

УДК 621.383

Отображающий спектрометр на основе интерферометров Фабри—Перо и смотрящего тепловизора

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

Предложены фильтрующее устройство на основе мультиплекса Фабри—Перо и отображающий спектрометр, содержащий это устройство и смотрящий тепловизор. Проведены расчеты их параметров. Ожидается, что подобные устройства могут быть пригодны для получения изображений объектов в заданных узких спектральных диапазонах.

Перестраиваемые по длинам волн устройства для фильтрации изображений могут быть использованы для построения на их основе отображающих спектрометров (ОС).

С помощью ОС удастся 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.

В рассматриваемом устройстве фильтрация осуществляется вследствие многолучевой интерференции в интерферометрах, в которых отражающие поверхности обращенных друг к другу пластин каждого интерферометра оптически отполированы и не имеют металлических или интерференционных зеркальных покрытий.

Интерферометры установлены так, что углы между оптической осью ОС и гранями первого и второго интерферометров находятся в одной плоскости и равны, соответственно, α и $-\alpha$, углы между оптической осью ОС и гранями следующей второй пары интерферометров находятся в плоскости, перпендикулярной плоскости, в которой находятся углы первой пары интерферометров, и, соответственно, равны α и $-\alpha$. Причем α имеет величину порядка угла поля зрения фильтрующего устройства 2β . Для фильтрации выбранной длины волны λ_m устанавливаются следующие расстояния между отражающими гранями пластин интерферометров:

$$d1 = (\lambda m_0/2)k, \quad k = 1 \text{ или } 2; \quad dn = (n-1)d1 \text{ или } nd1,$$

где $\lambda m_0 = \lambda m \cdot \cos\theta$;

θ — угол, под которым излучение падает на внутренние грани интерферометра.

Конструкция всех интерферометров обеспечивает возможность прецизионного и контролируе-

мого изменений расстояния между отражающими пластинами. Пластины интерферометров изготовлены из материалов, имеющих высокий показатель преломления и прозрачных для излучения в рабочем спектральном диапазоне. Оптическая схема ОС приведена на рис. 1.

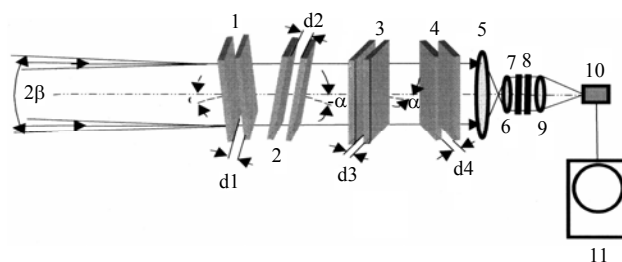


Рис. 1. Оптическая схема ОС с использованием многолучевой интерференции:

1—4 — интерферометры; 5, 6 — линзы телескопа, согласующие сечение и угол расхождения фильтруемого потока излучения с входным отверстием и апертурным углом прибора, регистрирующего отфильтрованное излучение, например тепловизора; 7, 8 — фильтры, отсекающие излучение с длинами волн, находящимися за пределами рабочего спектрального диапазона фильтрующего устройства.

Основные элементы приемника пользователя — тепловизора, регистрирующего отфильтрованное излучение:

9 — объектив; 10 — матричное приемное устройство; 11 — монитор

Для рассматриваемого примера реализации фильтрующего устройства (ФУ) с рабочим спектральным диапазоном 8—11 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 $t = 0,5 \text{ см}$, диаметр пластин $D_p = 7,5 \text{ см}$. Все интерферометры установлены под углом $|\alpha| = 4^\circ$ к оптической оси устройства. Наружные грани пластин каждого интерферометра имеют просветляющее покрытие в диапазоне 8—11 мкм, уменьшающее отражение от каждой грани до $R = 0,05$. Пропускание каждой

пластины τ оценивается следующим образом:

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

Тогда пропускание одной пластины $\tau = 0,938$, а пропускание восьми пластин $\tau^8 = 0,6$. Линзы телескопа (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 $|\beta| = 4^\circ$ к оптической оси устройства, фокусировались на крайние пиксели матричного приемника тепловизора. Например, для этого достаточно телескопа с кратностью $1/3$ и объектива с фокусным расстоянием $f = 4,7$ см (при размере матрицы 2×2 см). При этом диаметр сфокусированной моды ($\lambda = 10$ мкм) в плоскости матричного приемника равен $D_0 = 24$ мкм. В качестве фильтра 7, отсекающего излучение с длинами волн, меньшими $5,6\text{--}7$ мкм (в зависимости от расстояний между отражающими гранями), может быть использована пластинка из InSb (при температуре 78 К) толщиной около 0,1 мм. Излучение с длинами волн, большими $13\text{--}15$ мкм (в том числе побочные максимумы), можно подавить с помощью фильтра 8, изготовленного из пластинки из BaF₂ толщиной около 1 мм [1]. Однако абсорбционные фильтры не допускают в процессе работы точной подстройки границ фильтрации, а также требуют охлаждения при работе с охлаждаемыми матричными приемниками. Поэтому в ряде случаев целесообразнее использовать фильтры на основе полного внутреннего отражения, поскольку эти фильтры не надо охлаждать и можно точно подстраивать по длине волны [2].

Приведем основные соотношения, описывающие аппаратную функцию ФУ. Можно показать, что $\text{tn}(\alpha, \text{dn}, \lambda)$ и $T_l(\alpha, \text{dn}, \lambda)$ — пропускание подобного интерферометра, соответственно, для излучения с поляризацией перпендикулярной плоскости падения и параллельной плоскости падения, зависят от угла падения α , расстояния между внутренними гранями dn и длины волны λ следующим образом:

$$\text{tn}(\alpha, \text{dn}, \lambda) = \frac{1}{1 + \frac{1}{4}(n(\lambda)^2 - 1)^2 \frac{\sin^2 h \left[2\pi \frac{\text{dn}}{\lambda} (\sin(\alpha)^2 - 1)^{\frac{1}{2}} \right]^2}{(1 + n(\lambda)^2) \cos(\alpha)^2 - \cos(\alpha)^4}}, \quad (1)$$

$$T_l(\alpha, \text{dn}, \lambda) = 1 / \left\{ 1 + \frac{1}{4}(\sin(\alpha)^2 - 1) + \frac{1}{n(\lambda)^2} \sin(\alpha)^2 \times \right. \\ \left. \times (n(\lambda)^2 - 1)^2 \frac{\sin^2 h \left[2\pi \frac{\text{dn}}{\lambda} (\sin(\alpha)^2 - 1)^{\frac{1}{2}} \right]^2}{n(\lambda)^2 \left(1 - \frac{1}{n(\lambda)^2} \sin(\alpha)^2 - (\sin(\alpha)^2 - 1) \right)} \right\}, \quad (2)$$

где $n(\lambda)$ — зависящий от длины волны коэффициент преломления германия [1];

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

Тогда пропускание для неполяризованного излучения $T_{np}(\alpha, \text{dn}, \lambda)$, падающего на интерферометр под углом α , равно:

$$T_{np}(\alpha, \text{dn}, \lambda) = \frac{T_l(\alpha, \text{dn}, \lambda) + \text{tn}(\alpha, \text{dn}, \lambda)}{2}. \quad (3)$$

Суммарное пропускание $Zn(\alpha, \text{dn}, \lambda)$ четырех установленных друг за другом интерферометров с расстояниями между пластинами $d1, d2, d3, d4$ для излучения, падающего на каждый интерферометр под углом $|\alpha|$, выражается следующим произведением:

$$Zn(\alpha, \text{dn}, \lambda) = T_l1(\alpha, d1, \lambda) \cdot T_l2(\alpha, d2, \lambda) \times \\ \times T_l3(\alpha, d3, \lambda) \cdot T_l4(\alpha, d4, \lambda). \quad (4)$$

На рис. 2, а показаны зависимости контуров пропускания от длины волны (аппаратной функции фильтрующего устройства, содержащего четыре установленных друг за другом интерферометра) $Zn(\alpha, \text{dn}, \lambda)$, рассчитанные для пучка, распространяющегося вдоль оптической оси устройства, при $|\alpha| = 4^\circ$ и следующих расстояниях между пластинами интерферометров: $Z1(\lambda)$ при $d1 = 4$ мкм; $Z2(\lambda)$ при $d1 = 4,5$ мкм; $Z3(\lambda)$ при $d1 = 5$ мкм; $Z4(\lambda)$ при $d1 = 5,5$ мкм. Во всех случаях $d2 = 2 \cdot d1, d3 = 3 \cdot d1$ и $d4 = 4 \cdot d1$.

На рис. 2, б показаны зависимости контуров пропускания от длины волны $Zn(\alpha, \text{dn}, \lambda)$, рассчитанные для пучка, распространяющегося вдоль оптической оси устройства, при $|\alpha| = 4^\circ$ и следующих расстояниях между пластинами интерферометров: $Z1(\lambda)$ при $d1 = 4$ мкм; $Z2(\lambda)$ при $d1 = 4,5$ мкм; $Z3(\lambda)$ при $d1 = 5$ мкм; $Z4(\lambda)$ при $d1 = 5,5$ мкм. Во всех случаях $d2 = d1, d3 = 3 \cdot d1$ и $d4 = 4 \cdot d1$.

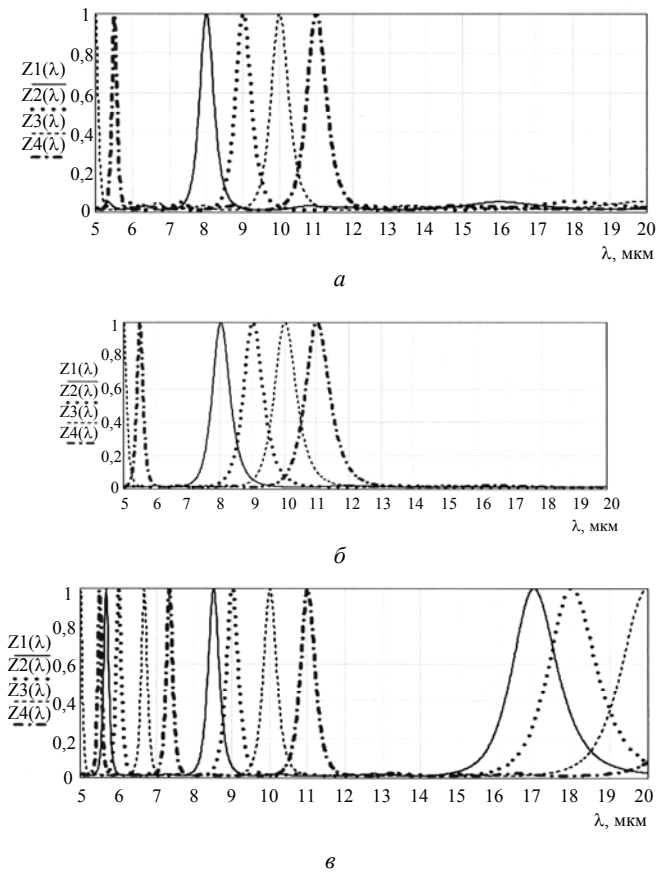


Рис. 2. Зависимости контуров пропускания ОС от длины волны

Из сравнения приведенных зависимостей 2, а и 2, б видно, что качество фильтрации выше у ФУ с расстояниями между пластинами интерферометров, при которых были рассчитаны зависимости, приведенные на рис. 2, б, поскольку в них практически отсутствуют боковые максимумы. Однако следует отметить, что при этом имеет место увеличение ширины контура фильтрации. В обоих случаях (эти случаи относятся к фильтрам первого порядка) требуется использование дополнительного фильтра, отсекающего излучение с длинами волн, меньшими 5,6 мкм.

На рис. 2, в показаны зависимости контуров пропускания от длины волны $Z_n(\alpha, d_n, \lambda)$, рассчитанные для пучка, распространяющегося вдоль оптической оси устройства, при $|\alpha| = 4^\circ$ и следующих расстояниях между пластинами интерферометров: $Z_1(\lambda)$ при $d_1 = 8,5$ мкм; $Z_2(\lambda)$ при $d_1 = 9$ мкм; $Z_3(\lambda)$ при $d_1 = 10$ мкм; $Z_4(\lambda)$ при $d_1 = 11$ мкм. Здесь во всех случаях $d_2 = d_1$, $d_3 = 2 \cdot d_1$ и $d_4 = 3 \cdot d_1$.

Видно, что увеличение расстояний между пластинами интерферометров в два раза приводит к соответствующему уменьшению ширины линии пропускания (т. е. к увеличению разрешающей способности устройства), однако при этом возникает необходимость в фильтрах, отсекающих не

только коротковолновое, но и длинноволновое излучение.

Устройство работает следующим образом. Пусть требуется произвести фильтрацию ИК-излучения, поступающего на матричное приемное устройство тепловизора. Для выделения излучения с выбранной длиной волны λ_m , принадлежащей рабочему спектральному диапазону устройства ($\lambda_1 \leq \lambda_m \leq \lambda_n$), устанавливают следующие расстояния между пластинами интерферометров, при которых происходит выделение этой длины волны: $d_1 = (\lambda_m/2)k$, $k = 1$ или 2 , $d_n = (n - 1)d_1$ или nd_1 , $\lambda_1 \leq \lambda_m \leq \lambda_n$. Например, для выделения излучения с длиной волны $\lambda_m = 10$ мкм можно установить любой из четырех возможных наборов расстояний между пластинами интерферометров:

Вариант 1. $Z_3(\lambda)$: $d_1 = 5$ мкм, $d_2 = 2 \cdot d_1$, $d_3 = 3 \cdot d_1$, $d_4 = 4 \cdot d_1$.

Вариант 2. $Z_3(\lambda)$: $d_1 = 5$ мкм, $d_2 = d_1$, $d_3 = 2 \cdot d_1$, $d_4 = 3 \cdot d_1$.

Вариант 3. $Z_3(\lambda)$: $d_1 = 10$ мкм, $d_2 = d_1$, $d_3 = 2 \cdot d_1$, $d_4 = 3 \cdot d_1$.

Вариант 4. $Z_3(\lambda)$: $d_1 = 10$ мкм, $d_2 = 2 \cdot d_1$, $d_3 = 3 \cdot d_1$, $d_4 = 4 \cdot d_1$.

Результаты расчетов аппаратных функций устройства для первых трех возможных вариантов расстояний см. на рис. 2.

Таким образом, из полихроматического пучка излучения, распространяющегося вдоль оптической оси (в пределах дифракционного угла, определяемого апертурным отверстием устройства), будет выделено излучение с длиной волны $\lambda_m = 10$ мкм и сфокусировано объективом на пиксел, находящийся в середине средней строки матричного приемника (см. рис. 1). При выбранных размерах пластин, параметрах объектива, размерах матрицы и кратности телескопа пучки с дифракционной расходимостью, распространяющиеся под углами $|\beta|$ к оптической оси устройства, пространственные моды [3] будут фокусироваться на оптически сопряженные с ними пикселы, расположенные в начале и конце первой и последней строк матрицы. Диаметр дифракционных пятен на пикселах будет около 24 мкм. Итак, любой пучок с дифракционной расходимостью, распространяющийся под углом к оптической оси системы, меньшим $|\beta|$, будет сфокусирован на оптически сопряженный с ним пиксел матрицы. Так как устройство фильтрует большое число пучков с дифракционной расходимостью, распространяющихся под различными углами к оптической оси, а интерферометры развернуты под углами 4° к оптической оси, углы падения пучков на пластины интерферометров различны и меняются в пределах от 0 до 8° . Это приводит к дополнительному (по

сравнению с расчетами для пучка, распространяющегося вдоль оси) уширению аппаратной функции и смещению максимума пропускания в сторону более коротких волн.

На рис. 3 показаны зависимости контуров пропускания (аппаратной функции) интерферометра $Z0(\lambda)$ и $Z1(\lambda)$, рассчитанные, соответственно, для случаев минимального (0°) и максимального (8°) углов падения пучков. Видно, что аппаратная функция фильтрации для пучков, падающих на интерферометры под разными углами, уширяется не более чем на 20 %, что вполне допустимо.

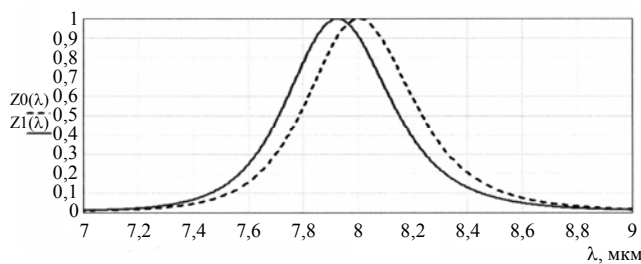


Рис. 3. Зависимости контуров пропускания интерферометра $Z0(\lambda)$ и $Z1(\lambda)$, рассчитанные, соответственно, для случаев минимального (0°) и максимального (8°) углов падения пучков

Определим максимальное число элементов изображения (число пространственных мод), которое может пропустить фильтрующее устройство.

Число пространственных мод (для $\lambda = 10$ мкм), пропускаемых фильтрующим устройством, можно определить [3] по следующей формуле:

$$M = \frac{1}{4} \pi^2 D_l^2 \frac{\beta^2}{\lambda^2}. \quad (4)$$

При $D_l = 7,5$ см и $\beta = 4^\circ$ фильтрующее устройство может пропустить не менее $6,7 \cdot 10^5$ мод, что в несколько раз больше, чем требуется для приема изображения современной ИК-матрицей. Таким образом, фильтрующее устройство не будет ограничивать число точек изображения, регистрируемое ОС, и при этом позволит получать изображения на любой из избранных длин волн в рассматриваемом рабочем спектральном диапазоне.

Заключение

Достоинства и недостатки, присущие предложенному типу ОС:

достоинства — слабая зависимость аппаратной функции от длины волны и принципиальная возможность увеличивать спектральное разрешение путем увеличения числа интерферометров;

недостатки — необходимость (в большинстве случаев) в дополнительных фильтрах, отсекающих коротковолновое излучение, и необходимость в прецизионной перестройке расстояний между пластинами всех интерферометров для фильтрации заданной длины волны.

Литература

1. Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И., Петров И. П. // Оптические материалы для инфракрасной техники. — М.: Наука, 1965.
2. 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. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/159.pdf>.
3. Гальярди Р. М., Карп Ш. // Оптическая связь. — М.: Связь, 1978.

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2006 г.

Imaging spectrometer on the basis of Fabry-Perot interferometers and staring thermal imager

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

The filtering device on the basis multiplex Fabry—Perot and imaging spectrometer keeping this device and a staring thermal imager is offered. The calculations of parameters of this filtering device and imaging spectrometer are conducted. It is expected, that the similar devices can be suitable for imagery of objects in given narrow spectral ranges.

* * *