermal imaging devices is given with regard of their "generation".

---