

# Тепловизоры

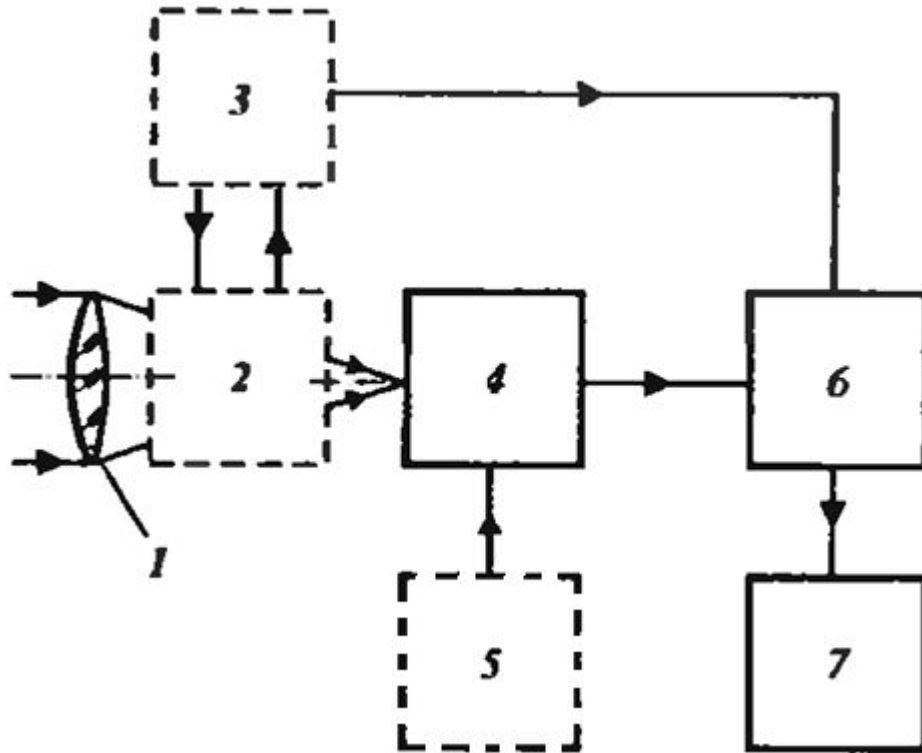
## Эвапорограф



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

# Тепловизоры

## Структурная схема

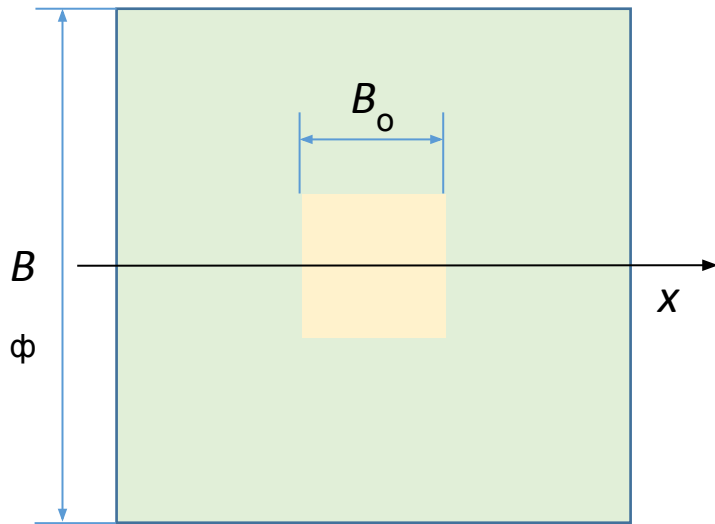


- 1 – объектив
- 2 – блок оптико-механической развертки
- 3 – привод и датчик положения элементов развертки
- 4 – ФПУ
- 5 – блок охлаждения ФПУ
- 6 – блок электронной обработки изображения
- 7 – индикаторное устройство

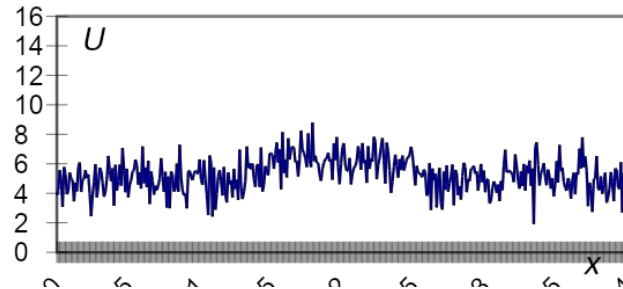
# Тепловизоры

## 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.

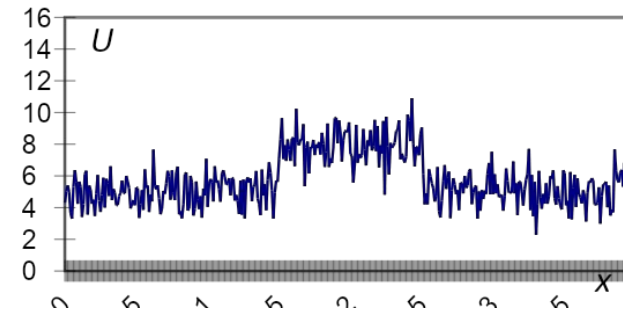


$$U_c = \sqrt{U_{\text{ш}}^2}$$



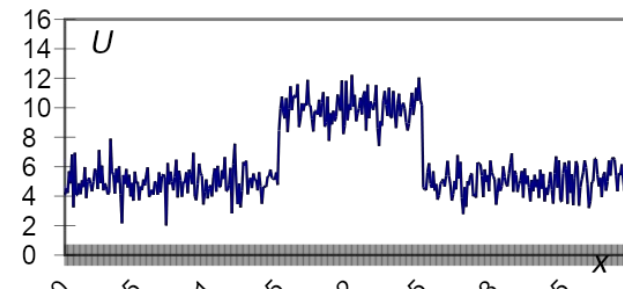
$$U_c \gg \sqrt{U_{\text{ш}}^2}$$

$$U_c = 3\sqrt{U_{\text{ш}}^2}$$



$$\Delta T_{\text{эш}} = \frac{\Delta T \sqrt{U_{\text{ш}}^2}}{U_c}$$

$$U_c = 5\sqrt{U_{\text{ш}}^2}$$



для электрического фильтра с временем просмотра элемента разложения  $\tau_{\text{э}}$   
 $|T(f)| = [1 + (2\pi f \tau_{\text{э}})^2]^{-0,5}$

# Тепловизоры

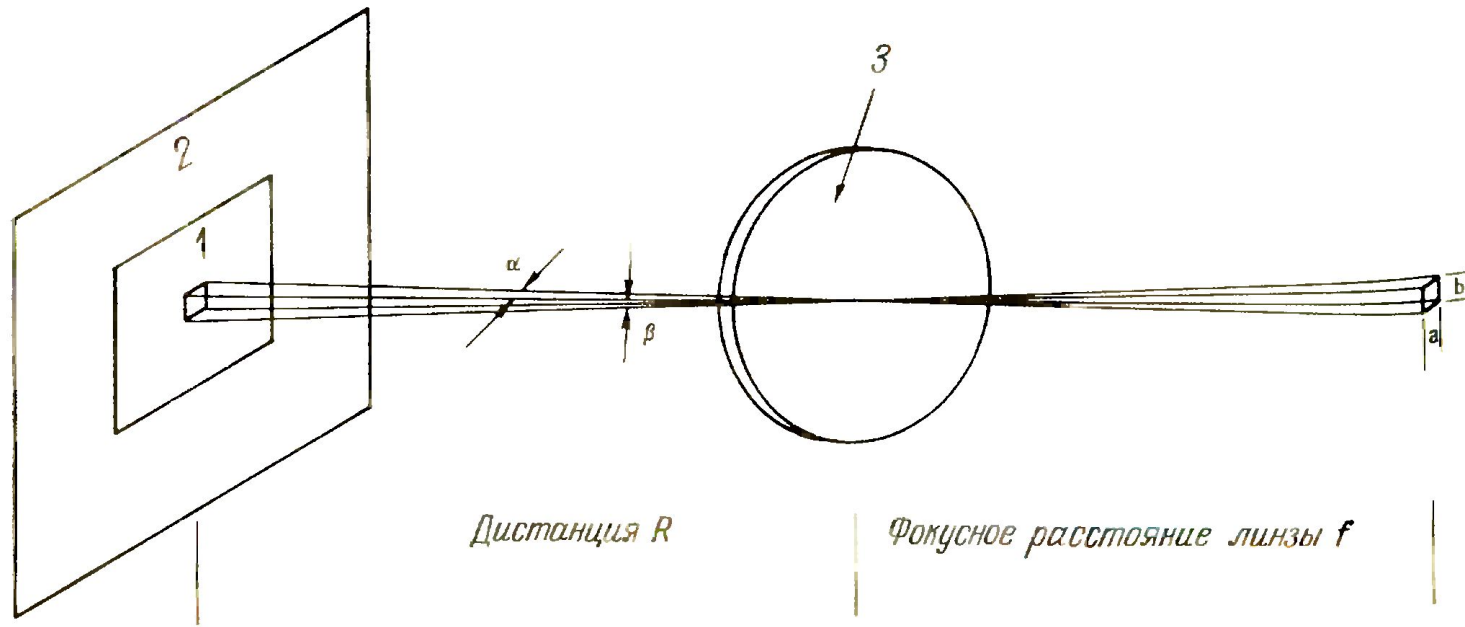
## Вывод выражения для эквивалентной шуму разности температур

Допущени

1. Чувствительность приемника излучения одинакова <sup>я</sup> 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 относительно 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  $A_0$

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

$$\varphi_e(\lambda) = \frac{i_e(\lambda)}{R^2} A_0 \tau_0(\lambda) = l_e(\lambda) \alpha \beta A_0 \tau_0(\lambda) = \frac{m_e(\lambda)}{\pi} \alpha \beta A_0 \tau_0(\lambda)$$

# Тепловизоры

Вывод выражения для эквивалентной шуму разности температур

$$\frac{\partial \varphi_e(\lambda)}{\partial T} = \frac{\alpha \beta A_0 \tau_0(\lambda)}{\pi} \frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T}$$

$$\frac{\partial U_c(\lambda)}{\partial T} = \frac{S(\lambda) \partial \varphi_e(\lambda)}{\partial T} = \frac{\alpha \beta A_0 \tau_0(\lambda) S(\lambda)}{\pi} \frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T}$$

$$\frac{\partial U_c(\lambda)}{\partial T} = \frac{\alpha \beta A_0 \tau_0(\lambda)}{\pi} \frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T} \frac{\sqrt{U_{\text{ш}}^2} D^*(\lambda)}{\sqrt{ab \Delta f_3}}$$

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

$$\frac{\partial U_c}{\partial T} = \int_0^{\infty} \frac{\partial U_c(\lambda)}{\partial T} d\lambda = \frac{\alpha \beta A_0 \sqrt{U_{\text{ш}}^2}}{\pi \sqrt{ab \Delta f_3}} \int_0^{\infty} \frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T} D^*(\lambda) \tau_0(\lambda) d\lambda \approx \frac{\Delta U_c}{\Delta T} \quad \Delta T_{\text{эш}} = \frac{\pi \sqrt{ab \Delta f_3}}{\alpha \beta A_0} \left[ \int_0^{\infty} \frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T} D^*(\lambda) \tau_0(\lambda) d\lambda \right]^{-1}$$

# Тепловизоры

## Вывод выражения для эквивалентной шуму разности температур

Эквивалентная полоса пропускания

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

Время просмотра элемента разложения

$$\tau_{\text{э}} = \frac{n\eta_{\Gamma}\eta_{\text{В}}\alpha\beta}{ABf_{\text{К}}}$$

$n$  – число элементов ФПУ

$A, B$  – размеры поля зрения

$$\Delta T_{\text{эш}} = \frac{\pi}{2(\alpha\beta)^{1,5}A_0} \sqrt{\frac{abABf_{\text{К}}}{n\eta_{\Gamma}\eta_{\text{В}}}} \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T} D^*(\lambda) \tau_0(\lambda) d\lambda \right]^{-1}$$

# Тепловизоры

Вывод выражения для эквивалентной шуму разности температур

Эффективный коэффициент пропускания

$$\tau_o = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T} D^*(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T} D^*(\lambda) d\lambda \right]^{-1}$$
$$\Delta T_{\text{эш}} = \frac{\pi}{2(\alpha\beta)^{1,5} A_o \tau_o} \sqrt{\frac{abABf_K}{n\eta_\Gamma\eta_B}} \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T} D^*(\lambda) d\lambda \right]^{-1}$$



# Тепловизоры

Вывод выражения для эквивалентной шуму разности температур

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

Для приближения Вина

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

и

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

$$\Delta T_{\text{эш}} = \frac{\pi T_\phi^2}{2(\alpha\beta)^{1,5} A_o \tau_o c_2} \sqrt{\frac{abABf_k}{n\eta_\Gamma \eta_B}} \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{m_e(\lambda)}{\lambda} D^*(\lambda) d\lambda \right]^{-1}$$

# Тепловизоры

## Вывод выражения для эквивалентной шуму разности температур

Для идеальных фотонных приемников

$$D^*(\lambda) = \begin{cases} \frac{\lambda D_{max}^*}{\lambda_{max}} & \text{при } \lambda \leq \lambda_{max} \\ 0 & \text{при } \lambda > \lambda_{max} \end{cases}$$

$$\Delta T_{\text{эш}} = \frac{\pi T_{\phi}^2 \lambda_{max}}{2(\alpha\beta)^{1,5} A_0 \tau_0 c_2 D_{max}^*} \sqrt{\frac{abAB f_K}{n\eta_{\Gamma}\eta_B}} \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} m_e(\lambda) d\lambda \right]^{-1}$$

# 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  $\Delta T_{\text{эш}}$ , измеренная на выходе электронной системы, не всегда показательна для всей системы в целом, потому что между точкой измерения  $\Delta T_{\text{эш}}$  и конечным изображением имеются свои пространственные фильтры и источники шумов.
4.  $\Delta T_{\text{эш}}$  учитывает полный шум в полосе, а глаз по-разному воспринимает шумы различных типов и частоты.

# Тепловизоры

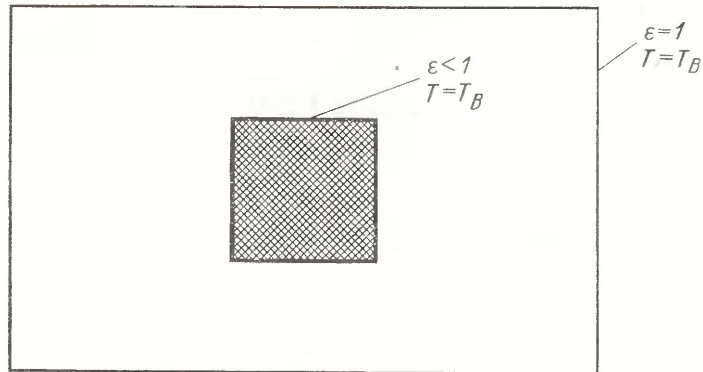
## Недостатки эквивалентной шуму разности температур как обобщённого критерия

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

# Тепловизоры

## Вывод выражения для эквивалентного шуму коэффициента излучения

Объект – серый излучатель с коэффициентом излучения  $\varepsilon$  с температурой  $T_\phi$



$$\Delta m_e(\lambda) = \varepsilon m_e(\lambda) - m_e(\lambda) = (\varepsilon - 1)m_e(\lambda) \quad \Delta \varphi_e(\lambda) = \frac{(\varepsilon - 1)m_e(\lambda)}{\pi} \alpha \beta A_o \tau_o(\lambda)$$

$$\Delta U_c(\lambda) = \frac{(\varepsilon - 1)m_e(\lambda) \alpha \beta A_o \tau_o(\lambda) \sqrt{U_{\text{III}}^2} D^*(\lambda)}{\pi \sqrt{ab \Delta f_\varepsilon}}$$

$$\Delta U_c = \frac{(\varepsilon - 1) \alpha \beta A_o \sqrt{U_{\text{III}}^2}}{\pi \sqrt{ab \Delta f_\varepsilon}} \int_0^\infty m_e(\lambda) D^*(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda$$

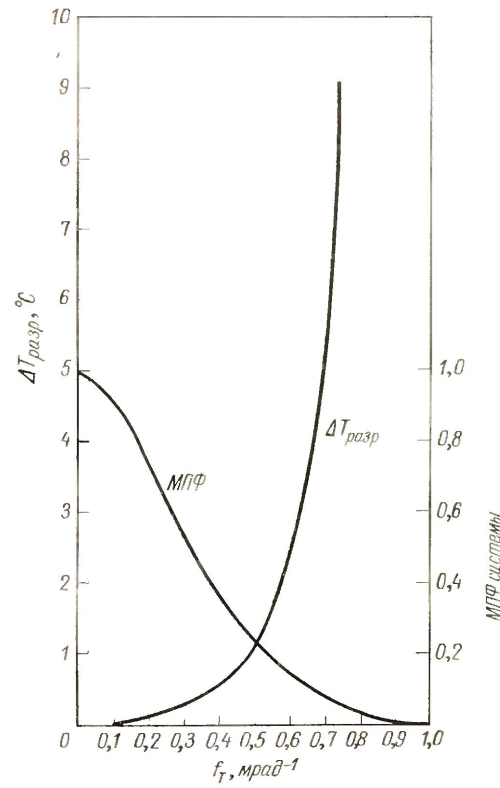
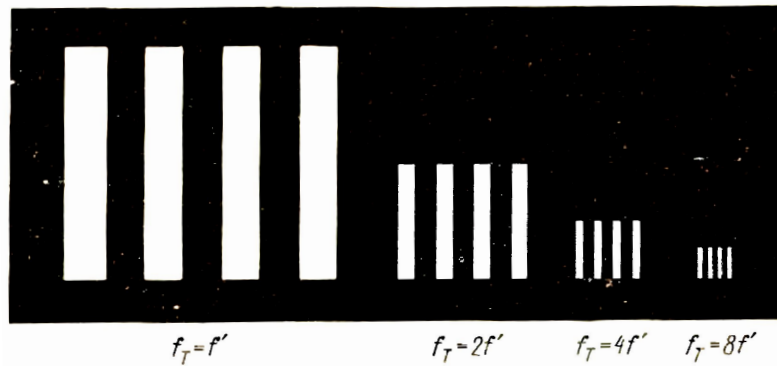
Пусть  $\frac{\Delta U_c}{\sqrt{U_{\text{III}}^2}} = -1$

$$\varepsilon_{\text{ЭШ}} = 1 - \frac{\pi \sqrt{ab \Delta f_\varepsilon}}{\alpha \beta A_o} \left[ \int_0^\infty m_e(\lambda) D^*(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda \right]^{-1} = 1 - \Delta T_{\text{ЭШ}} \left[ \int_0^\infty \frac{\partial m_e(\lambda)}{\partial T} D^*(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda \right] \left[ \int_0^\infty m_e(\lambda) D^*(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda \right]^{-1}$$

# Тепловизоры

## Обобщенные критерии

Минимальная разрешаемая разность температур  
или температурно-частотная



Минимальная  
обнаруживаемая  
разность температур

# Тепловизоры

## Термоабберации оптических систем

Изменение фокусного расстояния за счет температурного коэффициента показателя преломления  $\beta$

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

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

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

Изменение фокусного расстояния за счет теплового коэффициента расширения  $\alpha$

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

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

$$\Delta i_K = f' \alpha_K \Delta T$$

Полная расфокусировка при

$$\Delta T > 0 \text{ и } \beta > 0$$

$$\Delta i_\beta \quad F' \Delta i_\beta \quad \Delta i_K$$

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

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

Кружок рассеяния за счет термоаббераций  $d_{Ta}$

