

# Физическая аппаратура

УДК 621.383

## Мультиспектральный тепловизор

А. Н. Свиридов, А. М. Филачев, Л. Д. Сагинов, А. С. Кононов  
ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

*Предложен мультиспектральный тепловизор на основе матричного тепловизора и интерферометров, установленных под углом Брюстера к оптической оси устройства. Приведены расчеты параметров этого устройства. Ожидается, что подобные устройства могут быть пригодны для получения пространственной и спектральной информации о быстротекающих явлениях, например взрывах.*

В последние годы возросло внимание к устройствам, обеспечивающим получение изображений объектов в заданных узких спектральных диапазонах — spectral imaging (SI) (SI — термин, обозначающий быстроразвивающееся направление бесконтактного исследования объектов, использующее методы оптического спектрального анализа и распознавания образов). С помощью этих устройств удается наблюдать в изображениях различные фрагменты, отличающиеся (в выбранном узком спектральном диапазоне) различной спектральной яркостью, обусловленной различными коэффициентами отражения, поглощения или излучения. При наблюдении этих же объектов в широком спектральном диапазоне (например с помощью обычного тепловизора) яркости фрагментов усредняются, и объем получаемой оптической информации значительно уменьшается. Для реализации SI могут использоваться методы как непосредственной оптической фильтрации принимаемого излучения с помощью перестраиваемых оптических фильтров различных видов (акустооптические, интерференционные, интерференционно-поляризационные и др.), так и методы выделения спектральных изображений, основанные на компьютерной обработке оптических полей, регистрируемых матричным приемником (например, сигналов после Фурье-интерферометра, голограмм и др.) [1—41].

Устоявшегося названия, адекватно отображающего сущность этого направления, пока нет. Наиболее подходящими названиями можно считать такие, как "спектральная фильтрация изображений", "спектральное изображение структуры объектов", "спектральное видение", "спектральное отображение" [1]. Далее будем называть устройства, позволяющие получать изображения объектов в любых требуемых узких спектральных полосах, принадлежащих относительно широкому спектральному диапазону — отображающими спектрометрами (ОС). В случаях, если спектральный диапазон находится в пределах 3—14 мкм и излу-

чение регистрируется тепловизором, можно называть ОС "мультиспектральными тепловизорами" (МСТ).

В работе проведены расчеты параметров МСТ, использующих интерферометры, установленные под углом Брюстера к оптической оси системы.

### Мультиспектральный тепловизор на основе "смотрящего" тепловизора и фильтрующего устройства с интерферометрами, установленными под углом Брюстера к оптической оси устройства

Для фильтрации изображений в ИК-области спектра используются интерферометры Фабри-Перо с расстояниями между отражающими поверхностями зеркал порядка длины волны фильтруемого излучения [13].

Если оптическая толщина подобного интерферометра равна  $d$ , то он имеет  $V$  полос пропускания, максимумы которых (при нормальном падении фильтруемого излучения на зеркала интерферометра) равны:  $\lambda_{\max 1} = 2 \cdot d/1$ ;  $\lambda_{\max 2} = 2 \cdot d/2$ ;  $\lambda_{\max 3} = 2 \cdot d/3$ , ...,  $\lambda_{\max V} = 2 \cdot d/V$ . Фильтр, предназначенный для выделения первой ( $V = 1$ ), наиболее длинноволновой полосы пропускания, называется фильтром 1-го порядка, соответственно, фильтром 2-го порядка называют фильтр с  $V = 2$ , 3-го порядка — фильтр с  $V = 3$  и т. д. [8].

Число интерферометров, материал их зеркал (пластин), наличие или отсутствие металлических или интерференционных отражающих покрытий на поверхностях пластин определяют требуемым спектральным разрешением  $R = \lambda/\delta\lambda$  ( $\lambda$  — длина волны,  $\delta\lambda$  — ширина фильтруемой полосы спектра) и относительной шириной  $\lambda/\Delta\lambda$  спектрального диапазона перестройки МСТ (где  $\Delta\lambda = \lambda_n - \lambda_1$ ,  $\lambda_n$  и  $\lambda_1$  — соответственно, длинноволновая и коротковолновая границы рабочего спектрального диапазона МСТ).

Для МСТ с узким спектральным диапазоном перестройки ( $\lambda/\Delta\lambda > 10$ ) целесообразно использовать интерферометры с отражающими интерференционными покрытиями. В этом случае благодаря высокому коэффициенту отражения зеркал для получения требуемого разрешения, как правило, достаточно одного интерферометра.

Для МСТ с широким диапазоном перестройки (например,  $\lambda/\Delta\lambda < 3$ ) целесообразно (вследствие спектральной селективности интерференционных отражающих покрытий, недолговечности полупрозрачных металлических покрытий, которые требуют применения специальных покрытий для защиты от окисления и практически не применяются в ИК-области спектра) 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  $d_1, d_2, \dots, d_n$  находятся в простых кратных отношениях. В этом случае максимальная длина волны пропускания мультиплекса определяется толщиной первого интерферометра, который работает как фильтр 1-го порядка и имеет наименьшее расстояние между зеркалами.

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.

В предлагаемом МСТ фильтрация осуществляется вследствие многолучевой интерференции лучей (поляризованных в плоскости, перпендикулярной плоскости падения) в интерферометрах, установленных по отношению к оси оптической системы под углом  $\phi \approx \phi_{\text{Brewster}}$  (где  $\phi_{\text{Brewster}}$  — угол Брюстера).

Интерферометры образованы плоскими оптически полированными пластинами из материала с высоким показателем преломления, прозрачного для фильтруемого излучения.

В результате наклона интерферометров к фильтруемому излучению происходит:

- увеличение коэффициента отражения лучей (поляризованных в плоскости, перпендикулярной плоскости падения) от полированных граней пластин интерферометров (например, с 36 % при  $\phi = 0^\circ$  до 78 % — при  $\phi = \phi_{\text{Brewster}} = 76^\circ$  для пластин интерферометров, изготовленных из германия) и, следовательно, увеличение добротности и спектрального разрешения интерферометров;

- увеличение спектрального интервала (в результате смещения полос пропускания в коротковолновую область спектра) между соседними полосами пропускания интерферометров и возможность увеличения расстояния между зеркалами до  $d_1 = d_2 = d_3 = d_4 = K \cdot \lambda_m = 39$  мкм, что в свою очередь также приводит к увеличению добротности и разрешающей способности ( $\lambda_m$  — длина волны лучей на выходе мультиплекса интерферометров, распространяющихся вдоль оптической оси МСТ, соответствующая середине рабочего спектрального диапазона МСТ;  $K$  — коэффициент, зависящий от материала зеркал интерферометров и рабочего спектрального диапазона МСТ;  $\lambda_m \approx 9,44$  мкм и  $K = 4,131$ );

- появление принципиальной возможности устранить паразитную интерференцию между зеркалами соседних интерферометров путем установления  $L$ -расстояний между соседними интерферометрами в соответствии со следующим выражением:

$$L \geq \frac{j}{N \cdot \tan(\phi)}, \quad (1)$$

где  $j$  — длина пластины (зеркала) интерферометра;

$N$  — допустимое число отражений луча от зеркал соседних интерферометров;

$\phi$  — угол наклона зеркал интерферометров к оптической оси МСТ.

Для обеспечения возможности работы МСТ в других спектральных диапазонах зеркала интерферометров не имеют отражающих покрытий. Благодаря этому, заменяя охлаждаемый полосовой фильтр, установленный перед матричным приемником, или, заменяя охлаждаемый фильтр вместе с матричным приемником, можно обеспечить работу МСТ в других спектральных диапазонах (порядках интерференции).

Возможная оптическая схема МСТ с интерферометрами, установленными под одинаковыми углами  $\phi = \phi_{\text{Brewster}}$  к оптической оси МСТ, приведена на рис. 1. Определения позиций на рис. 1 следующие: 1—4 интерферометры; 5, 6 — линзы телескопа, согласующего сечение и угол расхождения фильтруемого потока излучения с входным отверстием и апертурным углом прибора, регистрирующего отфильтрованное излучение, например тепловизора; 7 — поляризатор, пропускающий (в положении 1) излучение с поляризацией, перпендикулярной плоскости падения фильтруемых лучей на пластины интерферометров; 8 — объектив; 9 — зеркало, обеспечивающее сканирование изображения по плоскости матрицы (в направлении, перпендикулярном строкам) путем прецизионных поворотов вокруг оси, перпендикулярной плоско-

сти ZY; 10 — охлаждаемый полосовой фильтр, отсекающий излучение с длинами волн, находящимися за пределами рабочего спектрального диапазона фильтрующего устройства; 11 — матричное приемное устройство тепловизора; 12 — монитор.

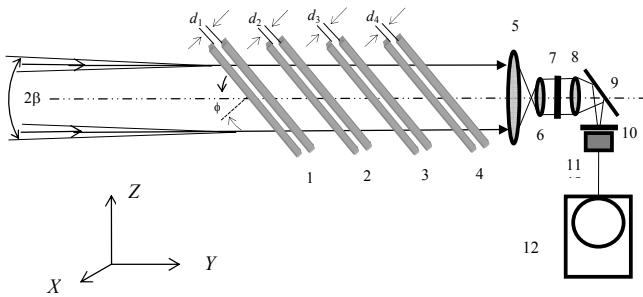


Рис. 1. Оптическая схема МСТ с использованием многолучевой интерференции в "наклонных интерферометрах" (вариант 1)

Все интерферометры изготовлены с возможностью прецизионного и контролируемого изменения расстояния между отражающими пластинами и возможностью юстировки по углам путем прецизионных поворотов вокруг осей X и Z. Пластины интерферометров изготовлены из материалов, имеющих высокий показатель преломления и прозрачных для излучения в рабочем спектральном диапазоне.

В результате математического моделирования определены оптимальные параметры конструкции МСТ.

Для рассматриваемого примера реализации фильтрующего устройства с рабочим спектральным диапазоном  $\lambda_{\min} = 8$  —  $\lambda_{\max} = 10,87$  мкм наиболее подходящим материалом для пластин является германий или кремний. Будем считать, что пластины изготовлены из германия, имеющего показатель поглощения в рабочем спектральном диапазоне  $\xi = 0,025 \text{ см}^{-1}$ . Толщина каждой пластины  $t = 0,5$  см. Пластины имеют следующие размеры: длина  $j = 212$  мм, ширина  $b = 50$  мм. Все интерферометры установлены под углом  $\phi = 76^\circ$  к оптической оси (ОС), соответствующим максимальному пропусканию интерферометров для излучения с длиной волны  $\lambda_m = 9,44$  мкм, распространяющемуся по оси оптической системы. Отметим, что угол Брюстера для этой длины волны равен  $\phi_{\text{Brewster}} \approx 76^\circ$ . Расстояния между отражающими гранями пластин интерферометров одинаковы и равны:  $d_1 = d_2 = d_3 = d_4 = d = 39$  мм. Расстояния, между наружными поверхностями зеркал соседних интерферометров, рассчитанные по выражению (1), при  $N = 2$  равны  $L = 26$  мм. (При этом паразитные интерферирующие лучи после двух отражений от зеркал соседних интерферометров выйдут из оптической системы и не попадут на матричный приемник).

Наружные грани интерферометров имеют просветляющие покрытия (соответствующие спектральному диапазону работы МСТ 8—10,87 мкм и углам падения фильтруемого излучения), уменьшающие отражение от каждой грани до  $R = 0,08$ .

Пропускание каждой пластины  $\tau$  оценивается следующим образом:

$$\tau = e^{-\xi \cdot t} (1 - R).$$

Тогда пропускание одной пластины  $\tau = 0,91$ , а пропускание восьми пластин  $\tau^8 = 0,46$ .

Линзы телескопа 5, 6 (см. рис. 1) согласуют сечение и угол, в котором распространяется фильтруемый поток излучения с входным отверстием объектива и углом поля зрения тепловизора, и выбираются вместе с объективом тепловизора таким образом, чтобы пучки фильтруемого излучения, распространяющиеся под углами  $|\beta| = 2,18^\circ$  к оптической оси устройства, фокусировались на крайние строки матричного приемника тепловизора. Для этого достаточно, например, иметь телескоп с кратностью 1/2 и объектив с фокусным расстоянием  $F = 13,2$  см (при размере матрицы  $2 \times 2$  см). При этом диаметр сфокусированной моды (при  $\lambda = 10$  мкм) в плоскости матричного приемника равен  $D_0 = 28$  мкм.

Приведем основные соотношения, описывающие аппаратную функцию МСТ. Можно показать, что  $t_n(\alpha, d_n, \lambda)$  — пропускание подобного интерферометра для излучения с поляризацией, перпендикулярной плоскости падения, зависит от угла падения  $\alpha$ , расстояния между внутренними гранями  $d_n$  и длины волны  $\lambda$  следующим образом:

$$t_n(\alpha, d_n, \lambda) = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \cdot (n(\lambda)^2 - 1)^2 \cdot \frac{\sin h \left[ 2\pi \frac{d_n}{\lambda} \cdot (\sin(\alpha)^2 - 1)^{1/2} \right]^2}{(1 + n(\lambda)^2) \cdot \cos(\alpha)^2 - \cos(\alpha)^4}}$$

где  $n(\lambda)$  — зависимость коэффициента преломления германия от длины волны [42];

$$n(\lambda) = 3,99931 + 0,391707 \cdot \frac{1}{\lambda^2 - 0,028} + 0,163492 \times \left( \frac{1}{\lambda^2 - 0,028} \right)^2 + (-0,0000060) \cdot \lambda^2 + (-0,00000053) \cdot \lambda^4.$$

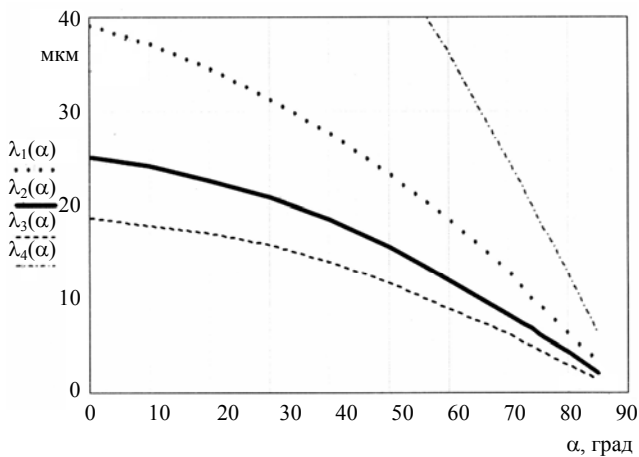
Результирующее пропускание  $Z_n(\alpha, d_n, \lambda)$  четырех установленных друг за другом интерферометров с расстояниями между пластинами  $d_1, d_2, d_3, d_4$  для излучения, падающего на каждый интерферо-

метр под углом  $\alpha$ , выражается следующим произведением:

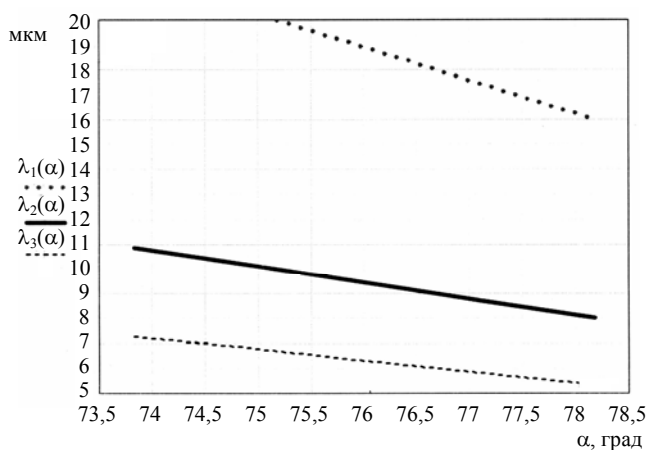
$$Z_n\alpha(\lambda) = t_{n1}(\alpha, d_1, \lambda) \cdot t_{n2}(\alpha, d_2, \lambda) \cdot t_{n3}(\alpha, d_3, \lambda) \times t_{n4}(\alpha, d_4, \lambda).$$

При  $d_1 = d_2 = d_3 = d_4 = d$ ,  $Z_n\alpha(\lambda) = t_n\alpha(\lambda)^4$ .

На рис. 2, а, б показаны зависимости длин волн полос пропускания рассматриваемого мультиплекса интерферометров от  $\alpha$  — угла наклона интерферометров к падающему излучению. Каждая зависимость соответствует определенному порядку интерференции. Зависимость  $\lambda_4(\alpha)$  соответствует первому порядку интерференции ( $V = 1$ ),  $\lambda_1(\alpha)$  — второму порядку интерференции ( $V = 2$ ),  $\lambda_2(\alpha)$  — третьему порядку интерференции ( $V = 3$ ),  $\lambda_3(\alpha)$  — четвертому порядку интерференции ( $V = 4$ ). Заменяя интерференционный фильтр 10, можно изменять спектральный диапазон работы МСТ, выбирая для работы желаемый порядок интерференции.



а



б

**Рис. 2.** Зависимости  $\lambda(\alpha)$  — длин волн, соответствующих максимумам пропускания мультиплекса от  $\alpha$  — угла падения полихроматических пучков фильтруемого излучения на интерферометры.

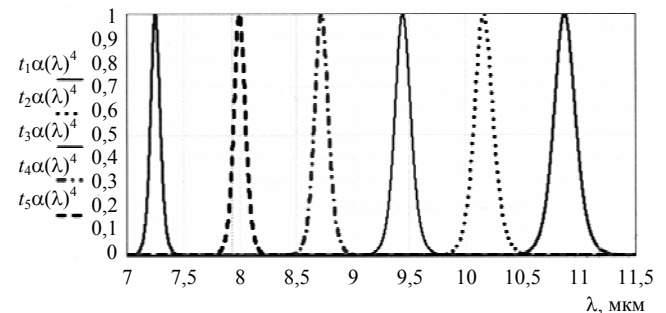
Рассчитаны при следующих значениях расстояний между отражающими пластинами интерферометров:

$$d_1 = d_2 = d_3 = d_4, d = 39 \text{ мкм}$$

Например, зависимость  $\lambda_2(\alpha)$  показывает возможность осуществления плавной фильтрации длин волн в интересующем нас диапазоне 8—10,87 мкм (соответствующий диапазон углов падения пучков фильтруемого излучения на интерферометры  $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$ , где  $\alpha_{\min} = 73,82^\circ$ ,  $\alpha_{\max} = 78,18^\circ$ ), при установке перед матричным приемником охлаждаемого интерференционного фильтра, пропускающего излучение в полосе 7,7—11,5 мкм.

Как видно из рис. 2, б (на котором показаны в увеличенном масштабе фрагменты зависимостей, приведенных выше на рис. 2, а) подобный интерференционный фильтр в рассматриваемом диапазоне углов падения  $73,82$ — $78,18^\circ$  обеспечит попадание на матричный приемник излучений, соответствующих выбранному спектральному диапазону 8—10,87 мкм.

На рис. 3 показаны зависимости контуров пропускания от  $\lambda$  (аппаратной функции) рассматриваемого фильтрующего устройства, рассчитанные при следующих расстояниях между пластинами интерферометров:  $d_1 = d_2 = d_3 = d_4, d = 139$  мкм — для лучей, распространяющихся под различными углами  $\beta$  к оптической оси МСТ.



**Рис. 3.** Зависимости контуров пропускания от  $\lambda$  для лучей, распространяющихся в плоскостях, перпендикулярных плоскости  $ZY$ , расположенных под следующими углами  $\beta$  к оптической оси МСТ:  $\beta = 2,18^\circ$  ( $\alpha = 73,82^\circ$ ),  $t_1\alpha(\lambda)$ ;  $\beta = 1,09^\circ$  ( $\alpha = 74,91^\circ$ ),  $t_2\alpha(\lambda)$ ;  $\beta = 0^\circ$  ( $\alpha = 76^\circ$ ),  $t_3\alpha(\lambda)$ ;  $\beta = -1,09^\circ$  ( $\alpha = 77,09^\circ$ ),  $t_4\alpha(\lambda)$ ;  $\beta = -2,18^\circ$  ( $\alpha = 78,18^\circ$ ),  $t_5\alpha(\lambda)$

Видно, что по мере изменения угла  $\beta$ , под которым распространяются в плоскости  $ZY$  фильтруемые пучки, плавно изменяется длина фильтруемой волны от  $\lambda_{\max} = 10,87$  мкм (при  $\beta = 2,18^\circ$ ) до  $\lambda_{\min} = 8$  мкм (при  $\beta = -2,18^\circ$ ) и уменьшается полоса пропускания мультиплекса от 0,22 до 0,12 мкм.

На рис. 4 показана зависимость ширины полосы (по полувысоте) пропускания мультиплекса от длины волны.

Матрица тепловизора установлена таким образом, чтобы ее строки были перпендикулярны плоскости  $ZY$ , ось объектива тепловизора совпадает с оптической осью системы, фокусное расстояние объектива выбрано таким образом, чтобы пуч-

ки, распространяющиеся под углом  $\beta = 2,18^\circ$  ( $\alpha = 73,82^\circ$ ), фокусировались на правую строку матрицы, а пучки, распространяющиеся под углом  $\beta = -2,18^\circ$  ( $\alpha = 78,18^\circ$ ), — на левую строку матрицы.

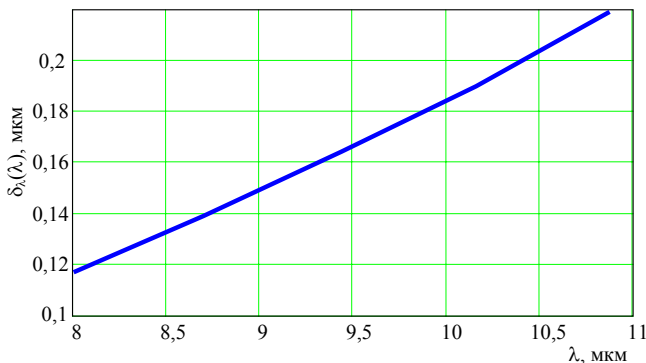


Рис. 4. Зависимость ширины полосы (по полувысоте) пропускания мультиплекса от длины волны

В результате на правую строку матрицы будет поступать излучение с длиной волны  $\lambda_{\max} = 10,87$  мкм от пучков, распространяющихся в плоскости, перпендикулярной плоскости ZY, наклоненной к оси МСТ под углом  $\beta = 2,18^\circ$  ( $\alpha = 73,82^\circ$ ), а на левую строку матрицы будет поступать излучение с длиной волны  $\lambda_{\min} = 8$  мкм от пучков, распространяющихся в плоскости, перпендикулярной плоскости ZY, наклоненной к оси МСТ под углом  $\beta = -2,18^\circ$  ( $\alpha = 78,18^\circ$ ).

Из пучка, распространяющегося вдоль оптической оси системы ( $\beta = 0^\circ$ ,  $\alpha = 76^\circ$ ), фильтруется излучение с длиной волны  $\lambda_m = 9,44$  мкм, которое фокусируется объективом на пиксел, расположенный в середине средней строки матричного приемника.

Таким образом, из полихроматического пучка, излучаемого участком сцены, оптически сопряженным с одним из пикселов матричного приемника, принадлежащих строке с номером  $n$ , будет выделено (отфильтровано) и сфокусировано на этот пиксел матрицы излучение (поляризованное в плоскости, перпендикулярной плоскости падения) с длиной волны  $\lambda_n$ , соответствующей угловой координате этой строки  $\beta_n$  ( $\beta_n$  — угол наклона плоскости, в которой распространяется пучок, к оптической оси МСТ,  $-2,18^\circ \leq \beta_n \leq 2,18^\circ$ ).

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  $\beta_n$ ) этой строки.

Максимальное число мод [43]  $M$  с длиной волны  $\lambda_n = 10$  мкм (предельное число точек изображения на длине волны  $\lambda_n$ ), которое пропускает

рассматриваемое фильтрующее устройство, рассчитанное по нижеприведенному выражению, равно  $340 \times 340$ .

$$M = \frac{b \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) a \left[\frac{\pi}{4} (2\beta)^2\right]}{\lambda^2}.$$

Для реализации режима SI необходимо провести сканирование (с помощью прецизионного вращения зеркала 9 (см. рис. 1)) 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 пространственные 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  $T_{\text{mid}}$  и средними коэффициентами излучения 0,9 или 0,2;
- рабочий спектральный диапазон 8—10,7 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  $35 \times 35$  мкм.

Эффективное пропускание фильтрующего устройства в максимуме полосы пропускания

$$\tau_{\text{eff}} \approx \tau_{\text{inter}} \cdot \tau_{\text{polar}} \cdot \tau_{c,f} \cdot \tau_{\text{opt}} \approx 0,11,$$

где  $\tau_{\text{inter}}$  — пропускание четырех интерферометров в максимуме полосы пропускания,  $\tau_{\text{inter}} \approx 0,46$ ;

- $\tau_{polar}$  — пропускание поляроида для неполяризованного излучения,  $\tau_{polar} \approx 0,5$ ;
- $\tau_{c.f.}$  — пропускание полосового охлаждаемого фильтра,  $\tau_{c.f.} \approx 0,7$ ;
- $\tau_{opt}$  — пропускание остальной оптики (объектив, телескоп),  $\tau_{opt} \approx 0,7$ .

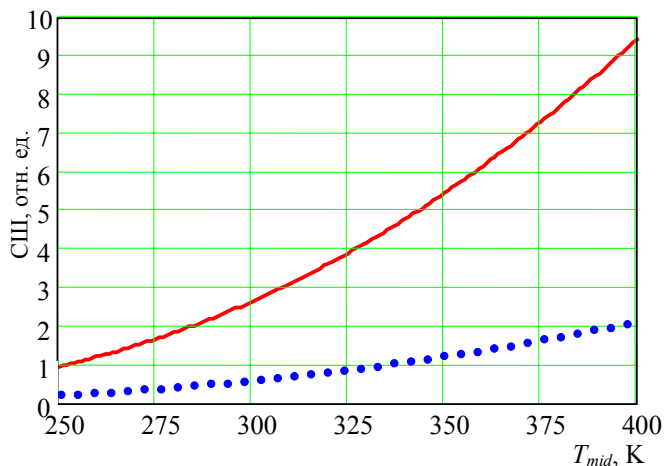


Рис. 5. Зависимости отношения сигнал/шум рассматриваемого варианта МСТ от температуры наблюдаемого объекта:  
 — СШ ( $T_{mid}$ ); ●●● — СШ1 ( $T_{mid}$ )

Расчеты проводились для двух значений коэффициентов излучения наблюдаемого тела: 0,9 — кривая СШ на рис. 5 и 0,2 — кривая СШ1 при эффективной полосе пропускания мультиплекса  $\Delta\delta \approx 0,15$  мкм и  $\lambda = 9,5$  мкм. (При расчетах предполагалось, что в конструкции устройства предусмотрен охлаждаемый экран, препятствующий паразитному попаданию фонового излучения на матричный приемник.)

Из приведенных зависимостей следует, что предлагаемый вариант мультиспектрального тепловизора позволит получать мультиспектральные изображения объектов с коэффициентом излучения 0,9 при температурах объектов выше 250 К и с коэффициентом 0,2 — при температурах выше 325 К.

На рис. 6 показан второй возможный вариант МСТ с "наклонными" интерферометрами. Рассматриваемая конструкция работает как мультиплекс интерферометров, так как позволяет осуществлять четырехкратное прохождение фильтруемого излучения через интерферометр и, следовательно, обеспечивает достижение таких же параметров, как и конструкция, представленная на рис. 1. На рис. 6 имеем: 1—3 — стеклянные (кварцевые) зеркала с золотым отражающим покрытием; 4, 5 — пластины интерферометра, изготовленные из германия (внешние поверхности которых имеют просветляющие покрытия, обеспечивающие максимальное пропускание для фильтруемого излучения); 6 — поляризатор, пропускающий излучение с поляризацией, перпендикулярной плоскости

падения фильтруемых лучей на пластины интерферометров; 7 — объектив; 8 — зеркало, обеспечивающее сканирование изображения по плоскости матрицы (в направлении, перпендикулярном строкам) путем прецизионных поворотов вокруг оси, перпендикулярной плоскости ZY; 9 — охлаждаемый полосовой фильтр, отсекающий излучение с длинами волн, находящимися за пределами рабочего спектрального диапазона фильтрующего устройства; 10 — матричное приемное устройство тепловизора; 11 — монитор.

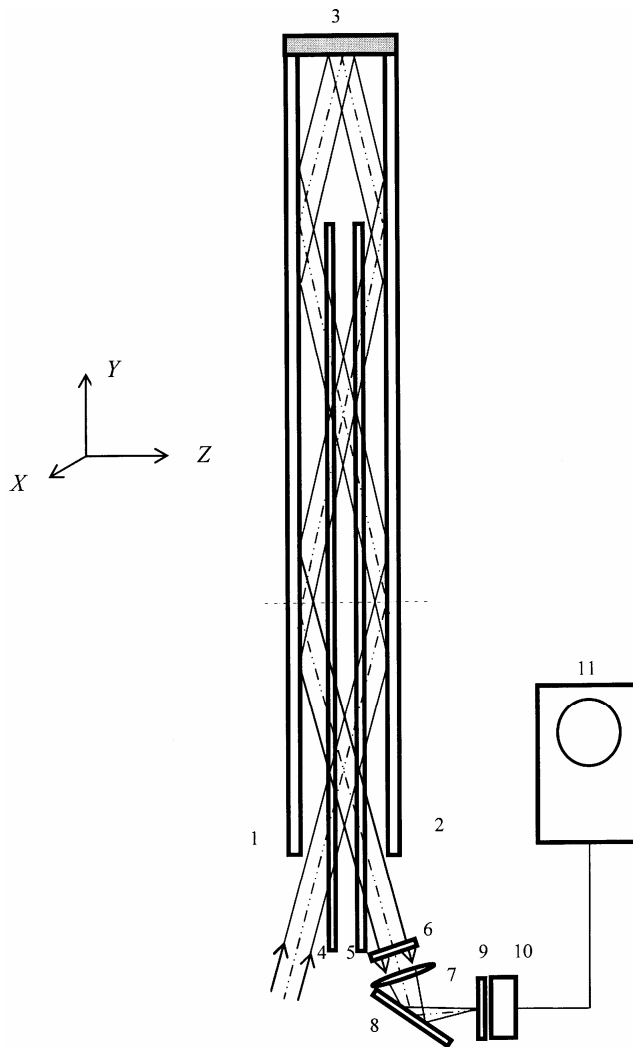


Рис. 6. Оптическая схема МСТ с использованием многолучевой интерференции в "наклонных интерферометрах" (вариант 2)

Основным достоинством второго варианта является то, что вместо четырех параллельных друг другу наклонных интерферометров используется один, зеркала которого имеют в два раза большую длину, чем зеркала интерферометров первого варианта. Другим достоинством является то, что в конструкции отпадает необходимость устранения влияния взаимной интерференции между эталонами.

Следует отметить, что в обоих вариантах поляризатор, установленный в положение 1, при котором

он пропускает излучение с поляризацией, перпендикулярной плоскости падения фильтруемого излучения на зеркала интерферометров, обеспечивает поступление на приемник излучения только на длинах волн, соответствующих полосам пропускания мультиплекса, т. е. если поляризатор установлен в положение 1, то устройство работает в режиме отображающего спектрометра (мультиспектрального тепловизора). Если поляризатор повернуть вокруг оптической оси, вдоль которой распространяется фильтруемое излучение на  $90^\circ$ , т. е. установить в положение 2, то на приемник будет поступать только излучение, поляризованное в плоскости, параллельной плоскости падения излучения на интерферометры. Так как зеркала интерферометров установлены под углом Брюстера к оптической оси устройства, то составляющие излучения, поляризованные в плоскости, параллельной плоскости падения, на всех длинах волн проходят через зеркала на приемник без отражений. В этом случае отсутствует многолучевая интерференция, и устройство работает как обычный тепловизор, регистрирующий излучение во всей полосе пропускания установленного перед ним интерференционного фильтра. Это вспомогательный режим работы устройства, который может быть полезен при предварительном обследовании сцены для получения интегральной информации.

### Заключение

Основной недостаток, присущий МСТ, классификация которых дана в работе [41], связан с тем, что все они требуют определенного времени для накопления пространственной и спектральной информации о наблюдаемом объекте и, следовательно, непригодны для регистрации быстропротекающих процессов (явлений). Для получения пространственной и спектральной информации необходимо 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 термину 3D или "куб данных". Чем больший объем имеет 3D и чем с большей скоростью он создается и воспроизводится его пространственные и спектральные выборки, тем эффективнее работает спектрометр отображения. Возможности быстрого получения 3D определяются как конструктивными особенностями МСТ, так и методами обработки информации.

Отличительной особенностью и основным достоинством предложенного МСТ является принци-

пиальная 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  $\sim 10^{-2}—10^{-4}$  с).

При наблюдении неподвижных объектов этот же МСТ обеспечивает накопление пространственной и спектральной информации ("куба данных") путем сканирования изображения в плоскости матричного приемника, осуществляемого с помощью качания зеркала 1 (см. рис. 6) вокруг оси, перпендикулярной плоскости чертежа. В этом случае можно получать монохромные изображения в любой строке из  $N_y$ , где  $N_y$  — число строк матричного приемника, узких спектральных полосах рабочего диапазона ФУ.

Отметим, что из известных МСТ возможностью одновременно регистрировать пространственную и спектральную информацию за время накопления кадра (и, следовательно, возможностью регистрировать быстропротекающие процессы) обладают также МСТ, описанные в работах [14] и [40].

### Литература

1. Пустовойт В. И., Пожар В. Э. // Лазер информ: Информ. бюллетень лазерной ассоциации. 2004. Июнь. Вып. № 11—12. С. 290—291.
2. LaBaw D. Airborne Imaging Spectrometer: an advanced concept instrument: Proc. of SPIE. 1983. V. 430.
3. Glenn Sellar R., Boreman Glenn D. Classification of imaging spectrometers for remote sensing applications//Optical Engineering, January. 2005. V. 44(1).
4. Gat Naum. Imaging Spectroscopy Using Tunable Filters// Proc. SPIE. 4056. 2000. P. 50—64.
5. Title A. M., Rosenberg W. J. Spectral Management//Ibid. Imaging Spectroscopy, 1981.
6. Yeh P., Tracy J. Theory of Dispersive Birefringent Filters// Ibid.
7. Wolfe W. L. Optical Materials//Chapter 7 in "The Infrared Handbook", Revised Edition, 1985, Editors: Wolfe W. L. and Zissis G. J. Published by ERIM.
8. Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И. // Техника и практика спектроскопии. — М.: Наука, 1976. С. 250—251.
9. Jain A. K., et al. Dual Tunable Fabry-Perot: a New Concept for Spectrally Agile Filtering//Proc. SPIE 268, Imaging Spectroscopy, 1981.
10. Atherton P. D., et al. Tunable Fabry-Perot Filters // Optical Engineering, 20. Nov/Dec. 1981. №. 6. P. 806—814.
11. Reay N. K., Pietraszewski K. A. R. B. Liquid Nitrogen-Cooled Servo-Stabilized Fabry-Perot Interferometer for Infrared// Ibid. 31. Aug. 1992. №. 8. P. 1667—1670.
12. Stuart D. Ryder, Yin-Sheng Sun, Michael C. B. Ashley, Michael G. Burton, Lori E. Allen, John W. V. Storey//Publ. Astron. Soc. Aust. 1998. № 15. P. 228 {39}.
13. Christopher M. Gittins and William J. Marinelli. LWIR multispectral imaging chemical sensor//Proc. of SPIE. 1998. V. 3533. (SPIE Paper № 3533-13).

14. Филачев А. М., Сагинов Л. Д., Кононов А. С. и др. Спектральная фильтрация изображений с использованием явления полного внутреннего отражения//Электронный журнал "Исследовано в России". 2005. № 159. С. 1656—1671.
15. Anatoly M. Filachev, Leonid D. Saginov, Andrey S. Kononov, Anatoly N. Sviridov, Vladimir L. Bakumenko, Konstantin O. Boltar. 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, SPIE PAPER NO 6206-107 poster. — Orlando, Florida USA.
16. Windels F. W., Pustovoi V. I., Leroy O. Collinear acousto-optic diffraction using two nearby sound frequencies//Ultrasonics. 2000. № 38. P. 586—589.
17. Parygin V. N., Bogomolov D. V. Electronic Control of Transmission Function in Tunable Acousto-optical Filter//Proc. of the 17 Int. Congress of Acoustics, Rome. 2001. V. 1. P. 123—124.
18. Parygin V. N., Vershoubkiy A. V., Filatova E. Yu. Optimization of the Transfer Function of an Acoustooptic Cell with an Apodized Piezoelectric Transducer//Technical Physics, V. 46. 2001. № 9. P. 1138—1142.
19. Steinbruege K. B., Gottlieb M., Feichtner J. D. Automatic Acousto-Optical Tunable Filter (AOTF) Infrared Analyzer//Proc. SPIE 268. Imaging Spectroscopy, 1981.
20. Gottlieb M.  $\text{Ti}_3\text{AsSe}_3$  Noncollinear Acousto-Optical Filter Operation at 10 micrometers//Applied Physics Letters 34:1. January, 1979.
21. Macenka S., Hartmann G., Haring R., Roeder H. Wide Filed-of-View Imaging Spectrometer// Patent US 5,768,040. 1998.
22. Haring R., Williams F., Vanstone G., Putnam G. WFIS: A Wide Field-of-View Imaging Spectrometer//Infrared Spaceborne Remote Sensing VII, Proc. SPIE 3759. 1999.
23. Haring R. E., Vanstone G., Nguyen F., Rodil C. Optomechanical design of the incubator Wide Field-of-View Imaging Spectrometer//in Current Developments in Lens Design and Optical Systems Engineering: Proc. SPIE 4093, 2000.
24. Haring R., Pollock R., Cross R. A Wide Field-of-view Imaging Spectrometer (WFIS), From Laboratory Demonstration to Fully Functioning Engineering Model//in Infrared Spaceborne Remote Sensing IX, Proc. SPIE 4486, 2001.
25. Robert E. Haring, Randy Pollock, Richard M. Cross, Terri Greenlee. Wide-field-of-view imaging spectrometer (WFIS): from a laboratory demonstration to a fully functional engineering model//Proc. SPIE. V. 4486. P. 403—410; Infrared Space borne Remote Sensing IX: Feb 2002.
26. Haring R., Pollock R., Cross R. Wide Field-of-view Imaging Spectrometer (WFIS) Engineering Model "Laboratory Tests and Field Demonstration"//in Infrared Spaceborne Remote Sensing XI. Proc. SPIE 5152.
27. Curtiss O. Davis, Jeffrey Bowles, Robert A. Leathers, Dan Korwan, T. Valerie Downes, William A. Snyder, W. Joe Rhea, Wei Chen, John Fisher, W. Paul Bissett, Robert Alan Reisse. Ocean PHILLS hyperspectral imager: design, characterization, and calibration// OPTICS EXPRESS 210. February 2002. V. 10. №. 4. P. 25.
28. Rasmus Nyholm Jorgensen. The VTTVIS Line Imaging Spectrometer-Principles, Error Sources, and Calibration//A user manual. Riso-R-1302(EN), February 2002. Riso National Laboratory, Roskilde. Denmark. Riso Report.
29. Aikio Mauri. Hiperspectral prism-grating-prism imaging spectrograph//VTT Publications 435, (VTT-PUBS-435), May 2001 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf>).
30. Hackwell J. A., Warren D. W. et al. A low resolution array spectrograph for the 2.9 to 13.5 micron spectral region// Proceedings SPIE. 1990. V. 1235. P. 171.
31. LeVan P. D. Capabilities of the AFGL Mosaic Array Spectrometer//Publication of Astronomical Society of the Pacific. 1990. V. 102. P. 190—199.
32. Harig R., Matz G., Rusch P. Scanning Infrared Remote Sensing System for Identification, Visualization, and Quantification of Airborne Pollutants in Instrumentation for Air Pollution and Global Atmospheric Monitoring/James O. Jensen, Robert L. Spellicy, Editors // Proc. SPIE 4574. 2002. P. 83—94.
33. Harig R. Passive remote sensing of pollutant clouds by FTIR spectrometry: Signal to-noise ratio as a function of spectral resolution//Applied Optics. 2004. V. 43 (23). P. 4603—4610.
34. Beil A., Daum R., Matz G., Harig R. Remote sensing of atmospheric pollution by passive FTIR spectrometry//in Spectroscopic Atmospheric Environmental Monitoring Techniques, Klaus Schafer, Editor, Proceedings of SPIE. 1998. V. 3493. P. 32—43.
35. Harig R., Matz G. Toxic Cloud Imaging by Infrared Spectrometry: A Scanning FTIR System for Identification and Visualization//Field Analytical Chemistry and Technology. 2001. № 5 (1—2). P. 75—90.
36. James A. Stobie, Alien Hairston, Stephen P. Tobin, Forbes Road, Lexington, Ronald J. Huppi, Ray Huppi. Imaging Sensor for the Geosynchronous Imaging Fourier Transform Spectrometer (GIFTS)//Proceedings of SPIE. 2002. V. 4818.
37. Summer Yarbrough, Thomas Caudill, Eric Kouba, Victor Osweiler, James Arnold, Rojan Quarles, Jim Russell, and others. Mighty Sat 11.1 hiperspectral imager: summari of on- orbit performance//Ibid. 2002. V. 4880. P. 186—197.
38. Gao Zhan, Kazuhiko Oka, Tsuyoshi Ishigaki and Naoshi Baba. Static Fourier-transform spectrometer based on Savart polariscope//Ibid. 2002. V. 4880. P. 198—203.
39. Stroke G. W., Funkhouser A. T. Fourier transform spectroscopy using holographic imaging without computing and with stationary interferomets//Phys. Lett. 16. 1965. P. V. 16. 272—274.
40. Curtis E. Volin, John P. Garcia, Eustace L. Dereniak, Michael R. Descour, Tom Homilton, Robert McMillan. Midwave-Infrared Snapshot Imaging Spectrometer//Proceedings of SPIE. 2002. V. 4880. P. 355—366.
41. Glenn Sellar R., Boreman Glenn D. Classification of imaging spectrometers for remote sensing applications//Optical Engineering, January 2005. V. 44(1). 013602-1...013602-3.
42. Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И., Петров И. П.//Оптические материалы для инфракрасной техники. — М.: Наука, 1965.
43. Гальярди Р. М., Карп Ш.//Оптическая связь. — М.: Связь, 1978.

Статья поступила в редакцию 15 марта 2007 г.

## Multispectral thermal imager

A. N. Sviridov, A. M. Filachev, L. D. Saginov, A. S. Kononov  
Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*The multispectral thermal imager is offered on the basis of a staring thermal imager and interferometers established bevel way of a Brewster to an axis of sighting of the device. The calculations of parameters of this device are conducted. It is expected, that the similar devices can be suitable for obtaining the spatial and spectral information about fast flowing past phenomena, for example, explosions.*