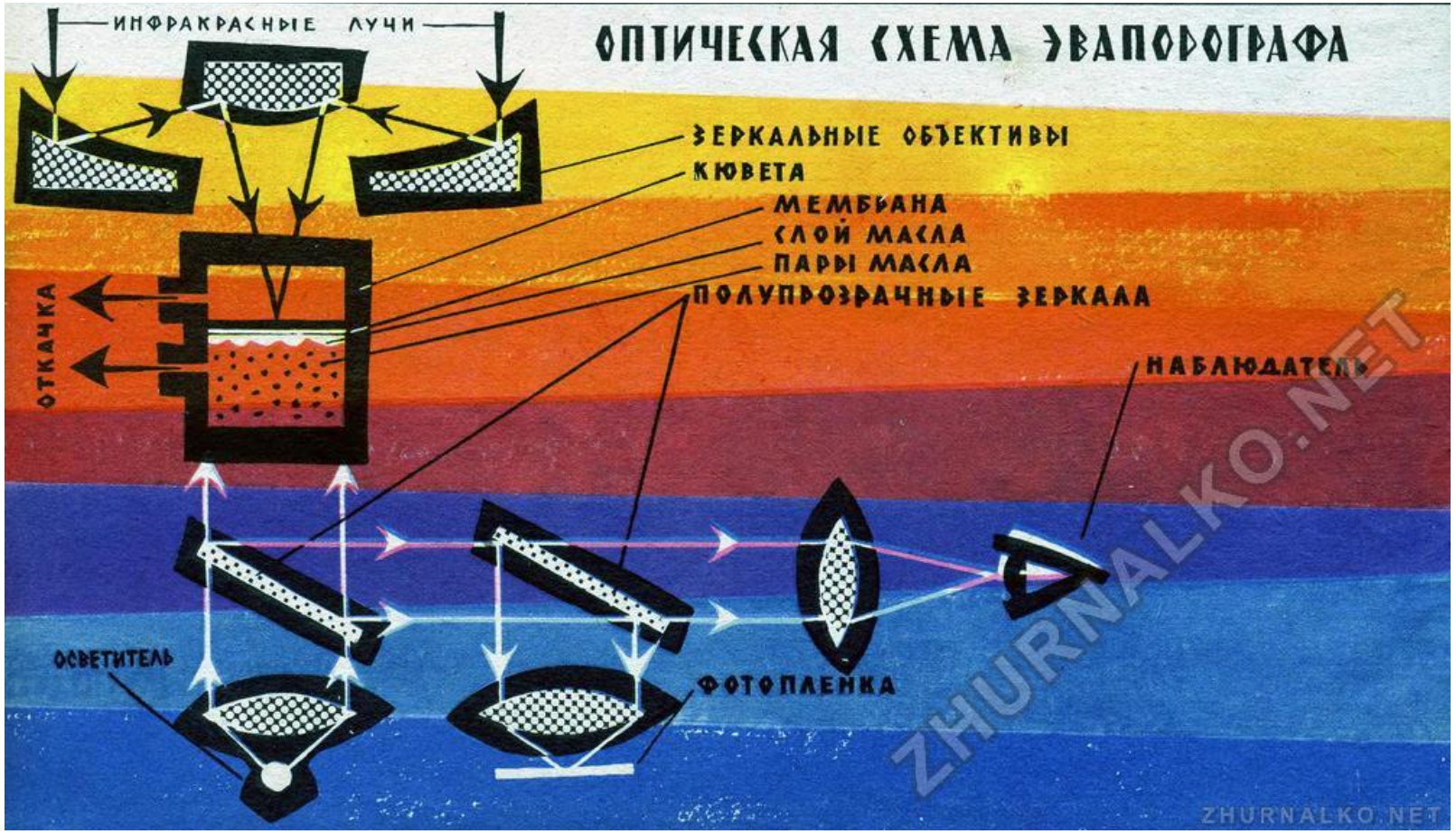
Тепловизоры

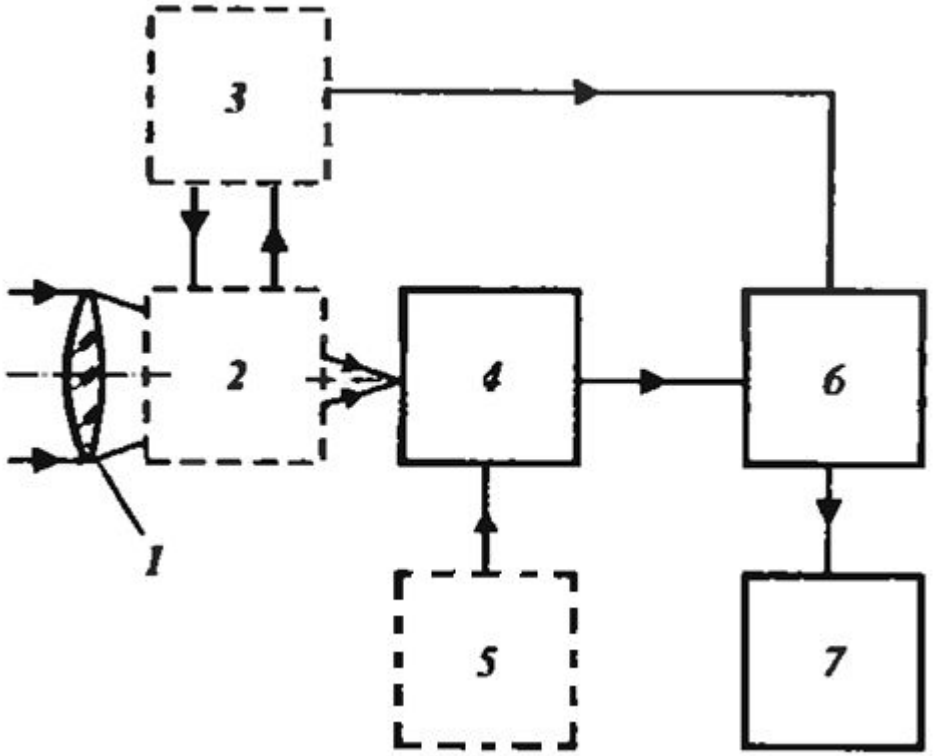
Эвапорограф



$\Delta T \cong 0{,}2 \ldots 1$ К; $\tau \cong 5 \ldots 10$ с при $\Delta T = 1$ К; $N \cong 10 \ldots 14$ мм$^{-1}$

Тепловизоры

Структурная схема

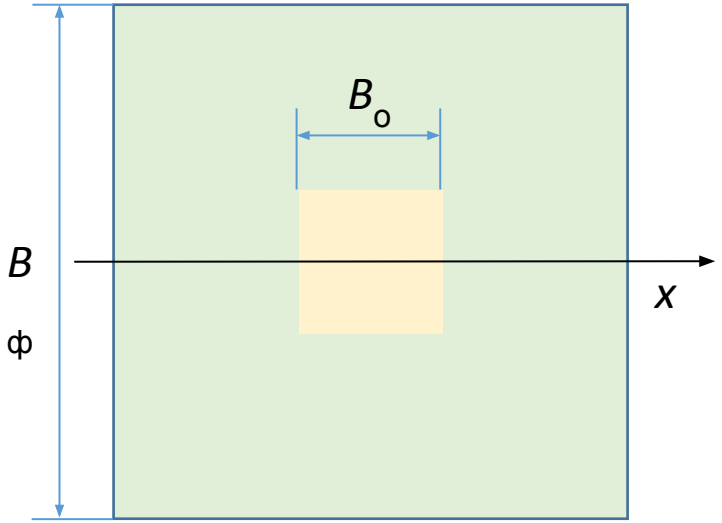


1 – объектив
2 – блок оптико-механической развертки
3 – привод и датчик положения элементов развертки
4 – ФПУ
5 – блок охлаждения ФПУ
6 – блок электронной обработки изображения
7 – индикаторное устройство

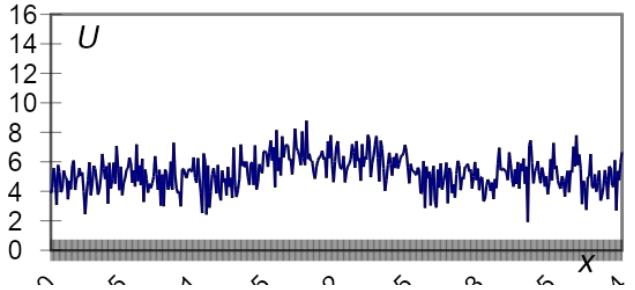
Тепловизоры

Эквивалентная шуму разность температур

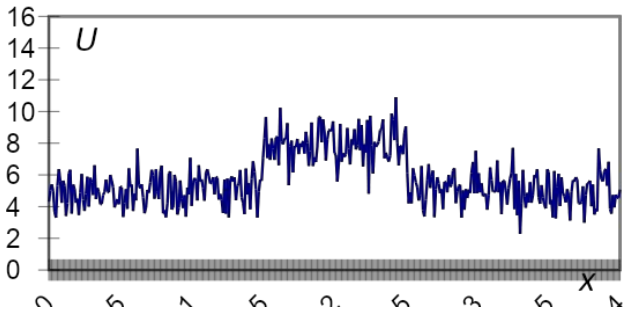
Разность температур объекта и фона, излучающих как черные тела, при которой отношение сигнала к шуму на выходе электрического фильтра системы, рассматривающей тест-объект, равно 1.



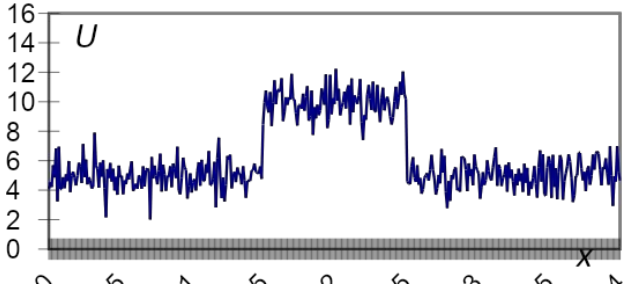
$$U_c = \sqrt{\overline{U_ш^2}}$$



$$U_c = 3\sqrt{\overline{U_ш^2}}$$



$$U_c = 5\sqrt{\overline{U_ш^2}}$$



$$U_c \gg \sqrt{\overline{U_ш^2}}$$

$$\Delta T_{эш} = \frac{\Delta T\sqrt{\overline{U_ш^2}}}{U_c}$$

для электрического фильтра с временем просмотра элемента разложения $\tau_э$

$$|T(f)| = [1 + (2\pi f\tau_э)^2]^{-0,5}$$

Тепловизоры

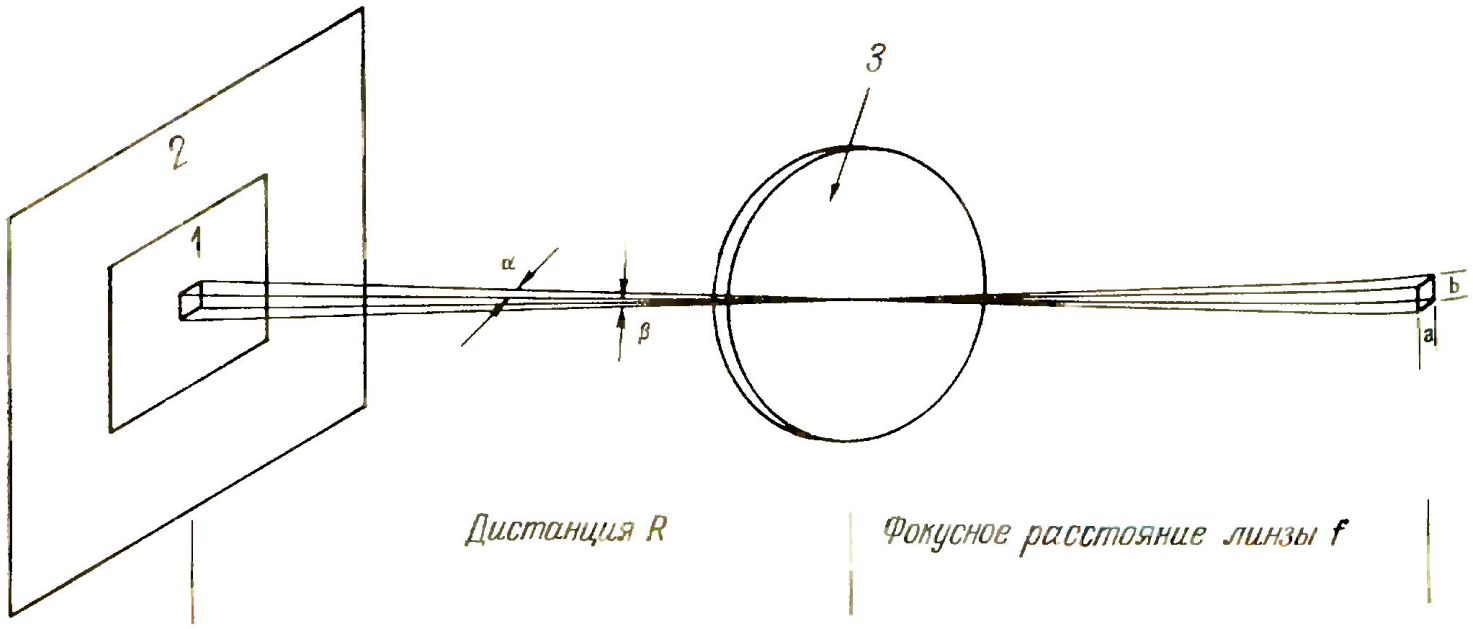
Вывод выражения для эквивалентной шуму разности температур

Допущения

1. Чувствительность приемника излучения одинакова в пределах площади его прямоугольного чувствительного элемента
2. Обнаружительная способность приемника не зависит от других параметров, входящих в выражение для $\Delta T_{\text{эш}}$
3. Потери при прохождении излучения через атмосферу между объектом и приемным устройством пренебрежимо малы
4. Объект и фон излучают как черные тела
5. Угловой размер чувствительного элемента приемника излучения, угловой размер объекта и угол, соответствующий относительному отверстию собирающей оптики, могут полагаться малыми
6. Электронная обработка сигнала не вносит дополнительных шумов

Тепловизоры

Вывод выражения для эквивалентной шуму разности температур



1 – объект

2 – фон

3 – оптическая система с эффективной площадью входного зрачка A_o

Спектральная яркость фотометрируемой площадки

$$l_e(\lambda) = \frac{m_e(\lambda)}{\pi}$$

Спектральная сила излучения в направлении входного зрачка

$$i_e(\lambda) = l_e(\lambda)\alpha\beta R^2 = \frac{m_e(\lambda)}{\pi}\alpha\beta R^2$$

Спектральный поток, упавший на элементарный приемник

$$\varphi_e(\lambda) = \frac{i_e(\lambda)}{R^2}A_o\tau_o(\lambda) = l_e(\lambda)\alpha\beta A_o\tau_o(\lambda) = \frac{m_e(\lambda)}{\pi}\alpha\beta A_o\tau_o(\lambda)$$

Тепловизоры

Вывод выражения для эквивалентной шуму разности температур

$$\frac{\partial \varphi_e(\lambda)}{\partial T} = \frac{\alpha\beta A_{\text{о}}\tau_{\text{о}}(\lambda)}{\pi}\frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T}$$

$$\frac{\partial U_{\text{с}}(\lambda)}{\partial T} = \frac{S(\lambda)\partial \varphi_e(\lambda)}{\partial T} = \frac{\alpha\beta A_{\text{о}}\tau_{\text{о}}(\lambda)S(\lambda)}{\pi}\frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T}$$

$$\frac{\partial U_{\text{с}}(\lambda)}{\partial T} = \frac{\alpha\beta A_{\text{о}}\tau_{\text{о}}(\lambda)}{\pi}\frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T}\frac{\sqrt{\overline{U_{\text{ш}}^2}}D^*(\lambda)}{\sqrt{ab\Delta f_{\text{э}}}}$$

$D^*(\lambda)$– обнаружительная способность

$$\frac{\partial U_{\text{с}}}{\partial T} = \int_0^\infty \frac{\partial U_{\text{с}}(\lambda)}{\partial T}d\lambda = \frac{\alpha\beta A_{\text{о}}\sqrt{\overline{U_{\text{ш}}^2}}}{\pi\sqrt{ab\Delta f_{\text{э}}}}\int_0^\infty \frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T}D^*(\lambda)\tau_{\text{о}}(\lambda)d\lambda \approx \frac{\Delta U_{\text{с}}}{\Delta T}$$

$$\Delta T_{\text{эш}} = \frac{\pi\sqrt{ab\Delta f_{\text{э}}}}{\alpha\beta A_{\text{о}}}\left[\int_0^\infty \frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T}D^*(\lambda)\tau_{\text{о}}(\lambda)d\lambda\right]^{-1}$$

Тепловизоры

Вывод выражения для эквивалентной шуму разности температур

Эквивалентная полоса пропускания

$$\Delta f_э = \int_0^\infty |T(f)|^2 df = \int_0^\infty [1 + (2\pi f \tau_э)^2]^{-1} df = \frac{1}{4\tau_э}$$

Время просмотра элемента разложения

$$\tau_э = \frac{n\eta_г\eta_в\alpha\beta}{ABf_к}$$

n – число элементов ФПУ

A, B – размеры поля зрения

$$\Delta T_{эш} = \frac{\pi}{2(\alpha\beta)^{1,5}A_о}\sqrt{\frac{abABf_к}{n\eta_г\eta_в}}\left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T}D^*(\lambda)\tau_о(\lambda)d\lambda\right]^{-1}$$

Тепловизоры

Вывод выражения для эквивалентной шуму разности температур

Эффективный коэффициент пропускания

$$\tau_{\text{о}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T} D^*(\lambda)\tau_{\text{о}}(\lambda)d\lambda \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T} D^*(\lambda)d\lambda\right]^{-1}$$

$$\Delta T_{\text{эш}} = \frac{\pi}{2(\alpha\beta)^{1,5}A_{\text{о}}\tau_{\text{о}}}\sqrt{\frac{abAB f_{\text{к}}}{n\eta_{\text{г}}\eta_{\text{в}}}}\left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T} D^*(\lambda)d\lambda\right]^{-1}$$

Тепловизоры

Вывод выражения для эквивалентной шуму разности температур

$$\frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T}\frac{c_1}{\lambda^5\left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_\text{ф}}\right)-1\right]} = \frac{c_1 c_2 \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_\text{ф}}\right)}{\lambda^6 T_\text{ф}^2\left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_\text{ф}}\right)-1\right]^2} = \frac{c_2 \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_\text{ф}}\right)}{\lambda T_\text{ф}^2\left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_\text{ф}}\right)-1\right]} m_e(\lambda)$$

Для приближения Вина

$$\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_\text{ф}}\right) \gg 1$$

и

$$\frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T} = \frac{c_2}{\lambda T_\text{ф}^2} m_e(\lambda)$$

$$\Delta T_\text{эш} = \frac{\pi T_\text{ф}^2}{2(\alpha\beta)^{1,5} A_\text{о}\tau_\text{о} c_2}\sqrt{\frac{abAB f_\text{к}}{n\eta_\text{г}\eta_\text{в}}}\left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\frac{m_e(\lambda)}{\lambda} D^*(\lambda)d\lambda\right]^{-1}$$

Тепловизоры

Вывод выражения для эквивалентной шуму разности температур

Для идеальных фотонных приемников

$$D^*(\lambda) = \begin{cases} \dfrac{\lambda D^*_{max}}{\lambda_{max}} \text{ при } \lambda \le \lambda_{max} \\ 0 \text{ при } \lambda > \lambda_{max} \end{cases}$$

$$\Delta T_{эш} = \frac{\pi T_ф^2 \lambda_{max}}{2(\alpha\beta)^{1,5} A_o \tau_o c_2 D^*_{max}} \sqrt{\frac{abAB f_к}{n \eta_г \eta_в}} \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} m_e(\lambda) d\lambda \right]^{-1}$$

Тепловизоры

Недостатки эквивалентной шуму разности температур как обобщённого критерия

1. В видеоканале часто возникают нестационарные процессы, которые не видны на индикаторном устройстве, а на шкале вольтметра, измеряющего среднеквадратичное напряжение шума, приводят к завышенным отсчетам, если только эти процессы не подавляются и в вольтметре.
2. Уровень пикового напряжения сигнала определяется с известной долей произвола.
3. Эквивалентная шуму разность температур $\Delta T_{эш}$, измеренная на выходе электронной системы, не всегда показательна для всей системы в целом, потому что между точкой измерения $\Delta T_{эш}$ и конечным изображением имеются свои пространственные фильтры и источники шумов.
4. $\Delta T_{эш}$ учитывает полный шум в полосе, а глаз по-разному воспринимает шумы различных типов и частоты.

Тепловизоры

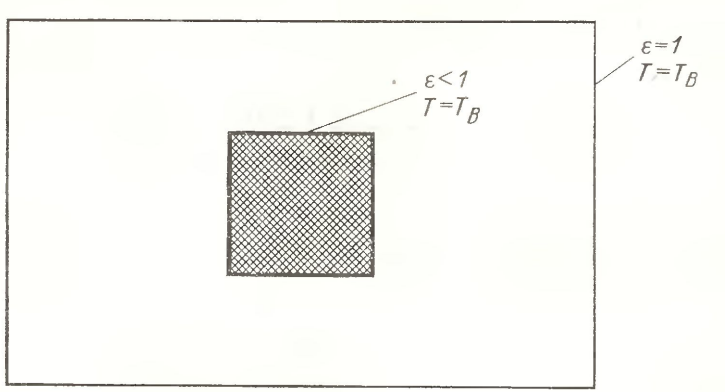
Недостатки эквивалентной шуму разности температур как обобщённого критерия

1. Проектирование системы в расчете на минимум измеренного значения $\Delta T_{эш}$ без рассмотрения других факторов, влияющих на качество изображения, может привести к совершенно неудовлетворительным результатам. Например, часто оказывается возможным улучшить $\Delta T_{эш}$, измеренное в лабораторных условиях, за счет расширения спектрального диапазона, а в результате характеристики системы в реальных условиях могут резко ухудшиться. Одна из возможных причин ухудшения $\Delta T_{эш}$ заключается в том, что при расширении спектрального диапазона система становится чувствительной к солнечным бликам.
2. Величина $\Delta T_{эш}$ не учитывает влияния на отношение сигнала к шуму различий в коэффициенте излучения.
3. Величина $\Delta T_{эш}$ практически бесполезна при сравнении систем, работающих в разных спектральных диапазонах, с различными характеристиками пропускания излучения атмосферой.
4. Зрительный аппарат работает как фильтр нижних частот, отрезающий шумы на высоких пространственных частотах.

Тепловизоры

Вывод выражения для эквивалентного шума коэффициента излучения

Объект – серый излучатель с коэффициентом излучения ε с температурой $T_\text{ф}$



$$\Delta m_e(\lambda) = \varepsilon m_e(\lambda) - m_e(\lambda) = (\varepsilon - 1) m_e(\lambda) \qquad \Delta\varphi_e(\lambda) = \frac{(\varepsilon - 1) m_e(\lambda)}{\pi} \alpha\beta A_\text{о} \tau_\text{о}(\lambda)$$

$$\Delta U_\text{с}(\lambda) = \frac{(\varepsilon - 1) m_e(\lambda) \alpha\beta A_\text{о} \tau_\text{о}(\lambda)}{\pi} \frac{\sqrt{\overline{U_\text{ш}^2}} D^*(\lambda)}{\sqrt{ab\Delta f_\text{э}}}$$

$$\Delta U_\text{с} = \frac{(\varepsilon - 1)\alpha\beta A_\text{о} \sqrt{\overline{U_\text{ш}^2}}}{\pi\sqrt{ab\Delta f_\text{э}}} \int_0^\infty m_e(\lambda) D^*(\lambda) \tau_\text{о}(\lambda) d\lambda$$

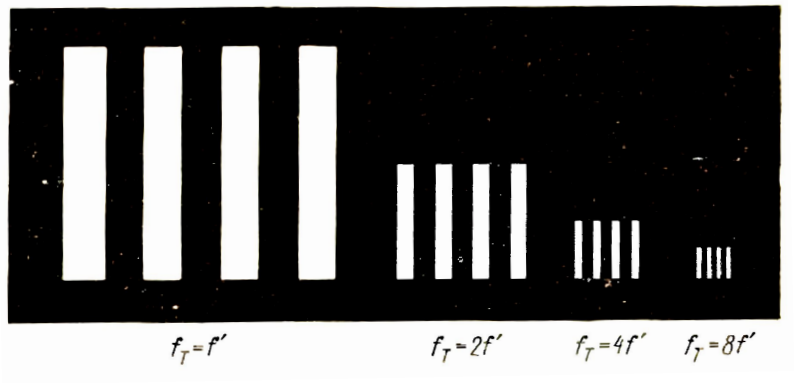
Пусть $\frac{\Delta U_\text{с}}{\sqrt{\overline{U_\text{ш}^2}}} = -1$

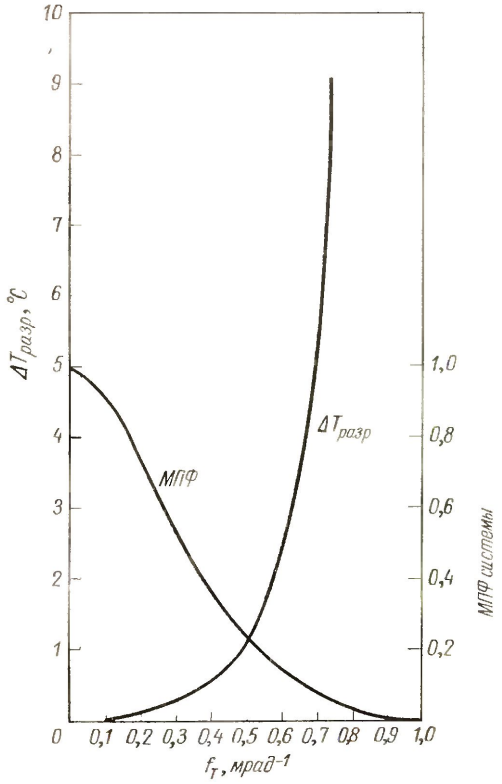
$$\varepsilon_\text{эш} = 1 - \frac{\pi\sqrt{ab\Delta f_\text{э}}}{\alpha\beta A_\text{о}} \left[\int_0^\infty m_e(\lambda) D^*(\lambda) \tau_\text{о}(\lambda) d\lambda\right]^{-1} = 1 - \Delta T_\text{эш} \left[\int_0^\infty \frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T} D^*(\lambda) \tau_\text{о}(\lambda) d\lambda\right] \left[\int_0^\infty m_e(\lambda) D^*(\lambda) \tau_\text{о}(\lambda) d\lambda\right]^{-1}$$

Тепловизоры

Обобщенные критерии

Минимальная разрешаемая разность температур
или температурно-частотная





Минимальная обнаруживаемая разность температур

Тепловизоры

Термоаберрации оптических систем

Изменение фокусного расстояния за счет температурного коэффициента показателя преломления β

$$f' = \frac{R_1 R_2}{(n-1)(R_2 - R_1)}$$

$$\frac{\partial f'}{\partial n} = -\frac{R_1 R_2}{(n-1)^2 (R_2 - R_1)} = -\frac{f'}{(n-1)}$$

$$\Delta i_\beta = -\frac{f'}{(n-1)} \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T = -\frac{f'}{(n-1)} \beta \Delta T$$

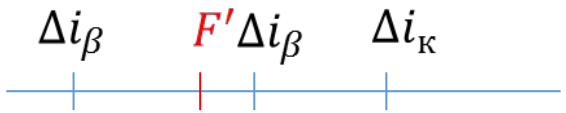
Изменение фокусного расстояния за счет теплового коэффициента расширения α

$$\Delta R = R \alpha \Delta T \rightarrow \Delta i_\alpha = f' \alpha \Delta T$$

Перемещение ФПУ из-за изменения длины элементов конструкции за счет теплового коэффициента расширения $\alpha_к$

$$\Delta i_к = f' \alpha_к \Delta T$$

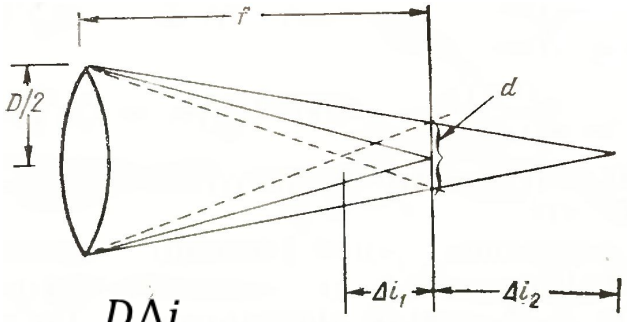
Полная расфокусировка при $\Delta T > 0$ и $\beta > 0$



$$\Delta i = -\Delta i_\beta - \Delta i_\beta + \Delta i_к =$$

$$= \left[\frac{1}{(n-1)} \beta - \alpha + \alpha_к\right] f' \Delta T$$

Кружок рассеяния за счет термоаберраций $d_{та}$



$$d_{та} \approx \frac{D \Delta i}{f'}$$