

стической МКС, разработанной United Technologies Corp.

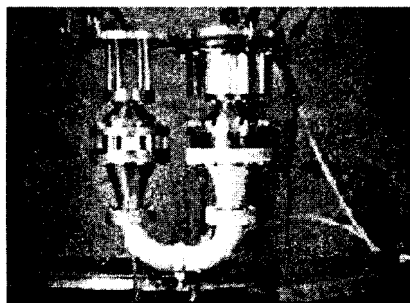


Рис. 5. Макетный образец термоакустической МКС

LANL разрабатывает термоакустическую МКС с компоновкой, допускающей стыковку с наиболее распространенными типами ФПУ, что может позволить в ряде случаев заменять МКС Стирлинга на термоакустические.

Американская фирма MacroSoniX разработала акустические компрессоры с перепадом давления на входе и выходе до 35 атмосфер.

В 2003 г. в НТК "Криогенная техника" предложены принципиально новые системы охлаж-

дения — нанокриогенные. Такое название они получили из-за нанометровых характерных размеров. Эти системы могут быть размещены внутри ФПУ и других электронных приборов, например в коммутаторах, процессорах, усилителях и др. На рис. 6 показан вариант выполнения нанокриогенной системы, работающей по циклу Стирлинга и размещенной внутри микро- или наноэлектронного прибора.

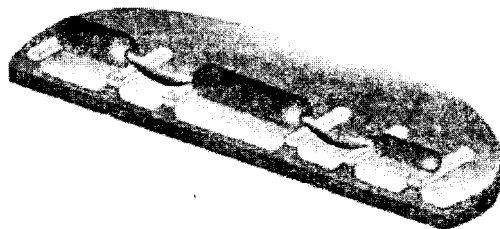


Рис. 6. Нанокриогенная система, работающая по циклу Стирлинга

В заключение следует отметить, что появление новых типов ФПУ может привести к изменению современных тенденций развития микрокриогенных систем.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2004 г.

Latest advances and world trends in the development of microcryogenic systems for cooling photodetecting devices

A. V. Gromov, V. M. Yermakov, V. I. Karagusov, M. V. Lipin, V. I. Lyapin
STC "Cryogenic Technique", Omsk, Russia

Latest advances and world trends in the development of microcryogenic systems for photodetecting devices are presented. Results of the development of PtSi, HgCdTe, InSb, Si<Ga>, SIS-based, 4.5, 15, 25, 80 K microcryogenic systems of 0.2 to 10 W refrigerating capacity for cooling linear and matrix photodetecting devices are described. Promising types of microcryogenic systems are considered. The scope for developing photodetecting devices and cryogenic systems according to common nanotechnologies is shown.

УДК 621.384.32

Оценка предельно достижимой разности температур, эквивалентной шуму, и эффективного значения элементарного поля зрения тепловизионных приборов

В. А. Овсянников, В. Л. Филиппов

ФГУП «Научно-производственное объединение "Государственный институт прикладной оптики"», г. Казань, Россия

Даны численные оценки минимальных значений разности температур, эквивалентной шуму, и соответствующего эффективного значения элементарного поля

зрения для несканирующих тепловизионных приборов, использующих фотонные охлаждаемые или тепловые неохлаждаемые матричные фотоприемники, которые работают в режиме ограничения фоном.

Наименьшее значение разности температур, эквивалентной шуму ΔT_0 , достигается в несканирующих тепловизионных приборах (ТВП) с матричными фотоприемниками (МФП), работающими в режиме ограничения фоном. Вывод и анализ соответствующих соотношений для ΔT_0 в таких ТВП были даны авторами фундаментальной работы [1]. Наша задача — доведение этих результатов "до числа" с учетом практических ограничений на основные конструктивные параметры данных ТВП, влияющие на их температурную чувствительность, а также получение соответствующих оценок для эффективного значения элементарного поля зрения несканирующих ТВП, определяющего их предельную разрешающую способность.

Как известно [1, 2], разность температур, эквивалентная шуму, для несканирующих ТВП определяется следующим выражением:

$$\Delta T_0 = \frac{4\sqrt{1/2t_{ac}}}{a\epsilon^2 D^* \tau (\partial M / \partial T)}; \quad (1)$$

$$\partial M / \partial T = \int_{\Delta\lambda} \frac{\partial M}{\partial T}(\lambda) d\lambda;$$

$$\epsilon = D : f,$$

где t_{ac} — время накопления зарядов, с;

a — размер элемента МФП, см;

D_m^* — удельная обнаружительная способность в максимуме относительной спектральной чувствительности МФП $S(\lambda)$ (для тепловых МФП $S(\lambda)=1$), см·Гц^{1/2}/Вт;

$M(\lambda)$ — спектральная плотность энергетической светимости черного тела при температуре $T = 295$ К, Вт/см²·мкм;

$\Delta\lambda$ — спектральный рабочий диапазон ТВП, мкм;

τ — коэффициент пропускания объектива;

D — диаметр объектива, см;

f — фокусное расстояние объектива, см.

Потенциально достижимое значение D_m^* определяется лишь фотонным шумом (режим ограничения фоном). Для фотонного фотодиодного охлаждаемого МФП с охлаждаемой диафрагмой, согласованной с относительным отверстием объектива ϵ , значение D_m^* равно [1, 2]

$$D_m^* = \frac{\lambda_m \eta_m}{hc(2Q\eta)^{1/2}}; \quad \eta = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \frac{\int Q(\lambda)\eta(\lambda)d\lambda}{\int Q(\lambda)d\lambda};$$

$$Q \frac{\epsilon^2}{4} = \int_0^{\lambda_0} Q(\lambda) d\lambda,$$

где $Q(\lambda)$ — спектральная плотность потока фотонов в полусферу от черного тела с температурой $T = 295$ К единичной площади в единицу времени, фотон/см²·с·мкм;

$\eta(\lambda)$ — спектральная квантовая эффективность МФП;

λ_0 — длинноволновая граница спектральной чувствительности МФП, мкм;

λ_m — длина волны, для которой $\eta(\lambda) = \eta_m = \max$;

$h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Вт·с² — постоянная Планка;

$c = 3 \cdot 10^{14}$ мкм/с — скорость света.

Учитывая, что между $Q(\lambda)$ и $M(\lambda)$ имеет место соотношение [2]

$$Q(\lambda) = \frac{\lambda M(\lambda)}{hc},$$

а относительная спектральная чувствительность МФП $S(\lambda)$ связана с $\eta(\lambda)$ зависимостью [2]

$$S(\lambda) = \frac{\lambda \eta(\lambda)}{\lambda_m \eta_m},$$

получаем для D_m^* более удобную расчетную формулу

$$D_m^* = \frac{\sqrt{2\lambda_m \eta_m}}{\epsilon \sqrt{hcM}}; \quad M = \int_{\Delta\lambda} M(\lambda) S(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

Для тепловых МФП, работающих в том же режиме, выражение для D_m^* имеет вид [1, 2]

$$D_m^* = \frac{\sqrt{\alpha}}{\sqrt{16k\sigma T^5}}, \quad (3)$$

где α — коэффициент поглощения излучения;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12}$ Вт/см²·К⁴ — постоянная Стефана-Больцмана.

Для относительного отверстия ϵ дифракционно-ограниченного объектива ТВП существует следующее считающееся оптимальным соотношение [3]

$$\epsilon = 10^{-4} \lambda / a, \quad (4)$$

где λ — эффективная длина волны в диапазоне $\Delta\lambda$, мкм.

При этом значения предельной частоты функции передачи модуляции (ФПМ) объектива ($10^4 D/\lambda$) и элемента МФП (f/a) совпадают и, как показывают эксперименты, обеспечивается наилучшая дешифрируемость тепловизионного изображения, сохраняющего, с одной стороны, еще достаточную резкость, не ограничиваемую пятном рассеяния объектива, а с другой — еще допустимую степень видности "артефактов", т. е. дискретной структуры изображения, обусловленной влиянием выборки. Отсюда вытекает, что оптимальное соотношение диаметров дифракционного кружка рассеяния объектива δ_0 и элементарного поля зрения $\delta_0 = a/f$ составляет

$$\alpha = \delta_0 / \delta_0 = 2,44. \quad (5)$$

Тогда, подставляя (2)—(4) в (1), получаем выражение для потенциально достижимых значений ΔT_0

$$\Delta T_0 = \begin{cases} \frac{4 \cdot 10^4 \sqrt{1/2t_{ac}} \sqrt{hcM}}{\lambda \sqrt{2\lambda_m \eta_m \tau} (\partial M / \partial T)} & \text{— фотонный МФП} \\ \frac{4 \cdot 10^8 a \sqrt{1/2t_{ac}} \sqrt{16k\sigma T^5}}{\lambda^2 \sqrt{\alpha} (\partial M / \partial T)} & \text{— тепловой МФП.} \end{cases} \quad (6)$$

Подставляя в (6) практически предельно достижимые значения $\eta_m = 0,9$; $\tau = 0,9$; $a = 0,002$ см и $\alpha = 1$, для типового времени накопления $t_{ac} = 0,04$ с (отвечает частоте кадров 25 Гц) и характерных зависимостей относительной спектральной чувствительности $S(\lambda)$ МФП на InSb ($\Delta\lambda = 3\text{--}5$ мкм, $\lambda = 5$ мкм) и КРТ ($8\text{--}14$ мкм, $\lambda = 10$ мкм) находим значения ΔT_0 (таблица).

Предельные значения ΔT_0 и δ для несканирующих ТВП

$\Delta\lambda$, мкм	ΔT_0 , К		δ , мрад	
	Фотонный МФП	Тепловой МФП	$\chi = 1$	$\chi = 2$
3—5	0,006	0,3	0,03	0,025
8—14	0,001	0,006	0,06	0,05

Разрешающая способность ТВП определяется эффективным значением δ его элементарного поля зрения — элементарным полем зрения "нормального" ТВП, имеющего ширину функции передачи модуляции, равную таковой для данного ТВП. При этом под "нормальным" понимается ТВП, результирующая ФПМ которого, аппроксимируемая формулой

$$K_{\Sigma}(\nu) = \exp(-2\pi^2 \sigma_{\Sigma}^2 \nu^2),$$

где ν — угловая частота, рад⁻¹;

σ_{Σ} — параметр аппроксимации, рад, в равной степени определяется ФПМ всех четырех его узлов — объектива, фотоприемника, усилителя, индикатора — с соответствующим парам-

етром σ аппроксимирующей гауссовской функции, причем $\sigma_{\Sigma} = \sqrt{4\sigma^2} = 0,55\delta_0$ (δ_0 — элементарное поле зрения ТВП).

Учитывая, что в реальных несканирующих ТВП дополнительно имеет место выборка с ФПМ [4]

$$K_B(\nu) = \cos(\pi\nu\delta_0 / \chi); \quad \chi = a / \Delta a,$$

где Δa — шаг элементов МФП, см, также аппроксимируемой гауссовской зависимостью $K_B(\nu) \approx \exp(-2\pi^2 \sigma_B^2 \nu^2)$ при $\sigma_B = 0,55\delta_0 / \chi$, а соотношение углового диаметра кружка рассеяния объектива δ_{ob} и значения δ_0 для "нормального" ТВП имеют вид $\delta_0 = 0,9\delta_{ob}$, эффективное значение элементарного поля зрения δ для несканирующего ТВП с угловым диаметром дифракционного кружка рассеяния объектива $\delta_d = 2,44 \cdot 10^{-4} \lambda / D$ будет составлять

$$\delta = \frac{\delta_0 \sqrt{3\sigma^2 + (0,9\delta_d / \delta_0)^2 + (0,55\delta_0 / \chi)^2}}{\sqrt{4\sigma^2}},$$

что с учетом (5) дает

$$\delta = \delta_0 \sqrt{1,95 + 1/\chi^2} = 0,418\delta_d \sqrt{1,95 + 1/\chi^2}. \quad (7)$$

При отсутствии зазоров между элементами МФП значение $\chi = 1$, и по формуле (7) получаем

$$\delta = 0,7\delta_d = 1,72 \cdot 10^{-4} \lambda / D.$$

В случае реализации в ТВП микросканирования (переналожения смежных подкадров со смещением в каждом из них МФП на полпериода его структуры в том или другом направлении, а также в обоих этих направлениях [5]) значение $\chi = 2$, и тогда

$$\delta = 0,6\delta_d = 1,48 \cdot 10^{-4} \lambda / D.$$

Принимая во внимание, что практически максимальное значение диаметра объектива ТВП составляет $D = 30$ см, то для таких значений λ находим соответствующие предельные значения δ (см. таблицу).

Можно полагать, что полученные результаты будут полезны при сравнении значений основных технических параметров конкретных ТВП с потенциально достижимыми значениями.

Литература

1. Таубкин И. И., Трищенко М. А. // Оптический журнал, 1996. № 6. С. 18.
2. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. — Л.: Машиностроение, 1983.

3. Fiete R. D. // Optical Engineering, 1999. V. 38. № 7. P. 1229.

4. Удод В. А. // Автометрия. 2002. № 4. С. 66.

5. Тришенков М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. — М.: Радио и связь, 1992.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2004 г.

The estimated value of minimum noise equivalent temperature difference and the effective value of the instantaneous field of view of the thermal imaging devices

V. A. Ovsyannikov, V. L. Philippov
State Institute of Applied Optics, Kazan, Russia

The lower-range value of the noise equivalent temperature difference ΔT_0 , and the specified effective value of the instantaneous field of view are given for the non-scanning thermal imaging devices, which use the photon cooled or thermal uncooled focal plane arrays, acting in the background limited mo.

УДК 621.383

Перспективная система обработки сигналов многоэлементного фотоприемного устройства ИК-диапазона на основе сигнальных контроллеров серии "Мультикор"

В. Н. Соляков, А. С. Медведев, С. И. Жегалов, М. П. Хомутова
ФГУП «Научно-производственное объединение "Орион"» — государственный научный центр Российской Федерации, Москва, Россия

Ю. Н. Александров, Я. Я. Петричкович, Т. В. Солохина, А. В. Глушков, А. А. Крымов
ГУП «НПЦ "ЭЛВИС"», Москва (Зеленоград), Россия

Рассмотрена система обработки сигналов многоэлементных фотоприемных устройств (МФПУ) ИК-диапазона — многорядных линеек и матричных устройств, которая представляет собой канал МФПУ—АЦП—ввод—цифровая обработка—ЦАП ТВ, со скоростью обработки (в пересчете на входной поток) до 128 МВ/с. Средством обработки является цифровой сигнальный микроконтроллер "Мультикор", разработанный в ГУП «НПЦ "ЭЛВИС"», г. Зеленоград.

Назначение и основные характеристики системы

Система предназначена для ввода, обработки и отображения сигналов и предусматривает работу как с многорядными фотоприемными устройствами (линейками), так и с матричными, "смотрящими" приемниками. Все процедуры реализуются программно, в реальном масштабе времени.

Два контроллера МС-24 обеспечивают обработку с производительностью (в пересчете на входной поток) до 128 МВ/с. Такой поток соответствует фотоприемному устройству — линейке 4×288: при размере видеокadra 576×768 и представлении отсчетов (пикселей) 14 разрядами.

Суммарный пиковый вычислительный ресурс системы с рациональным распределением задач по процессорам (RISC-ядрам) и сопроцессорам-акселераторам (DSP-ядрам) обоих устройств