

# Физическая аппаратура

УДК 621.384.3

## Мультиспектральный тепловизор с фильтрующим устройством на основе наклонного интерферометра Фабри—Перо

И. Д. Бурлаков, А. И. Дирочка, А. С. Кононов, В. П. Пономаренко,  
А. Н. Свиридов, А. М. Филачев

*Предложен мультиспектральный тепловизор с фильтрующим устройством на основе наклонного интерферометра. Проведены расчеты возможных параметров мультиспектрального тепловизора. Ожидается, что подобные устройства могут быть пригодны для получения пространственной и спектральной информации о быстро протекающих явлениях, например взрывных.*

PACS: 42.79.Ls

*Ключевые слова:* мультиспектральный тепловизор, интерферометр, параметры, быстрые явления.

### Введение

Число работ, посвященных различным принципам эффективной спектральной фильтрации изображений, методам получения спектральных изображений объектов и различным типам многоспектральных оптико-электронных систем (МОЭС), регистрирующих, преобразующих и отображающих оптическую информацию в виде изображений объектов в любых требуемых узких спектральных полосах  $\Delta\lambda$ , принадлежащих относительно широкому рабочему спектральному диапазону системы  $\lambda_n - \lambda_1$  (где  $\lambda_n$  и  $\lambda_1$ , соответственно, длинно- и коротковолновая границы рабочего спектрального диапазона отображающего спектрометра (ОС), исчисляется уже трехзначными цифрами.

Подобные устройства принято называть отображающими спектрометрами [1, 2], а получаемые с их помощью изображения в узких спектральных полосах — спектральными изображениями (СИ). Соответственно ОС, работающие в спектральных диапазонах 3—5 и 8—14 мкм, будем называть мультиспектральными тепловизорами (МСТ).

Условно ОС (в которых в большинстве случаев используются приемные модули, содержащие матричные приемники излучения — МПИ) можно разделить на три группы: мультиспектральные (multi-spectral), гиперспектральные (hyper-spectral) и ультраспектральные (ultra-spectral).

Мультиспектральные приборы позволяют получать изображения в нескольких спектральных полосах  $N = (\lambda_n - \lambda_1) / \Delta\lambda_m < 10$  (где  $N$  — число разрешаемых спектральных полос в рабочем диапазоне прибора,  $\Delta\lambda_m$  — полуширина узкой спектральной полосы, разрешаемой прибором при приеме излучения с длиной волны  $\lambda_m$ ,  $\lambda_m = \lambda_1 + (\lambda_n - \lambda_1) / 2$ ) и имеют, как правило, низкое спектральное разрешение. Гиперспектральные приборы обеспечивают возможность получения изображений с  $N = 10—1000$ , а к ультраспектральным можно отнести приборы, позволяющие получать изображения с  $N > 1000$ .

Для записи и воспроизведения СИ в различных спектральных полосах требуется формирование трех массивов данных: массивов по каждой из двух пространственных координат и массива спектральной информации о каждой точке изображения, определенной во многих узких спектральных полосах, принадлежащих исследуемому достаточно широкому спектральному диапазону. Такая трехмерная природа накопления данных привела к терминам “Куб данных (КД)” или “Объектный куб”. Чем больший объем имеет КД и чем с большей скоростью он создается и с большей скоростью воспроизводятся его пространственные и спектральные выборки, тем эффективнее работает ОС.

Бурлаков Игорь Дмитриевич, начальник НИЦ.  
Дирочка Александр Иванович, ученый секретарь.  
Кононов Андрей Сергеевич, главный метролог.  
Пономаренко Владимир Павлович, зам. генерального директора.  
Свиридов Анатолий Николаевич, начальник НИЦ.  
Филачев Анатолий Михайлович, генеральный директор  
ФГУП «НПО "Орион"».

Россия, 111402, Москва, ул. Косинская, 9.  
Тел. (495) 374-94-00. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2008 г.

Возможности быстрого получения КД определяются как конструктивными особенностями ОС (Hard ОС), так и методами обработки информации (Soft ОС).

### Классификация методов спектральной фильтрации, методов получения спектральных изображений и отображающих спектрометров

Современные ОС можно классифицировать по методам, с помощью которых они получают пространственную и спектральную информацию [2].

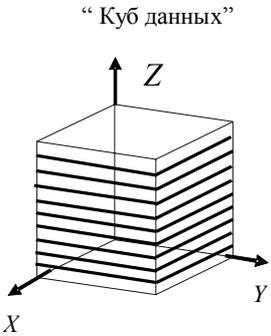
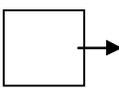
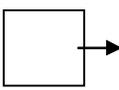
В таблице представлены основные принципы спектральной фильтрации изображений объектов и методы их получения.

ными интерферометрами [6, 7] фильтруемая длина волны, как и в дисперсионных ОС, определяется углом между оптической осью устройства и фильтруемым полихроматическим лучом. (Для полноты картины классов также включены практически уже неиспользуемые в настоящее время ОС с двухмерным сканированием).

### Использование “наклонных” интерферометров Фабри—Перо для эффективной фильтрации изображений и построения гиперспектральных отображающих спектрометров

Интерферометры Фабри—Перо используются в ОС для фильтрации изображений в ИК-области

Принципы спектральной фильтрации изображений объектов и методы их получения

		 <p>“Куб данных”</p>	Методы получения пространственной информации						
			двухмерное сканирование	одномерное сканирование	сканирование окном	система смотрящего типа (Staring) Framing			
			Whiskbroom	Pushbroom	Windowing				
Методы получения спектральной информации	<b>1</b>	<b>Фильтрующие изображения:</b> линейка фильтров; клиновидный фильтр; перестраиваемый фильтр на основе ПВО или интерферометра Фабри—Перо; перестраиваемый АО-фильтр; жидкокристаллический перестраиваемый фильтр							
	<b>1a</b>								
	<b>1б</b>								
	<b>2</b>						<b>Дисперсионные, дифракционные:</b> решетка или (и) призма; многоспектральные фильтры на основе ПВО и наклонных интерферометров Фабри—Перо; голограммные диспергирующие элементы. (голограммный томограф)		
	<b>2a</b>								
	<b>3</b>	<b>Интерферометрические:</b> статический (СПФ) (Саньяка); статический (СПФ) (Маха-Цандера), с полярископом Savart'a; традиционные СПФ (Майкельсона)							
	<b>3a</b>								

Хотя ОС с использованием полного внутренне-го отражения (ПВО), ОС с использованием много-лучевой интерферометрии на основе мультиплек-сов Фабри—Перо и ОС с дисперсионной линзой являются фильтрующими устройствами, их поместили также и в класс дисперсионных, учиты-вая, что в предложенных ОС на основе ПВО [3, 4], ОС с дисперсионной линзой [5] и ОС с наклон-

спектра [6—8]. Для фильтрации используют ин-терферометры с расстояниями между отражаю-щими поверхностями зеркал порядка длины волны фильтруемого излучения.

Число интерферометров, материал их зеркал (пластин), а также наличие или отсутствие метал-лических или интерференционных отражающих покрытий на поверхностях пластин определяются

требуемым относительным спектральным разрешением  $R = \lambda_m/\Delta\lambda_m$  и относительной шириной  $(\lambda_n - \lambda_1)/\lambda_m$  спектрального диапазона перестройки ОС.

Для ОС с широким диапазоном перестройки целесообразно (вследствие спектральной селективности интерференционных отражающих покрытий) использовать интерферометры с зеркалами без всяких покрытий. Однако подобные интерферометры имеют существенно меньшую добротность, поэтому для достижения требуемого разрешения необходимо применять мультиплекс — два или более интерферометров, расположенных последовательно по ходу фильтруемых лучей, толщины которых  $d_1, d_2, d_n$  находятся в простых кратных отношениях. В этом случае максимальная длина волны пропускания мультиплекса определяется толщиной первого интерферометра, который работает как фильтр первого порядка и имеет наименьшее расстояние между зеркалами [6].

Основная трудность при построении мультиплекса обусловлена необходимостью устранения или уменьшения влияния взаимной интерференции между эталонами. Другая трудность связана с тем, что при каждой настройке мультиплекса на фильтрацию заданной длины волны необходимо добиваться кратного отношения оптических толщин всех интерферометров.

Для ОС с узким спектральным диапазоном перестройки целесообразно использовать интерферометры с отражающими интерференционными или частично прозрачными золотыми покрытиями. В этом случае благодаря высокому коэффициенту отражения зеркал для получения требуемого разрешения, как правило, достаточно одного интерферометра.

В предлагаемом МСТ фильтрация осуществляется вследствие многолучевой интерференции лучей в "наклонном интерферометре", установленном под углом  $\theta$  к оси оптической системы. Оптическая схема МСТ с интерферометром, установленным под углом  $\theta$  к оптической оси МСТ, приведена на рис. 1.

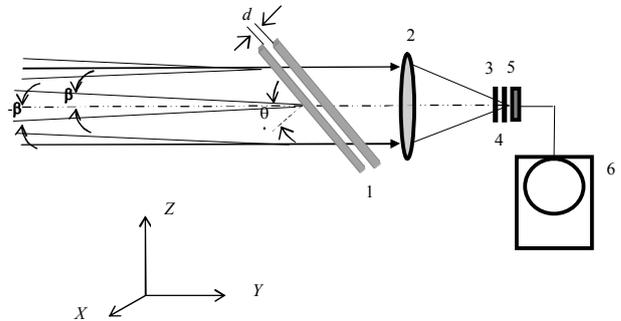
Интерферометр изготовлен с возможностью юстировки по углу  $\phi$  путем прецизионных поворотов вокруг оси, параллельной оси  $X$ .

На обращенных одна к другой поверхностях пластин интерферометра нанесено отражающее покрытие, обладающее в спектральном диапазоне работы спектрометра коэффициентом отражения  $r$  и коэффициентом пропускания  $\tau$ .

В результате наклона интерферометра к фильтруемому излучению:

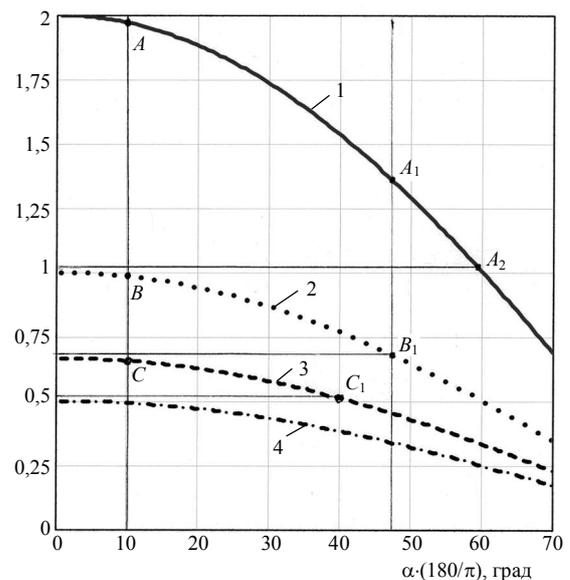
увеличивается путь, проходимый лучами между двумя последовательными отражениями и, следовательно, повышается добротность интерферометра;

происходит (в результате смещения полос пропускания в коротковолновую область спектра) увеличение спектрального интервала между соседними полосами пропускания интерферометров и появляется возможность увеличения расстояния между зеркалами.



**Рис. 1. Оптическая схема МСТ с использованием многолучевой интерференции в "наклонном интерферометре":** 1 — интерферометр; 2 — объектив тепловизора; 3 — входное окно матричного фотоприемного устройства; 4 — охлаждаемый полосовой фильтр, отсекающий излучение с длинами волн, находящимися за пределами рабочего спектрального диапазона фильтрующего устройства; 5 — матричный приемник излучения; 6 — монитор тепловизора

Наклонный интерферометр в зависимости от величины  $\nu = (2 \cdot d/\lambda) \cdot \cos \theta$  может работать в различных порядках интерференции. При первом порядке интерференции  $\nu = 1$ , при втором  $\nu = 2$ , при третьем  $\nu = 3$  и т. д. Настройка интерферометра на фильтрацию той или иной волны определяется зависимостями  $Z = \lambda/d$  от  $\alpha$ -угла падения излучения на пластины интерферометра, рассчитанными для разных порядков интерференции. Подобные зависимости представлены на рис. 2.



**Рис. 2. Зависимости:** 1 —  $Z_1(\alpha)$ ; 2 —  $Z_2(\alpha)$ ; 3 —  $Z_3(\alpha)$ ; 4 —  $Z_4(\alpha)$ , рассчитанные, соответственно, для первого, второго, третьего и четвертого порядков интерференции

Разности ординат пар точек  $A$  и  $A_2$ ,  $B$  и  $B_1$ ,  $C$  и  $C_1$  равны максимальным относительным спектральным диапазонам перестройки спектрометра при работе, соответственно, в первом, втором, третьем порядке интерференции, а разности абсцисс этих пар точек определяют максимальные вертикальные углы поля зрения спектрометра.

Эти зависимости поясняют выбор оптимальных основных конструктивных величин отображающих спектрометров:  $d$ ,  $\theta$ ,  $F$  (где  $F$  — фокусное расстояние объектива тепловизора), рассчитанных по выражениям (1)—(9), приведенных ниже, из которых следует, что по мере увеличения порядка интерференции уменьшается относительный рабочий спектральный диапазон и увеличивается (вследствие увеличения  $d$ ) относительное спектральное разрешение ОС.

Для достижения максимальных значений  $N$  следует выбирать величины  $d$ ,  $\theta$ ,  $F$  в соответствии со следующими соотношениями:

- при работе интерферометра в первом порядке интерференции

$$d = 0,96 \cdot \lambda_1, \quad \lambda_n = 1,9 \cdot \lambda_1; \quad (1)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \left( a \cos \left( \frac{1}{2} \frac{\lambda_1}{d} \right) + a \cos \left( \frac{1}{2} \frac{\lambda_n}{d} \right) \right); \quad (2)$$

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{a}{\tan \left( \frac{1}{2} a \cos \left( \frac{1}{2} \frac{\lambda_1}{d} \right) - \frac{1}{2} a \cos \left( \frac{1}{2} \frac{\lambda_n}{d} \right) \right)}; \quad (3)$$

- при работе интерферометра во втором порядке интерференции

$$d = 1,43 \cdot \lambda_1; \quad \lambda_n = 1,414 \cdot \lambda_1; \quad (4)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \left( a \cos \left( \frac{\lambda_1}{d} \right) + a \cos \left( \frac{\lambda_n}{d} \right) \right); \quad (5)$$

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{a}{\tan \left( \frac{1}{2} a \cos \left( \frac{\lambda_1}{d} \right) - \frac{1}{2} a \cos \left( \frac{\lambda_n}{d} \right) \right)}; \quad (6)$$

- при работе интерферометра в третьем порядке интерференции

$$d = 1,95 \cdot \lambda_1; \quad \lambda_n = 1,3 \cdot \lambda_1; \quad (7)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \left( a \cos \left( \frac{3}{2} \frac{\lambda_1}{d} \right) + a \cos \left( \frac{3}{2} \frac{\lambda_n}{d} \right) \right); \quad (8)$$

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{a}{\tan \left[ \frac{1}{2} \left( a \cos \left( \frac{3}{2} \frac{\lambda_1}{d} \right) - a \cos \left( \frac{3}{2} \frac{\lambda_n}{d} \right) \right) \right]}; \quad (9)$$

Наибольший диапазон спектральный перестройки  $(\lambda_n - \lambda_1)/\lambda_m = 0,622$  достигается при работе в первом порядке интерференции (зависимость  $Z_1(\alpha)$ ) при изменении угла падения излучения от 59 до 9 град, однако, как это следует из выражений (1), (4), (7), уменьшение порядка интерференции связано с уменьшением расстояния между пластинами интерферометра, что в свою очередь приводит к уменьшению его добротности и разрешающей способности.

По заданным значениям  $\lambda_1$  и  $a$  (где  $a$  — высота матричного приемника излучения) можно рассчитать по выражениям (1)—(9) основные конструктивные параметры отображающего спектрометра и установить оптимальные величины  $d$  и  $\theta$ , обеспечивающие предельно достижимые значения относительного рабочего спектрального диапазона и относительного спектрального разрешения ОС.

Для рассматриваемого примера реализации ОС в качестве материала для пластин интерферометра выбран фтористый барий. На обращенных одна к другой и параллельных между собой гранях пластин нанесено отражающее покрытие. Пластины имеют следующие размеры: длина  $L = 3,5$  см, ширина  $b = 2,5$  см, толщина  $t = 0,6$  см. Интерферометр установлен под углом  $\theta$  к оптической оси ОС.

Фокусное расстояние объектива тепловизора выбирается так, чтобы лучи регистрируемого фильтруемого излучения, распространяющиеся под максимальными углами  $\beta$  к оптической оси устройства, фокусировались на крайние строки матричного приемника тепловизора. Например, при работе во втором порядке интерференции при размере матрицы  $2 \times 2$  см для этого требуется объектив с фокусным расстоянием  $F = 3$  см, который при апертурном отверстии объектива  $\varnothing = 2,1$  см (т. е. при относительном отверстии 0,7) обеспечивает в плоскости матричного приемника диаметр сфокусированной моды  $D_o = 32$  мкм (при  $\lambda \approx 10$  мкм).

Ниже приведены результаты расчетов оптимальных конструктивных и выходных параметров ОС, работающих в первом, втором или третьем порядке интерференции.

- Спектрометр, работающий в первом порядке интерференции.

При  $\lambda_1 = 8$  мкм;  $a = 2$  см имеет:

$\lambda_n = 15,23$  мкм;  $d = 7,7$  мкм;  $\theta = 33,39^\circ$ ;  
 $F = 2,1$  см;  $\lambda_m = 11,615$  мкм;  $(\lambda_n - \lambda_1)/\lambda_m = 0,622$ ;  
 $\lambda_m/\Delta\lambda_m = 130,3$ ;  $K = (\lambda_n - \lambda_1)/\Delta\lambda_m = 81$ .

При этом  $\Phi$  — плоский угол поля зрения ОС будет равен

$$\Phi = a \cos \left( \frac{1}{2} \frac{\lambda_1}{d_1} \right) - a \cos \left( \frac{1}{2} \frac{\lambda_n}{d_1} \right) = 50,552^\circ.$$

• *Спектрометр, работающий во втором порядке интерференции.*

При  $\lambda_1 = 8$  мкм;  $a = 2$  см имеет:

$\lambda_n = 11,315$  мкм;  $d = 11,429$  мкм;  $\theta = 26,837^\circ$ ;  
 $F = 3$  см;  $\lambda_m = 9,657$  мкм;  $(\lambda_n - \lambda_1) / \lambda_m = 0,343$ ;  
 $\lambda_m / \Delta\lambda_m = 193,6$ ;  $K = (\lambda_n - \lambda_1) / \Delta\lambda_m = 55$ .

При этом  $\Phi$  — плоский угол поля зрения ОС будет равен

$$\Phi = a \cos\left(\frac{\lambda_1}{d_2}\right) + a \cos\left(\frac{\lambda_n}{d_2}\right) = 37,476^\circ.$$

• *Спектрометр, работающий в третьем порядке интерференции.*

При  $\lambda_1 = 8$  мкм;  $a = 2$  см имеет:

$\lambda_n = 10,381$  мкм;  $d = 15,564$  мкм;  $\theta = 21,59^\circ$ ;  
 $F = 3,1$  см;  $\lambda_m = 9,19$  мкм;  $(\lambda_n - \lambda_1) / \lambda_m = 0,298$ ;  
 $\lambda_m / \Delta\lambda_m = 209,1$ ;  $K = (\lambda_n - \lambda_1) / \Delta\lambda_m = 54$ .

При этом  $\Phi$  — плоский угол поля зрения ОС будет равен

$$\Phi = a \cos\left(\frac{3 \lambda_1}{2 d_3}\right) - a \cos\left(\frac{3 \lambda_n}{2 d_3}\right) = 36,252^\circ.$$

Итак, при увеличении порядка интерференции (путем увеличения расстояния между зеркалами интерферометра) увеличивается относительная спектральная разрешающая способность ОС, однако при этом уменьшаются относительный спектральный диапазон работы ОС и плоский угол поля зрения ОС.

Используя выражения (1)–(9), можно обеспечить возможность выбора оптимального сочетания относительного рабочего спектрального диапазона и относительного спектрального разрешения ОС.

Приведем основные соотношения, описывающие аппаратную функцию ОС. Можно показать, что  $T(\alpha, \lambda, d, r(\lambda), \tau(\lambda), n(\lambda), \xi(\lambda))$  — пропускание подобного интерферометра следующим образом зависит от  $\alpha$ -угла падения фильтруемого луча на зеркала интерферометра, длины волны  $\lambda$ , расстояния между внутренними гранями пластин интерферометра  $d$ , коэффициента отражения одного зеркала интерферометра  $r(\lambda)$ , коэффициента пропускания одного зеркала интерферометра  $\tau(\lambda)$ , коэффициента преломления среды между зеркалами интерферометра  $n(\lambda)$ , коэффициента поглощения материала пластин интерферометра  $\xi(\lambda)$ .

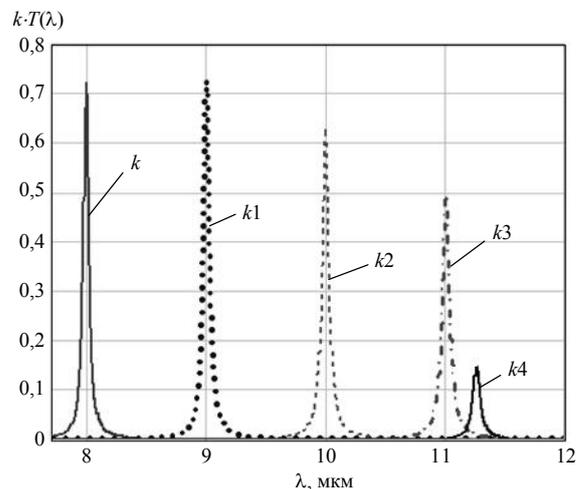
$$T(\alpha, \lambda, d, r(\lambda), \tau(\lambda), n(\lambda), \xi(\lambda)) = \tau(\lambda)^2 \times \frac{\exp\left(-2 \cdot \xi(\lambda) \cdot \frac{t}{\cos(\alpha)}\right)}{\left(1 - r(\lambda)\right)^2 + 4r(\lambda) \sin\left(2\pi \frac{d}{\lambda} \cos(\alpha) n(\lambda)\right)^2}, \quad (10)$$

где  $r(\lambda) = 1 - (\mu(\lambda) + \tau(\lambda))$ ;

$\mu(\lambda)$  — поглощение в отражающем покрытии зеркала интерферометра;

$t$  — толщина пластины интерферометра.

На рис. 3 представлены контуры пропускания (для рассматриваемого примера реализации интерферометра ОС) в случае работы во втором порядке интерференции.



**Рис. 3.** Контуры пропускания для рассматриваемого примера реализации интерферометра ОС, рассчитанные при  $\theta = 26,837^\circ$ ;  $\mu = 0,005$ ;  $\tau = 0,045$ ;  $r = 0,9$ ;  $t = 0,6$  см и при расстоянии между пластинами интерферометра  $d = 11,429$  мкм для лучей, распространяющихся в плоскости падения под различными углами  $\beta = |\alpha - \theta|$  к оптической оси ОС:

$k \cdot T(\lambda)$  при  $\beta = 18,74^\circ$  ( $\alpha = 45,6^\circ$ );  $k1 \cdot T1(\lambda)$   
 при  $\beta = 11,242^\circ$  ( $\alpha = 38,079^\circ$ );  $k2 \cdot T2(\lambda)$  при  $\beta = 2,203^\circ$   
 ( $\alpha = 29,04^\circ$ );  $k3 \cdot T3(\lambda)$  при  $\beta = -11,18^\circ$  ( $\alpha = 15,819^\circ$ );  
 $k4 \cdot T4(\lambda)$  при  $\beta = -18,74^\circ$  ( $\alpha = 8,1^\circ$ )

Видно, что по мере изменения угла  $\beta$ , под которым распространяются в плоскости падения фильтруемые лучи, плавно изменяется длина фильтруемой волны от  $\lambda_{\min} = 8$  мкм (при  $\beta = 18,74^\circ$ ) до  $\lambda_{\max} = 11,25$  мкм (при  $\beta = -18,74^\circ$ ) и уменьшается (вследствие увеличения поглощения излучения в пластинах интерферометра) пропускание интерферометра. По этим зависимостям можно определить  $\Delta\lambda_m$  — полуширину контура пропускания интерферометра. Так, для излучения с длиной волны около 10 мкм  $\Delta\lambda_m = 0,06$  мкм.

Отображающий спектрометр работает следующим образом (см. рис. 1). Полихроматическое излучение от исследуемого объекта (сцены), поступающее на вход оптического устройства, распространяется вдоль оптической оси в пределах угла поля зрения  $2 \cdot \beta$  и проходит через интерферометр 1. При этом излучение испытывают многократные отражения внутри интерферометра (явление многолучевой интерференции), в результате чего из спектральных составляющих излучения после прохождения интерферометра будут выде-

лены узкие спектральные линии с длинами волн, определяемыми расстоянием между зеркалами интерферометра  $d$  и  $\alpha$ -углами падения лучей на зеркала интерферометра. Далее излучение проходит через объектив 2, входное окно матричного приемника излучения 3, полосовой оптический фильтр 4, пропускающий излучение только с длинами волн, соответствующими выбранному рабочему спектральному диапазону, и попадает на матричный приемник излучения 5, расположенный в фокальной плоскости объектива 2. Фокусное расстояние объектива  $F$  рассчитано так, чтобы лучи регистрируемого фильтруемого излучения, распространяющиеся под максимальными углами  $\beta$  к оптической оси устройства, фокусировались на крайние строки матричного приемника излучения, соединенного с монитором, воспроизводящим спектральные изображения. Например, при размере матрицы  $2 \times 2$  см и работе во втором порядке интерференции для этого требуется объектив с фокусным расстоянием  $F = 3$  см, который при диаметре объектива 2,1 см (т. е. при относительном отверстии 0,7) обеспечивает в плоскости матричного приемника диаметр сфокусированной моды  $D_0 = 32$  мкм (при  $\lambda = 10$  мкм).

Таким образом, из полихроматического луча, излучаемого участком сцены, оптически сопряженным с одним из пикселей матричного приемника, принадлежащем строке с номером  $i$ , будет выделено (отфильтровано) и сфокусировано на этот пиксел матрицы излучение с длиной волны  $\lambda_i$ , соответствующей угловой координате этой строки  $\beta_i$ .

В рассматриваемом примере реализации при работе во втором порядке интерференции  $\beta_{\min} = -18,74^\circ \leq \beta_i \leq \beta_{\max} 18,74^\circ$ .  $\beta_i$  — угол наклона плоскости (в которой распространяется луч) к оптической оси ОС. При этом угол поля зрения тепловизора в плоскости ZY будет равен  $|\beta_{\min}| + |\beta_{\max}| = 37,48^\circ$ .

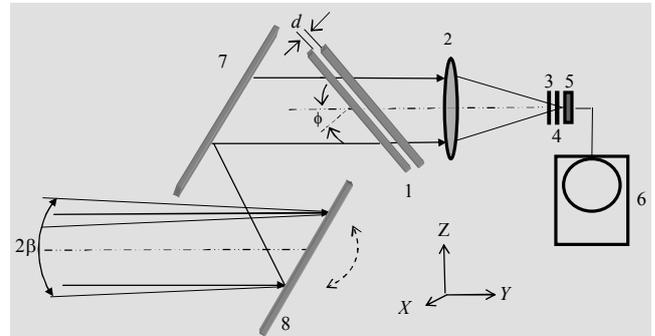
Очевидно, что в результате такой оптической фильтрации на матрице формируется “разноцветное” изображение наблюдаемого объекта, где на каждую строку поступает излучение от оптически сопряженных с ней точек объекта на длине волны, соответствующей порядковому номеру (угловой координате  $\beta_i$ ) этой строки.

Максимальное число мод  $M$  (предельное число точек изображения), которое пропускает рассматриваемое фильтрующее устройство, рассчитанное по нижеприведенному выражению, равно  $1150 \times 1150$ . (Расчет проводился для  $\lambda = 10$  мкм).

$$M = \frac{\pi}{4} \Phi^2 \frac{a^2}{\lambda^2}. \quad (2)$$

Полный “Куб данных” о наблюдаемом подвижном объекте может быть получен при движении объекта вдоль оси Z в пределах полного угла поля зрения МСТ.

Полный “Куб данных” о наблюдаемом неподвижном объекте может быть получен при использовании ОС, конструкция которого показана на рис. 4.



**Рис. 4. Оптическая схема МСТ с использованием многолучевой интерференции в “наклонном интерферометре”, позволяющая получать спектральные изображения неподвижных объектов:**

1 — интерферометр; 2 — объектив тепловизора, 3 — входное окно матричного фотоприемного устройства; 4 — охлаждаемый полосовой фильтр, отсекающий излучение с длинами волн, находящимися за пределами рабочего спектрального диапазона фильтрующего устройства; 5 — матричный приемник излучения; 6 — монитор тепловизора; 7 — зеркало; 8 — вращающееся зеркало

Для получения полного “Куба данных” о неподвижных объектах необходимо провести (с помощью прецизионного вращения зеркала 8, см. рис. 4) сканирование изображения объекта по матрице так, чтобы это изображение перемещалось в направлении, перпендикулярном строкам матрицы. При этом из излучения, исходящего от каждого фрагмента наблюдаемого объекта, отфильтровывается излучение с длиной волны, соответствующей номеру той строки, на один из чувствительных элементов которой в данный момент фокусируется это излучение. Сканирование можно производить дискретными шагами или непрерывно. При шаговом сканировании за каждый шаг изображение каждой точки объекта перемещается на соседнюю строку. За время между двумя последовательными шагами производятся регистрация и запись в памяти компьютера сигналов от всех элементов матрицы — запись кадра. В случае непрерывного сканирования запись кадра проводится за время перемещения изображения каждой точки изображения на чувствительный элемент соседней строки.

Таким образом, для записи “многоспектрального” изображения объекта требуется записать число кадров, равное удвоенному числу строк матрицы. Далее из полученного трехмерного (две простран-

ственные и спектральная координаты) массива информации на монитор можно выводить моноспектральное изображение — изображение объекта в выбранном узком спектральном диапазоне.

На рис. 5 приведены зависимости отношения сигнал/шум (СШ), рассматриваемого варианта МСТ от температуры наблюдаемого объекта, рассчитанные при следующих исходных данных:

источник излучения (объект наблюдения) — нагретые тела со средней температурой  $T_{mid}$  и средними коэффициентами излучения 0,9 или 0,2;

рабочий спектральный диапазон 8,5—11,5 мкм;

приемник излучения — матричный КРТ-приемник, охлаждаемый до 80 К с детектирующей способностью  $4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{0,5} \cdot \text{Гц}^{0,5} \cdot \text{Вт}^{-1}$ , с размером пиксела  $35 \times 35 \text{ мкм}$ ,  $\Delta f = 25 \text{ кГц}$  ( $\Delta f$  — полоса усилителя промежуточной частоты). Эффективное пропускание фильтрующего устройства и остальной оптики МСТ в максимуме полосы пропускания для  $\lambda = 10 \text{ мкм}$   $\tau_{cf} \approx \tau_{int} \tau_{cf} \tau_{opt} \approx 0,42$  (где  $\tau_{int}$  — пропускание интерферометра,  $\tau_{int} \approx 0,68$ ;  $\tau_{cf}$  — пропускание полосового охлаждаемого фильтра,  $\tau_{cf} \approx 0,7$ ;  $\tau_{opt}$  — пропускание остальной оптики (объектив, окно),  $\tau_{opt} \approx 0,9$ ).

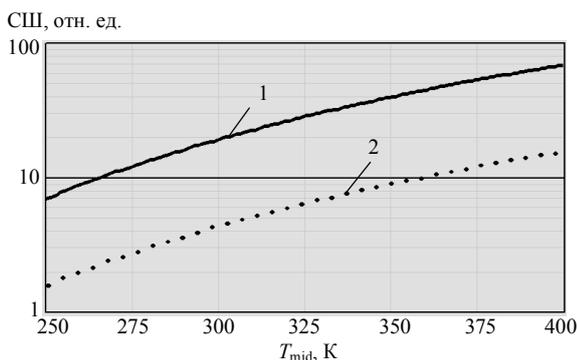


Рис. 5. Зависимости отношения СШ от температуры наблюдаемого объекта: 1 — СШ ( $T_{mid}$ ); 2 — СШ ( $T_{mid}$ )

Расчеты проводились для двух значений коэффициентов излучения наблюдаемого тела 0,9 (кривая СШ) и 0,2 (кривая СШ1) при эффективной полосе пропускания мультиплекса  $\Delta \delta \approx 0,15 \text{ мкм}$  и  $\lambda = 10 \text{ мкм}$ .

### Заключение

Отличительной особенностью и основным достоинством предложенного ОС является принципиальная возможность регистрировать быстропротекающие процессы путем получения за один кадр их мгновенного "изображения с разноцветными строками", т. е. изображения, в котором каждая

строка отображает интенсивность излучения только с определенной длиной волны, соответствующей номеру этой строки от оптически сопряженной с этой строкой полосы сцены. Такое изображение получается без всякого сканирования за время накопления кадра  $\sim 10^{-2} \div 10^{-4} \text{ с}$ .

При наблюдении неподвижных объектов этот же ОС обеспечивает накопление пространственной и спектральной информации ("Куба данных") путем сканирования изображения в плоскости матричного приемника, осуществляемого с помощью качания зеркала (см. рис. 1) вокруг оси, перпендикулярной плоскости чертежа. В этом случае можно получать монохромные изображения в любой из  $N_y$  (где  $N_y$  — число строк матричного приемника) узких спектральных полосах, рабочего диапазона ФУ.

Отметим, что из известных ОС принципиальной возможностью одновременно регистрировать пространственную и спектральную информации за время накопления кадра (и, следовательно, возможностью регистрировать быстропротекающие процессы) обладают также ОС, описанные в [9].

### Литература

1. Пустовойт В. И., Пожар В. Э. Лазер информ// Информационный бюллетень лазерной ассоциации. 2004. Вып. № 11—12. С. 290, 291.
2. Glenn Sellar R., Boreman Glenn D. Classification of imaging spectrometers for remote sensing applications// Optical Engineering, January 2005. V. 44(1).
3. Филачев А. М., Сагинов Л. Д., Кононов А. С., Свиридов А. Н., Бакуменко В. Л. Спектральная фильтрация изображений с использованием явления полного внутреннего отражения// Электронный журнал "Исследовано в России". 2005. № 159. С. 1656—1671.
4. Filachev A. M., Saginov L. D., Kononov A. S., Sviridov A. N., Bakumenko V. L., Boltar K. O. Spectral filtration of images in the IR spectral region with use of phenomenon of total internal reflection and multibeam interference// Defense & security Symposium. An SPIE Event. 17—21 April 2006.
5. Свиридов А. Н., Филачев А. М., Пономаренко В. П., Кононов А. С. Отображающий фокальный монохроматор// Электронный журнал "Исследовано в России". 2008. № 18, С. 219—228, (<http://Zhurnal.apc.relam.ru/articles/2008/018.pdf>)
6. Свиридов А. Н., Филачев А. М., Сагинов Л. Д., Кононов А. С. Отображающий ИК-спектрометр// Там же. 2006. № 103. С. 979—992.
7. Свиридов А. Н., Филачев А. М., Сагинов Л. Д., Кононов А. С. Отображающий спектрометр на основе интерферометра Фабри—Перо и смотрящего тепловизора// Прикладная физика. 2007. № 4. С. 146—149.
8. Gittins C. M., Marinelli W. J. LWIR multispectral imaging chemical sensor// Proc. of SPIE. 1998. V. 3533. (SPIE Paper № 3533-13).
9. Volin Curtis E., Garcia John P., Dereniak Eustace L., Descour Michael R., Homilton Tom, McMillan Robert. Midwave-Infrared Snapshot Imaging Spectrometer// Proceedings of SPIE. 2002. V. 4880. P. 355—366.

## Multispectral thermal imager with a Fabry—Perot interferometer

*I. D. Burlakov, A. I. Dirochka, A. S. Kononov, V. P. Ponomarenko, A. N. Sviridov, A. M. Filachev*

Orion Research-and-Production Association, 9 Kosinskaya str., Moscow, 111402, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru

*Analyzed the possibility of building an imaging spectrometer operating within the range of 8-12  $\mu\text{m}$  (multispectral thermal imager) capable to register the radiations from quickly running phenomena's, for example, explosions. Principle of action optical filtering device multispectral thermal imager is founded on dependency of spectral drive an interferometer Fabry—Perot operating in first in the second or one third order to interferences from angle a slopping an interferometer to falling radiation. Designed mathematical model a spectrometer, allowing calculate its optimum parameter.*

PACS: 42.79.Ls

*Keywords:* multispectral thermal imager, interferometer, parameters, rapid events.

Bibliography — 9 references.

*Received 11 December 2008*