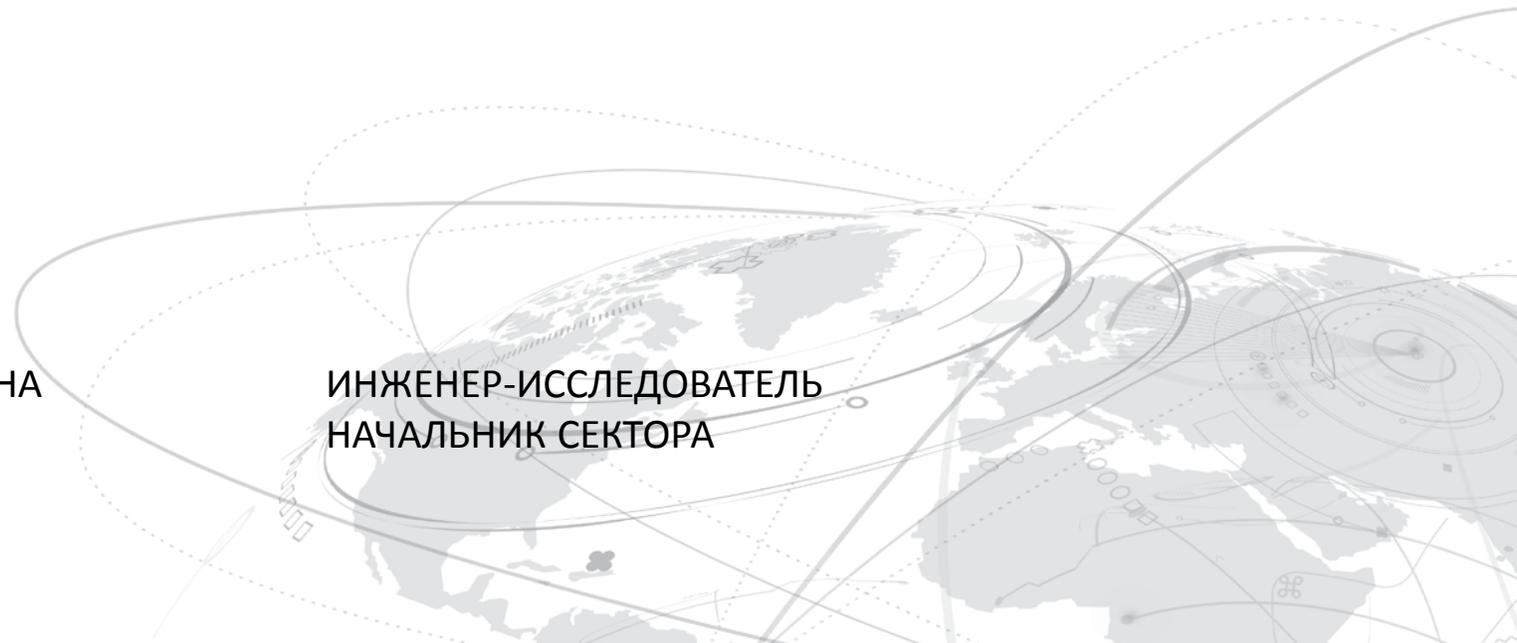




Экспериментальная отработка методик оценки температурного разрешения оптико-электронной аппаратуры в спектральном диапазоне 3 - 14 мкм

НИКОЛАЕВА МАРГАРИТА ВЛАДИМИРОВНА
ЗОРИН СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ

ИНЖЕНЕР-ИССЛЕДОВАТЕЛЬ
НАЧАЛЬНИК СЕКТОРА



МЕНЮ СЛАЙДОВ

| Номер слайда | Название слайда |
|--------------|---|
| 1 | Название доклада |
| 3 | Данные, получаемые аппаратурой ДЗЗ ИК-диапазона. Их потребители |
| 4 | Температурное разрешение |
| 5 | Особенности критериев температурного разрешения |
| 6 | Экспериментальная установка для определения МРРТ $\Delta T_{\text{мррт}}$ и МОРТ $\Delta T_{\text{морт}}$ |
| 7 | Выбор вида и размеров тест-объекта для экспериментальной оценки МРРТ $\Delta T_{\text{мррт}}$ |
| 8 | Выбор вида и размеров тест-объекта для экспериментальной оценки МОРТ $\Delta T_{\text{морт}}$ |
| 9 | Этапы проведения экспериментальной оценки МРРТ $\Delta T_{\text{мррт}}$ и МОРТ $\Delta T_{\text{морт}}$ |
| 10 | Проблемы при контроле МРРТ $\Delta T_{\text{мррт}}$ и МОРТ $\Delta T_{\text{морт}}$ |
| 11 | Расчетная зависимость МРРТ $\Delta T_{\text{мррт}}$ от ЭШРТ $\Delta T_{\text{эшрт}}$ |
| 12 | Теоретическая оценка эквивалентной шуму разности температур $\Delta T_{\text{эшрт}}$ |
| 14 | Расчет эквивалентной шуму разности температур $\Delta T_{\text{эшрт}}$ |
| 15 | Экспериментальная установка для определения ЭШРТ $\Delta T_{\text{эшрт}}$ |
| 16 | Обработка экспериментальных данных при определении ЭШРТ $\Delta T_{\text{эшрт}}$ |
| 17 | Измерение эквивалентной шуму разности температур $\Delta T_{\text{эшрт}}$ |
| 19 | Выводы |
| 20 | Литература |

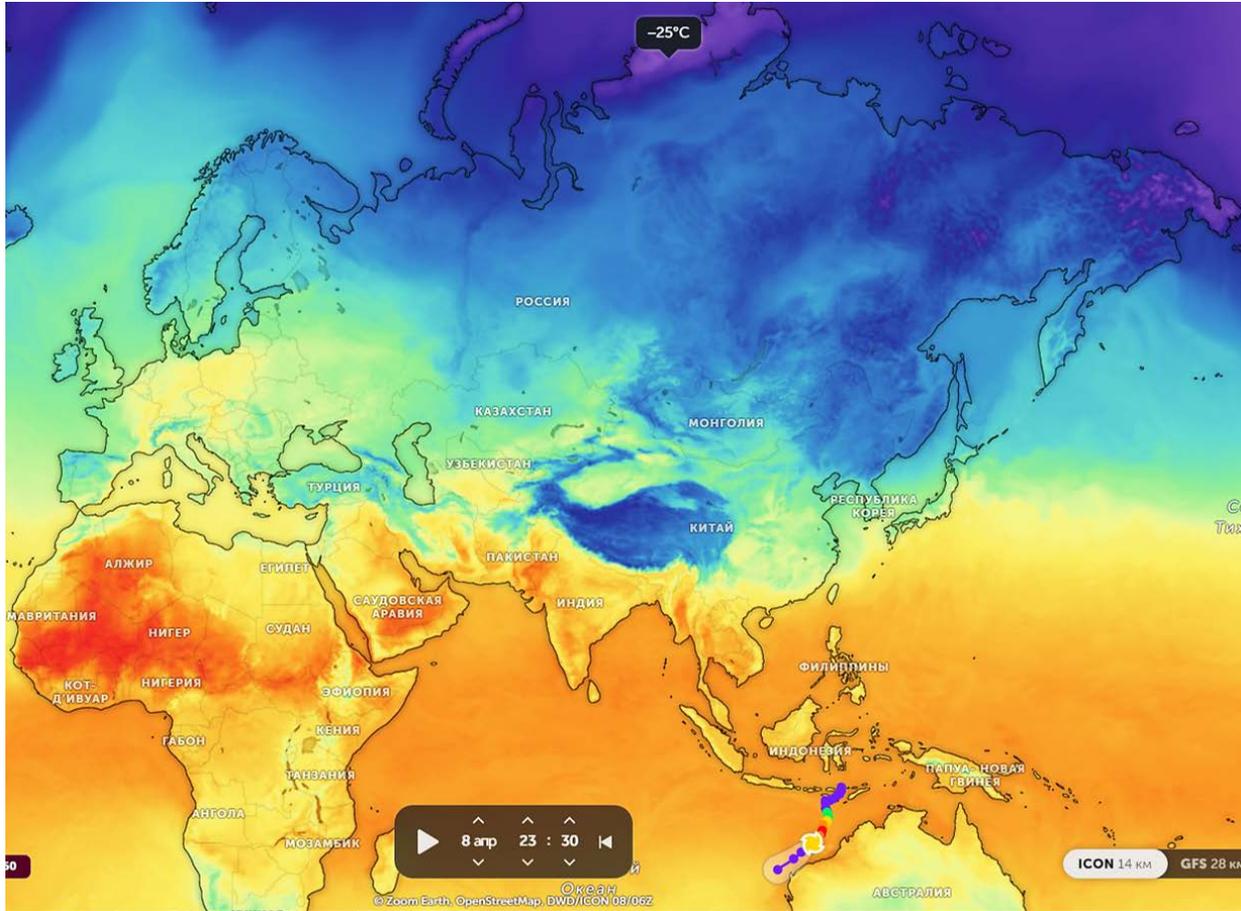
Данные, получаемые аппаратурой ДЗЗ ИК-диапазона. Их потребители

ИК аппаратура ДЗЗ используется для:

- наблюдения явлений и объектов;
- измерения температуры подстилающей поверхности
- круглосуточного контроля локальных техногенных объектов.

Спутниковые данные по температуре необходимы [1]:

- службам по гидрометеорологии;
- службам по мониторингу окружающей среды;
- службам МЧС;
- Министерству природных ресурсов;
- Минсельхозу;
- Росрыболовству;
- Росреестру;
- Рослесхозу;
- заинтересованным коммерческим потребителям.

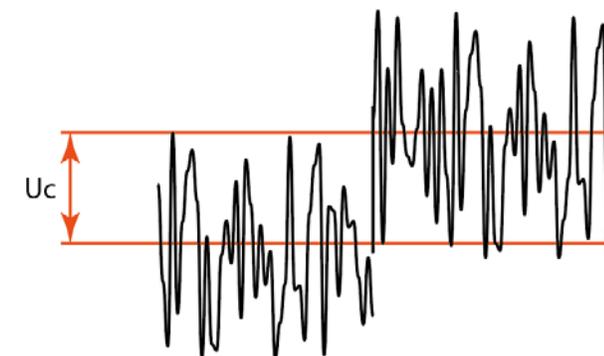


Пример глобальной температурной карты поверхности океана, сформированной по спутниковым данным [2]

Эквивалентная шуму разность температур (ЭШРТ)

$$\Delta T_{\text{эшрт}}$$

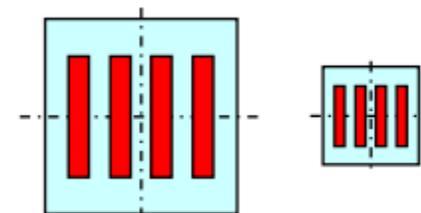
разность эффективных температур протяженного объекта и его окружения, при котором отношение сигнал-шум равно 1



Минимальная разрешаемая разность температур (МРРТ)

$$\Delta T_{\text{мррт}}$$

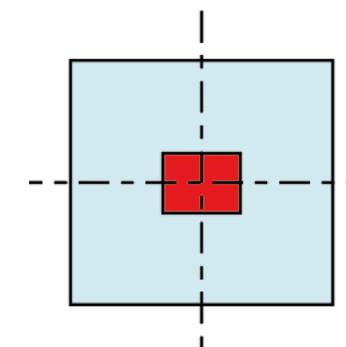
минимальная разность эффективных температур между штрихом и промежутком миры с периодической структурой, позволяющая разрешить штрихи миры



Минимальная обнаруживаемая разность температур (МОРТ)

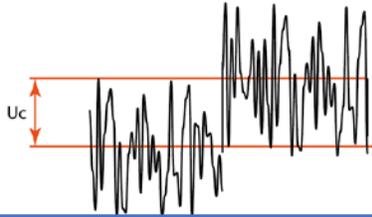
$$\Delta T_{\text{морт}}$$

Минимальная разность эффективных температур протяженного объекта и его окружения при которой становится возможным восприятие объекта при визуальном наблюдении



**Эквивалентная шуму
разность температур**

$$\Delta T_{\text{эшрт}}$$

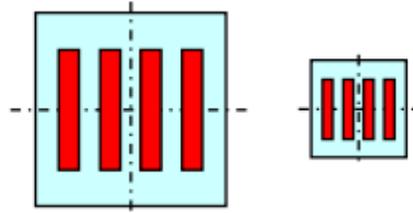


- Объективная количественная оценка температурного разрешения аппаратуры;
- Учитывается влияние оптической системы, приемника излучения, электронного тракта, параметров объекта на шумовые характеристики

Есть отработанные методики [1, 2, 3, 8]

**Минимальная разрешаемая
разность температур**

$$\Delta T_{\text{мррт}}$$

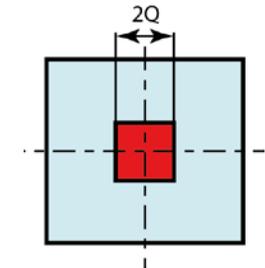


- Субъективная оценка температурного разрешения и обнаружительных свойств аппаратуры;
- Учитывается влияние оптической системы, приемника излучения, электронного тракта, параметров объекта, обработки изображения, устройства вывода и человека-оператора

Методики измерений не полностью проработаны [3, 4]

Минимальная обнаруживаемая разность температур

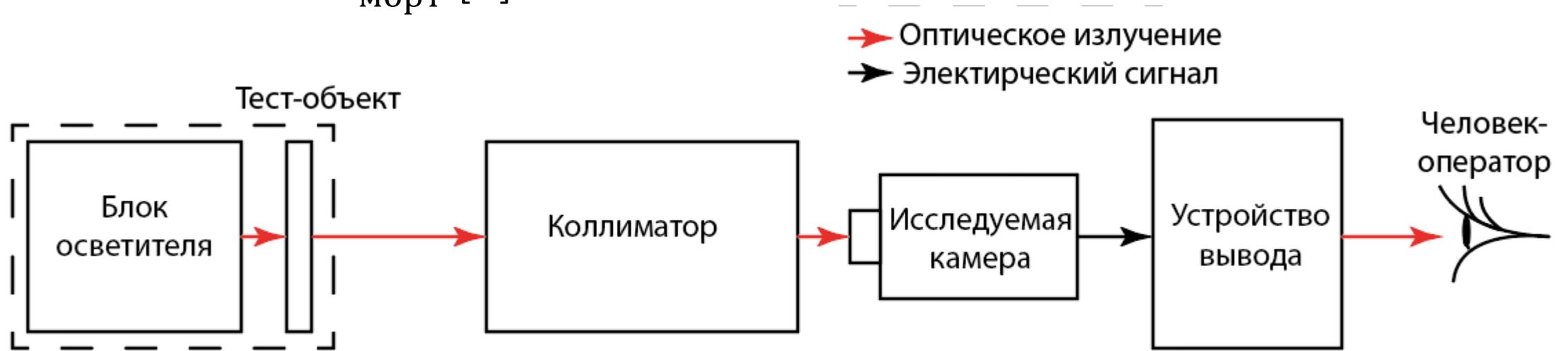
$$\Delta T_{\text{моррт}}$$



Нет однозначных рекомендаций (нормативных документов) по методам измерений

Для ЦА ДЗЗ принято измерение при температуре фона 300 К (средняя температура Земли), что может уточняться при отличающихся условиях эксплуатации

Экспериментальная установка для определения МРРТ $\Delta T_{\text{мррт}}$ и МОРТ $\Delta T_{\text{морт}}$ [3]



- Тест-объект и осветитель (МЧТ) могут быть реализованы в одном устройстве.
- В зависимости от определяемого параметра изменяется только вид и конструкция тест-объекта или тест-объекта и осветителя.
- Могут быть представлены: набором МЧТ, дифференциальной МЧТ, МЧТ и тест-объектом (мирой), температуру которых можно контролировать.

Коллиматор может не использоваться, если камера предусматривает возможность изображения объектов, находящихся на конечном расстоянии.

При использовании коллиматора необходимо учесть его влияние на определяемый параметр (передаточную функцию и пропускание)

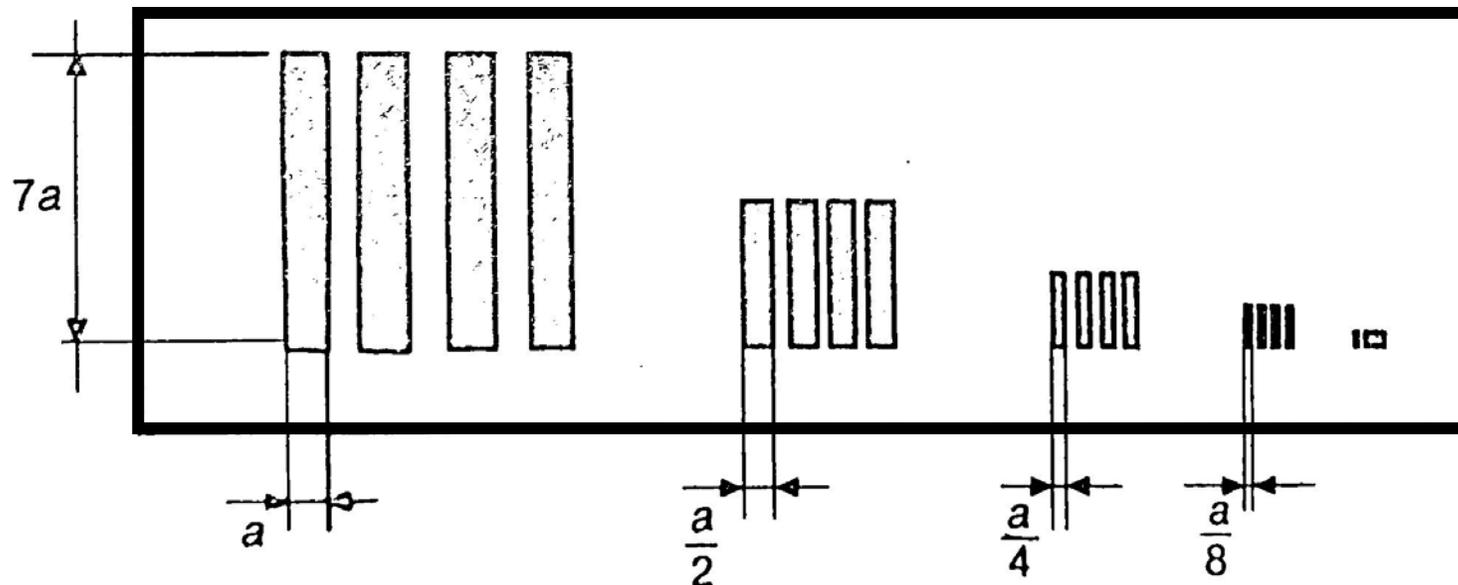
- В общем случае устройство вывода – монитор, человек-оператор – обученный персонал.
- Может быть предусмотрена вторичная обработка изображения.
- Человек-оператор может быть заменен на программную реализацию.

Выбор вида и размеров тест-объекта для экспериментальной оценки МРРТ $\Delta T_{\text{мррт}}$

Размер элемента мира a может быть выбран как четверть максимального габаритного размера целевого объекта, что соответствует обнаружению с вероятностью 0,95 по критерию Джонсона [5].

Наименьший размер элемента мира a/n , где n – целое число, можно выбрать как соответствующий:

- максимальному расчетному разрешению системы;
- минимальному размеру разрешаемого элемента целевого объекта.



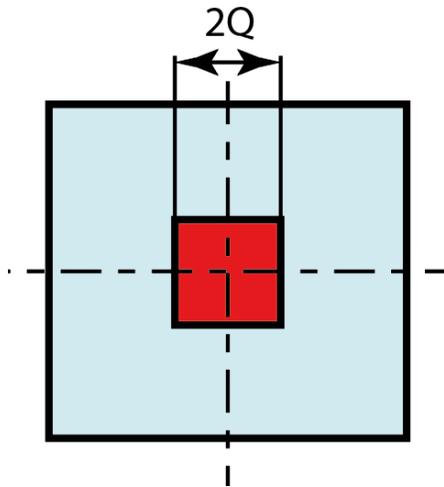
Рекомендуемый вид тест-объекта [3, 4]

Вид и соотношения сторон штриха мир общеприняты [3, 4], что удобно при сравнении ИК-аппаратуры.

Высота штриха $7a$ мира позволяет рассматривать одномерную модель, полагая, что большие вертикальные размеры тест-объекта не вызывают заметных частотных искажений в горизонтальном направлении.

Выбор вида и размеров тест-объекта для экспериментальной оценки МОРТ $\Delta T_{\text{морт}}$

Общепринято [3, 4]: угловой размер тест-объекта $2Q$ в несколько раз больше углового размера пикселя.



Вид тест-объекта [3, 4]

Можно предложить следующие варианты выбора углового размера тест-объекта $2Q$:

- $2Q$ равен одному из габаритных размеров целевого объекта;
- $2Q$ равен размеру штриха миры Джонсона при обнаружении, при заданной вероятности (угловой размер тест-объекта должен быть в несколько раз больше углового размера пикселя).

Этапы проведения экспериментальной оценки МРРТ $\Delta T_{\text{мррт}}$ и МОРТ $\Delta T_{\text{морт}}$

1. Разница температур тест-объекта и фона
 $\Delta T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$

2. Повышение разницы температур до уровня распознавания человеком-оператором тест-объекта

3. Регистрация разности температур ΔT_1

4. Понижение разности температур до уровня неразличимости человеком-оператором тест-объекта

5. Регистрация разности температур ΔT_2

6. Вычисление МРРТ $\Delta T_{\text{мррт}}$ или МОРТ $\Delta T_{\text{морт}}$

На выводящем устройстве
равномерное поле

На выводящем устройстве
видна мира

На выводящем устройстве
не видна мира

$$\Delta T_{\text{мррт/морт}} = (\Delta T_1 + \Delta T_2)/2$$



* При определении МРРТ $\Delta T_{\text{мррт}}$ шаги 1-6 повторяются для мира с периодом в 2 раза меньшим периоду предыдущей мира. Размер мира уменьшается до тех пор, пока при любом ΔT мира не будет различима.

Оборудование

при использовании стандартного тест-объекта (миры) разность температур может быть измерена только при температуре миры, равной комнатной температуре

необходимость измерения разностей температур при различной температуре фона или возможности настройки температуры тест-объекта предполагает создание сложных технических устройств:

- Тест-объекта (миры) с возможностью регулирования температуры;
- МЧТ с возможностью установки различной температуры его областей (дифференциальная МЧТ).

Человек-оператор

необходимость обучения человека-оператора

проведение контроля с привлечением нескольких операторов

субъективность восприятия

сложность определения при наличии в системе решающего устройства, реализованного программно

Постобработка

зависимость разности температур от вида постобработки

необходимость проводить контроль разности температур при изменении алгоритма постобработки изображения

При расчете МРРТ $\Delta T_{\text{мррт}}$ в общем случае учитывают [4, 5, 6]:

эквивалентную шуму разность температур $\Delta T_{\text{эшрт}}$ аппаратуры

отношение сигнал-шум при необходимой вероятности обнаружения, распознавания

влияние на сигнал и шумы системы:

- слоя пространства (атмосферы);
- оптической системы;
- приемника излучения с учетом влияния сканирования (если присутствует в системе);
- электронного тракта;
- последующей обработки изображения;
- оптической системы глаза человека-оператора или устройства, принимающего решение

Изменение МРРТ $\Delta T_{\text{мррт}}$ прямо пропорционально изменению ЭШРТ $\Delta T_{\text{эшрт}}$ и отношения сигнал-шум μ при заданной вероятности обнаружения, распознавания, идентификации.

Вид формулы для расчета МРРТ $\Delta T_{\text{мррт}}$ и входящих в нее параметров зависит от принятых допущений и выбранных моделей аппаратуры и глаза человека-оператора. Наиболее общая зависимость имеет вид [5]:

$$\Delta T_{\text{мррт}}(\nu_x, \nu_y) = \frac{\mu \pi^2 \Delta T_{\text{эшрт}} K_{\text{ш}}(\nu_x, \nu_y)}{8K_{\text{икс}}(\nu_x, \nu_y)}$$

где $K_{\text{ш}}(\nu_x, \nu_y)$ – составляющие модели шума, учитывающие изменения спектра шумов в звеньях системы, включая глаз человека-оператора;
 $K_{\text{икс}}(\nu_x, \nu_y)$ – передаточные функции системы;
 ν_x, ν_y - пространственные частоты по осям Ox и Oy .

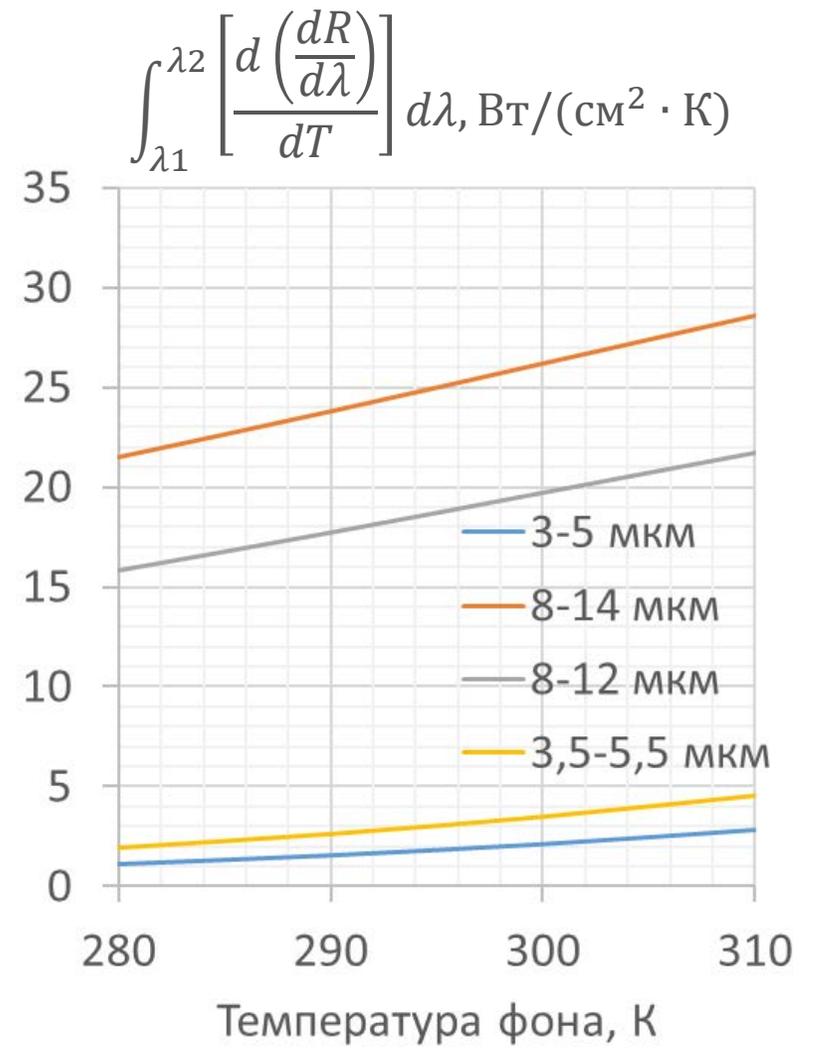
$$\Delta T_{\text{ЭШРТ}} [3,4]$$

$$\Delta T_{\text{ЭШРТ}} = \frac{4 f^2 \sqrt{\Delta \nu}}{D_{\text{ВХ}}^2 \sqrt{A} \tau} \left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[\frac{d \left(\frac{dR}{d\lambda} \right)}{dT} \right] D^*(\lambda) d\lambda \right\}^{-1}$$

где f – фокусное расстояние оптической системы,
 $\Delta \nu$ – электрическая полоса пропускания системы,
 $D_{\text{ВХ}}$ - диаметр входного зрачка оптической системы,
 A – площадь фоточувствительного элемента,
 τ – коэффициент пропускания оптической системы,
 $D^*(\lambda)$ - удельная обнаружительная способность,
 $\frac{d \left(\frac{dR}{d\lambda} \right)}{dT}$ - производная уравнения Планка по температуре.

При прочих равных и сравнении только влияния светимости объекта можно сказать, что:

- чем температура фона выше, тем меньше ЭШРТ $\Delta T_{\text{ЭШРТ}}$;
- ЭШРТ $\Delta T_{\text{ЭШРТ}}$ меньше для более широких спектральных диапазонов, так как интегральная светимость объекта в них больше.



Теоретическая оценка эквивалентной шуму разности температур $\Delta T_{\text{эшрт}}$ [3]

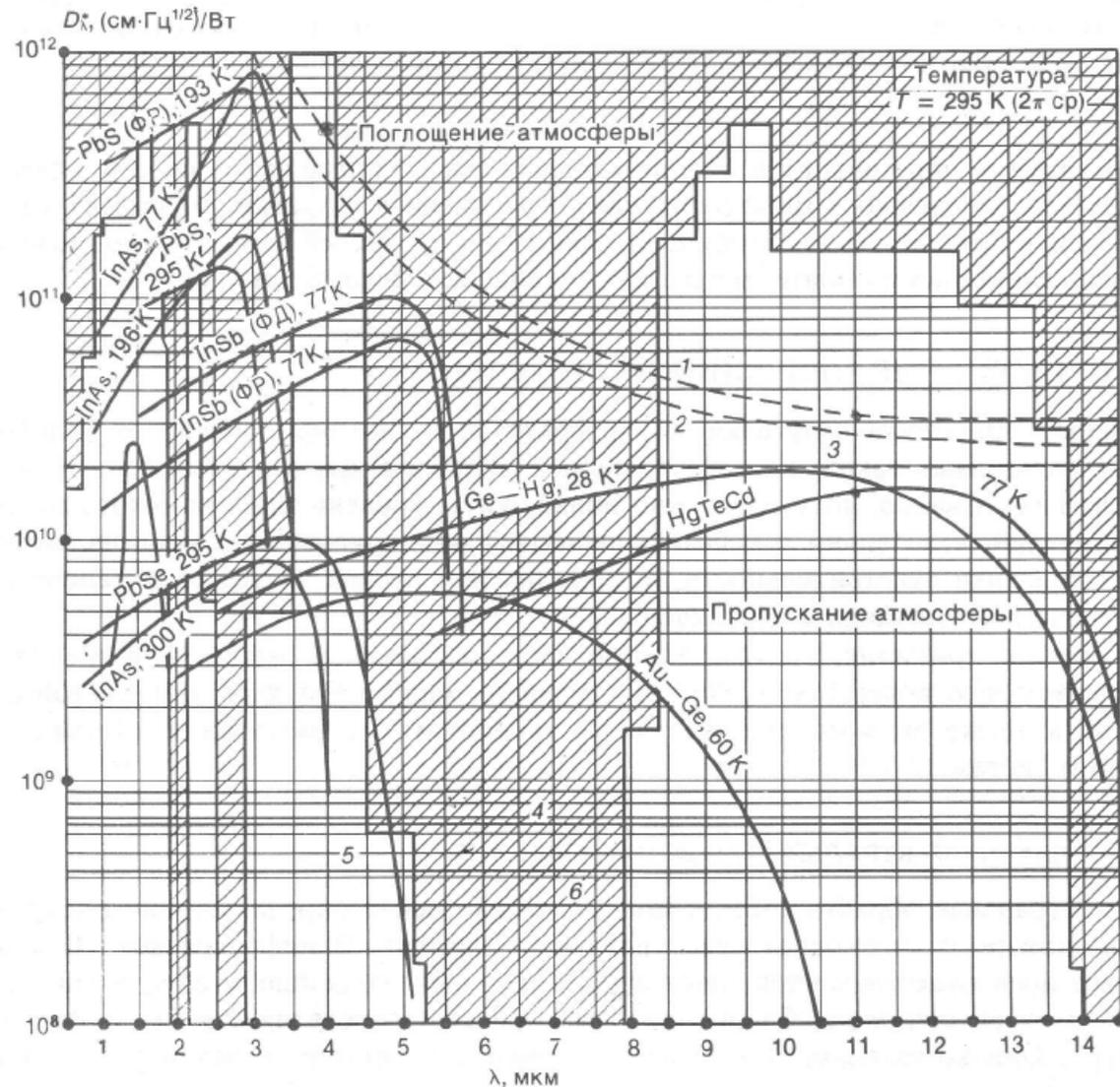
При сравнении ЭШРТ $\Delta T_{\text{эшрт}}$ разных спектральных диапазонов необходимо учитывать удельную обнаружительную способность фотоприемника $D^*(\lambda)$, которая существенно зависит от длины волны излучения.

Для расчета ЭШРТ $\Delta T_{\text{эшрт}}$ разных спектральных диапазонов выберем приемники излучения различных спектральных диапазонов:

- фотодиод InSb, охлаждаемый жидким азотом до 77 К ($D^* = 8 \cdot 10^{10} \text{ см}\sqrt{\text{Гц}}/\text{Вт}$ – среднее значение в диапазоне

3-5 мкм);

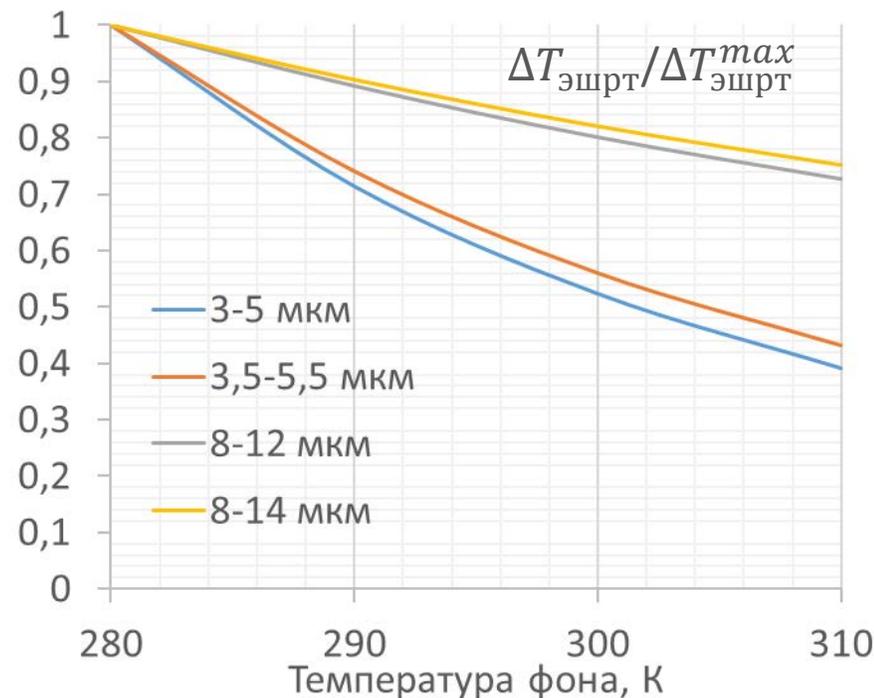
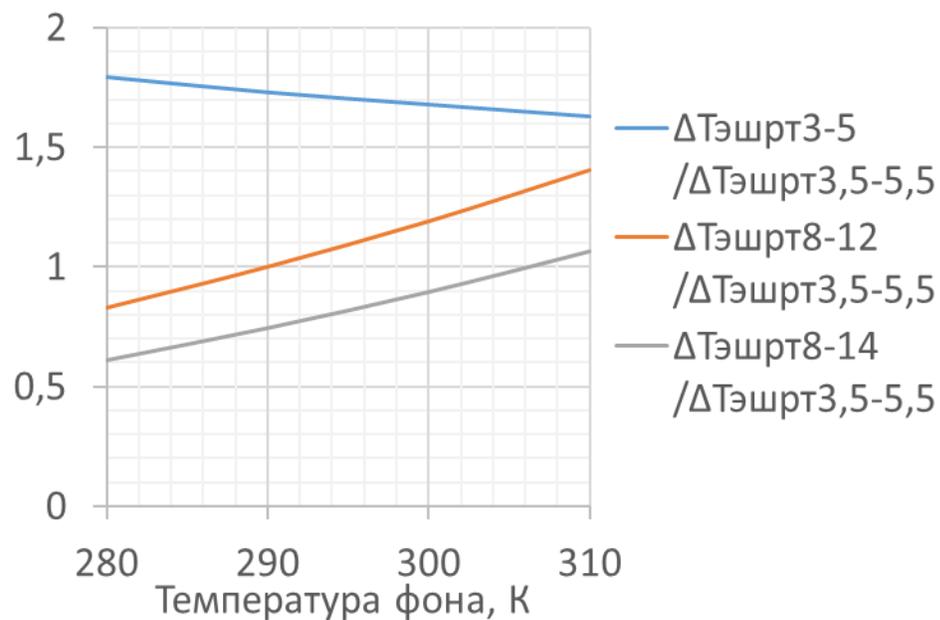
- фоторезистор HgCdTe охлаждаемый жидким азотом до 77 К ($D^* = 1,2 \cdot 10^{10} \text{ см}\sqrt{\text{Гц}}/\text{Вт}$ – среднее значение в диапазоне 8-14 мкм).



Спектральные характеристики приемников разных типов.

1 — идеальный приемник $sp - n$ -переходом; 2 — идеальный фоторезистор; 3 — идеальный тепловой приемник; 4 — пирозлектрический приемник; 5 — термисторный болометр; 6 — термоэлемент; ФД — фотодиод; ФР — фоторезистор.

Расчет эквивалентной шуму разности температур $\Delta T_{\text{эшрт}}$ [3]



При равных f , $\Delta\nu$, $D_{\text{вх}}$, A , τ при сравнении ЭШРТ $\Delta T_{\text{эшрт}}$ можно сделать следующие выводы:

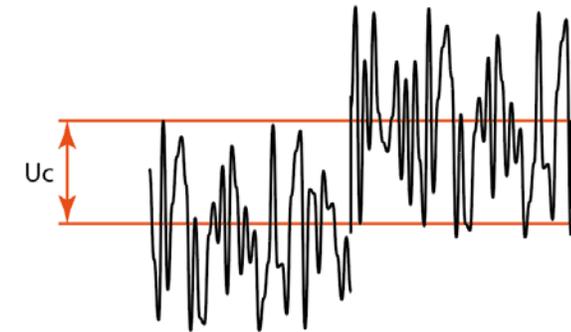
- ЭШРТ $\Delta T_{\text{эшрт}}$ в спектральном диапазоне 3-5 мкм выше, чем в диапазонах 3,5-5,5 мкм, 8-12 мкм, 8-14 мкм;
- ЭШРТ $\Delta T_{\text{эшрт}}$ в спектральном диапазоне 3,5-5,5 мкм менее ЭШРТ $\Delta T_{\text{эшрт}}$ в спектральном диапазоне 8-12 мкм и 8-14 мкм при температурах фона до 290 К и до 305 К соответственно;
- при изменении температуры фона от 280 К до 310 К ЭШРТ $\Delta T_{\text{эшрт}}$ уменьшается более чем в 2 раза в спектральном диапазоне от 3-5,5 мкм и на четверть в спектральном диапазоне от 8 до 14 мкм.



Вид блока осветителя и тест-объекта зависит от выбранной методики измерения и может быть представлен:

- одной МЧТ;
- двумя МЧТ;
- МЧТ и тест-объектом с возможностью регулирования температуры;
- МЧТ с возможностью регулирования температуры у разных областей МЧТ (дифференциальная МЧТ).

Коллиматор может не использоваться, если камера предусматривает возможность изображения объектов, находящихся на конечном расстоянии.



Обработка экспериментальных данных при определении ЭШРТ $\Delta T_{\text{эшрт}}$

В режиме реального времени

Используется дифференциальная МЧТ или МЧТ и тест-объект.

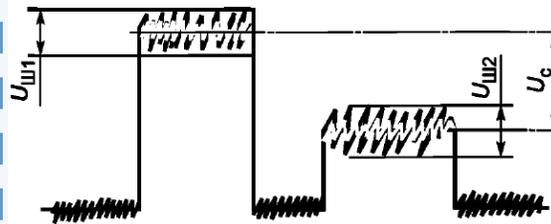
Расчет отношения сигнал-шум идет в реальном времени.

При достижении отношения сигнал-шум, равному 1, регистрируется заданная разница температур ΔT .

Удобен при измерении $\Delta T_{\text{эшрт}}$ при температуре фона, равной комнатной.

По изображению двух разнотемпературных объектов [7]

Используется две МЧТ



$$\Delta T_{\text{эшрт}} = \frac{U_{\text{ш}1} + U_{\text{ш}2}}{12U_c} \Delta T$$

где ΔT – установленная разница температур 2-х МЧТ.

Можно определить $\Delta T_{\text{эшрт}}$ при любой температуре фона, используется простое оборудование

По изображению фона и объекта [3, 4]

Используется дифференциальная МЧТ или МЧТ и тест-объект

$$\Delta T_{\text{эшрт}} = (T1 - T2) / \left(\frac{U_c}{\sigma_{\text{ш}}} \right)$$
 где $\sigma_{\text{ш}}$ – СКО шума фона; U_c – напряжение сигнала; $T1, T2$ – установленные температуры.

Можно определить $\Delta T_{\text{эшрт}}$ при температуре фона, равной комнатной с использованием простого оборудования.

По характеристике преобразования [1]

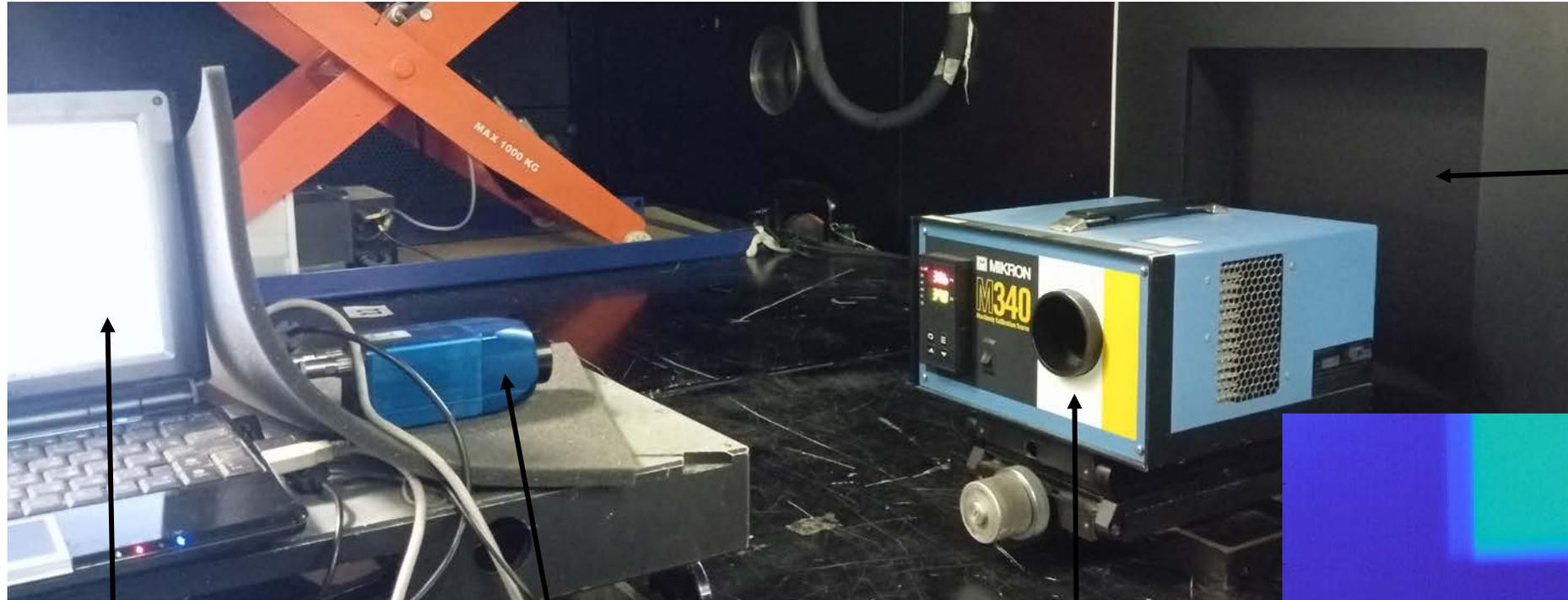
Используется одна МЧТ

$$\Delta T_{\text{эшрт}} = \frac{\sigma}{dU(T)/dT|_{T=300\text{K}'}}$$
 где σ – СКО сигнала по равномерному фрагменту; $dU(T)/dT|_{T=300\text{K}}$ – крутизна характеристики преобразования при $T = 300\text{K}$.

Можно определить $\Delta T_{\text{эшрт}}$ при любой температуре фона, используется одна МЧТ.

Необходимо проведение радиометрической калибровки в окрестности заданной температуры

Измерение эквивалентной шуму разности температур $\Delta T_{\text{эшрт}}$

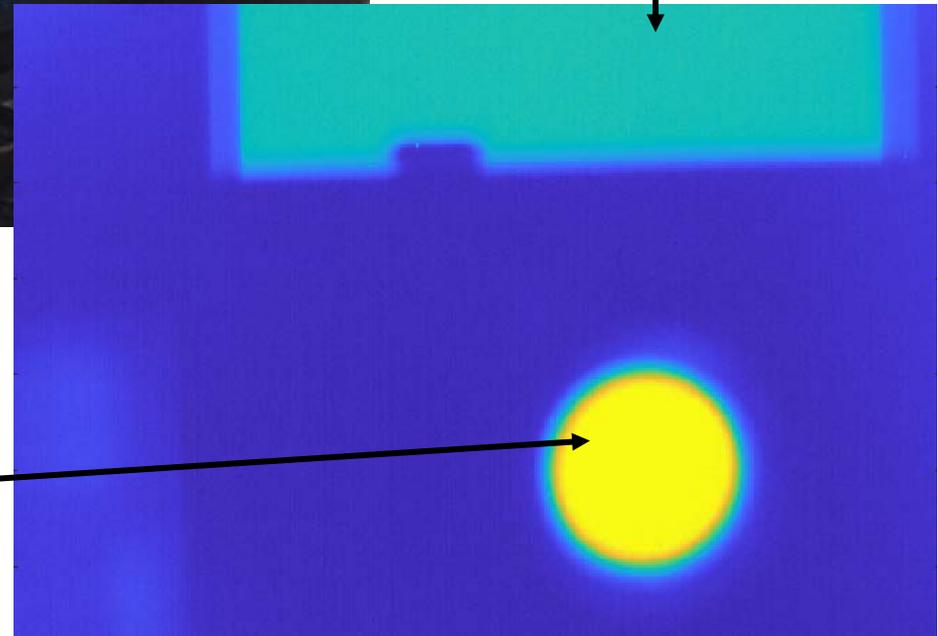


МЧТ SR800-N
 Температурный диапазон: -40...+150°C
 Коэффициент излучения: $\geq 0,97$ (2-14 мкм)

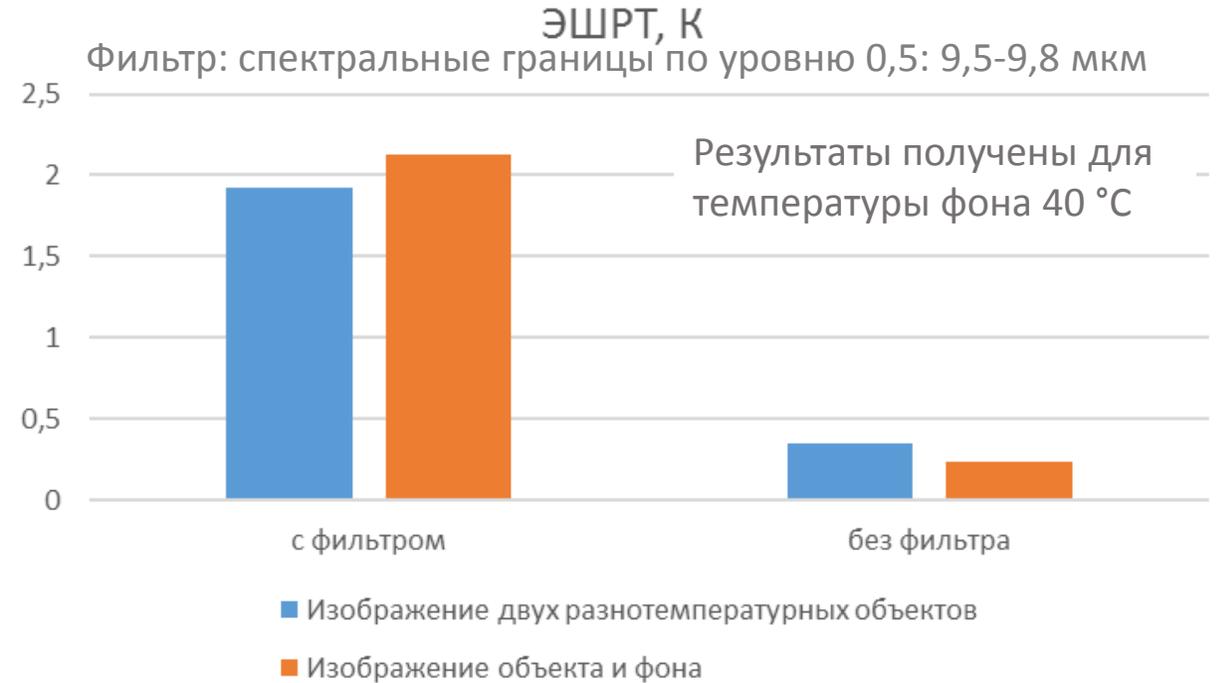
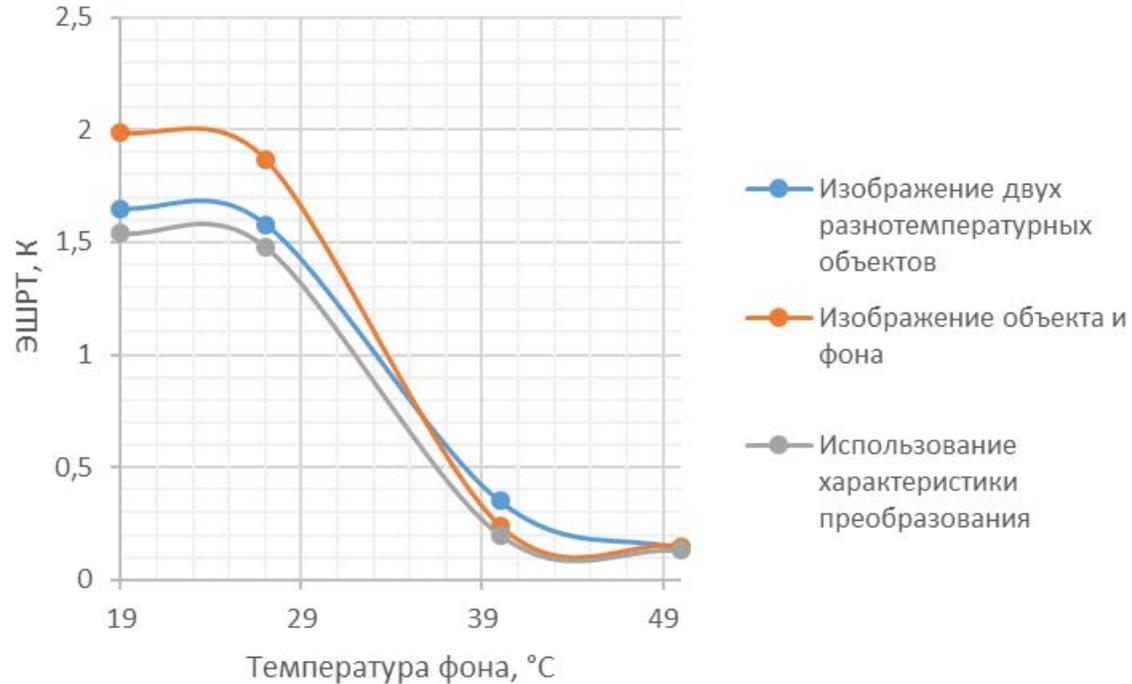
ПК

Камера Gobi-384
 ПИ: микроболометрическая матрица 384x288; пиксель 25 мкм
 Спектральный диапазон: 8-14 мкм

МЧТ Mikron M340
 Температурный диапазон: -20...+150°C
 Коэффициент излучения: $\geq 0,98$ (8-14 мкм)



Измерение эквивалентной шуму разности температур $\Delta T_{\text{ЭШРТ}}$



Измерения подтверждают, что:

- с ростом температуры фона ЭШРТ уменьшается;
- в зависимости от выбранного спектрального диапазона изменяется ЭШРТ – при его сужении уменьшается освещенность ПИ и, как следствие, увеличивается ЭШРТ.

- При температуре фона выше 40 °C расчет ЭШРТ по разным методикам дает одинаковые значения (разность $\approx 0,01$ K).
- При температуре фона ниже 40 °C ЭШРТ, рассчитанные по изображению объекта и фона и с использованием характеристики преобразования, должны давать схожие результаты, так как в них учитывается только СКО шума фона, которое в общем случае зависит от уровня освещённости ПИ.
- При проведении измерений необходимо учитывать стабильность и однородность радиационной температуры примененных МЧТ

1. Рассмотрены основные характеристики ИК аппаратуры, описывающие ее температурное разрешение.
2. Приведены используемые методики измерений ЭШРТ $\Delta T_{\text{эшрт}}$, МРРТ $\Delta T_{\text{мррт}}$ и МОРТ $\Delta T_{\text{морт}}$:
 - описаны схемы экспериментальных установок,
 - используемое испытательное и измерительное оборудование,
 - последующая обработка результатов.
3. Показано, что характеристики аппаратуры, описывающие ее температурное разрешение, имеют зависимость от температуры фона, при которой они определяются, и используемого спектрального диапазона.
4. Температурное разрешение увеличивается с ростом температуры фона, что необходимо учитывать при выборе условий эксплуатации
5. Собрана экспериментальная установка и измерены ЭШРТ для спектральных диапазонов 8-14 мкм и 9,4-9,8 мкм при разной температуре фона.
6. Показано, что ЭШРТ зависит от выбранного спектрального диапазона и уменьшается при увеличении температуры фона.

1. Ю.М. Гектин, С.М. Зорин, М.В. Аскерко, Д.О. Трофимов. Температура и методы ее определения с помощью оптико-электронной аппаратуры космических систем ДЗЗ // Журнал Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2024. – Т. 11, В. 2. - С. 11-21.
2. С.М. Зорин, М.В. Николаева. Основные факторы обеспечения качества бортовой оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ инфракрасного диапазона // СМиС-2024. Технологии управления качеством: материалы Международной научнотехнической конференции (Россия, Москва, 22–24 мая 2024 г.) – М.: Московский Политех. – 2024. – С. 205-213.
3. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение // М.: Мир. – 1988. – 416 с.
4. Дж. Ллойд. Системы тепловидения // М.: Мир. – 1978. – 416 с.
5. В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков. Инфракрасные системы «смотрящего» типа // М.: Логос. – 2004. – 444 с.
6. Аль-Мзирави Ахмед М.Л., Колобродов В.Г., Микитенко В.И. Расчет минимальной разрешаемой разности температур тепловизионных // Приборы и методы измерений. – 2015. – № 1 (10). – С. 64-69.
7. ГОСТ Р 53466-2009. Оптика и оптические приборы. Тепловизоры медицинские. Общие технические требования. Методы измерения основных параметров
8. ГОСТ Р 8.619-2006 «Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки».



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Докладчик:
Николаева
Мargarита Владимировна

