

Т е м а № 2. «Зенитная управляемая ракета 9М39»

**Занятие № 6. «Принципы
построения оптико - электронных
устройств».**

Вопросы занятия:

1-ый вопрос: Общие принципы построения опико-электронных устройств.

2-ой вопрос: Физические основы работы опико-электронных устройств.

1-ый вопрос: Общие принципы построения оптико-электронных устройств.

Распределение энергии излучения в зависимости от длины волны или частоты называют его спектром. Весь широкий оптический диапазон (λ изменяется от 1 нм до 1 мм) разделять на ультрафиолетовую (от 10 нм до 0,38 мкм), видимую (от 0,38 мкм до 0,78 мкм) и инфракрасную области (от 0,78 мкм до 1 мм), как это показано на рис. 1. Электромагнитные волны с длиной волны от 1 до 10 нм, относятся к рентгеновскому излучению.

Инфракрасная область условно разделяется на коротковолновый участок (от 0,78 мкм до 1,5 мкм), средневолновый (от 1,5 мкм до 20 мкм) и длинноволновый (от 20 мкм до 1 мм).

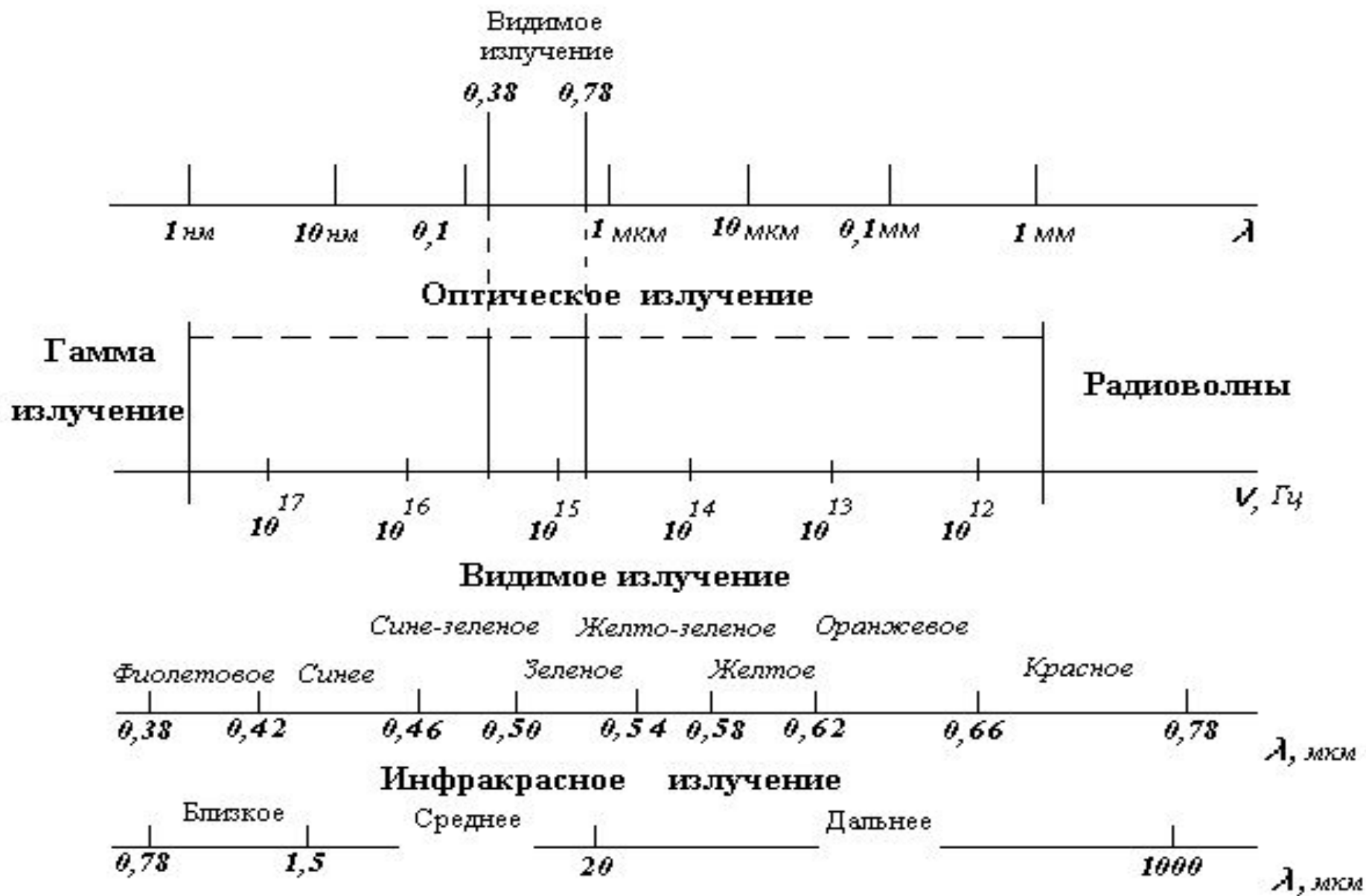


Рис. 1. Оптический спектр электромагнитных колебаний

Элементарными источниками излучения являются атомы и молекулы вещества.

Атомарное излучение происходит при переходе электронов с одного энергетического уровня, более высокого, на другой, более низкий. Каждому типу такого перехода соответствует монохроматическое излучение определенной длины волны.

Излучение молекул происходит при изменении их колебательного и вращательного движения, причем спектр излучения вращательного движения молекул расположен в длинноволновой области спектра. При колебательно-вращательном движении молекул их спектр состоит из группы монохроматических линий, образующих полосу излучения.

Монохроматическое излучение, т. е. излучение с практически одной частотой ν или длиной волны $\lambda = c / \nu$, где c - скорость распространения излучения, можно представить как поток квантов с одинаковой энергией:

$$\lambda = c / \nu,$$
$$E = h \nu = h c / \lambda,$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж $\cdot$ с - постоянная Планка.

Поскольку частота электромагнитных колебаний оптического излучения больше частоты радиоволн, кванты излучения в оптическом диапазоне являются более мощными, чем в радиодиапазоне.

Параметры, характеризующие состояние энергии оптического излучения (лучистой энергии), выражаются в энергетических или светотехнических единицах. Лучистая энергия в видимой области измеряется в светотехнических единицах, а в инфракрасной, ультрафиолетовой и более коротковолновой областях излучения - в энергетических единицах.

Световые величины характеризуют физиологическое действие света и оцениваются по воздействию на человеческий глаз или другие приемники оптического излучения.

Энергетические величины характеризуют оптическое излучение безотносительно к его воздействию на приемники оптического излучения.

Таблица основных светотехнических и энергетических величин.

Термин	Обозначение	Определение	Выражение	Ед. измерения
Светотехнические величины				
Сила света	I	Световой поток в данном направлении, приходящийся на единицу телесного угла Ω	$I = d\Phi/d\Omega$	Кд (кандела)
Световой поток	Φ	Мощность лучистой энергии, переносимой в единицу времени	$\Phi = dW/dt$	Лм (люмен)
Световая энергия	W	Энергия, переносимая светом в течение времени $\Delta t = t_1 - t_2$	$W = \int_{t_1}^{t_2} \Phi dt$	Лм•с
Яркость	L	Отношение силы света в заданном направлении к площади проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную этому направлению	$L = \frac{dI_\varphi}{dS \cos \varphi}$	Кд•м ⁻²

Энергетические величины

Сила излучения	I_{ε}	Лучистый поток в данном направлении, приходящийся на единицу телесного угла Ω	$I_{\varepsilon} = d\Phi_{\varepsilon}/d\Omega$	Вт•ср ⁻¹
Поток излучения	Φ_{ε}	Мощность лучистой энергии, излучаемой или переносимой в единицу времени	$\Phi_{\varepsilon} = dW_{\varepsilon}/dt$	Вт
Энергия излучения	W_{ε}	Энергия, переносимая излучением в течение времени $\Delta t = t_1 - t_2$	$W_{\varepsilon} = \int_{t_1}^{t_2} \Phi_{\varepsilon} dt$	Дж
Энергетическая яркость	L_{ε}	Излучение лучистой энергии в определенном направлении с единицы перпендикулярной поверхности в единичном телесном угле Ω	$L_{\varepsilon} = \frac{dI_{\varepsilon\varphi}}{dS \cos \varphi}$	Вт•ср ⁻¹ •м ⁻²

III. Обобщенные схемы и принципы работы ОЭУ.

Особое место среди устройств, использующих электромагнитное излучение для передачи полезной информации, занимают оптико-электронные устройства (ОЭУ), которым свойственны высокая точность, быстродействие и возможность обработки многомерных сигналов.

Оптико-электронные устройства - это устройства, в которых полезная информация переносится с помощью оптического излучения (содержится в оптическом сигнале), а ее первичная обработка сопровождается преобразованием энергии оптического излучения в электрическую энергию.

В состав этих устройств входят как оптические, так и электронные звенья, причем и те и другие равноценны и выполняют основные функции данного устройства, а не являются вспомогательными (например, узлами подсветки отсчетных шкал, узлами термостабилизации и т. д.).

Принцип действия ОЭУ основан на приеме, преобразовании и использовании электромагнитного излучения объектов в различных диапазонах оптической области спектра.

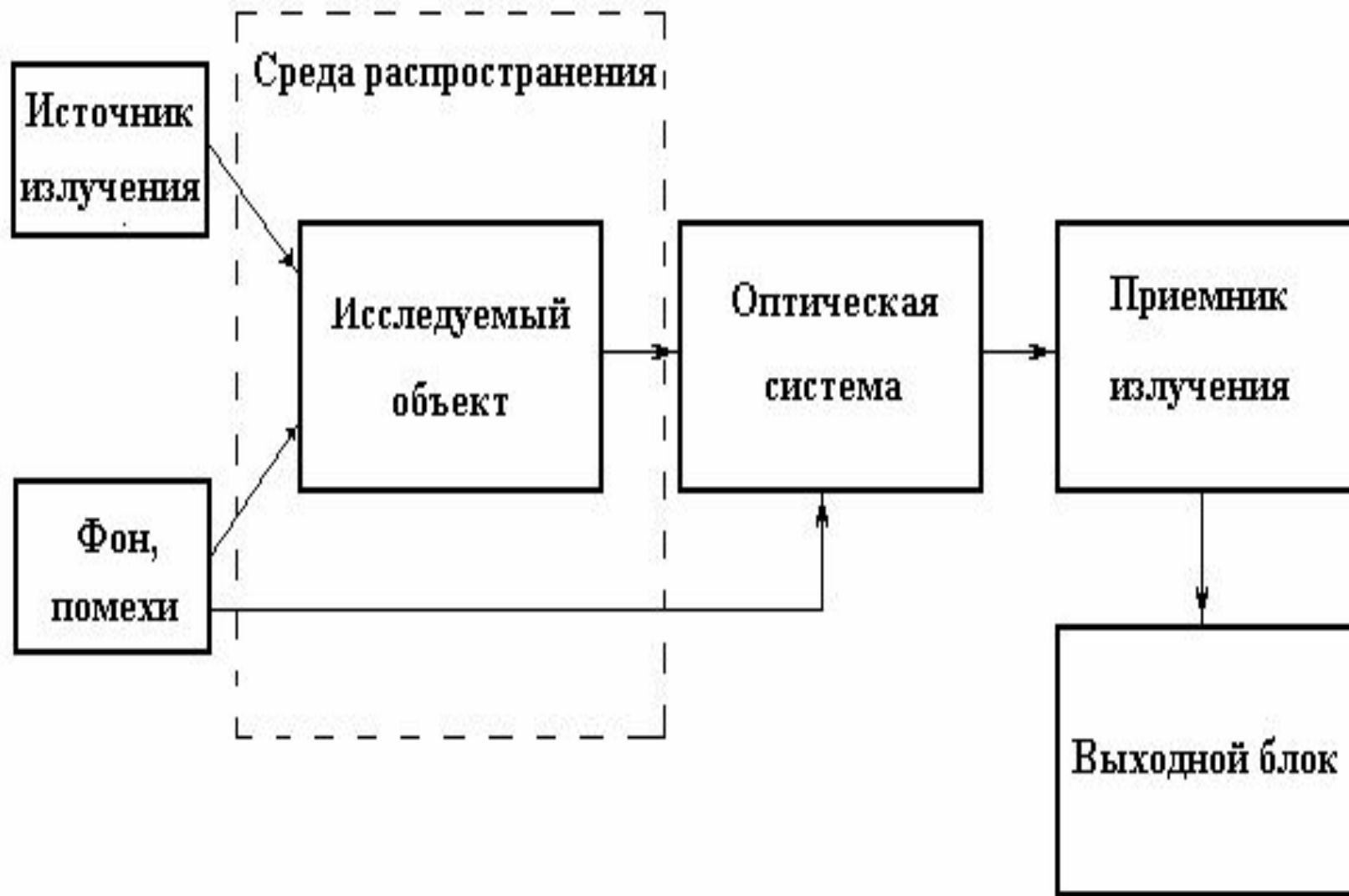


Рис. 2. Обобщенная схема ОЭУ.

Источник излучения создает материальный носитель полезной информации - поток излучения. Часто источник излучения дополняется передающей оптической системой, которая направляет лучистый поток на исследуемый объект или непосредственно на приемную оптическую систему (в системах связи).

Приемная оптическая система собирает поток, излучаемый наблюдаемым объектом, фокусирует этот поток и направляет его на приемник излучения. Приемник преобразует оптический сигнал, переносимый потоком излучения, в электрический. Выходной блок (система вторичной обработки информации) производит обработку и формирует сигнал, обеспечивающий работу исполнительной или индикаторной системы.

Для выделения полезного сигнала на фоне помех используются не только оптическая система и приемник излучения, но и дополнительные звенья, например сканирующие системы, анализирующие устройства, модуляторы и др.

В зависимости от функционального назначения все ОЭУ военного назначения можно разделить на:

- ОЭУ наблюдения (ПНВ);
- ОЭУ обнаружения и слежения (ТОВ);
- ОЭУ наведения и целеуказания (лазерные системы ВТО).

Как и в радиолокационных системах, в ОЭУ могут реализовываться активный, пассивный и полуактивный методы работы.

При активном методе работы (рис. 3) наблюдаемый объект II облучается источником оптического излучения I, параметрами и характеристиками которого может управлять оператор.

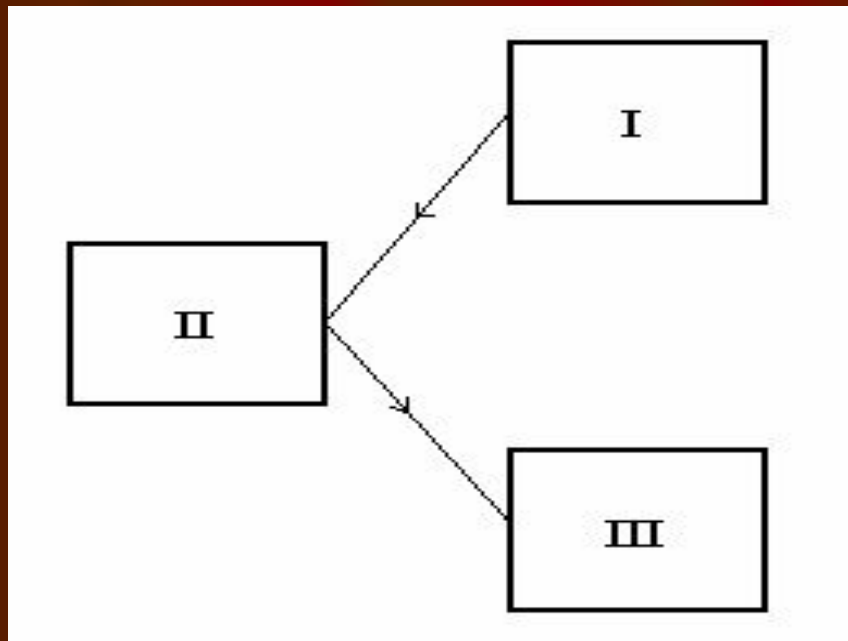


Рис. 3. Активный метод работы ОЭУ

При этом наилучшим образом удастся согласовать параметры источника (передающей системы I), объекта наблюдения II, среды распространения излучения и приемной системы III.

ВЫВОД: при технической реализации активного метода работы, в состав ОЭУ необходимо включать специальный источник оптического излучения, что увеличивает массу, габариты ОЭУ и ухудшает скрытность работы. При **пассивном методе** работы (рис. 4) используется собственное излучение наблюдаемого объекта II, которое и принимает ОЭУ III.

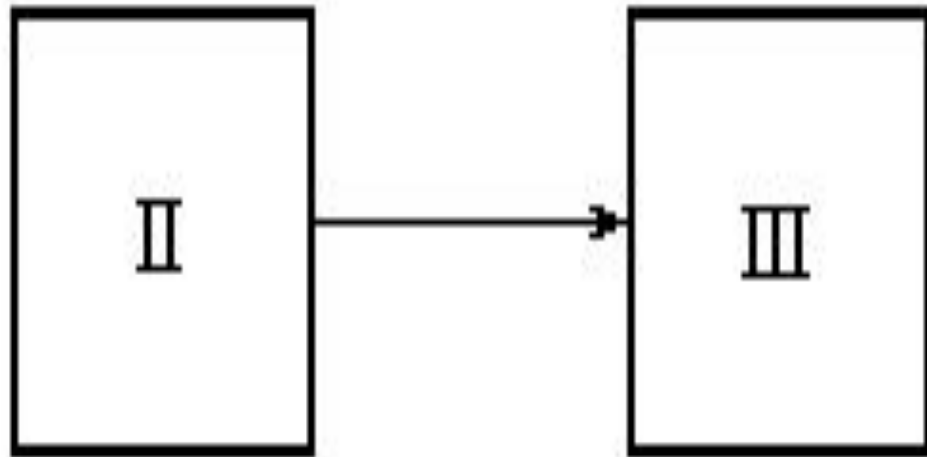
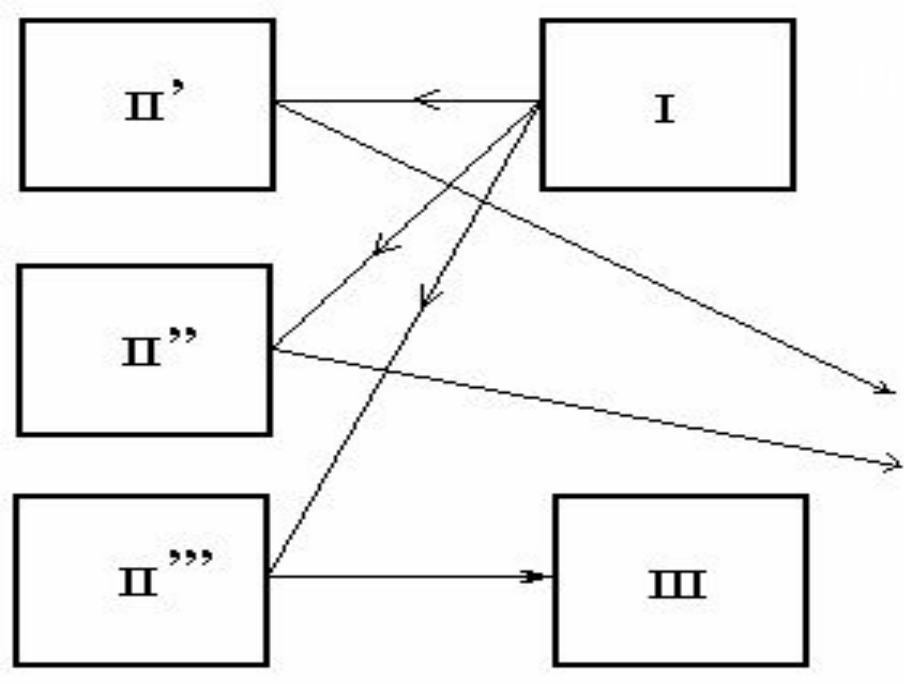


Рис. 4. Пассивный метод работы ОЭУ.

В этом случае для повышения помехозащищенности приходится особенно тщательно следить за оптимальным соответствием параметров ОЭУ, объекта наблюдения и среды распространения излучения.

Достоинство метода: скрытность действия такого ОЭУ.

Недостаток метода: заключается в необходимости высокой чувствительности, частотной и пространственной избирательности ОЭУ, что вызвано относительно малой собственной мощностью излучения воздушных целей, особенно в сравнении с мощностью фонов или помех.



с. 5. Полуактивный метод работы ОЭУ.

При облучении источником I одного или несколько объектов, ОЭУ III выделяет поток, отраженный только от одного из них, причем, как правило, параметрами излучения источника управлять нельзя (например, в случае использования естественной освещенности). Такой метод называют **полуактивным**.

Достоинство ОЭУ: работа на значительно более высоких частотах позволяет получить более высокую направленность излучения, более высокую точность измерения и разрешающую способность, как по угловым координатам, так и по дальности, в сравнении с радиоэлектронными устройствами (РЭУ).

Недостаток ОЭУ: относительно небольшая дальность действия в сравнении с радиоэлектронными устройствами, что связано с ослаблением оптического излучения в атмосфере, а также наличием фоновых помех.

2-ой вопрос: Физические основы работы ОЭУ.

I. Основные свойства и характеристики оптического (инфракрасного) излучения.

Источником инфракрасного излучения в веществе являются атомы и молекулы. Излучение атомов является следствием перехода электронов между высшими энергетическими уровнями. Каждому типу перехода соответствует излучение с узкой полосой длин волн оптического спектра. Большинство атомарных инфракрасных линий спектра, соответствующих излучению отдельных атомов, имеют сравнительно малую ширину и лежат непосредственно около красной части спектра видимого света в ближней инфракрасной области с длиной волны от 0,78 до 2,5 мкм.

II. Основные законы инфракрасного излучения.

Закон Стефана-Больцмана

Австрийский физик Й.Стефан, анализируя результаты экспериментальных исследований (1879 г.), и немецкий физик Л. Больцман, применив термодинамический метод (1884 г.), установили **зависимость энергетической светимости абсолютно черного тела (АЧТ) от его температуры.**

Согласно закону Стефана – Больцмана интегральная плотность излучения абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры:

$$RT = \sigma \cdot T^4,$$

где $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ - постоянная Стефана-Больцмана.

Для сравнения различных излучателей используется **общий эталон** – абсолютно черное тело, под которым подразумевается гипотетический тепловой излучатель, имеющий при заданной температуре для всех длин волн максимально возможную излучательность. Абсолютно черное тело полностью поглощает все падающие на него электромагнитные излучения, преобразуя их энергию в тепловую.

Закон Планка

Закон Стефана – Больцмана, определяя зависимость интегральной плотности излучения от температуры, не позволяет определить спектральный состав излучения АЧТ (абсолютно чёрное тело). Эту задачу решил голландский физик М. Планк в 1900 г., отказавшись от положений классической физики и выдвинув квантовую гипотезу излучения.

Согласно закону Планка распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела имеет следующий вид:

$$r_\lambda = c_1 \cdot \lambda^{-5} [\exp(c_2/\lambda T) - 1]^{-1}, \quad (1.1)$$

где $c_1 = 3,715 \cdot 10^{-16}$ Вт·м ; $c_2 = 1,43879 \cdot 10^{-2}$ м·К.

При $\lambda T < 3000$ м·км·К для практических вычислений формулу (1.1) представляют в виде

$$M_\lambda = c_1 \cdot \lambda^{-5} \exp(-c_2/\lambda T).$$

По формуле Планка можно определить плотность излучения АЧТ на единичный интервал длин волн при заданной определенной длине волны.

Закон Голицына-Вина

Закон Голицына-Вина позволяет определить длину волны излучения, соответствующую максимуму кривой $RT = f(\lambda)$, т. е. найти экстремум зависимости интегральной плотности излучения абсолютно черного тела от длины волны. Его математическое выражение имеет следующий вид:

$$\lambda_m = 2898 / T,$$

где λ_m - измеряется в мкм.

Математическое выражение называют законом смещения Вина, т. к. оно показывает смещение максимума спектральной плотности энергетической светимости АЧТ в область более коротких волн по мере возрастания температуры. Именно по этому, например, при нагреве металлов красное каление переходит в белое.

III. Основные параметры и характеристики излучателей

ИК излучение происходит при возбуждении атомов и молекул вещества. Это излучение у большинства источников испускается в виде широкого спектра ЭМВ хаотически, когда колебания не связаны между собой по частоте и фазе. Такое излучение называется некогерентным. Другие источники излучают ЭМВ с одинаковой частотой. Такие источники называются когерентными.

Источники ИК- излучения подразделяются :

1. Источники температурного излучения, генерирующие ИК-излучение при нагреве твердых тел или в результате сжигания какого-либо горючего вещества.
2. Электролюминесцентные источники излучения, генерирующие ИК-излучение вследствие люминесценции, возникающей при прохождении электрического тока через газ или пары металла (различные газосветные лампы).
3. Источники смешанного излучения, в которых одновременно происходит электролюминесценция и тепловое излучение (ртутные лампы высокого и сверхвысокого давления, электродуговые лампы и т. д.).
4. Электромагнитные радиотехнические источники, генерирующие ИК-излучение в переходной (субмиллиметровой) области спектра от ИК к радиоизлучению (искровые генераторы, использующие принцип вибратора Герца).
5. Квантово-механические когерентные источники излучения, в которых используется способность атомов излучать кванты энергии под воздействием стимулирующего излучения (лазеры).

В зависимости от характера распределения энергии излучения по спектру, все источники излучения принято делить на источники с непрерывным спектром, к которым относятся источники теплового излучения (излучения, возникающего в результате теплового возбуждения частиц вещества: атомов, молекул, ионов), источники с полосовым или линейным спектрами, к которым относятся люминесцентные излучатели и лазеры, а также источники смешанного типа, у которых наряду со сплошным спектром излучения имеются отдельные полосы или линии излучения. Взаимное расположение полос в спектре излучения, возникающего вследствие изменения движений молекулы, зависит от ее структуры и непосредственно связано с энергией испускаемых квантов. Монохроматическое излучение по квантовой теории представляет собой поток квантов одинаковой энергии $E_{кв}$, а по волновой теории характеризуется одинаковой частотой ν электромагнитных колебаний. Постоянная величина отношения энергии кванта к соответствующей частоте называется квантовой постоянной $E_{кв} / \nu = h$ (постоянной Планка) и выражается числом $h = 6,626196 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Мощность потока излучения $\Phi_{\text{Э}}$, т. е. количество энергии, проходящей через поверхность в единицу времени, определяется количеством квантов, проходящих за одну секунду через площадь данной поверхности.

Количество энергии, излученной или поглощенной веществом, кратно величине энергии кванта. Так как квант излучения обладает энергией и скоростью, то согласно теории относительности, он имеет массу $m_{\text{кв}}$ и количество движения $P_{\text{кв}}$, определяемые формулами:

$$\Phi_{\text{Э}} = N \cdot h \cdot \nu; \quad m_{\text{кв}} = h \cdot \nu / c^2; \quad P_{\text{кв}} = m_{\text{кв}} \cdot c = h \cdot \nu / c.$$

ВЫВОД: энергия и масса кванта зависят от длины волны электромагнитного излучения.

IV. Характеристики ИК-излучения и фона

Абсолютно черное тело не имеет отраженных потоков, так как полностью поглощает падающую на него лучистую энергию. Реально существующие в природе предметы не являются идеальными излучателями, т. е. абсолютно черными телами. Лучистый поток каждого реального излучателя содержит в себе собственное излучение, возникающее при колебаниях молекул и атомов его вещества, а также побочные потоки, создаваемые вследствие отражения лучистой энергии других источников при падении на излучатель.

Собственное ИК-излучение летательных аппаратов (ЛА) является основным источником лучистой энергии для оптико-электронных приборов наведения зенитных управляемых ракет.

Основными источниками (излучателями) ИК энергии у самолетов с поршневыми двигателями являются выхлопные патрубки с температурой, изменяющейся в пределах 1100...1300 К, выхлопные газы с температурой до 1200...1350 К, а также капоты двигателей с температурой 350...370 К.

Наиболее выгодно использовать излучение капота двигателя при стрельбе на встречных курсах, так как именно в передней полусфере оно максимально.

Мощность лучистого потока этих излучателей, кроме температуры, зависит также от формы, размеров и излучательных свойств их поверхностей, а также от размещения на самолете и экранировки.

Основными излучателями ИК энергии у реактивного самолета при дозвуковых скоростях полета являются двигатель и реактивная струя раскаленных газов. Для наведения ОЭУ можно использовать излучение факела газовой струи турбореактивного двигателя самолета. Излучение основных газовых составляющих факела турбореактивного двигателя (паров воды и углекислого газа) возбуждается колебаниями молекул с частотами, совпадающими с собственными частотами колебаний молекул тех же веществ в атмосфере.

Температура факела по мере удаления от среза двигателя и оси струи весьма быстро убывает, начиная примерно с 900 К, и при удалении от среза на 4 м не превышает 500 К.

При стрельбе под большими ракурсами в качестве источника излучения для ОЭУ наведения ЗУР используют центральную часть факела у среза с температурой 900...600 К. Данный источник создает инфракрасное излучение с длинами волн 3,2...3,8 мкм, пропускание которого в атмосфере достигает 70...90 %.

V. Характеристика ИК-излучения фона

Излучение естественных источников создает помехи, мешающие работе ОЭУ. Для того чтобы избавиться от этих помех, необходимо знать спектральный состав и интенсивность мешающих излучений.

Источниками таких излучений являются Солнце, Луна, Земля, а также облака и прочие неоднородности в атмосфере. Кроме естественных помех, противник может преднамеренно затруднять работу ОЭУ с помощью искусственных помех.

Наиболее интенсивным излучателем внешней среды является Солнце, основной источник излучения которого - фотосфера - характеризуется средней энергетической яркостью $2,1 \cdot 10^7$ Вт/м²·ср и цветовой температурой от 5700°К до 6100°К.

Около половины солнечной энергии излучается в ИК-области спектра, 40% - в видимой области и 10% - в УФ и рентгеновской областях.

Средняя энергетическая яркость излучения Солнца в области земной орбиты составляет 2020 Вт/см²·ср. Экспериментальные исследования показали, что длительное облучение солнечной энергией фоторезисторов на основе *PbS*, используемых в ОЭУ, приводит к их повреждению, поэтому фотоприемники ОЭУ до этапа боевого применения нужно закрывать непрозрачными колпаками.

Шумы при наблюдении целей на фоне ясного неба создаются собственным излучением атмосферы, т. е. излучением молекул водяных паров, углекислого газа, озона и других ее составляющих, а также рассеянным излучением Солнца.

Ночью, когда температура воздуха снижается, излучение чистого ночного неба сдвигается в более длинноволновую область спектра и его максимум находится на длине волны $\lambda = 10,5$ мкм. В дневное время излучение неба возрастает в несколько раз, а максимум излучения сдвигается в видимую область спектра с длиной волны $\lambda = 0,45$ мкм.

Собственное излучение атмосферы Земли, величина энергетической яркости которой при $\lambda < 3$ мкм относительно мала, не может создать существенных помех в работе инфракрасных приборов самонаведения. Но при $\lambda > 4$ мкм помехи от собственного излучения атмосферы становятся существенными по сравнению с полезным излучением целей.

При облачном небе величины фоновых шумов в ОЭУ во многом определяются лучистой энергией, идущей от облаков вследствие отражения солнечной энергии и собственного излучения облаков.

Выводы:

1. Природа инфракрасного излучения связана с атомными и молекулярными процессами в веществах во всех формах их агрегатного состояния.
2. К основным физическим законам, описывающим закономерности инфракрасного излучения, относятся законы Стефана-Больцмана, Планка и Голицына-Вина.
3. Основными излучателями ИК энергии самолетов с поршневыми двигателями являются выхлопные патрубки, выхлопные газы с температурой до $1200...1350^{\circ}\text{K}$, а так же капоты двигателей.
4. В коротковолновой области оптического диапазона в излучении неба превалирует рассеянное излучение Солнца, а в длинноволновой - собственное излучение атмосферы.