

**Московский Государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана**

В. Я. Колючкин, Г. М. Мосягин

Тепловизионные приборы и системы

Рекомендовано редсоветом МГТУ им. Н. Э. Баумана в качестве учебного
пособия

Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана

2002г.

УДК 621.384.3

Рецензенты: Машников Н. Н., Рязанов В. Н.

Колючкин В. Я., Мосягин Г. М.
Тепловизионные приборы и системы. Учебное пособие. М.:
МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. с. с илл.

Учебное пособие посвящено вопросам рационального проектирования тепловизионных приборов, предназначенных для наблюдения объектов в инфракрасной области спектра по их собственному излучению.

Рассмотрены принципы получения тепловизионного изображения, функциональные схемы тепловизоров и методы расчета их основных параметров и характеристик. Рассмотрены методы проектирования на системотехническом и схемотехническом уровнях, а также методы и аппаратура аттестационного контроля тепловизионных приборов.

Учебное пособие может быть рекомендовано для студентов и аспирантов технических университетов по оптическим и другим специальностям, а также для разработчиков оптико-электронной литературы.

Илл. . Библиогр. назв.-10.

УДК. 621.384.3

Редакция заказной литературы

Василий Яковлевич Колючкин, Геннадий Михайлович Мосягин.

Тепловизионные приборы и системы.

Заведующий редакцией

Редактор

Корректор

Подписано к печати

Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. 107005. Москва, 2-я Бауманская, 5.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Принципы получения тепловизионного изображения и классификация тепловизионных приборов.....	4
2. Элементы теории теплового излучения.....	5
2.1. Характеристики и параметры оптического излучения. Законы теплового излучения.....	5
2.2. Характеристики и параметры излучения реальных объектов Распространение излучения в атмосфере.....	7
3. Модельное представление тепловизоров.....	8
3.1. Иерархия процесса проектирования и модельного представления ОЭП.....	8
3.2. Модельное описание тепловизоров, как объектов проектирования на системотехническом уровне.....	9
3.2.1. Математические модели источников сигналов.....	9
3.2.2. Математическая модель оптической системы.....	15
3.2.3. Математическая модель системы оптико-механического сканирования...	16
3.2.4. Математическая модель ПИ.....	17
3.2.5. Математическая модель электронного тракта и ВКУ.....	19
3.3. Анализ тепловизора с параллельным сканированием и параллельной обработкой сигналов.....	20
3.4 Модельное представление зрительной системы человека-оператора при наблюдении тепловизионных изображений.....	22
4. Проектирование тепловизионных приборов.....	25
4.1. Предварительный габаритно-энергетический расчет.....	25
4.2. Целевая функция проектирования тепловизоров на системотехническом уровне проектирования.....	25
4.3 Проектирование на схемотехническом уровне.....	26
4.3.1. Проектирование оптической системы.....	26
4.3.2. Методика проектирования систем оптико-механического сканирования....	27

4.3.3. Обзор типов ПИ и систем охлаждения.....	28
5. Методы и аппаратура технологического и аттестационного контроля тепловизоров.....	30
Список литературы.....	32

ВВЕДЕНИЕ.

Тепловизионные приборы предназначены для наблюдения объектов по их собственному излучению. Принцип действия приборов этого типа основан на преобразовании излучения инфракрасного (ИК) диапазона в видимый диапазон длин волн излучения. Спектральный диапазон, в котором работают тепловизоры, определяется интервалами длин волн в области максимума энергии излучения наблюдаемых объектов в соответствующих окнах прозрачности атмосферы. Обычно это интервалы длин волн от 3,5 до 5,5 мкм или от 8 до 13,5 мкм. Современные тепловизоры позволяют обнаруживать объекты, имеющие температурные контрасты до десятых и даже сотых долей градусов, формируют изображение в телевизионном или близком к телевизионному стандартах и находят, в связи с этим широкое применение в промышленности, медицине и военном деле.

Первым тепловизионным прибором, появившимся в конце 20-х годов, был эвапорограф [1], принцип действия которого основан на визуализации фазового рельефа масляной пленки, образующейся на поверхности мембраны при проекции на противоположную сторону этой мембраны теплового изображения. Эвапорографы имели низкую пороговую чувствительность, большую инерционностью и давали изображение с очень малым контрастом.

В 40-е годы наметились две тенденции в развитии тепловизионных приборов. К первой группе приборов относятся тепловизоры, в которых для преобразования оптического сигнала ИК-диапазона в электрический сигнал используется принцип оптико-механического сканирования (ОМС), а ко второй группе приборов – тепловизоры с электронным сканированием. В тепловизорах первого типа используются одноэлементные или многоэлементные ИК приемники излучения (ПИ) мгновенного действия, а в тепловизорах второго типа в качестве ПИ используются ИК видиконы, пириконы, а сейчас уже и матричные приемники излучения, так называемые фокальные матрицы, работающие в режиме накопления зарядов и основанные на различных физических принципах.

1. Принципы получения тепловизионного изображения и классификация тепловизионных приборов.

Большинство используемых в настоящее время тепловизионных приборов построены по первому принципу, но в связи с успехами в технологии производства матричных приемников излучения появились приборы без оптико-механического сканирования, которые не только не уступают, но даже превосходят приборы первого типа по потребительским свойствам [1,2,3].

На рис.1.1 представлена обобщенная функциональная схема тепловизора с фокальной ИК матрицей.

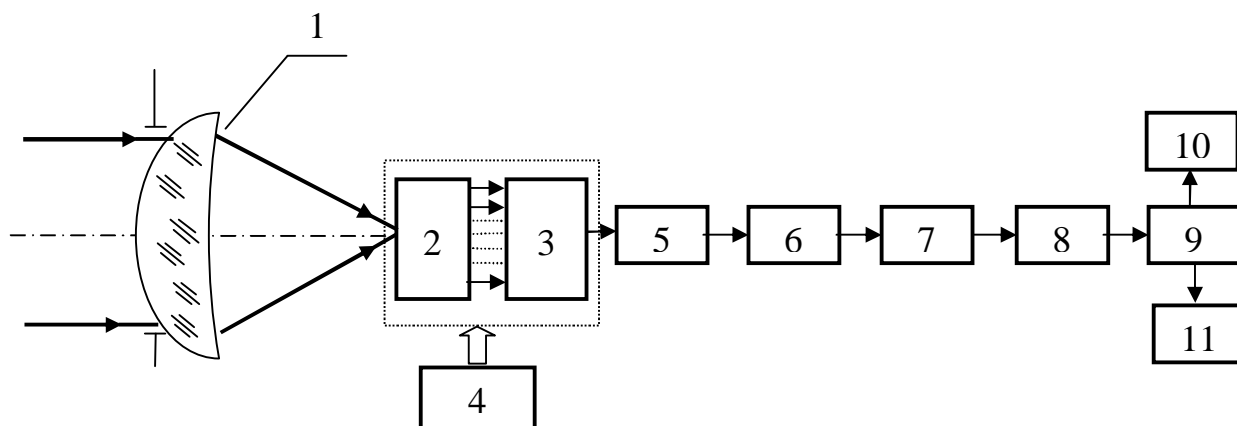


Рис. 1.1 Обобщенная функциональная схема тепловизора с фокальной матрицей: 1 – оптическая система; 2 – фокальная матрица с предусилителями; 3 – мультиплексор; 4 – система охлаждения; 5 – корректор неоднородности характеристик чувствительных элементов; 6 – аналого-цифровой преобразователь; 7 – цифровой корректор неоднородности; 8 – корректор неработающих ячеек; 9 – формирователь изображения; 10 – дисплей; 11 – цифровой выход.

Фокальные ИК матрицы могут иметь размерность 128x128, 256x256 и даже 512x512 элементов при размере этих чувствительных элементов 30x30 мкм². Фокальные матрицы изготавливаются как функционально законченные фотоприемные устройства (ФПУ), включающие систему охлаждения, предусилители, мультиплексор, корректор неоднородности характеристик

чувствительных элементов, аналого-цифровой преобразователь, блоки цифровой обработки и формирователь выходных сигналов. Сигналы с выхода такого ФПУ могут передаваться на видеоконтрольное устройство (ВКУ) телевизионного типа либо в цифровом виде в блоки цифровой обработки.

На рис.1.2 представлена обобщенная функциональная схема тепловизора с системой (ОМС).

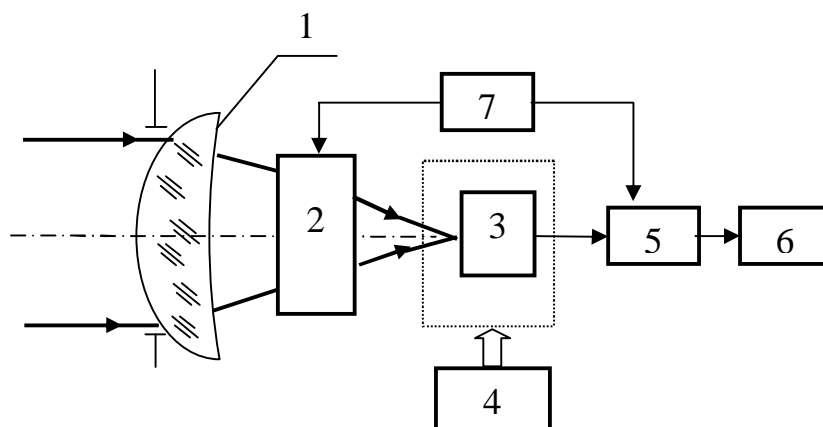


Рис. 1.2 Обобщенная функциональная сканирующего тепловизора: 1 – оптическая система; 2 – блок оптико-механического сканирования; 3 – приемник излучения; 4 – система охлаждения; 5 – электронный тракт; 6 – видеоконтрольное устройство; 7 – система синхронизации.

Система ОМС, в общем случае, должна обеспечивать обзор пространства предметов - сканирование, как в направлении строк (по горизонту), так и по кадру (в вертикальном направлении), что иллюстрируется рис.1.3.

Существует множество схем сканирующих тепловизоров, различающихся методами сканирования, обработки сигналов и представления выходного изображения. Эти различия, во многом, обусловлены топологией ПИ, используемых в тех или иных приборах. В частности, в тепловизорах с системами ОМС могут использоваться одноэлементные, а также многоэлементные ПИ в виде линеек или матриц (см.рис.1.4). Кроме этого, в качестве видеоконтрольного устройства, помимо широко применяемых ТВ-мониторов, используются различного рода устройства с линейками светодиодов и оптико-механическими системами развертки.

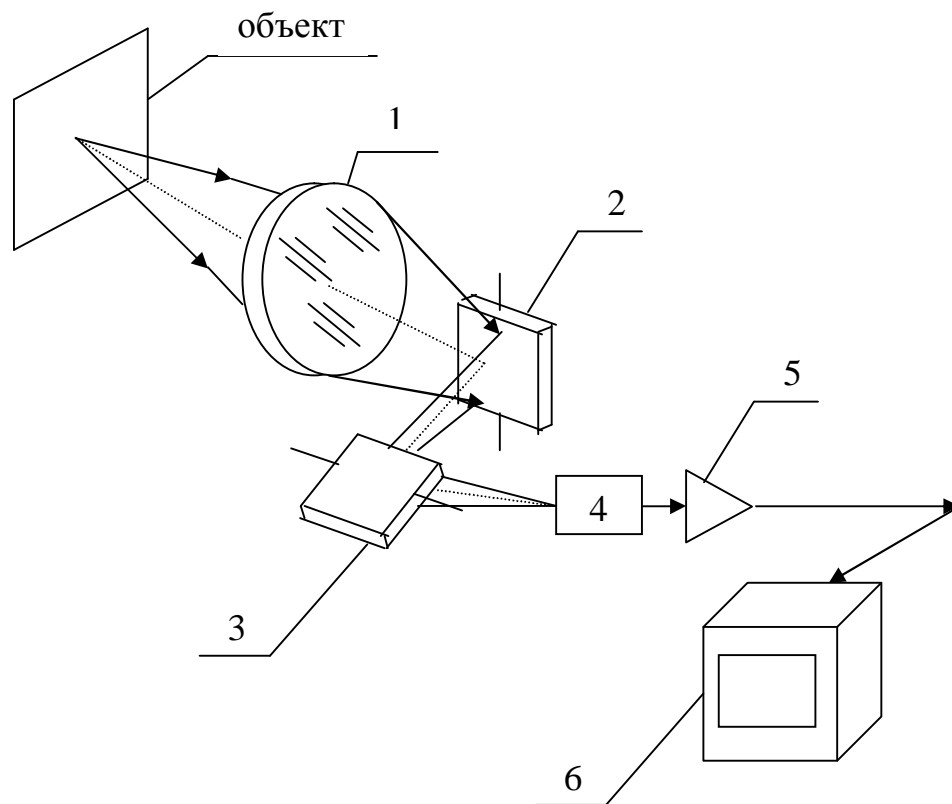


Рис. 1.3 Функциональная схема тепловизора со сканированием по строкам и кадру: 1 – объектив; 2 и 3 – сканирующие зеркала; 4 – приемник излучения; 5 – электронный тракт; 6 – видеоконтрольное устройство.

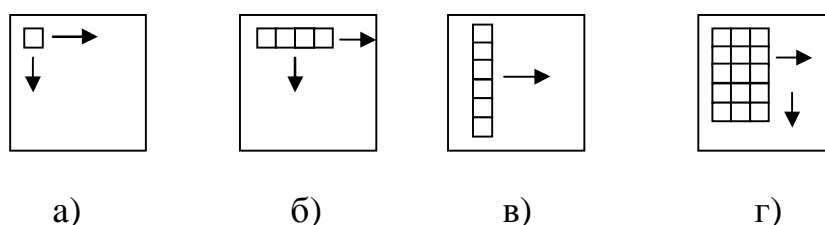


Рис. 1.4 Методы сканирования: а) - сканирование одноэлементным ПИ; б) – последовательное сканирование линейкой чувствительных элементов; в) – параллельное сканирование линейкой чувствительных элементов; г) параллельно-последовательное сканирование матричным ПИ.

Различают следующие методы сканирования пространства предметов и развертки при формировании выходного изображения: последовательное, параллельное и параллельно-последовательное. При последовательном сканировании или развертке осуществляется изменение направления визирной оси и

преобразование сигнала поочередно вдоль каждой из строк изображения с последующим переходом на каждую следующую строку. Такое сканирование или развертка могут осуществляться при использовании одноэлементных ПИ или СД, а также ПИ или СД в виде линеек, элементы которых ориентированы вдоль строки.

При параллельном сканировании или развертке площадки ПИ или СД, выполненные в виде линейки, ориентированы перпендикулярно направлению движения визирной оси. При параллельно-последовательном сканировании или развертке используются ПИ и СД в виде линеек или матриц, а обзор поля производится последовательно по зонам.

В соответствии с наиболее целесообразными сочетаниями типов сканирования, обработки сигналов и развертки тепловизионные приборы с системами ОМС строят на основе следующих 4-х основных принципов:

- параллельное сканирование, параллельная обработка видеосигналов и параллельная развертка (рис.1.5);

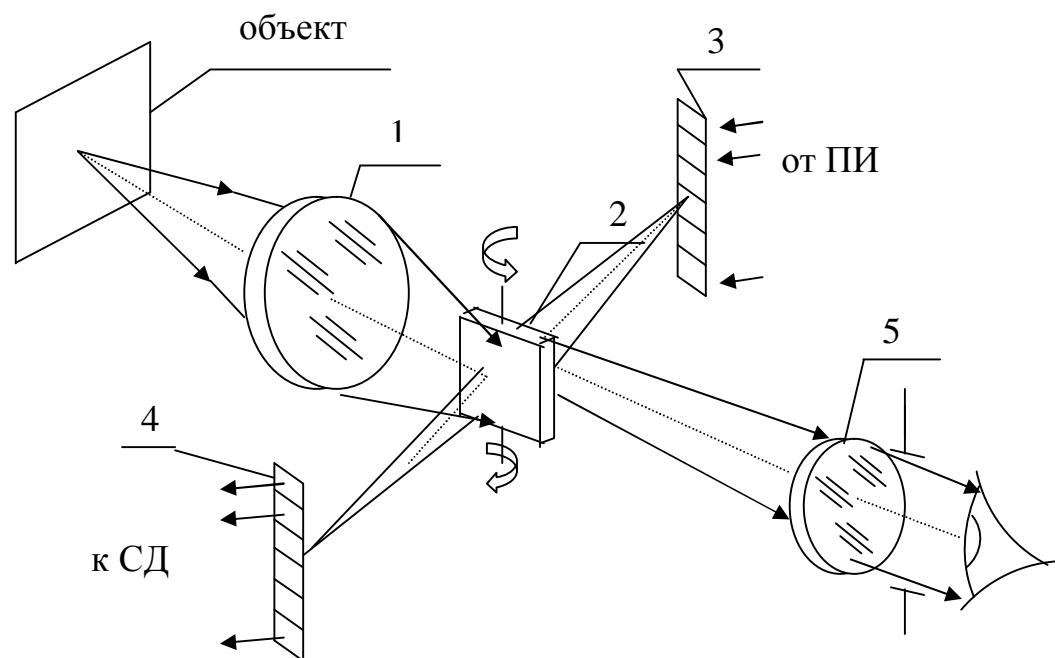


Рис. 1.5 Тепловизор с параллельным сканированием и параллельной разверткой изображения: 1 – объектив; 2 – сканирующее зеркало; 3 – линейка светодиодов; 4 – линейка ПИ; 5 – окуляр.

- параллельное сканирование, параллельная обработка сигналов с последующим их преобразованием (мультиплексированием) для вывода изображения на ТВ-монитор (рис.1.6);

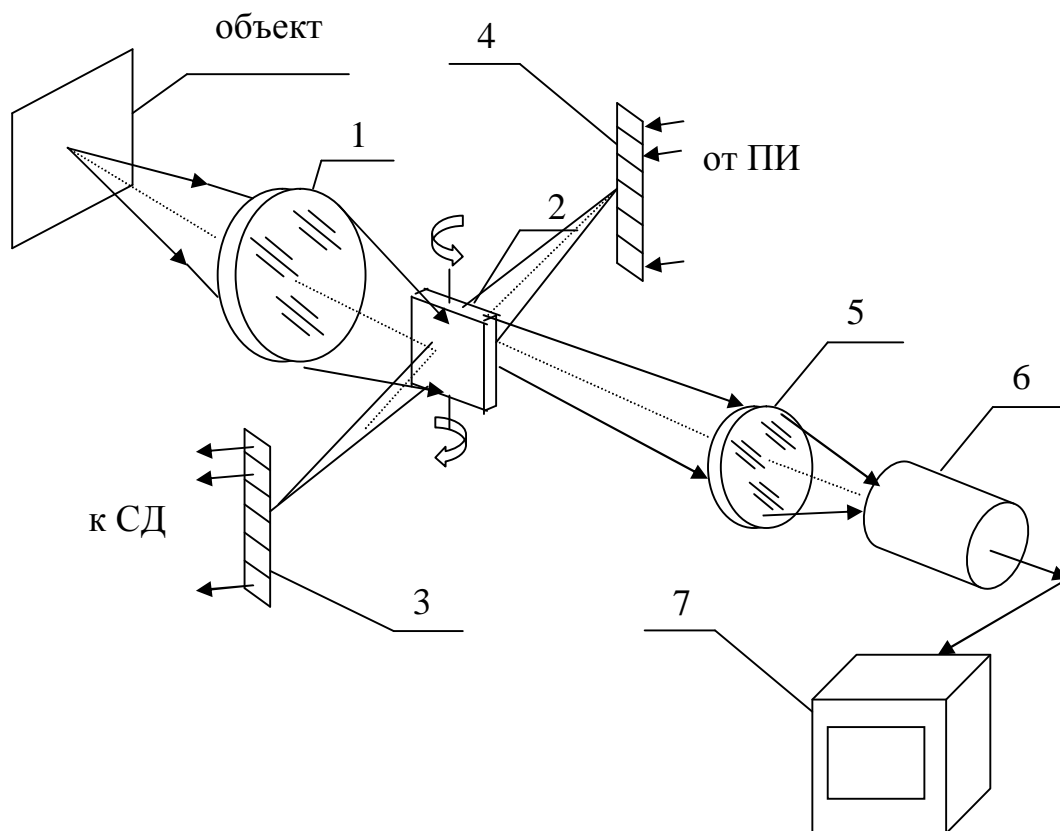


Рис. 1.6 Тепловизор с параллельным сканированием и параллельной обработкой сигналов с последующим мультиплексированием для вывода изображения на ТВ монитор: 1 – объектив; 2 – сканирующее зеркало; 3 – линейка ПИ; 4 – линейка светодиодов; 5 – проекционный объектив; 6 – передающая телевизионная трубка (матрица ПЗС); 7 – ТВ монитор.

- параллельно-последовательное сканирование и развертка с параллельной обработкой сигналов (рис.1.7);

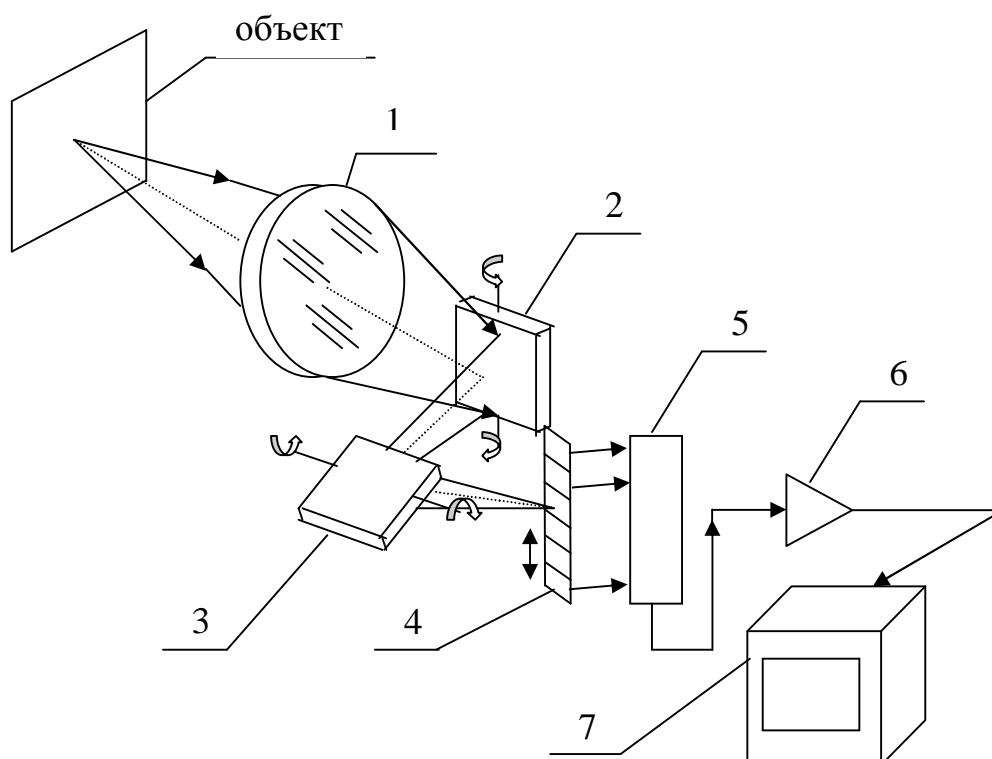


Рис. 1.7 Тепловизор с параллельно-последовательным сканированием, параллельной обработкой сигналов и параллельно-последовательной разверткой изображения: 1 – объектив; 2 – сканирующее зеркало; 3 – матрица светодиодов; 4 – матрица ПИ; 5 – окуляр.

- последовательная обработка сигналов с преобразованием сигнала для вывода на ТВ-монитор (рис.1.8).

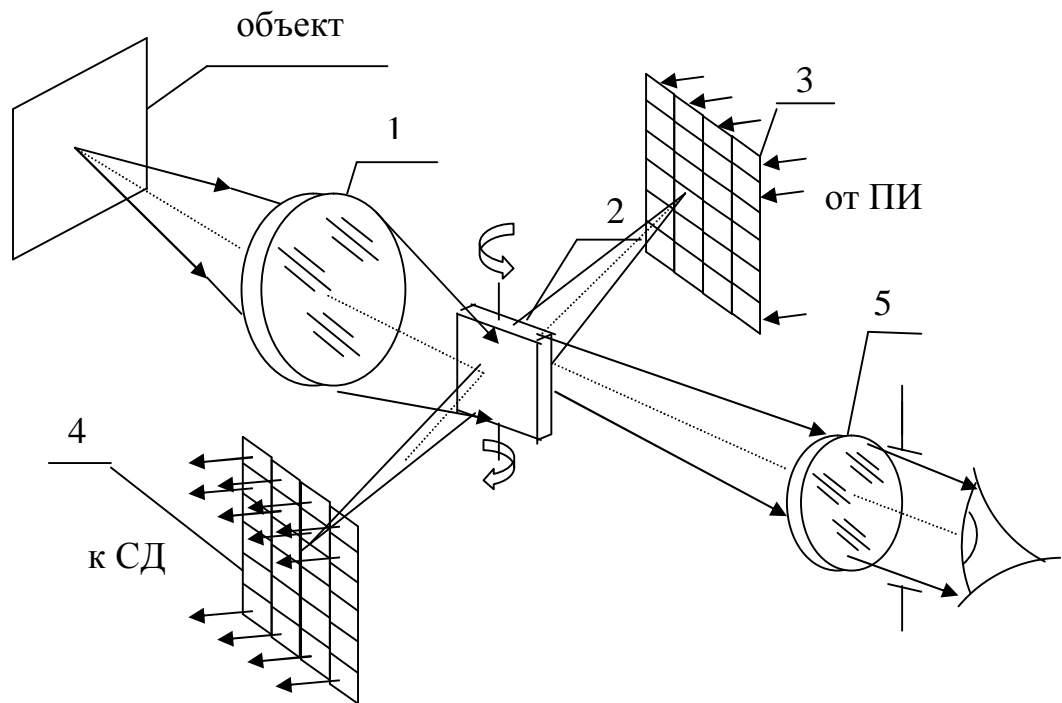


Рис. 1.8 Тепловизор с последовательным сканированием линейкой ПИ и преобразованием сигналов для вывода изображения на ТВ монитор: 1 – объектив; 2 и 3 – сканирующие зеркала; 4 – линейка ПИ; 5 – линии задержки с сумматором; 6 – видеоусилитель; 7 – ТВ монитор.

2. Элементы теории теплового излучения

2.1. Характеристики и параметры оптического излучения. Законы теплового излучения.

Перед тем, как ввести термины оптического излучения, рассмотрим геометрические соотношения, существующие между излучающей и освещаемой поверхностями. Эти соотношения при излучении иллюстрируются на рис.2.1, где A - излучающая поверхность, dA - элемент излучающей поверхности, r - расстояние от точки O элемента излучающей поверхности dA до точки C элемента освещаемой поверхности dA_1 .

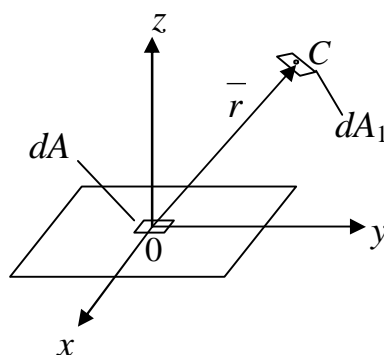


Рис. 2.1 Геометрические соотношения при излучении.

Доля энергии излучения, попадающей на поверхность A_1 от элемента dA излучающей поверхности, определяется в пределах конуса, имеющего основание на поверхности A_1 и вершину в точке O . Количественно этот конус характеризуется телесным углом

$$\Omega = \iint_{A_1} \frac{dA_1}{r^2} = \iint_{a b} \sin b \cdot da \cdot db. \quad (2.1)$$

Оптическое излучение характеризуют следующими физическими величинами[4]:
Энергия излучения $W = \langle W \rangle$ [Вт*с] или [Дж]- энергия, переносимая излучением;
Поток излучения $\Phi = \langle W \rangle / T$ [Вт] - физическая величина, определяемая отношением энергии, переносимой излучением, ко времени переноса, значительно превышающему период электромагнитных колебаний;

Энергетическая яркость излучения $L = d^2\Phi / dAd\Omega \cos\beta$ [Вт/(м²ср)] - физическая величина, определяемая отношением потока излучения, проходящего в рассматриваемом направлении в пределах малого телесного угла $d\Omega$ через участок поверхности dA , к произведению этого телесного угла, площади участка и косинуса угла β между рассматриваемым направлением и нормалью к участку dA ;

Сила излучения $J = d\Phi/d\Omega = L \cos\beta dA$ [Вт/ср] - физическая величина, определяемая отношением потока излучения, распространяющегося от источника в рассматриваемом направлении внутри малого телесного угла, к этому телесному углу;

Энергетическая светимость $M = d\Phi/dA = \int_{\Omega} L \cos b \cdot d\Omega$ [Вт/м²] - физическая величина, определяемая отношением потока излучения от рассматриваемого малого участка поверхности к площади этого участка;

Облученность $E = d\Phi/dA$ [Вт/м²] - физическая величина, определяемая отношением потока излучения, падающего на малый участок поверхности, к площади этого участка.

Все перечисленные физические величины могут рассматриваться как спектральные, т.е. зависящие от длины волны, или как интегральные. В первом случае эти величины имеют смысл спектральных плотностей.

Закон Кирхгофа.

Для теплового источника на данной длине волны и при определенной температуре отношение величины, характеризующей излучательную способность, к величине, характеризующей поглощательную способность, есть величина постоянная, равная излучательной способности абсолютно черного тела (АЧТ), а именно,

$$\frac{e(l;T)}{a(l;T)} = \frac{e^{\wedge}(l;T)}{a^{\wedge}(l;T)} = \dots = f_{el}(l;T). \quad (2.2)$$

На практике тепловое излучение реальных источников характеризуют коэффициентом теплового излучения (коэффициентом черноты)

$$e(l;T) = \frac{M_{el}(l;T)}{M_{el}^0(l;T)}, \quad (2.3)$$

где $M_{el}^0(l;T)$ - спектральная энергетическая светимость АЧТ. Если $e(l;T) = const$, то тепловой источник называется серым.

Закон Планка.

Этот закон характеризует распределение спектрального излучения АЧТ при заданной температуре T , а именно,

$$M_{el}^0(l;T) = c_1 l^{-5} [\exp(\frac{c_2}{lT}) - 1]^{-1}, \quad (2.4)$$

где $c_1 = 3,74 * 10^4$ [Вт*мкм⁴/см²],

$c_2 = 1,4388 * 10^4$ [мкм*К].

Закон Вина.

Определяет положение экстремума функции Планка

$$l_M = \frac{2898}{T^0 K} \text{ [мкм]}. \quad (2.5)$$

Второй закон Вина.

Определяет значение спектральной светимости АЧТ на длине волны l_M , а именно,

$$M_{elM}^0 = 1,2864 * 10^{-15} T^5 \text{ [Вт/(см}^2\text{ мкм)]}. \quad (2.6)$$

Закон Стефана-Больцмана.

Интегральная энергетическая светимость АЧТ в диапазоне длин волн от 0 до ∞ равна

$$M_e^0(T) = sT^4 \text{ [Вт/см}^2\text{]}. \quad (2.7)$$

Закон Ламберта.

Сила излучения J идеального диффузного излучателя пропорциональна косинусу угла между нормалью к излучающей поверхности и направлением наблюдения, т.е.

$$J(a, b) = J_0 \cos b. \quad (2.8)$$

Для плоского ламбертовского излучателя справедливо также следующее соотношение

$$M = pL. \quad (2.9)$$

2.2. Характеристики и параметры излучения реальных объектов.

Распространение излучения в атмосфере.

Собственное излучение реальных тел отличается от излучения АЧТ. Мерой отличия служит спектральный коэффициент направленного теплового излучения

$$e(I, T, a, b) = \frac{L_{el}(I, T, a, b)}{L_{el}^0(I, T)}. \quad (2.10)$$

Реальные тепловые источники делят на селективные и неселективные-"серые", для которых $e(I, T, a, b) = e(T, a, b)$. Наибольшей селективностью излучения обладают газообразные вещества. У твердых веществ селективность излучения значительно меньше, причем, чем выше шероховатость поверхности, тем меньше селективность, как по длинам волн, так и по направлению.

Излучение реальных тел складывается из собственного излучения и отраженного. В частности, для диффузных тел справедливо соотношение

$$M_{el}(I) = e(I, T)M_{el}^0(I, T) + [1 - e(I, T)]E_{el}(I). \quad (2.11)$$

При увеличении температуры объекта коэффициент теплового излучения растет, но зависимость эта очень слабая. В большинстве практических случаев в пределах поля зрения тепловизоров яркость меняется незначительно. Поэтому обычно принимают, что коэффициент теплового излучения для заданного ракурса наблюдаемого объекта не зависит от углов визирования. На основании этого при энергетических расчетах используют следующую формулу для определения потока излучения от наблюдаемого объекта

$$\begin{aligned}\Phi_{el}(I) &= \int_{\Omega} J_{el}(I, a, b) d\Omega \approx e(I) \int_{\Omega} \int_{A_o} L_{el}^0(I, T, x, y) \cos b \cdot dA \cdot d\Omega \approx \\ &\approx e(I) L_{el}^0(I, T) A_o \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \cos b \cdot \sin b \cdot da \cdot db = pe(I) L_{el}^0(I, T) A_o \sin^2 S_A.\end{aligned}\quad (2.12)$$

Для интегральной оценки потока излучения реальных тел удобно использовать понятие радиационной температуры T_r , которая определяется как температура АЧТ, при которой интегральная светимость реального излучателя в заданном спектральном интервале равна интегральной светимости излучения АЧТ с температурой T_r в том же спектральном интервале, т.е.

$$\int_{I_1}^{I_2} e(I, T) M_{el}^0(I, T) dI = \int_{I_1}^{I_2} M_{el}^0(I, T_r) dI. \quad (2.13)$$

Если $e(I, T) \cong e(I)$, то для интервала длин волн $\Delta I = 0 \dots \infty$ на основе закона Стефана-Больцмана получим следующее выражение для радиационной температуры

$$T_r = \sqrt[4]{e(T)T} \quad (2.14)$$

При прохождении оптического излучения через атмосферу оно ослабляется из-за молекулярного поглощения и рассеяния, а также рассеяния на аэрозолях. Наибольшее влияние на ослабление излучения в ИК диапазоне оказывает молекулярное поглощение и рассеяние на трехатомных молекулах таких, как вода, углекислый газ и озон. Полосы поглощения водяного пара с центром 6.3 мкм и углекислого газа с центрами 2.7 и 15 мкм ограничивают пропускание в диапазоне длин волн 2-20 мкм, определяя положение двух окон прозрачности: 3,5-5 и 8-14 мкм. Для большинства применений тепловизионных систем окно прозрачности в диапазоне длин волн 8-14 мкм является более предпочтительным.

Согласно закону Бугера спектральный коэффициент пропускания определяется по формуле

$$t_a(I) = \exp[-g(I)L_o] \quad (2.15)$$

где $g(I) = s(I) + k(I)$ - показатель ослабления;

$s(I) = s_m(I) + s_a(I)$ - показатель рассеяния;

$k(I) = k_m(I) + k_a(I)$ - показатель молекулярного и аэрозольного поглощения.

Подробнее методику расчета коэффициента пропускания атмосферы см. в [1,2,3].

3. Модельное представление тепловизоров

3.1. Иерархия процесса проектирования и модельного представления ОЭП

При решении задач проектирования в инженерной практике широко используют методы математического моделирования. Суть этих методов заключается в абстрагировании от реального объекта и оперировании с его образом, адекватно отражающим интересующие проектанта свойства этого реального объекта. В формализованном виде эти свойства описываются математическими символами, отображениями и операторами. При модельном описании объектов проектирования, в том числе и тепловизионных приборов, существует определенная иерархия. Высшим иерархическим уровнем является функционально-логический, на котором рассматривается прибор в составе некоторого комплекса программно-аппаратных средств, выполняющих некоторую задачу. На этом уровне синтезируется общий алгоритм функционирования, включая обработку сигналов для выделения полезной информации, а также алгоритмы управления и требования к отдельным подсистемам комплекса.

Нижеследующим уровнем проектирования является системотехнический, на котором ставятся и решаются задачи проектирования каждой из подсистем комплекса. На системотехническом уровне каждая из подсистем, выполняющая определенную функцию представляется в виде структурной схемы, состоящей из элементов примерно одинаковой степени сложности с точки зрения математических операторов, описывающих преобразование сигнала каждым из этих элементов. Обобщенная схема ОЭП на системотехническом уровне представлена на рис.3.1.

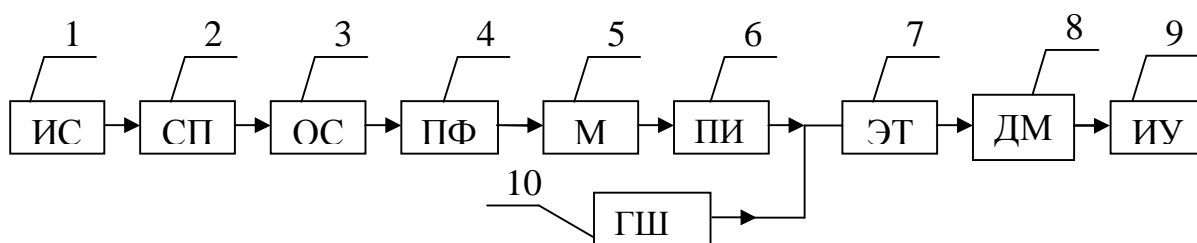


Рис. 3.1 Обобщенная схема ОЭП, как объекта проектирования на системотехническом уровне проектирования: 1 – источник сигнала; 2 – слой пространства; 3 – оптическая система; 4 – пространственный фильтр; 5 – модулятор;

6 – приемник излучения; 7 – электронный тракт; 8 – демодулятор; 9 – исполнительное устройство; 10 – генератор шума.

На системотехническом уровне синтезируется структурная схема ОЭП, как объекта проектирования, и в процессе решения задач анализа и параметрической оптимизации на основе принятого модельного описания определяются значения переменных проектирования - конструктивных параметров. Результаты проектирования на данном уровне проектирования позволяют сформулировать ТЗ для проектирования на нижеследующем схемотехническом уровне отдельно оптической системы, модулятора, электронной части, демодулятора и исполнительного устройства.

Модельное описание каждого из перечисленных звеньев ОЭП представляется в виде принципиальных схем с соответствующим математическим описанием функционирования элементов и схем в целом. Как и на любом из иерархических уровне на схемотехническом уровне ставятся и решаются задачи синтеза, анализа и параметрической оптимизации. Результатом проектирования является конкретная принципиальная схема с определенными конструктивными параметрами ее элементов.

Если элементов с требуемыми параметрами нет в продаже, то на еще более низком - компонентном уровне ставится, если это экономически целесообразно, задача проектирования отдельных компонентов.

В связи с вышеизложенным при проектировании тепловизоров, используемых, как приборы наблюдения, в состав комплекса следует включать человека-оператора с соответствующим его модельным описанием. Вопрос модельного описания зрительной системы человека-оператора будет рассмотрен ниже, а сейчас рассмотрим особенности модели тепловизора на системотехническом уровне.

3.2. Модельное описание тепловизоров, как объектов проектирования на системотехническом уровне

Ниже по порядку будут рассмотрены особенности математического описания отдельных элементов структурной схемы тепловизора, как объекта проектирования, представленной на рис.3.1.

3.2.1. Математические модели источников сигналов

Источниками сигналов для тепловизионных систем являются объекты, которые требуется обнаружить и распознать. Но объекты всегда наблюдаются на каком-либо фоне. Поэтому, необходимо сформулировать не только математические модели полезных сигналов - сигналов от объектов, но также математические модели мешающих, фоновых сигналов.

Математические модели сигналов от объектов

Сделаем ряд допущений, позволяющих упростить математические выражения, описывающие сигналы от объектов:

- сигналы от объектов описываются, как приращение значений их яркости относительно математического ожидания значений яркости фона, что равносильно описанию объектов, наблюдаемых на равномерном фоне;
- объекты и фон являются серыми тепловыми излучателями и, соответственно, распределением температуры $T_o(x, y)$ по поверхности объекта и средним значением температуры \bar{T}_Φ фона;
- разница температуры объекта и фона невелика, т.е.

$$\max |T_o(x, y) - \bar{T}_\Phi| \ll \bar{T}_\Phi. \quad (3.1)$$

Полезный сигнал от объектов можно определить как приращение пространственного распределения спектральной яркости поверхности объекта и спектральной яркостью равномерного фона (см. рис. 3.2), т.е.

$$\Delta L_I(x, y, I) = e \{L_I^\circ [I, T_o(x, y)] - L_I^\circ (I, \bar{T}_\Phi)\}. \quad (3.2)$$

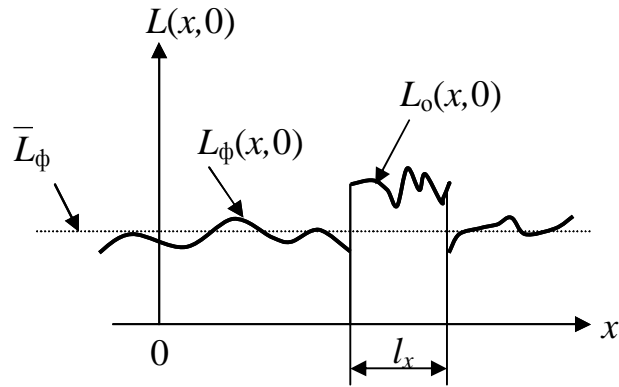


Рис. 3.2 Пояснение к модельному описанию источников оптических сигналов

Если в выражении (3.2) с учетом допущения (3.1) первый член в фигурных скобках разложить в ряд Тейлора и ограничиться первыми двумя членами, то полезный сигнал от объектов можно представить следующим образом

$$\Delta L_l(x, y, I) = e \left. \frac{\partial L_l^0(I, T)}{\partial T} \right|_{T=\bar{T}_\phi} \Delta T(x, y) = \Delta L_l(I) L_H(x, y), \quad (3.3)$$

причем

$$\Delta L_l(I) = e \left. \frac{\partial L_l^0(I, T)}{\partial T} \right|_{T=\bar{T}_\phi} \Delta T_M, \quad (3.4)$$

$$L_H(x, y) = \Delta T(x, y) / \Delta T_M. \quad (3.5)$$

В зависимости от пространственного распределения приращения $\Delta T(x, y)$ температуры различают следующие типы моделей сигналов от объектов:

1. Объект протяженный, равномерный и не вписывается в поле зрения тепловизора (полуплоскость). Тогда

$$\Delta L_l(x, y, I) = \Delta L_l(I) Y(x - x_0), \quad (3.6)$$

где x_0 - координата границы полуплоскости, описываемой функцией Хевисайда.

Пространственно-частотный спектр такого объекта определяется как

$$\Delta \tilde{L}_l(I, n_x, n_y) = \Delta L_l(I) \cdot \frac{1}{2} \left[d(n_x, n_y) + \frac{1}{pn_x} \right] \cdot \exp(-i2pn_x x_0). \quad (3.7)$$

2. Объект малоразмерный, "точечный".

Тогда

$$\Delta L_l(I, x, y) = A_o \Delta L_l(I) \cdot d(x - x_0, y - y_0) = \Delta J_l(I) \cdot d(x - x_0, y - y_0), \quad (3.8)$$

где A_o - площадь объекта;

x_o, y_o - координаты объекта;

ΔT - усредненный по площади объекта температурный перепад относительно температуры фона.

Пространственно-частотный спектр такого объекта равен

$$\Delta\tilde{L}_l(l, n_x, n_y) = \Delta L_l(l) \cdot 1(n_x, n_y). \quad (3.9)$$

3. Объект в виде ограниченного по размерам l_x и l_y прямоугольника с равномерным пространственным распределением, а именно

$$\Delta L_l(x, y, l) = \Delta L_l(l) \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{l_x}, \frac{y}{l_y}\right), \quad (3.10)$$

где a, b - размеры прямоугольника.

Пространственно-частотный спектр такого объекта равен

$$\Delta\tilde{L}_l(l, n_x, n_y) = A_o \Delta L_l(l) \cdot \text{sinc}(pl_x n_x) \cdot \text{sinc}(pl_y n_y). \quad (3.11)$$

4. Объект, ограниченный по размерам с произвольным пространственным распределением яркости (см. рис.3.3).

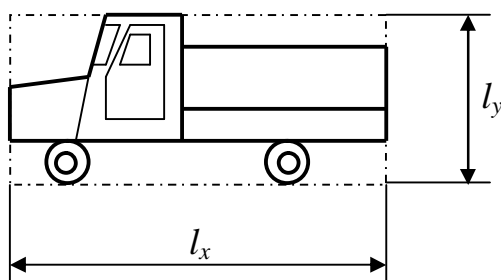


Рис. 3.3 Пример объекта с ограниченными размерами

Чтобы упростить и унифицировать описание объектов с произвольным распределением яркости, воспользуемся теоремой Котельникова для частотной области. Двумерный Фурье-спектр сигнала $\Delta L_l(x, y, l)$, ограниченного в пределах

прямоугольной области $\text{rect}(\frac{x}{l_x}, \frac{y}{l_y})$, можно представить интерполяционным

полиномом вида

$$\Delta \tilde{L}_l(I, n_x, n_y) = \Delta L_l(I) \sum_{m, n = -\infty}^{\infty} \tilde{L}_H(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y}) \cdot \text{sinc}[pl_x(n_x - \frac{m}{l_x})] \cdot \text{sinc}[pl_y(n_y - \frac{n}{l_y})]. \quad (3.12)$$

Если вычислить обратное преобразование Фурье от выражения (3.12), то получим следующее выражение, описывающее сигнал от объекта, с произвольным распределением яркости и ограниченного по своим размерам

$$\Delta L_l(I, x, y) = \frac{\Delta L_l(I)}{A_o} \sum_{m, n = -\infty}^{\infty} \left| \tilde{L}_H(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y}) \right| \text{rect}(\frac{x}{l_x}, \frac{y}{l_y}) \exp\{i[2p(\frac{xm}{l_x} + \frac{yn}{l_y}) + j(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y})]\}. \quad (3.13)$$

Если воспользоваться свойством центральной симметрии пространственно-частотного спектра сигнала, то выражение (3.13) можно также представить в несколько ином виде

$$\Delta L_l(I, x, y) = \frac{\Delta L_l(I)}{A_o} \text{rect}(\frac{x}{l_x}, \frac{y}{l_y}) \cdot \{ \tilde{L}_H(0,0) + 2 \sum_{m, n = 1}^{\infty} \left| \tilde{L}_H(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y}) \right| \cdot \cos[2p(\frac{xm}{l_x} + \frac{yn}{l_y}) + j(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y})] \} \quad (3.14)$$

Из полученного выражения следует, что сигнал от любого финитного объекта, т.е. ограниченного по области его ненулевого описания, можно представить в виде разложения в базисе гармонических функций, ограниченных в пределах этой же области. Возможность такого представления является следствием избыточности континуального описания сигналов от реально существующих объектов.

Существует гипотеза, согласно которой изображение, формируемое в зрительной системе человека, на этапе вторичной обработки с целью уменьшения избыточности информации, раскладывается именно в таком базисе.

Математические модели фоновых образований

Реализации фоновых сигналов представляют собою случайные поля, которые описываются в терминах яркости излучения многомерными случайными функциями $L_{\Phi}(\mathbf{r})$, определенными, в самом общем случае, в координатном пространстве $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_k)^T$.

Очевидно, что фоновые поля могут существенно отличаться по своим статистическим характеристикам распределения яркости излучения, как, например, фон, образованный звездным небом, и аэроландшафт при подстилающей лесной местности. Тем не менее, множество $B = \{b_i\}$ фоновых полей можно разделить на подмножества $\Phi_k \in B$ таким образом, что любую из реализаций $L_{\Phi_i}(\mathbf{r})$ фоновых полей можно отнести к определенному ансамблю случайных полей $\Phi_k = \{L_{\Phi_i}(\mathbf{r})\}$, каждый из которых полностью характеризуется некоторой многомерной плотностью вероятности $w_{nk}(L_{\Phi_1}, \dots, L_{\Phi_n}; \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_n)$.

Тогда математическую модель фона, как источника оптического сигнала можно представить в виде множества $A_{\Phi} = \{\Phi_k \in B \rightarrow w_{nk}(L_{\Phi_1}, \dots, L_{\Phi_n}; \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_n)\}$, описывающего сигналы типовых ансамблей фона.

Описание реально существующих фоновых полей в таком виде при условии, что их реализации являются функциями многих аргументов, а размерность n плотности вероятности ничем не ограничена, связано с практически непреодолимыми трудностями. Поэтому обычно делают ряд допущений, существенно упрощающих проблему математического моделирования фоновых полей.

Во первых, будем рассматривать фоновые поля как статические, пренебрегая возможной зависимостью распределения яркости в реализациях фона от времени, и ламбертовские, т.е. имеющие одинаковую яркость по направлениям распространения излучения. При таких допущениях реализации фоновых полей описываются функциями трех переменных $L_{\Phi_i}(x, y, I)$. В некоторых частных случаях, которые будут рассмотрены ниже, $L_{\Phi_i}(x, y, I)$ можно представить как функции с разделяющимися переменными. Представление флуктуаций яркости фона в таком виде существенно упрощает задачу математического моделирования фоновых полей. Но, к сожалению, такое допущение не всегда оправдано.

Во вторых, фоновые образования можно разделить на ряд типовых случайных полей, которые с некоторой степенью приближения обладают свойствами таких наиболее изученных случайных процессов, как гауссовские и марковские. Удобство такого описания заключается в том, что n -мерные плотности вероятности для этих случайных процессов выражаются через двумерные плотности вероятности.

В третьих, принимается допущение о том, что фоновые образования являются однородными в широком смысле случайными полями, т.е. их математические ожидания не зависят от координат, а ковариационная функция зависит только разности аргументов.

Тогда фоновые случайные поля, как и сигналы от объектов, удобно рассматривать в виде флуктуаций яркости излучения **Error! Objects cannot be created from editing field codes.** относительно значения математического ожидания **Error! Objects cannot be created from editing field codes.**, т.е.

$$\Delta L_{\Phi}(\vec{r}) = L_{\Phi}(\vec{r}) - M\{L_{\Phi}(\vec{r})\} = L_{\Phi}(\vec{r}) - \bar{L}_{\Phi}(I), \quad (3.15)$$

причем

$$\bar{L}_{\Phi}(I) = eL^0(I, \bar{T}_{\Phi}). \quad (3.16)$$

Важно отметить, что при таком допущении можно строить математические модели фона в рамках корреляционной теории. Согласно этой теории полное описание случайных полей задается их математическим ожиданием и ковариационной функцией. Корреляционная теория строго справедлива для однородных гауссовских и марковских случайных процессов и полей, многомерные плотности вероятности которых, выражаются через двумерные.

Несмотря на кажущуюся ограниченность применения корреляционной теории, в большинстве практически интересных случаев математическое моделирование фоновых образований осуществляют на основе именно этой теории. Главным образом, это оправдывается ограниченностью возможностей получения экспериментальных данных о многомерной статистике фона, в связи с чем, экономически целесообразно экстраполировать закон распределения на основе экспериментально полученной корреляционной функции и в качестве первого приближения пользоваться нормальным законом.

Рассмотрим теперь математические модели типичных фоновых образований при сделанных выше допущениях.

Пусть для фона, кроме перечисленных выше, справедливы приближения теплового источника. К этому типу фоновых образований можно отнести распределение яркости излучения сельских, городских и др. ландшафтов в среднем и дальнем ИК диапазонах длин волн. Тогда распределение флуктуаций яркости фона обусловлено флуктуациями пространственного распределения температуры этого фона. Если амплитуды температурных флуктуаций невелики по отношению к среднему уровню температуры фона \bar{T}_Φ , то без существенной потери точности сигналы, описывающие флуктуации яркости фона, можно представить, функциями с разделяющимися переменными, а именно,

$$\Delta L_\Phi(x, y, I) = \Delta L_{\Phi I}(I) L_H(x, y), \quad (3.17)$$

$$\text{где: } \Delta L_{\Phi I}(I) = e \Delta T_M \left. \frac{\partial L_I^0(I, T)}{\partial T} \right|_{T=\bar{T}_\Phi} - \quad (3.18)$$

- функция, описывающая спектральное распределение яркости флуктуаций фона;

$$L_H(x, y) = \frac{\Delta T(x, y)}{T_M} - \quad (3.19)$$

- нормированная функция, описывающая распределение пространственных флуктуаций яркости, обусловленных флуктуациями пространственного распределения температуры $\Delta T(x, y) = T(x, y) - \bar{T}_\Phi$.

Как следует из анализа формул (3.18) и (3.19), зависимость флуктуаций яркости теплового фона от длины волны λ носит регулярный характер и, в первом приближении, определяется функцией контрастной яркости $\frac{\partial L_I^0(I, T)}{\partial T}$ при заданном значении средней температуры фона \bar{T}_Φ , а также величиной флуктуаций температурного перепада ΔT_M . Поэтому статистические свойства флуктуаций амплитуды спектральной яркости теплового фона можно описать одномерной плотностью вероятности $w_L(\Delta L; I)$ (здесь λ рассматривается как параметр), вид которой зависит от плотности вероятности значений флуктуаций температуры $w_T(\Delta T)$. Если флуктуации температуры ΔT распределены по гауссовскому закону,

то одномерная плотность вероятности амплитуды спектральной яркости также гауссовская и имеет вид

$$w_L(\Delta L; I) = \frac{1}{s_I \sqrt{2p}} \exp\left(-\frac{\Delta L^2}{2s_I^2}\right), \quad (3.20)$$

где $s_I = s_T e^{\left. \frac{\partial L_I^0(I; T)}{\partial T} \right|_{T=\bar{T}_\Phi}} -$ (3.21)

- среднеквадратическое отклонение флуктуаций спектральной яркости фона на длине волны λ ;

s_T - среднеквадратическое отклонение флуктуаций температуры ΔT фона.

Тогда в рамках корреляционной теории пространственно-спектральные флуктуации теплового фона можно описать корреляционной функцией, которую можно представить как

$$K(\Delta x, \Delta y; I) = s_I^2 K_H(\Delta x, \Delta y), \quad (3.22)$$

где $K_H(\Delta x, \Delta y)$ - нормированная корреляционная функция пространственного распределения случайного стационарного поля яркости фона.

Из экспериментальных исследований наземных аэроландшафтов известно, что для изотропных фоновых образований нормированную корреляционную функцию можно аппроксимировать функциями вида

Error! Objects cannot be created from editing field codes.

(3.23)

где $\Delta j = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{L_D} -$ (3.24)

- приращение угловых координат в пространстве предметов, измеряемых обычно в миллирадианах (мрад) при наблюдении на известной дальности L_D ;

a - коэффициент аппроксимации;

n_j - коэффициент аппроксимации, имеющий смысл эффективной пространственной частоты и измеряемый в мрад^{-1} .

Если распределение флуктуаций яркости фона не является изотропным, то можно использовать аппроксимацию вида

$$K_H(\Delta j) = \exp(-a|\Delta j|) \cdot \cos[2p(n_{j_x} \Delta j_x + n_{j_y} \Delta j_y)], \quad (3.25)$$

где n_{j_x} и n_{j_y} - коэффициенты аппроксимации, имеющие смысл эффективных пространственных частот в направлениях X и Y, соответственно.

Важно отметить, что в рамках предложенной модели описания излучения фонов, как тепловых источников, для большинства типовых ландшафтов, вид функций (3.23), (3.25) и конкретизирующих описание моделей коэффициентов аппроксимации можно считать инвариантными в пределах суточного интервала и даже времени года, т.к. при колебаниях температуры, в основном будет изменяться значение среднеквадратического отклонения s_l . Это значение довольно просто рассчитать, используя формулу (3.21), если известны пределы колебаний температуры от T_{\min} до T_{\max} .

Например, для гауссовского закона распределения флуктуаций температуры, среднеквадратическое отклонение флуктуаций яркости равно

$$s_l = e \frac{T_{\max} - T_{\min}}{6} \frac{\partial L_l^0(I, T)}{\partial T} \Big|_{T=\bar{T}_\phi}, \quad (3.26)$$

а для бинарного закона -

$$s_l = e \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \frac{\partial L_l^0(I, T)}{\partial T} \Big|_{T=\bar{T}_\phi}. \quad (3.27)$$

Следует отметить, что бинарный закон достаточно хорошо описывает распределение значений яркости для такого типа фона, как облачное небо. При этом нормированная корреляционная функция может быть аппроксимирована зависимостью вида

$$K_H(\Delta j) = \exp(-a|\Delta j|). \quad (3.28)$$

В заключение отметим, что модель фоновых образований используется в задачах оценки эффективности тепловизионных систем при селекции и распознавании объектов на неравномерном фоне. Это сложная и до конца не решенная задача, требующая знания теории статистических решений, а также теории зрительного восприятия сложных текстур.

3.2.2. Математическая модель оптической системы

На системотехническом уровне математическая модель оптической системы (ОС) представляется в рамках скалярной теории дифракции как пространственный фильтр, характеризуемый функцией рассеяния (импульсным откликом) $H_o(x', y')$ или оптической передаточной функцией (ОПФ) $\tilde{H}_N(n_x, n_y)$. Кроме этого, геометрические и энергетические преобразующие свойства ОС описываются спектральным коэффициентом пропускания $t_o(I)$, диаметром входного зрачка D_o , а также фокусным расстоянием f_o . Перечисленные характеристики и параметры при проектировании рассматриваются как переменные, которые требуется определить.

Оператор преобразования ОС входного сигнала в выходной описывается с точностью до множителей интегралом суперпозиции, а именно, распределение полезной составляющей спектральной освещенности в плоскости изображения x', y' ОС равно

$$\Delta E(x', y', I) = t_a(I) t_o(I) p \sin^2 s'_A \Delta L_I(I, \frac{x'}{b}, \frac{y'}{b}) \otimes H_{ol}(x', y'), \quad (3.29)$$

где: $\Delta L_I(I, \frac{x'}{b}, \frac{y'}{b})$ – распределение спектральной яркости пространства предметов,

приведенное к плоскости изображения;

s'_A – задний апертурный угол ОС;

β – линейное увеличение ОС;

\otimes – символическое обозначение математического оператора свертки.

На начальной стадии проектирования требуется определить ориентировочные значения переменных проектирования. Методика такого расчета будет изложена ниже, а сейчас рассмотрим общие соображения по синтезу вида функции рассеяния или ОПФ ОС.

Иногда в качестве первого приближения принимают, что ОС не имеет aberrаций, а качество формируемого ОС изображения ограничено лишь дифракцией на выходном зрачке (дифракционно ограниченная ОС). В этом случае функция рассеяния для ОС с круглым зрачком имеет вид

$$H_o(x', y') = \left[\frac{2J_1(u)}{u} \right]^2, \quad (3.30)$$

где

$$u = \frac{pD}{If'_o} \sqrt{x'^2 + y'^2}, \quad (3.31)$$

а ОПФ -

$$\tilde{H}_{NI}(n_r) = \frac{2}{p} \left[\arccos\left(\frac{n_r}{n_M}\right) - \frac{n_r}{n_M} \sqrt{1 - \left(\frac{n_r}{n_M}\right)^2} \right], \quad (3.32)$$

где $n_M = \frac{D_o}{If'_o}$ - предельная пространственная частота;

$$n_r = \sqrt{n_x^2 + n_y^2}.$$

Более удобной для аппроксимации полихроматической функции рассеяния ОС является двумерная функция Гаусса

$$H_o(x', y') = \frac{1}{2pr_o^2} \exp\left(-\frac{x'^2 + y'^2}{2r_o^2}\right) \quad (3.33)$$

где r_o - эффективный радиус пятна рассеяния ОС.

ОПФ в этом случае имеет вид

$$\tilde{H}_N(n_x, n_y) = \exp[-2p^2 r_o^2 (n_x^2 + n_y^2)]. \quad (3.34)$$

3.2.3. Математическая модель системы оптико-механического сканирования

Система ОМС осуществляет изменение направления визирной оси тепловизора в пространстве поля обзора в процессе преобразования оптического сигнала в электрический. На системотехническом уровне система ОМС характеризуется законом сканирования, который задается параметрическими уравнениями вида

$$\begin{cases} x_v = x_v(t) \\ y_v = y_v(t), \end{cases} \quad (3.35)$$

в соответствии с которыми осуществляется обзор пространства предметов. На системотехническом уровне проектирования абстрагируются от конкретной схемной

реализации, а преобразование сигнала, осуществляемое системой ОМС, в общем случае, описывается как линейное преобразование типа свертки, т.е.

$$\Delta E_{1l}(x^{\wedge}-x_v, y^{\wedge}-y_v) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta E_l(x, h) H_{ck}[(x^{\wedge}-x_v) - x, (y^{\wedge}-y_v) - h] dx dh, \quad (3.36)$$

где $H_{ck}(x^{\wedge}-x_v, y^{\wedge}-y_v)$ – импульсный отклик системы ОМС.

Если система ОМС не вносит линейных искажений в сигнал, то импульсный отклик равен

$$H_{ck}(x^{\wedge}, y^{\wedge}; x_v, y_v) = d(x^{\wedge}-x_v, y^{\wedge}-y_v). \quad (3.37)$$

В простейшем случае линейный закон сканирования в пределах одного кадра можно представить как

$$\begin{cases} x_v = \text{rect}\left(\frac{t}{T_k}\right) V_x t \\ y_v = \text{rect}\left(\frac{t}{T_k}\right) V_y t, \end{cases} \quad (3.38)$$

где V_x и V_y – скорости сканирования в направления X и Y.

При последовательном циклическом считывании изображения (см. рис.3.4) закон сканирования может быть представлен системой параметрических уравнений вида

$$\begin{cases} x_v = \{ [\text{rect}\left(\frac{t}{T_1}\right) V_x t] \otimes \frac{1}{T_c} \text{comb}\left(\frac{t}{T_c}\right) \} \text{rect}\left(\frac{t}{T_2}\right) \otimes \frac{1}{T_k} \text{comb}\left(\frac{t}{T_k}\right) \\ y_v = \{ [\text{rect}\left(\frac{t}{T_1}\right) \otimes \frac{1}{T_c} \text{comb}\left(\frac{t}{T_c}\right)] V_y t \} \text{rect}\left(\frac{t}{T_2}\right) \otimes \frac{1}{T_k} \text{comb}\left(\frac{t}{T_k}\right), \end{cases} \quad (3.39)$$

где T_1 – время сканирования по строке;

T_c – период сканирования по строке;

T_2 – время сканирования по кадру;

T_k – период следования кадров.

Параметр, определяющий эффективность системы сканирования, называется коэффициентом использования $-h$. Коэффициент использования определяет долю «полезного» времени, непосредственно используемого на считывание и преобразование оптического сигнала в электрический, и рассчитывается по формуле

$$h = \frac{T_1 T_2}{T_c T_k}. \quad (3.40)$$

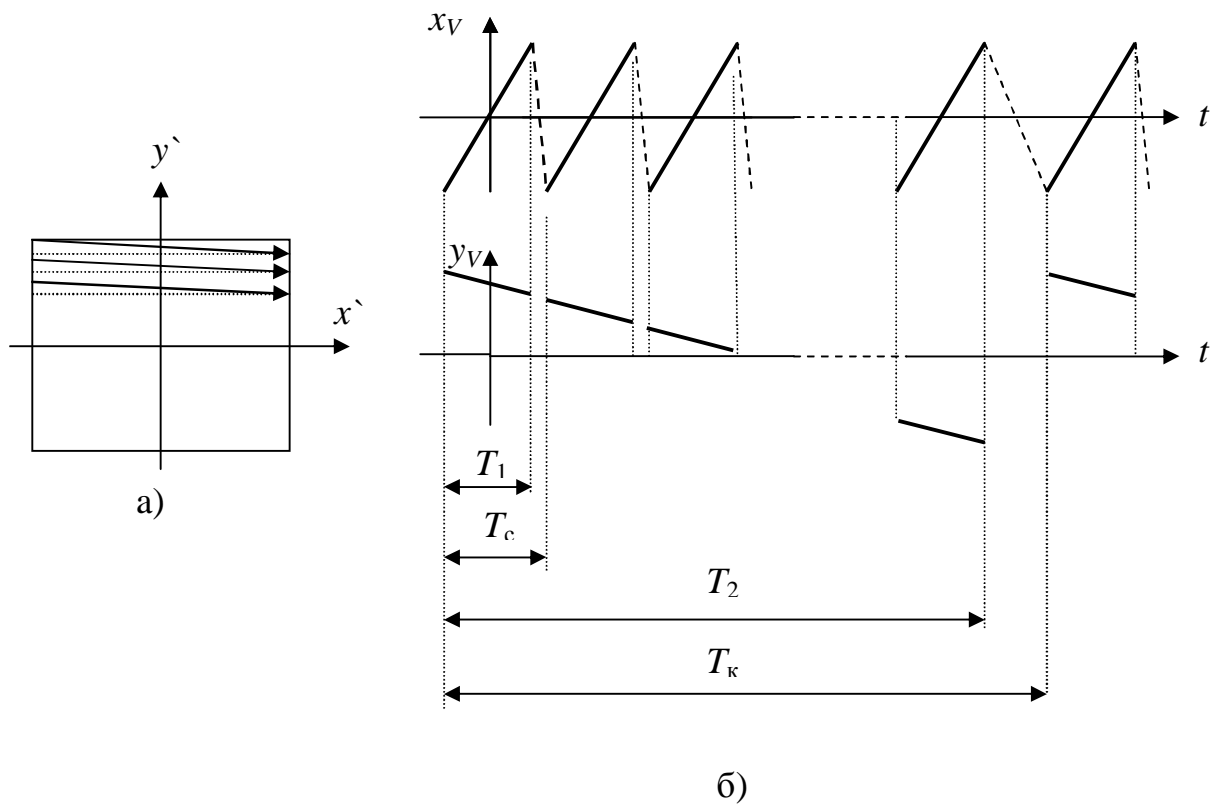


Рис. 3.4 Последовательное циклическое сканирование: а) траектория сканирования в плоскости анализа; б) графики параметрических кривых сканирования по соответствующим координатам плоскости анализа.

Следует иметь в виду, что в телевизорах сканирующего типа в процессе преобразования входного сигнала осуществляется его модуляция. В частности, это связано с тем, что при сканировании в интервалы времени между циклами «полезного» сканирования производится обнуление считываемого сигнала. Говорят также, что сигнал «гасится на время обратного хода». Указанная модуляция обычно осуществляется в электронном тракте. В модельном представлении эта операция может рассматриваться как умножение сигнала на некоторую модулирующую функцию $m(t)$. Для рассмотренного выше примера системы ОМС с последовательным законом сканирования модулирующая функция может быть представлена как

$$m(t) = [\text{rect}(\frac{t}{T_1}) \otimes \frac{1}{T_c} \text{comb}(\frac{t}{T_c})] \text{rect}(\frac{t}{T_2}) \otimes \frac{1}{T_k} \text{comb}(\frac{t}{T_k}) \quad (3.41)$$

3.2.4. Математическая модель ПИ

В тепловизионной технике в основном применяются одноэлементные и многоэлементные ПИ в виде линеек и матриц, работающие на различных физических принципах. Обзор типов ПИ с указанием их конкретных параметров и характеристик приведен ниже. В данном разделе рассматриваются ПИ с общих позиций их модельного описания.

Как известно, ПИ осуществляют преобразование оптического сигнала в электрический сигнал. Основной характеристикой такого преобразования для ПИ, работающих в ИК диапазоне длин волн излучения, является спектральная энергетическая чувствительность $S(I)$, измеряемая в [В/Вт] или [А/Вт]. Спектральную энергетическую чувствительность удобно представлять в виде

$$S(I) = S_{IM} s_{\text{омн}}(I), \quad (3.42)$$

где S_{IM} – значение спектральной энергетической чувствительности на длине волны I_M , соответствующей максимальной чувствительности;

$s(I)$ – относительная спектральная чувствительность.

Пороговую чувствительность ПИ принято оценивать обнаружительной способностью D_{IM}^* , которая определяется, как

$$D_{IM}^* = S_{IM} \sqrt{\frac{A_{nu} \Delta n}{S_{uu}^2}} \quad (3.43)$$

где A_{nu} – площадь чувствительного элемента ПИ;

S_{uu}^2 – дисперсия шума чувствительного элемента ПИ в полосе Δn пропускания электронного тракта;

Таким образом, уровень минимального обнаруживаемого сигнала определяется дисперсией аддитивного шума ПИ. Более полной характеристикой шумовых свойств ПИ является спектр мощности шума. На рис. 3.5 представлена типовая характеристика спектра мощности шума ПИ на основе HgCdTe, охлаждаемого до температуры $T_{\text{охл}} = 77^\circ \text{K}$.

В современных тепловизионных системах считывание изображения осуществляется непосредственно чувствительными площадками ПИ. С этих позиций ПИ можно рассматривать как пространственный фильтр, характеризуемый импульсным откликом или передаточной функцией. Если чувствительные элементы ПИ имеют форму прямоугольников с размерами a и b , то эти характеристики, соответственно, представляются как

$$H_{nu}(x', y') = \frac{1}{ab} \operatorname{rect}\left(\frac{x'}{a}, \frac{y'}{b}\right) \quad (3.44)$$

$$\tilde{H}_{nu}(n_x, n_y) = \operatorname{sinc}(pn_x a) \cdot \operatorname{sinc}(pn_y b) \quad (3.45)$$

По способам регистрации сигналов во времени различают ПИ непрерывного действия и ПИ с накоплением сигналов. Присущие ПИ непрерывного действия инерционные свойства описываются частотной характеристикой $\tilde{H}_t(n)$, которая достаточно точно аппроксимируется функцией вида

$$\tilde{H}_t(n) = \frac{1}{1 + i2pnt_{nu}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2pnt_{nu})^2}} \exp[-iarctg(2pnt_{nu})], \quad (3.46)$$

где t_{nu} – постоянная времени.

ПИ с накоплением сигналов, которые, как правило, представляют собою фокальные матрицы, характеризуются параметром t_H – временем накопления (интегрирования) сигнала, а также периодом считывания T_k этого накопленного сигнала. Эти параметры, по существу, характеризуют ширину фильтрующего окна и период дискретизации по временной координате. Таким образом, сигнал на выходе матричного ПИ, как и в тепловизорах с системами ОМС, подвергается фильтрации и амплитудно-импульсной модуляции по временной координате.

Важным свойством многоэлементных ПИ, является то, что, помимо пространственной фильтрации оптического сигнала, в них производится также дискретизация этого сигнала по пространственным координатам. Если ПИ представляет собою линейку чувствительных элементов, то дискретизация осуществляется по одной координате, если ПИ матричный, то – по двум координатам. Процесс дискретизации в модельном описании можно рассматривать как амплитудно-импульсную модуляцию, которая математически описывается

операцией умножения исходного сигнала на модулирующий сигнал. Таким образом, в тепловизорах с многоэлементными ПИ сигнал подвергается модуляции как по временной, так и по пространственной координатам. Для варианта не сканирующего тепловизора с матричным ПИ модулирующая функция имеет вид

$$m(t) = \frac{1}{T_k} \text{comb}\left(\frac{t}{T_k}\right) \cdot \frac{1}{T_x} \text{comb}\left(\frac{x}{T_x}\right) \cdot \frac{1}{T_y} \text{comb}\left(\frac{y}{T_y}\right) \quad (3.47)$$

где T_x и T_y - периоды дискретизации сигнала по координатам x и y , соответственно,

а

T_k - период дискретизации во времени (период следования кадров).

Обобщая вышеизложенные преобразования, осуществляемые системой ОМС и ПИ, часть функциональной схемы тепловизора, включающие эти элементы, в модельном описании на системотехническом уровне можно представить в виде структурной схемы, изображенной на рис. 3.6.

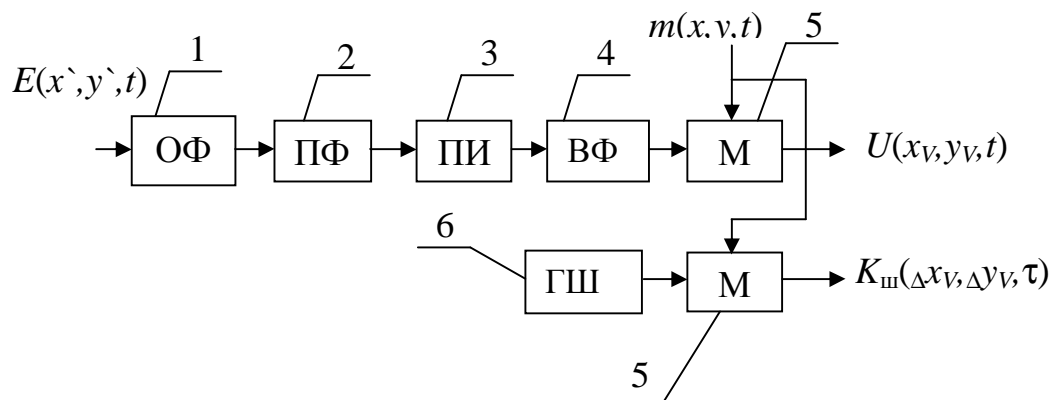


Рис. 3.6 Структурная схема модельного описания системы сканирования и приемника излучения: 1 – оптический фильтр; 2 – пространственный фильтр; 3 – идеализированный ПИ; 4 – временной фильтр; 5 – модулятор; 6 – генератор шума.

Данная схема включает такие структурные элементы, как оптический, пространственный и временной фильтры, модулятор, генератор шума, а также некоторый идеализированный ПИ, осуществляющий преобразование оптического сигнала, описываемого в терминах интегрального потока излучения, в электрический сигнал.

3.2.5. Математическая модель электронного тракта и ВКУ

Электронный тракт (ЭТ) в общем случае включает аналоговую и цифровую части. Как правило, аналоговая часть ЭТ рассматривается в линейном приближении. В связи с этим ее характеризуют импульсным откликом $H_s(t)$ или передаточной функцией $\tilde{H}_s(n)$. На начальной стадии проектирования обычно электронный тракт рассматривают как апериодическое звено с передаточной функцией

$$\tilde{H}_s(n) = \frac{1}{1 + i2pnt_s} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2pnt_s)^2}} \exp[-i \arctg(2pnt_s)], \quad (3.48)$$

где t_s – постоянная времени ЭТ, определяемая как время разложения одного элемента изображения по формуле

$$t_s = \frac{nabh}{2W_x 2W_y n_k}, \quad (3.49)$$

здесь: n – количество чувствительных элементов в ПИ;

a и b – угловые размеры чувствительных элементов ПИ;

$2W_x$ и $2W_y$ – угловые размеры поля зрения тепловизора;

$n_k = \frac{1}{T_k}$ – частота кадров.

Преобразование сигнала из аналогового вида в цифровой вид связано с параметрическим и нелинейным преобразованиями, осуществляемыми в аналого-цифровом преобразователе (АЦП). Разрядность АЦП выбирается такой, чтобы уровень квантования был меньше уровня аддитивного шума на выходе аналоговой части ЭТ. Если это условие выполняется, то можно пренебречь нелинейностью преобразования, осуществляемого АЦП, а эффект квантования учесть путем введения источника дополнительного аддитивного шума – шума квантования. Шум квантования можно рассматривать как гауссовский с дисперсией, равной

$$S_k^2 = \frac{\Delta^2}{12}, \quad (3.50)$$

где Δ – так называемый, шаг квантования.

Параметрическое преобразование в АЦП - это дискретизация по координате t , которую, как и в предыдущих случаях, следует рассматривать как амплитудно-импульсную модуляцию.

Для отображения информации на экране ВКУ требуется преобразовать цифровой сигнал в аналоговый. Эта операция, осуществляемая цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП), математически описывается как фильтрация фильтром нижних частот с соответствующим импульсным откликом $H_u(t)$ и передаточной функцией $\tilde{H}_u(n)$.

Алгоритмы цифровой обработки информации, осуществляемой в ЭВМ, направлены на улучшение восприятия изображений оператором. Но это отдельный вопрос, выходящий за рамки данного курса.

С учетом выше изложенного на рис. 3.7 представлена обобщенная структурная схема модельного описания ЭТ на системотехническом уровне проектирования.

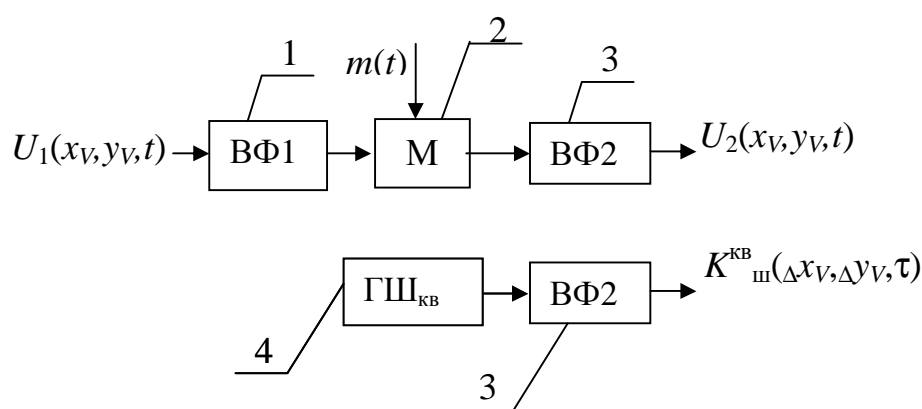


Рис. 3.7 Структурная схема модельного описания обобщенного электронного тракта.

Преобразования, осуществляемые ВКУ практически любого типа, на системотехническом уровне описываются как линейные энергетические преобразования сигнала, которые учитываются некоторым коэффициентом S_B , а также процесс низкочастотной пространственной фильтрации. Если изображение на выходе тепловизора выводится на телевизионный монитор, то импульсный отклик

низкочастотного фильтра, моделирующего действие такого ВКУ, с достаточной степенью точности аппроксимируется функцией Гаусса

$$H_B(x_1, y_1) = \frac{1}{2\pi r_B^2} \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{2r_B^2}\right) \quad (3.51)$$

где r_B – эффективный радиус пятна свечения люминофора экрана ВКУ, обусловленного действием пучка электронов.

3.3. Анализ тепловизора с параллельным сканированием и параллельной обработкой сигналов.

Суть задачи анализа в общем случае заключается в следующем. Заданы характеристики полезного сигнала, и фона. Требуется определить сигнал или спектр сигнала на выходе тепловизора с известными функциональной схемой и конструктивными параметрами и характеристиками этого тепловизора.

Подход к решению задачи анализа продемонстрируем на примере тепловизора с параллельным сканированием и параллельной обработкой сигналов, функциональная схема которого представлена на рис. 3.8.

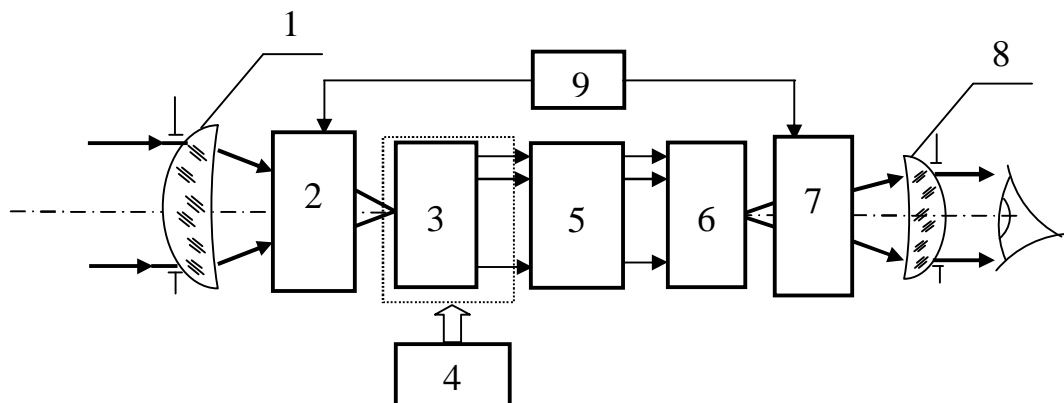


Рис. 3.8 Функциональная схема тепловизора с параллельным сканированием, параллельной обработкой сигналов и параллельной разверткой изображения: 1 – оптическая система; 2 – блок оптико-механического сканирования; 3 – линейка ПИ; 4 – система охлаждения; 5 – электронный блок; 6 – линейка светодиодов; 7 – блок оптико-механического сканирования; 8 – окуляр.

Модельное описание такого тепловизора, как объекта проектирования, в линейном приближении представлено в виде структурной схемы на рис.3.9.

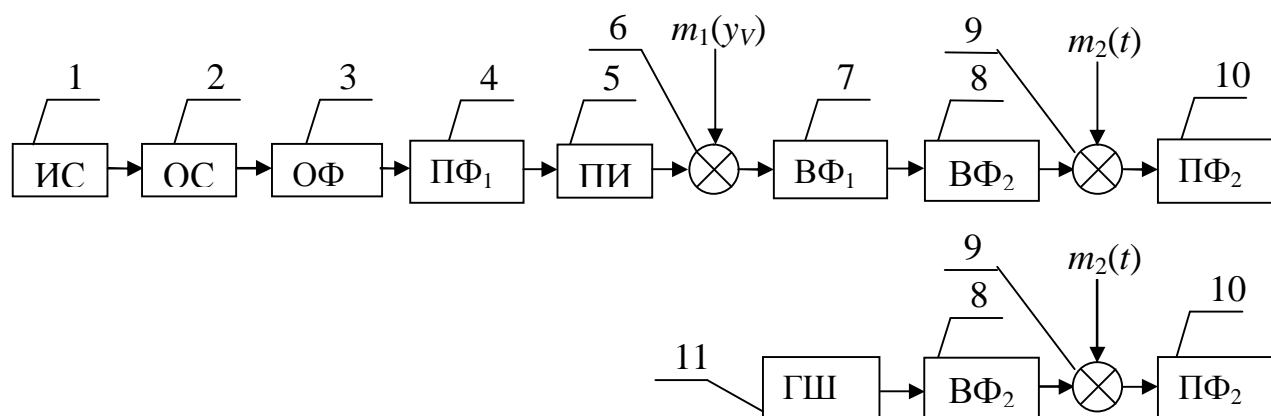


Рис. 3.9 Структурная схема модельного описания тепловизора с параллельным сканированием, параллельной обработкой сигналов и параллельной разверткой изображения: 1 – источник сигнала; 2 – оптическая система; 3 – оптический фильтр; 4 и 10 – пространственные фильтры; 5 – идеализированный ПИ; 6 и 9 модуляторы; 7 и 8 – временные фильтры; 11 – генератор шума.

Следует отметить, что в силу сделанного допущения о линейности, преобразование сигнала и аддитивного шума ПИ в данной модели производится в отдельных параллельных каналах.

Определяющей особенностью тепловизора с параллельным сканированием является то, что закон сканирования для этого случая представляется системой параметрических уравнений вида

$$\begin{cases} x_v = [\text{rect}(\frac{t}{T_1}) \cdot V_x t] \otimes \frac{1}{T_k} \text{comb}(\frac{1}{T_k}), \\ y_v = \text{const} \end{cases} \quad (3.52)$$

а модулирующая функция определяется выражениями

$$m(x_v, y_v, t) = m_1(y_v)m_2(t), \quad (3.53)$$

$$m_1(y_v) = \frac{1}{T_y} \text{comb}(\frac{y_v}{T_y}) \text{rect}(\frac{y_v}{T_y}), \quad (3.54)$$

$$m_2(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_1}\right) \otimes \frac{1}{T_k} \text{comb}\left(\frac{t}{T_k}\right). \quad (3.55)$$

С учетом выше изложенного сигнал на выходе модулятора (поз.6) структурной схемы, изображенной на рис. 3.9, может быть представлен в виде выражения

$$U_1(x_v, y_v, t) = k_1 m_1(y_v) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_H(x' - x_v, y' - y_v, t) H_{nu}(x', y') dx' dy' = \quad (3.56)$$

$$= k_1 [E_H(x_v, y_v, t) * H_{nu}(x_v, y_v)] m_1(y_v) = U(x_v, y_v, t) m_1(y_v),$$

где $k_1 = p \sin^2 s_A \cdot A_{nu} S_{IM} \Delta T_M e \int_0^{\infty} t_a(l) t_o(l) s_{OTH}(l) \left. \frac{\partial L_1^0(l; T)}{\partial T} \right|_{\bar{T}_\Phi} dl - \quad (3.57)$

- коэффициент, численно равный амплитуде ΔU_M полезного сигнала от объекта без учета линейных искажений, которые вносят звенья тракта тепловизора;

* – символическое обозначение операции взаимной корреляции.

С учетом линейных искажений, которые вносит реальный ПИ и электронный тракт тепловизора, сигнал после модулятора 9 описывается как

$$U_2(x_v, y_v, t) = [U_1(x_v, y_v, t) \otimes H_t(t) \otimes H_s(t)] m_2(t). \quad (3.58)$$

Полезную составляющую сигнала на выходе ВКУ можно представить выражением вида

$$L_B(x_1, y_1, t) = S_B A_B \int_{-\infty}^{\infty} U_2(x_v, y_v, t) H_B(x_1 - x_v, y_1 - y_v) dy_v, \quad (3.59)$$

где

$$H_B(x_1, y_1) = \frac{1}{cd} \text{rect}\left(\frac{x_1}{c}, \frac{y_1}{d}\right) - \quad (3.60)$$

- импульсный отклик прямоугольных площадок светодиодов, каждая из которых имеет размеры $cd = A_B$.

С учетом формул (3.54), (3.55), (3.56) и (3.58) выражение (3.59) можно представить следующим образом

$$L_B(x_1, y_1, t) = S_B A_B \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(V_x t, y_v, t) H_B(x_1 - V_x t, y_1 - y_v) \frac{1}{T_y} \text{comb}\left(\frac{y_v}{T_y}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{y_v}{nT_y}\right) \times \quad (3.61)$$

$$\times \text{rect}\left(\frac{t}{T_1}\right) \cdot \frac{1}{T_k} \text{comb}\left(\frac{t-t}{T_k}\right) dy_v dt.$$

Более наглядным для целей анализа является выражение для пространственно-временного спектра сигнала. Если вычислить трехмерное преобразование Фурье от выражения (3.61) и пренебречь уширением спектра, обусловленного конечными размерами поля наблюдения, то получим

$$\tilde{L}_B(n_x, n_y, n) = k_2 \tilde{H}_B(n_x, n_y) \sum_{m, n=-\infty}^{\infty} \tilde{U}\left(n_x + \frac{m}{V_x T_k}, n_y - \frac{n}{T_y}, n - \frac{m}{T_k}\right) \tilde{H}_t(n_x V_x + \frac{m}{T_k}) \tilde{H}_y\left(n_x V_x + \frac{m}{T_k}\right), \quad (3.62)$$

где $k_2 = \frac{S_B A_B}{V_x T_k T_y}$. (3.63)

С учетом инерционности зрительной системы человека, которая характеризуется передаточной функцией вида

$$\tilde{H}_{zp}(n) = \frac{1}{1 + i2\pi n t_{zp}}, \quad (3.64)$$

выражение (3.62) приближенно можно представить следующим образом

$$\tilde{L}_B(n_x, n_y, n) = k_2 \tilde{H}_B(n_x, n_y) \sum_{m, n=-\infty}^{\infty} \tilde{U}\left(n_x, n_y - \frac{n}{T_y}, n - \frac{m}{T_k}\right) \tilde{H}_t(n_x V_x) \tilde{H}_y(n_x V_x) \tilde{H}_{zp}(n), \quad (3.65)$$

Полученное выражение учитывает тот факт, что за счет пространственной и временной дискретизации входного оптического сигнала в спектре появляются дополнительные составляющие, которые при несоблюдении условия теоремы Котельникова приводят к необратимой потере информации. Это иллюстрируется рисунком (3.10), на котором изображено сечение пространственно-временного спектра сигнала на выходе тепловизора.

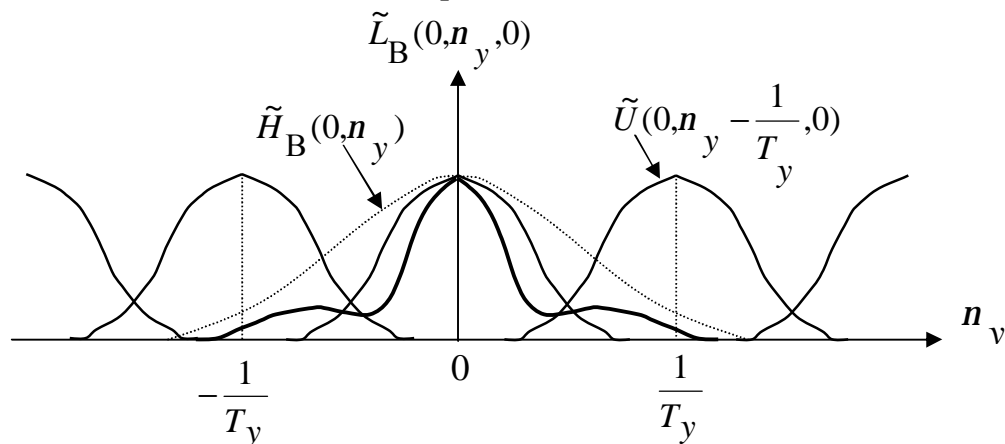


Рис. 3.10 Сечение пространственно-временного спектра сигнала на выходе телевизора.

Аддитивный шум, который присутствует в выходном изображении, обусловлен в основном шумом ПИ, который обычно принимают гауссовским. Преобразование шума ПИ в тракте телевизора в принятом модельном описании нижней ветвью структурной схемы телевизора, как объекта проектирования, изображенной на рис. 3.9. Генератор шума 10 на этой схеме характеризует шум ПИ. Можно показать, что спектр мощности шума в изображении на экране ВКУ описывается следующим выражением

$$\tilde{K}_u(n_x, n_y, n) = \frac{S_u^2}{n k_{y0}} k_2 \tilde{r}_H(n_x V_x) |\tilde{H}_B(n_x, n_y)|^2 |\tilde{H}_o(n_x V_x)|^2 |\tilde{H}_{zp}(n)|^2, \quad (3.66)$$

где $n_{y0} = \frac{1}{T_y}$ – частота пространственной дискретизации по координате y ;

$\tilde{r}_H(n_x V_x)$ – Фурье-образ от нормированной корреляционной функции шума ПИ.

3.4 Модельное представление зрительной системы человека-оператора при наблюдении телевизионных изображений.

Телевизоры предназначены для формирования изображений тепловых объектов, наблюдаемых человеком-оператором. Качество телевизоров следует оценивать, исходя из возможностей оператора решать задачи обнаружения и распознавания объектов по их изображениям, формируемым в телевизоре на экране ВКУ. В связи с этим необходимо формализовать процесс преобразования изображения и принятия решений в зрительной системе человека, т.е. представить зрительную систему в виде математической модели.

Известно, что зрительная система человека обладает следующими свойствами преобразования оптических сигналов:

- селективностью по длинам волн оптического излучения, характеризуемая, так называемой, кривой видности глаза $k(I)$;

- инерционностью восприятия, которая характеризуется передаточной функцией - $\tilde{H}_{zp}(n)$;

- пространственной селективностью, оцениваемой, так называемыми, реакцией на синусоидальную волну (РСВ) или функцией контрастной чувствительности (ФКЧ) - $\tilde{H}_k(n_x, n_y)$.

Относительно обработки сигнала, предшествующей принятию решений об обнаружении или распознавании образов объектов существует две теории, каждая из которых опирается на модель зрительной системы, как оптимального приемника [5,6]. Согласно этому подходу решение об обнаружении или распознавании образов объектов принимается на основе анализа функционала отношения правдоподобия (ФОР) по критерию идеального наблюдателя. Отличие теорий заключается в том, что в первом случае фильтр, осуществляющий оптимальную обработку оптического сигнала в приемнике является одноканальным, а во втором случае этот фильтр - многоканальный.

На рис. 3.11 и 3.12 изображены структурные схемы, отражающие алгоритмы обработки сигналов вплоть до принятия решений для одноканальной и многоканальной моделей зрительной системы человека.

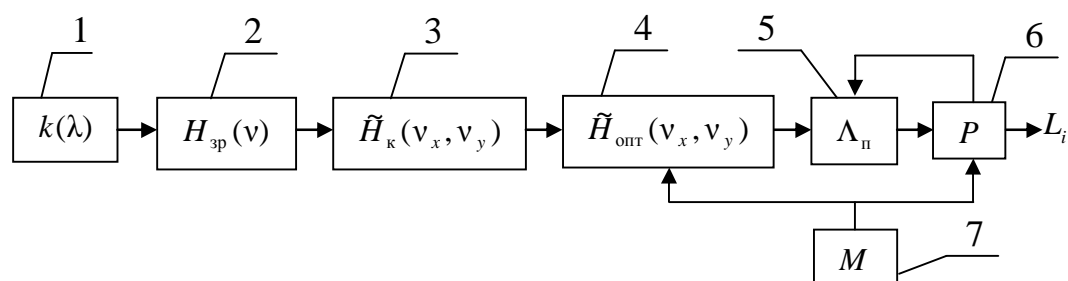


Рис. 3.11 Структурная схема одноканальной модели зрительной системы человека: 1 – оптический фильтр; 2 – временной фильтр; 3 – пространственный фильтр; 4 – оптимальный фильтр; 5 – пороговое устройство; 6 – процессор; 7 – память.

Рассмотрим многоканальную модель, т.к. она в большей степени соответствует результатам экспериментальных исследований. Многоканальная модель базируется на гипотезе, согласно которой изображения в зрительной системе человека представляются в виде разложения в ортогональном базисе ограниченных в пространстве гармонических функций (см. формулу 3.14). Такое разложение, по сути являющееся фильтрацией изображения осуществляется в стиральной коре головного

мозга. Фильтры образуются в модулях групп корковых нейронов, рецептивные поля которых спроецированы на предварительно выделенные участки поля зрения и настроены на разные частоты и ориентации. Если модуль состоит из линейных нейронов, то получается разложение типа (3.14), если модуль включает в себя нелинейные нейроны, то получается разложение по гармоникам спектра мощности.

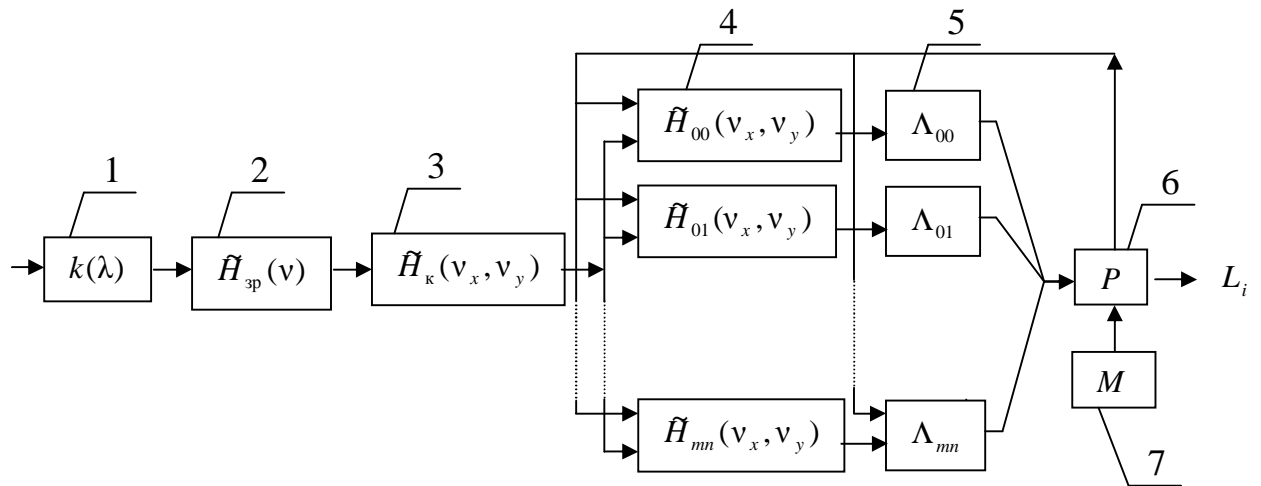


Рис. 3.12 Структурная схема многоканальной модели зрительной системы человека: 1 – оптический фильтр; 2 – временной фильтр; 3 – пространственный фильтр; 4 – параллельные фильтры; 5 – пороговые устройства; 6 – процессор; 7 – память.

Такая обработка позволяет не только отфильтровать полезный сигнал, но также существенно уменьшить избыточность изображения - сжать информацию.

Импульсные отклики mn -ых параллельных фильтров описываются следующими выражениями

$$H_{mn}(x, y) = \frac{1}{l_x l_y} \text{rect}\left(\frac{x}{l_x}, \frac{y}{l_y}\right) \cdot \cos\left[2p\left(\frac{xm}{l_x} + \frac{yn}{l_y}\right)\right], \quad (3.67)$$

а соответствующие им передаточные функции -

$$\tilde{H}_{mn}(n_x, n_y) = \text{sinc}\left[pl_x\left(n_x - \frac{m}{l_x}\right)\right] \cdot \text{sinc}\left[pl_y\left(n_y - \frac{n}{l_y}\right)\right], \quad (3.68)$$

Предположим, что входной оптический сигнал не меняется во времени. Тогда, согласно критерию идеального наблюдателя, алгоритм принятия решения сводится к сравнению значения корреляционного интеграла с порогом, а именно

$$Z = \max_{xy} \{L_B(x, y, t) \otimes H_{mn}(x, y)\} > \frac{S_{mn}^2 \ln \Lambda_n}{S_{mn}} + \frac{S_{mn}}{2} = Z_n,$$

(3.69)

где

$$L_B(x, y, t) = L_B(x, y) + L_u(x, y, t) - \quad (3.70)$$

- функция, описывающая реализации сигнала в виде аддитивной смеси полезного сигнала $L_B(x, y, t)$ и шума $L_u(x, y, t)$ в изображении, формируемом на выходе тепловизора, с учетом инерционности зрительной системы человека;

$$\Lambda_n = \frac{p_0}{p_1} - \quad (3.71)$$

- пороговое отношение правдоподобия, зависящее от априорных вероятностей p_0 и p_1 , соответственно, отсутствия и наличия полезного сигнала в принятой реализации;

$$\begin{aligned} S_{mn} &= \max_{xy} \{L_B(x, y, t) \otimes H_{mn}(x, y)\} \approx \\ &\approx_{\Delta} U_M k_2 \left| \tilde{L}_H\left(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y}\right) \right| \left| \tilde{H}_T\left(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y}\right) \right| \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{A_o} \operatorname{rect}\left(\frac{x}{l_x}, \frac{y}{l_y}\right) \cos\left[2p\left(\frac{mx}{l_x} + \frac{ny}{l_y}\right) + j\left(\frac{mx}{l_x}, \frac{ny}{l_y}\right)\right] dx dy \right|^2 = \\ &= \frac{2_{\Delta} U_M k_2}{A_o} \left| \tilde{L}_H\left(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y}\right) \right| \left| \tilde{H}_T\left(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y}\right) \right| - \end{aligned} \quad (3.72)$$

- амплитуда mn -ой гармоники полезного сигнала после его фильтрации в зрительной системе;

$$\tilde{H}_T(n_x, n_y) = \tilde{H}_N(n_x, n_y) \tilde{H}_{nu}(n_x, n_y) \tilde{H}_t(n_x V_x) \tilde{H}_o(n_x V_x) \tilde{H}_B(n_x, n_y) - \quad (3.73)$$

- передаточная функция тепловизора;

$$\begin{aligned}
s_{mn}^2 &= K_{uu}(0) = M \left\{ \left| L_B(x, y, t) \otimes H_{mn}(x, y) \right|^2 \right\} = \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_{uu}(n_x, n_y, n) \left| \tilde{H}_{mn}(n_x, n_y) \right|^2 dn_x dn_y dn \approx \\
&\approx \frac{k_2 s_{uu}^2 A_{uu}}{2n_k t_{zp} A_o} \left| \tilde{H}_B \left(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y} \right) \right|^2 -
\end{aligned} \tag{3.74}$$

- дисперсия шума m -ой гармоники на выходе соответствующего фильтра;

Если в уравнении (3.69), определяющем значение порога принятия решения, перейти к переменной $x = Z/s_{mn}$, то вероятность правильного обнаружения m -ой гармоники сигнала можно определить по формуле

$$P_{обн} = \frac{1}{\sqrt{2p_{m_n}}} \int \exp\left[-\frac{(x - m_B)^2}{2}\right] dx, \tag{3.75}$$

где

$$m_n = \frac{\ln \Lambda_n}{m_B} + \frac{m_B}{2}; \tag{3.76}$$

$$m_B = \frac{S_{mn}}{S_{mn}} = 2m_0 \frac{\left| \tilde{L}_H \left(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y} \right) \right|}{A_o} \left\| \tilde{H}_N \left(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y} \right) \right\| \left\| \tilde{H}_{nu} \left(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y} \right) \right\| \sqrt{\frac{2n_k A_o}{A_{uu}}} - \tag{3.77}$$

- так называемое, воспринимаемое (оператором) отношение сигнал/шум;

A_{uu} – площадь корреляции шума; в рассмотренном выше примере тепловизора с параллельным сканированием этот параметр определяется как

$$A_{uu} = r_k T_y; \tag{3.78}$$

$$m_0 = \frac{\Delta U_M}{S_{uu}} - \tag{3.79}$$

- отношение сигнал/шум на выходе ПИ.

В заключение этого раздела отметим следующее. Так как априорные вероятности p_0 и p_1 обычно неизвестны, то для расчета вероятности обнаружения можно использовать значение порогового отношения правдоподобия, полученное на основе сравнения экспериментальных и расчетных результатов и равное $\Lambda_n = 180$.

4. Проектирование тепловизионных приборов

4.1. Предварительный габаритно-энергетический расчет.

На начальной стадии проектирования требуется определить основные габаритные соотношения оптической системы тепловизора, при которых обеспечивается надежное обнаружение заданных в техническом задании типов объектов. В этом случае в качестве критерия качества тепловизоров используется параметр ΔT_n , который называется эквивалентной шуму разностью температуры. Эквивалентная шуму разность температуры определяет значение разности температуры объекта и равномерного фона, излучающих, как АЧТ, при которой отношение пикового значения сигнала к среднеквадратическому значению шума на выходе эквивалентного ЭТ тепловизора равно 1. Размеры объекта при этом намного больше мгновенного поля тепловизора, а эквивалентный ЭТ имеет передаточную функцию $\tilde{H}_s(n)$, описываемую формулой (3.48).

Если предположить, что ЭТ не вносит дополнительного шума, то значение эквивалентной шуму разности температуры можно определить из уравнения

$$p \sin^2 \delta_A \cdot \Delta T_n A_{nu} e \int_0^\infty t_a(l) t_o(l) s_{отн}(l) \left. \frac{\partial L_l^0(l; T)}{\partial T} \right|_{T=\bar{T}_\Phi} dl = \frac{S_{1M} \sqrt{A_{nu} \Delta n_{экв}}}{D_{1M}^*}, \quad (4.1)$$

где

$$\Delta n_{экв} = \int_0^\infty \tilde{r}_H(n) |\tilde{H}_s(n)|^2 dn - \quad (4.2)$$

- эквивалентная полоса пропускания ЭТ.

Тогда

$$\Delta T_n = \frac{p \sqrt{A_{nu} \Delta n_{экв}}}{ab A_{зр} D_{1M}^* e \int_0^\infty \left. \frac{\partial L_l^0(l; T)}{\partial T} \right|_{T=\bar{T}_\Phi} t_a(l) t_o(l) s_{отн}(l) dl}, \quad (4.3)$$

где $A_{зр}$ – площадь входного зрачка ОС.

Недостатки ΔT_n , как критерия качества:

- не учитывает свойств зрительной системы человека;
- не учитываются линейные искажения, которые вносятся звеньями тракта тепловизора.

На рис. 4.1 изображена схема экспериментального измерения ΔT_n .

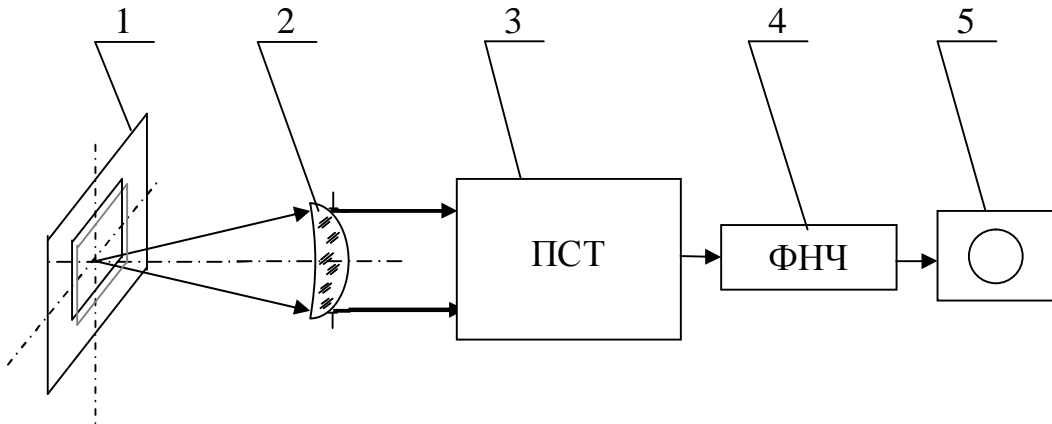
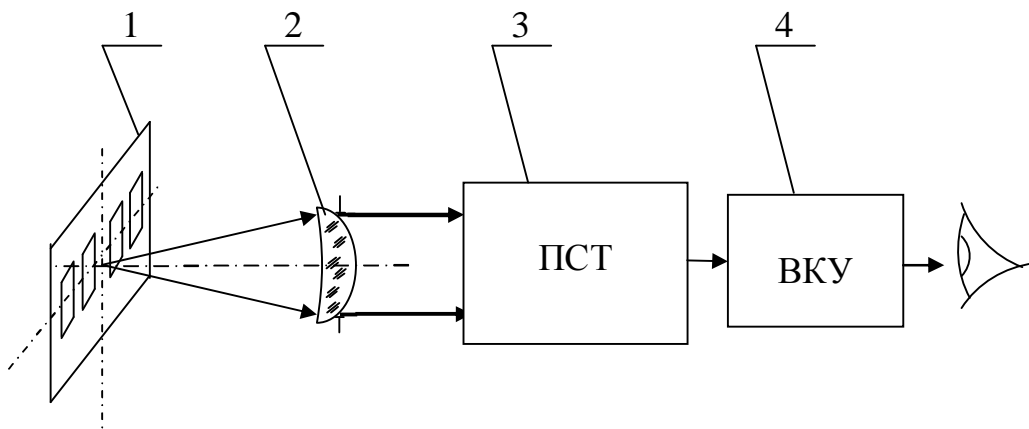


Рис. 4.1 Схема измерения пороговой разности температур: 1 – тест-объект; 2 – коллиматор; 3 – приемная система тепловизора; 4 – эквивалентный электронный фильтр; 5 – осциллограф.

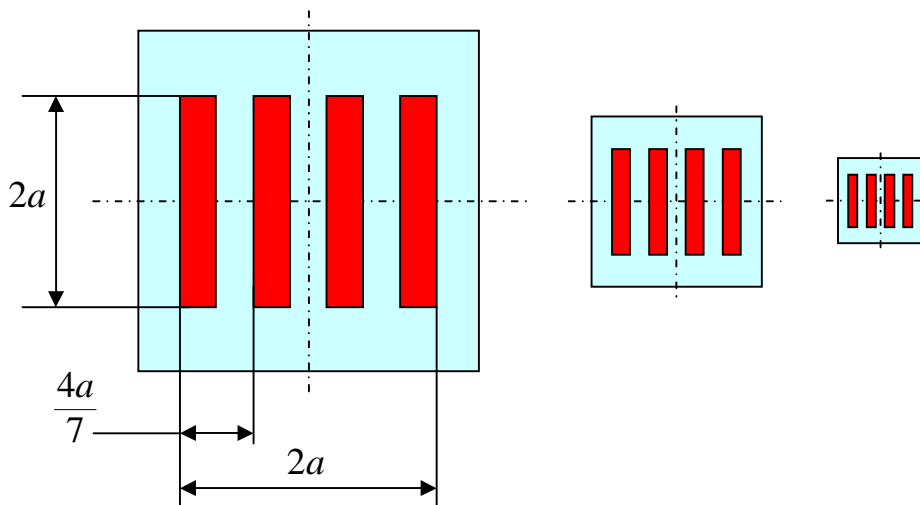
4.2. Целевая функция проектирования тепловизоров на системотехническом уровне проектирования.

При проектировании тепловизоров в качестве обобщенного критерия можно было бы использовать вероятность обнаружения или распознавания объектов при заданном алфавите объектов. Но это не всегда удобно, т.к. для разных типов тепловизоров алфавит классов может различаться. Поэтому общепринято оценивать качество тепловизоров по штриховым мирам, тем более, что по тест-объектам такого типа относительно просто производить экспериментальную оценку качества тепловизоров (см. рис.4.2).

Критерий обнаружения штриховых мир и, в частности, 4-х штриховых (рис.4.2), базируется на определении температурного контраста ΔT_p , при котором возможно обнаружение такой миры с заданными размерами $l_x = l_y = 2a$. Этот критерий называется минимально обнаруживаемой разностью температур (МРТ).



а)



б)

Рис. 4.2 Измерение минимально обнаруживаемой разности температур (МРТ):

а) Структурная схема измерения МРТ.

1 – тест-объект; 2 – коллиматор; 3 и 4 тепловизор.

б) топология тест-объектов, используемых для измерения МРТ.

Пространственно-частотный спектр тестовой 4-х штриховой миры описывается формулой

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{T}(n_x, n_y) = & \Delta T_p \frac{16a^2}{7} \left\{ \operatorname{sinc}\left(\frac{16pan_x}{7}\right) - \frac{2}{p} \operatorname{sinc}\left[\frac{16pa}{7}\left(n_x \pm \frac{7}{4a}\right)\right] + \right. \\ & \left. + \frac{2}{3p} \operatorname{sinc}\left[\frac{16pa}{7}\left(n_x \pm \frac{21}{4a}\right)\right] + \dots \right\} \cdot \operatorname{sinc}(2pn_y a) = \Delta T_p \{ \tilde{I}_0(n_x, n_y) + \tilde{I}_1(n_x, n_y) + \tilde{I}_3(n_x, n_y) + \dots \}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

На основе описанной выше модели зрительной системы человека-оператора, можно предположить, что для обнаружения 4-х штриховой миры достаточно решить задачу обнаружения 1-ой гармоники $\Delta T_p \tilde{I}_1(n_x, n_y)$ спектра (4.4) с соответствующей амплитудой I_1 . Тогда приближенно МРТ можно выразить через воспринимаемое отношение с/ш в изображении указанного тест-объекта следующим образом

$$\Delta T_p(n_T) = \frac{\Delta T_n m_B}{2I_1 |\tilde{H}_{nc}(n_T)|} \sqrt{\frac{2n_k t_{zp} A_o}{A_{uu}}}, \quad (4.5)$$

где $n_T = \frac{7}{4a} -$ (4.6)

- пространственная частота первой гармоники 4-х штриховой миры;

$$\tilde{H}_{nc}(n_x, n_y) = \tilde{H}_N(n_x, n_y) \tilde{H}_{nu}(n_x, n_y) - \quad (4.7)$$

- передаточная функция приемной системы тепловизора.

Т.к. в выражение для расчета МРТ входят практически все переменные проектирования системотехнического уровня, то этот показатель часто используют как целевую функцию при решении задач анализа и параметрической оптимизации тепловизора на системотехническом уровне проектирования.

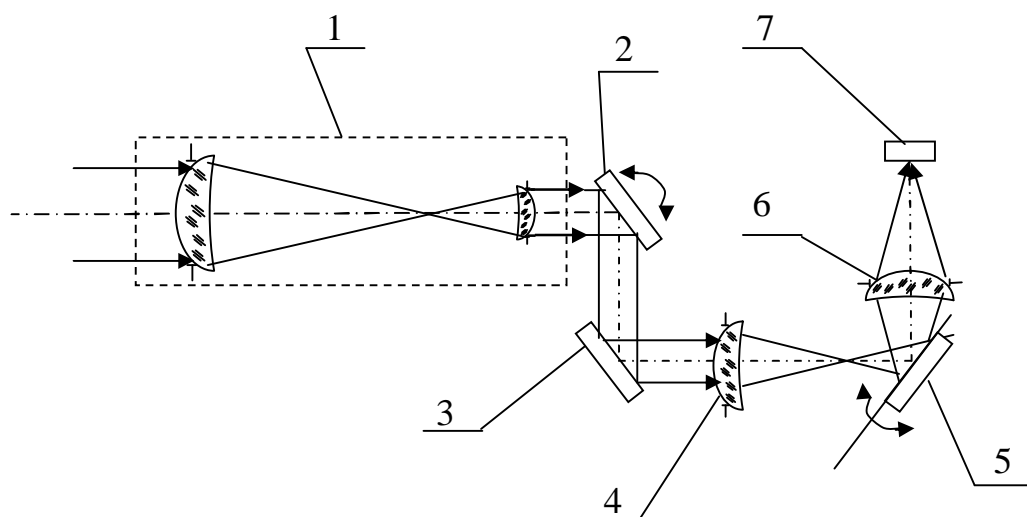
4.3 Проектирование на схемотехническом уровне.

4.3.1. Проектирование оптической системы.

В [1,2,3] представлены широко распространенные оптические схемы тепловизоров. Принципиальное отличие этих и многих других подобных схем связано с особенностями построения систем сканирования.

В большинстве современных тепловизоров сканирование по кадру осуществляется качающимся плоским зеркалом, а по строке – вращающимися зеркальными призмами или пирамидами. В связи с этим для уменьшения габаритов сканирующих элементов осуществляют оптическое сопряжение положения их

рабочих плоскостей. Эта задача решается с помощью дополнительных оптических систем, формирующих промежуточное изображение. Типовая оптическая схема тепловизора сканирующего типа, включающего в свой состав телескопическую систему и дополнительную систему изображена на рис. 4.3.



4.3 Типовая оптическая схема сканирующего тепловизора: 1 – коллиматор; 2 – кадровое зеркало; 3 – плоское зеркало; 4 – дополнительная оптическая система; 5 – строчное сканирующее зеркало; 6 – проекционный объектив; 7 – ПИ.

Эквивалентное фокусное расстояние такой системы определяется по формуле

$$f_{\text{экв}} = f_{\text{д}} b_{\text{о}} \Gamma_{\text{т}}, \quad (4.8)$$

где $f_{\text{д}}$ – фокусное расстояние дополнительной оптической системы;

$\Gamma_{\text{т}}$ – видимое увеличение телескопической системы;

$b_{\text{о}}$ – линейное увеличение проекционного объектива.

Требования на качество ОС формулируются при оптимизации значения целевой функции (4.6).

Особенностью оптических схем тепловизоров, подобных рассмотренной, является возможность появления холодного блика, так называемого, эффекта Нарцисса. Этот эффект проявляется в формировании изображения холодной полости, находящейся в окрестности чувствительного элемента охлаждаемого ПИ, в плоскости анализа тепловизора. Сам же эффект Нарцисса возникает в результате

отражения излучения холодной полости от поверхностей линзовых компонент телескопической и дополнительной оптических систем.

Для устранения этого крайне нежелательного эффекта требуется проектировать оптическую систему с как можно меньшим обратным отражением.

4.3.2. Методика проектирования систем оптико-механического сканирования.

Как отмечалось ранее, существует великое множество схем систем оптико-механического сканирования. Некоторые из них приведены в [1,2,3].

Основными показателями качества систем сканирования являются:

- коэффициент использования развертки;
- геометрические искажения;
- габариты.

Коэффициент использования развертки при условии отсутствия виньетирования пучка в процессе сканирования и заданных габаритах сканирующего барабана определяется по формуле, которую можно вывести на основе простых геометрических соображений (см. рис.4.4),

$$h = 1 - \frac{n_z}{180^0} \arcsin \left[\frac{a_n \cos\left(\frac{180^0}{n_z}\right)}{2r_1} \right], \quad (4.9)$$

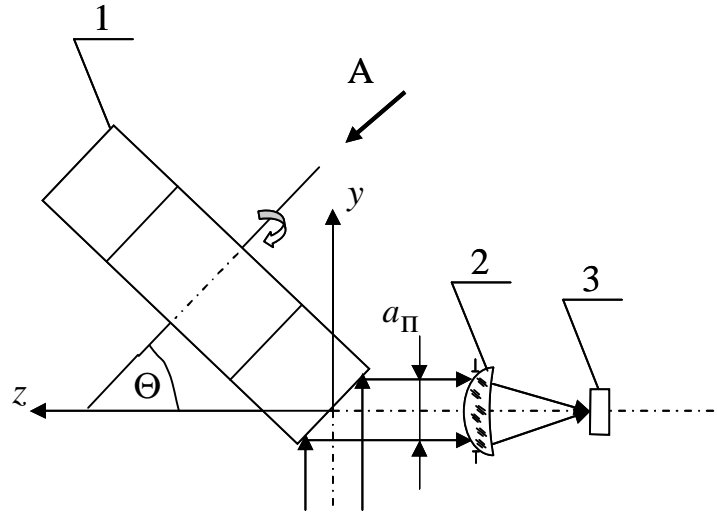
где n_z – количество граней зеркального сканирующего барабана;

a_n – сечение пучка лучей;

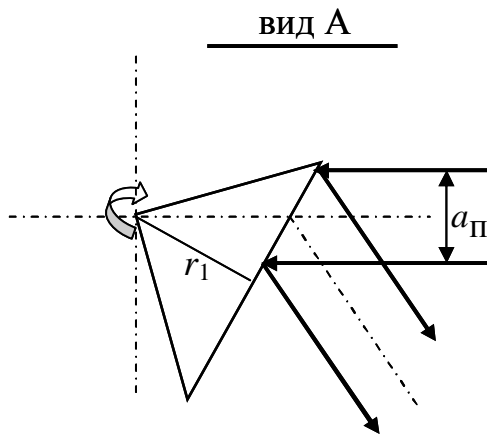
r_1 – радиус окружности, вписанной в зеркальный сканирующий барабан.

Формулу (4.9) можно также использовать для расчета габаритов зеркального сканирующего барабана при заданном коэффициенте использования.

Для анализа вида траектории сканирования используется математический аппарат векторной алгебры.



а)



б)

4.4 Система сканирования с зеркально-призменным барабаном:

а) Схема системы сканирования.

1 - зеркально-призменный барабан; 2 – объектив; 3 – ПИ.

б) Геометрическая интерпретация условия отсутствия виньетирования при сканировании зеркально-призменным барабаном (к выводу формулы (4.9)).

Если задан единичный вектор

$$\mathbf{r}_{a_1} = \begin{pmatrix} l_1 \\ m_1 \\ n_1 \end{pmatrix}, \quad (4.10)$$

определяющий направление падающего луча в проекциях на оси выбранной системы координат и известно направление нормали

$$\mathbf{r}_{\vec{n}} = \begin{pmatrix} L \\ M \\ N \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

к отражающей поверхности, то вектор отраженного луча определяется как

$$\mathbf{r}_{a_2} = \begin{pmatrix} l_2 \\ m_2 \\ n_2 \end{pmatrix} = \mathcal{A} \mathbf{r}_{a_1}, \quad (4.12)$$

где линейный оператор \mathcal{A} определяется выражением

$$\mathcal{A} = \begin{pmatrix} 1-2L^2 & -2LM & -2LN \\ -2LM & 1-2M^2 & -2MN \\ -2LN & -2MN & 1-2N^2 \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

В качестве примера рассмотрим отражение от граней зеркальной призмы (см. рис.4.4 и 4.5).

Пусть

$$\mathbf{r}_{a_1} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{r}_{\vec{n}} = \begin{pmatrix} \sin j \\ -\cos j \cos \Theta \\ -\cos j \sin \Theta \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

Тогда вектор отраженного луча определяется как

$$\mathbf{r}_{a_2} = \begin{pmatrix} \sin 2j \sin \Theta \\ -\cos^2 j \sin 2\Theta \\ 1-2\cos^2 j \sin^2 \Theta \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

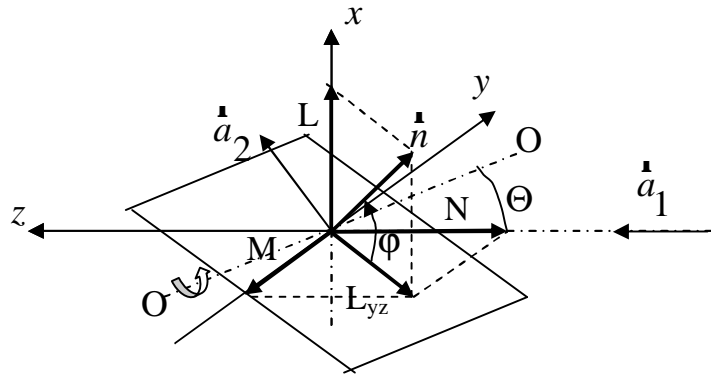


Рис. 4.5 Пояснение к решению задачи анализа отражения луча от грани зеркально-призменного барабана

4.3.3. Обзор типов ПИ и систем охлаждения.

В тепловизионных системах используются ПИ на основе полупроводниковых материалов таких, как PbS, PbSe, InSb, InAs, Ge:Hg, HgCdTe, SiPt/Si, IrSi/Si, GeSi/Si, GaAs/AlGaAs и др. Параметры перечисленных одноэлементных и многоэлементных ПИ приведены в литературе [7, 8, 9].

В настоящее время большинство используемых в тепловизорах ПИ являются охлаждаемыми. Существуют следующие типы систем охлаждения:

- заливные;
- термоэлектрические холодильники;
- холодильники Джоуля-Томсона;
- холодильные машины, работающие в цикле Стирлинга.

Принципы действия перечисленных устройств достаточно подробно изложены в [2].

Следует отметить, что наибольший интерес у разработчиков тепловизионных систем вызывают неохлаждаемые фокальные матрицы ПИ. Среди таких ПИ следует отметить появившиеся в последнее время фокальные матрицы микроболометров, матрицы термоэлектрических элементов, а также пироэлектрические матрицы [10].

5. Методы и аппаратура технологического и аттестационного контроля тепловизоров

Методы и аппаратура технологического контроля

На этапе сборки и юстировки оптико-механической части тепловизоров возникают проблемы, обусловленные непрозрачностью в видимом диапазоне компонент оптической системы. В связи с этим такие задачи, как оценка качества оптической системы, контроль положения чувствительных элементов ПИ и др. могут быть решены только с использованием фотоэлектрических методов.

Контроль качества оптической системы тепловизоров производят на основе анализа измеренной ОПФ. Существуют различные методы измерения ОПФ, но наибольшее распространение для контроля ИК систем получили методы, основанные на измерении пограничной кривой. Суть метода заключается в следующем.

На рис.5.1 представлена схема установки для измерения ОПФ. В качестве тест-объекта, расположенного в фокальной плоскости коллиматора используется подвижная диафрагма типа "нож".

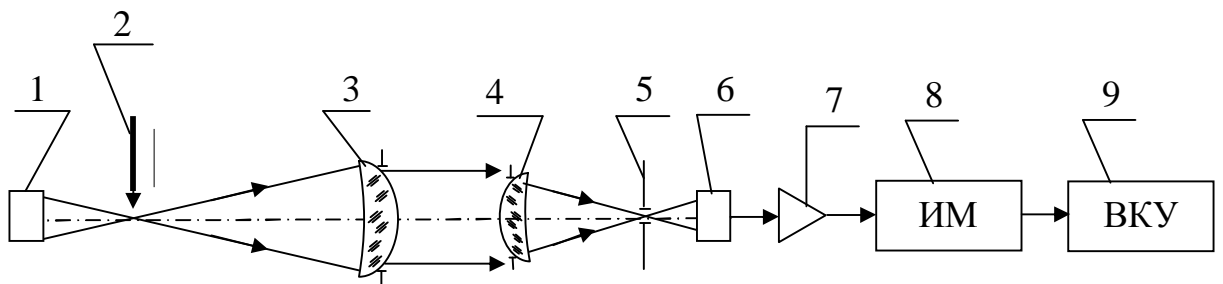


Рис. 5.1 Схема установки для измерения оптических передаточных функций объективов и приемных систем тепловизоров: 1 – ИК-излучатель; 2 – ножевая диафрагма; 3 – коллиматор; 4 – контролируемый объектив; 5 – анализирующая диафрагма; 6 – ПИ; 7 – усилитель; 8 – интерфейсный модуль; 9 – ЭВМ.

Если такую диафрагму подсветить от некоторого источника, то распределение яркости в фокальной плоскости коллиматора можно выразить через функцию Хевисайда следующим образом

$$L(x'-bx_v, y') = L_o J(x'-bx_v) = \begin{cases} L_o, & x' > bx_v, |y'| < \infty, \\ 0 & x' < bx_v, |y'| < \infty \end{cases} \quad (5.1)$$

Освещенность в плоскости изображения контролируемой оптической системы, в предположении, что коллиматор не вносит искажений, описывается как

$$E(x'-bx_v, y') = k_0 \int_{bx_v}^{\infty} H_N^n(x'-x) dx, \quad (5.2)$$

где $H_N^n(x')$ – функция рассеяния линии;

k_0 – коэффициент пропорциональности.

Поток излучения после анализирующей щелевой диафрагмы, имеющей размеры, гораздо меньшие, чем размер пятна рассеяния контролируемого объектива, равен

$$\Phi(x'_v) = k_0 \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_N^n(x'-x) \text{rect}\left(\frac{x'}{a_{ш}}, \frac{y'}{b_{ш}}\right) dx' dy' \right] dx. \quad (5.3)$$

Если выражение (5.3) продифференцировать и затем вычислить преобразование Фурье, то получим

$$\mathfrak{F} \left\{ \frac{d\Phi(x'_v)}{dx'_v} \right\} = a_{ш} b_{ш} k_0 \tilde{H}_N^n(\mathbf{n}_x) \sin c(\mathbf{p} a_{ш} \mathbf{n}_x). \quad (5.4)$$

Принцип измерения погрешностей юстировки приемной системы тепловизора вытекает из следующих свойств ОПФ. Если анализирующая диафрагма или чувствительная площадка ПИ смещена вдоль оптической оси, то график функции, описывающей модуль ОПФ, за редким исключением во всем диапазоне пространственных частот будет ниже, чем ОПФ для плоскости наилучшей установки. Если анализирующая диафрагма или чувствительные площадки ПИ сместить от оптической оси в поперечном направлении, то график частотно-фазовой характеристики изменит наклон, пропорционально величине смещения.

Методы и аппаратура для аттестационного контроля.

Основными параметрами тепловизора, подлежащими аттестационному контролю являются ΔT_n и $\Delta T_p(n_T)$. Схема установки, предназначенной для измерения этих параметров, представлена на рис.5.2.

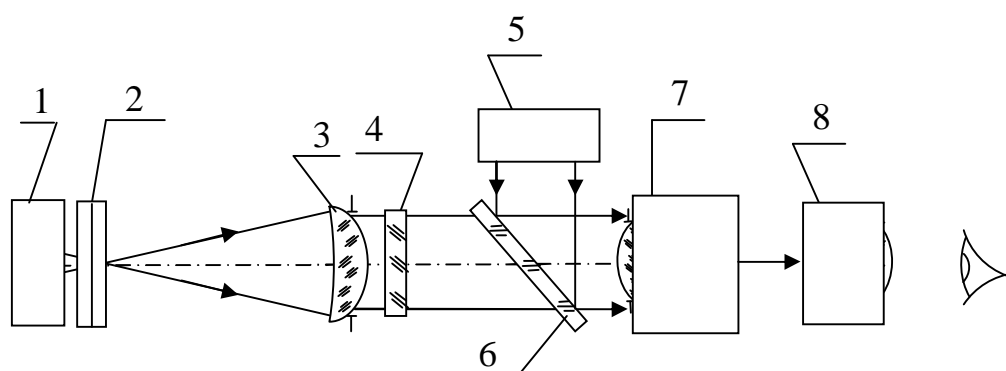


Рис 5.2 Схема установки для аттестационного контроля тепловизоров: 1 и 5 – излучатели в виде АЧТ; 2 – блок тест-объектов; 3 – коллиматор; 4 – ослабляющий нейтральный ИК фильтр; 6 – полупрозрачное зеркало; 7 и 8 – контролируемый тепловизор.

В состав установки входят два АЧТ, одно из которых подсвечивает транспарант с соответствующим пространственным коэффициентом пропускания, а другое - создает уровень равномерного фона. Для варьирования температурного контраста в схеме данной установки предусмотрены нейтральные сменные ИК фильтры. Параметр ΔT_n измеряется с использованием осциллографа, а $\Delta T_p(n_T)$ определяется субъективным методом на основе оценок, даваемых тренированными операторами.

Список литературы

1. Ллойд Дж. Системы тепловидения.- М: Мир, 1978г.
2. Госсорг Ж. Инфракрасная термография.- М: Мир, 1988.
3. Богомолов П.А., Сидоров В.И., Усольцев И.Ф. Приемные устройства ИК-систем.- М.: Радио и связь, 1987. – 208 с.
4. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники.- М.: Сов. радио, 1978.
5. Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображений.- М.: Радио и связь, 1986г.
6. Логвиненко А.Д. Чувственные основы восприятия пространства.- М.: МГУ, 1985г.
7. Хряпов В.Т., Пономаренко В.П., Буткевич В.Г. и др. Пороговые фотоприемники и матрицы ИК-диапазона. Оптический журнал, 1992, №12, с.33-44.
8. Бакланов М.Р., Демьяненко М.А. и др. Фотоприемники ИК-диапазона на основе многослойных квантовых ям GaAs/AlGaAs. Оптический журнал, 1992, №12, с.45-48.
9. Колбин М.Н., Романов О.Г. Фотоприемники на основе примесного германия для тепловидения. Оптический журнал, 1992, №12, с.49-51.
10. Ерофейчев В.Г., Мирошников М.М. Перспективы использования ИК матриц в тепловидении. Оптический журнал, том 64, №2, 1997, с.5-12.