



Научная статья

УДК 621.383

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187455>

EDN: <https://www.elibrary.ru/ITRILD>

СИНТЕЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

А.М. Краснов^{1✉}, С.Н. Шашков², А.В. Румянцев³

¹Закрытое акционерное общество «Технологический парк космонавтики «ЛИНКОС»,
г. Москва, г. Щербинка, Россия

²Федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский
институт авиационных систем», г. Москва, Россия

³Центр (управления комплексной безопасностью) Министерства Обороны
Российской Федерации, г. Москва, Россия

✉ a.krasnov@inbox.ru

Цитирование: Краснов А.М., Шашков С.Н., Румянцев А.В. Синтез изображений с использованием частотно-контрастной характеристики тепловизионной оптико-электронной системы с целью оценки разрешающей способности // Труды МАИ. 2026. № 146. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187455>

Аннотация. Приведено определение частотно-контрастной характеристики и рассмотрены параметры оптико-электронной системы, определяющие разрешающую способность: угловой размер пятна нечёткости изображения, мгновенное (элементарное) поле зрения, угловой размер детектора, функция рассеяния точки и показана взаимосвязь между ними.

Проведён расчет частотно-контрастной характеристики тепловизионной оптико-электронной системы и её составляющих на этапе лабораторных испытаний и по полученным значениям эффективной разрешающей способности была дана оценка разрешающей способности оптико-электронной системы.

Раскрыто содержание синтеза изображений объектов с использованием линейной фильтрации в частотной и в пространственной области с учётом частотно-контрастной характеристики и функции рассеяния точки. Проведенный

синтез изображения посредством использования частотно-контрастной характеристики и функции рассеяния точки подтвердил полученную ранее оценку разрешающей способности оптико-электронной системы.

Актуальность данного материала обусловлена необходимостью наличия качественного инструмента объективной оценки разрешающей способности авиационных оптико-электронных систем, исключающего субъективное мнение, обусловленное человеческим фактором, на этапах испытаний и серийного производства изделий, на соответствие заданным тактико-техническим требованиям и требованиям технических условий

В заключение определено место синтеза изображений объектов с использованием частотно-контрастной характеристики в цифровой модели комбинированной системы технического зрения.

Ключевые слова: частотно-контрастная характеристика, линейная фильтрация в частотной (пространственной) области, синтез изображений объектов, тепловизионная оптико-электронная система

IMAGE SYNTHESIS USING THE MODULATION TRANSFER CHARACTERISTIC OF A THERMAL IMAGING OPTOELECTRONIC SYSTEM IN ORDER TO EVALUATE THE RESOLUTION

A.M. Krasnov¹✉, S.N. Shashkov², A.V. Rumyantsev³

¹Closed Joint Stock Company «Technological Park of Cosmonautics «LINKOS»,
Moscow, Shcherbinka, Russia

²Federal Autonomous Institution «State Research Institute of Aviation Systems»,
Moscow, Russia

³Center (control of integrated safety and security) the MoD RF, Moscow, Russia

✉ a_krasnov@inbox.ru

Citation: Krasnov A.M., Shashkov S.N., Rumyantsev A.V. Image synthesis using the modulation transfer characteristic of a thermal imaging optoelectronic system in order to evaluate the resolution // Trudy MAI. 2026. No. 146. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187455>

Abstract. The definition of the modulation transfer characteristic is considered, the electro-optical system parameters determining the resolution are also analyzed: the

angular size of the image blur spot, the instantaneous (elementary) field of view, the angular size of the detector, the dot scattering function, and the relationship between them is shown.

The modulation transfers characteristic of the thermal imaging electro-optical system and its components are calculated based on the results obtained at the laboratory testing stage, as well as a comparison of the components of the laboratory and calculated (theoretical) modulation transfer characteristic. Then, the content of the synthesis of images of objects using linear filtering in the frequency and spatial domains is disclosed, taking into account the modulation transfer characteristic and the dot scattering function.

The basic idea of filtering in the spatial domain is to define the filter, and in the frequency domain, the transfer function of the filter. If, depending on the characteristics of the filter (transfer function), the high-frequency components weaken, and the low-frequency components remain relatively unchanged, then a filter with such characteristics is called a low-frequency filter. The result of low-frequency filtering is blurring (smoothing) of the image, and vice versa, the result of high-frequency filtering is an increase in image sharpness, that is, low frequencies are attenuated, leaving the high frequencies of the Fourier transform relatively unchanged. An example of image synthesis for the objective assessment of image sharpness through the use of histograms is considered.

The relevance of this material is due to the need for an objective tool for assessing the resolution of optoelectronic systems, excluding subjective opinion due to the human factor. In conclusion, the place of synthesis of images of objects using modulation transfer characteristic in the digital model of the combined vision system is determined.

Keywords: modulation transfer characteristic, linear filtering in the frequency (spatial) domain, synthesis of images of objects, thermal imaging electro-optical system

Введение

Авторами статьи рассмотрено определение частотно-контрастной характеристики, также проанализированы параметры оптико-электронной системы, определяющие разрешающую способность: угловой размер пятна

нечёткости изображения, мгновенное (элементарное) поле зрения, угловой размер детектора, функция рассеяния точки и показана взаимосвязь между ними.

Проведен расчет частотно-контрастной характеристики тепловизионной оптико-электронной системы (ОЭС) и её составляющих по результатам, полученным на этапе лабораторных испытаний, а также сравнение составляющих лабораторной и расчётной (теоретической) частотно-контрастных характеристик. Затем раскрыто содержание синтеза изображений объектов с использованием линейной фильтрации в частотной и в пространственной области с учетом частотно-контрастной характеристики и функции рассеяния точки.

Основная идея фильтрации в пространственной области заключается в определении фильтра, а в частотной области – передаточной функции фильтра. Если, в зависимости от характеристик фильтра (передаточной функции), происходит ослабление высокочастотных компонентов, а низкочастотные компоненты остаются относительно неизменными, то фильтр с такими характеристиками называется низкочастотным. Результатом низкочастотной фильтрации является размытие (сглаживание) изображения и наоборот, результатом высокочастотной фильтрации является повышение резкости изображения, то есть ослабляются низкие частоты, оставляя высокие частоты преобразования Фурье относительно неизменными. Рассмотрен пример синтеза изображения с целью объективной оценки резкости изображения посредством использования гистограмм.

Актуальность данного материала обусловлена необходимостью наличия инструмента объективной оценки разрешающей способности авиационных оптико-электронных систем, исключающего субъективное мнение, обусловленное человеческим фактором. В заключение определено место синтеза изображений объектов с использованием частотно-контрастной характеристики в цифровой модели комбинированной системы технического зрения.

Основные положения

Функция передачи модуляции или частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) есть зависимость контраста изображения мира, сгенерированного тестируемой камерой, от пространственной частоты. При расчёте и анализе ЧКХ используют приведённую частоту $\xi_{\text{пр}}, \eta_{\text{пр}}$ (цикл/пиксель) в горизонтальном и в вертикальном направлениях. Значения приведённой частоты находятся в диапазоне от 0 до 1 [1]. По понятным причинам значения ЧКХ для частот более 0,5 цикл/пиксель не следует рассматривать. Связь между приведенной частотой $\xi_{\text{пр}}$ (цикл/пиксель) и частотой в пространстве предметов ξ (цикл/мрад) определяется следующей формулой [1]:

$$\xi = \frac{\xi_{\text{пр}}}{DAS}; DAS = \frac{d}{f'},$$

где DAS (Detector Angular Subtenses) – угловой размер детектора приёмника излучения, мрад; f' – фокусное расстояние ОЭС, мм; d – размер детектора (пикселя), мкм. В случае, если коэффициент заполнения равен 1, то размер детектора равен размеру пикселя. При частоте $\xi_{\text{пр}}$ равной 0,5 рассчитывается значение частоты Найквиста:

$$f_N = \frac{1}{2DAS}.$$

Частота в пространстве изображений ξ_I (цикл/мм) связана с частотой в пространстве предметов ξ отношением:

$$\xi_I = \frac{\xi}{f'}.$$

Частотно-контрастные характеристики MTF (Modulation Transfer Function) внешней среды и ОЭС подробно рассмотрены в [1]. В данной работе использовалась ЧКХ ОЭС $MTF_{\text{sys}}(\xi)$, имеющая вид:

$$MTF_{\text{sys}}(\xi) = MTF_{\text{opt}}(\xi)MTF_{\text{det}}(\xi),$$

где $MTF_{\text{opt}}(\xi)$ – функция передачи модуляции оптической системы ОЭС; $MTF_{\text{det}}(\xi)$ – функция передачи модуляции детектора. Здесь и далее будут рассматриваться функции по горизонтальной оси ξ , для вертикальной оси η – формульные зависимости будут аналогичными.

Функция передачи модуляции оптической системы $MTF_{\text{opt}}(\xi)$ имеет вид [2, 3]:

$$MTF_{opt}(\xi) = MTF_{diff}(\xi)MTF_{blur}(\xi);$$

$$MTF_{diff}(\xi) = \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{\xi}{\xi_{oco}}\right) - \left(\frac{\xi}{\xi_{oco}}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{\xi}{\xi_{oco}}\right)^2} \right], \text{ при } \xi < \xi_{oco};$$

$$MTF_{blur}(\xi) = e^{-2(\pi\sigma_{blr}\xi)^2};$$

$$\sigma_{blr} = a \frac{\lambda}{D} = a \frac{1}{\xi_{oco}};$$

$$a \in [0; 1];$$

$$\xi_{oco} = \frac{D}{\lambda},$$

где $MTF_{diff}(\xi)$, $MTF_{blur}(\xi)$ – функции, учитывающие дифракцию и абберацию оптической системы ОЭС; ξ_{oco} – предельная частота оптической системы, ц/град; λ – среднее значение длины волны оптического диапазона ОЭС, мкм; D – диаметр входного зрачка ОЭС, мм; σ_{blr} – угловой размер пятна нечёткости изображения, характеризующий величину абберации, мрад. Данный параметр невозможно измерить, так как любое измерение оптической системы, включает дифракцию и абберацию [2].

В случае, если угловой размер пятна абберации больше углового размера пятна дифракции, то есть σ_{blr} больше или равно пределу Релея, то ОЭС не считается дифракционно-ограниченной системой (рисунок 1).

При теоретическом расчёте ОЭС значение σ_{blr} задаётся и оно не должно превышать предел Спарроу [4]. В случае, если значение σ_{blr} равно или больше предела Релея, то ОЭС не является дифракционно-ограниченной системой.

Отношение предела Спарроу $\frac{\lambda}{D}$ к угловому размеру детектора DAS определяет тип дифракционно-ограниченной системы:

$$\frac{\lambda}{D} \frac{1}{DAS} = \frac{\lambda f'}{D d} = \frac{f' \lambda}{D d} = \frac{F \lambda}{d},$$

где F – отношение фокусного расстояния к диаметру входного зрачка ОЭС. Параметр $\frac{F \lambda}{d}$ в частотной области равен отношению предельной частоты детектора ξ_{dco} к предельной частоте оптической системы ξ_{oco} , а в пространственной области характеризует расположение диска Эйри относительно детектора.

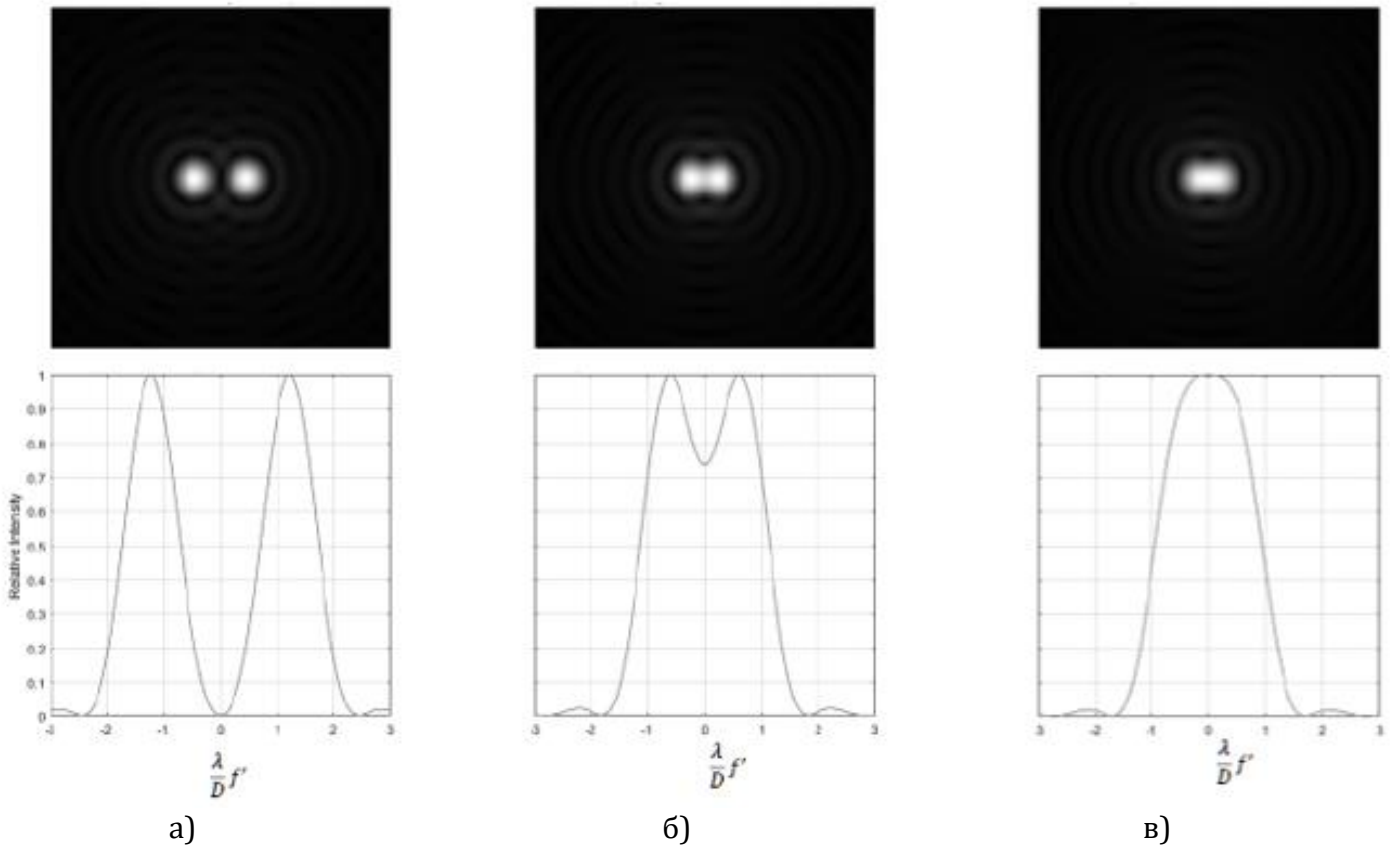


Рисунок 1 – Расположение диска Эйри:

- а) максимальные интенсивности находятся на расстоянии диаметра диска Эйри $2,44 \frac{\lambda}{D} f'$;
- б) это же расстояние в один радиус диска Эйри $1,22 \frac{\lambda}{D} f'$ (предел Рэля);
- в) расстояние равно пределу Sparrow $\frac{\lambda}{D} f'$.

Рассмотрим следующие случаи:

- 1) если $\frac{F\lambda}{d} < 0,41$, то ОЭС дифракционно-ограниченна размером детектора: $f_N < \xi_{dco} < \xi_{oco}$, диаметр диска Эйри меньше размера детектора;
- 2) если $\frac{F\lambda}{d} = 0,41$, то ОЭС дифракционно-ограниченна размером детектора: $f_N < \xi_{dco} < \xi_{oco}$, диаметр диска Эйри равен размеру детектора;
- 3) если $0,41 < \frac{F\lambda}{d} < 1$, то $f_N < \xi_{dco} < \xi_{oco}$, диаметр диска Эйри незначительно больше детектора;
- 4) если $\frac{F\lambda}{d} = 1$, то $f_N < \xi_{dco} = \xi_{oco}$, диаметр диска Эйри больше размера детектора в 2,44 раза;
- 5) если $1 < \frac{F\lambda}{d} < 2$, то $f_N < \xi_{oco} < \xi_{dco}$, диаметр диска Эйри больше размера детектора;

6) если $\frac{F\lambda}{d} = 2$, то ОЭС дифракционно-ограниченна оптической системой и $f_N = \xi_{oco} < \xi_{dco}$, диаметр диска Эйри больше размера детектора в 4,88 раза.

7) если $\frac{F\lambda}{d} > 2$, то ОЭС дифракционно-ограниченна оптической системой и $\xi_{oco} < f_N < \xi_{dco}$, диаметр диска Эйри значительно больше размера детектора.

Диапазон $\frac{F\lambda}{d} \leq 0,41$ – это диапазон дифракционно-ограниченный размером детектора, диапазон дифракционно-ограниченный оптической системой когда $\frac{F\lambda}{d} \geq 2$. Переходный диапазон – это когда выполняется условие $0,41 < \frac{F\lambda}{d} < 2$, при значениях $\frac{F\lambda}{d} \leq 1$ диск Эйри оказывает минимальное влияние на разрешающую способность ОЭС, а размер детектора имеет минимальное влияние при $\frac{F\lambda}{d} \geq 1,5$ [5].

Отметим, часто угловой размер детектора DAS принимают равным мгновенному (элементарному) полю зрения $IFOV$ (Instantaneous Field Of View), однако в [2, 3, 6, 7] отмечено, что $IFOV$ это пространственный угол, измеряемый в стерadiansах и равен

$$IFOV = \frac{A_d}{f'^2};$$

$$A_d = \frac{\pi d^2}{4},$$

где A_d – площадь круга, вписанного в детектор (пиксель) размером d . При допущении, что $A_d = d^2$ выражение для расчёта $IFOV$ принимает вид

$$IFOV = \frac{d^2}{f'^2} = DAS^2.$$

Рассмотренные угловой размер пикселя DAS , пределы Sparrow и Релея, а также диск Эйри, по уровням функции рассеяния точки psf (Point Spread Function) показаны на рисунке 2а. Теоретическая функция psf определяется по формуле [2]:

$$psf(r) = \left[\frac{2J_1\left(\frac{\pi Dr}{\lambda}\right)}{\frac{\pi Dr}{\lambda}} \right]^2;$$

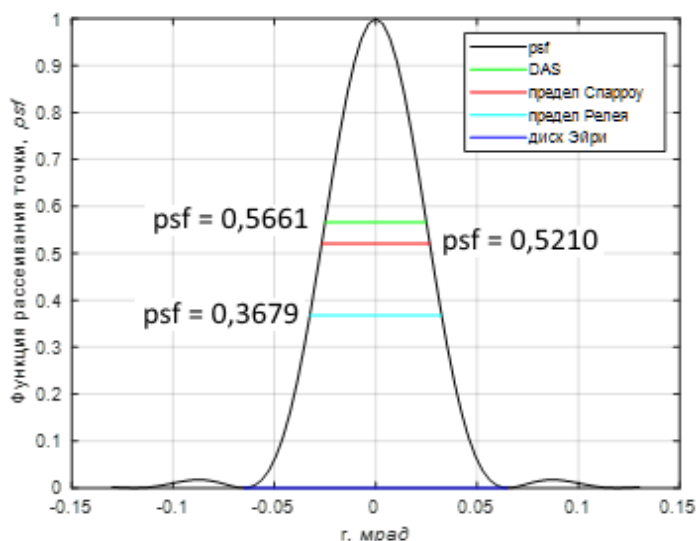
$$r \in [-dA; dA];$$

$$dA = 2,44 \frac{\lambda}{D},$$

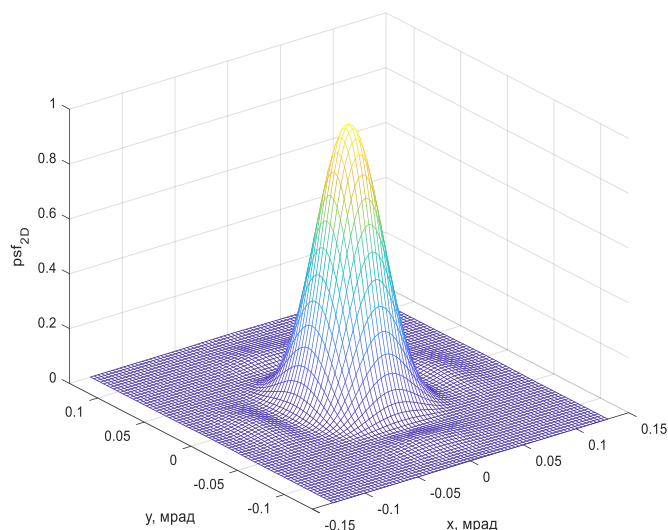
где J_1 – функция Бесселя первого порядка; r – угловое расстояние, мрад; dA – диаметр диска Эйри, мрад.

На рисунке 2б представлена двумерная функция рассеяния точки psf_{2D} .

$$psf_{2D}(r_x, r_y) = psf(r_x)psf(r_y).$$



а) $psf(r)$



б) $psf_{2D}(x, y)$

Рисунок 2 – Функция рассеяния точки

Функция передачи модуляции детектора $MTF_{detect}(\xi)$ [2, 3]:

$$MTF_{det}(\xi) = \left| \frac{\sin\left(\pi \frac{\xi}{\xi_{dco}}\right)}{\pi \frac{\xi}{\xi_{dco}}} \right| = \left| \text{sinc}\left(\frac{\xi}{\xi_{dco}}\right) \right|;$$

$$\xi_{dco} = \frac{1}{DAS},$$

где ξ_{dco} – предельная частота детектора.

В таблице 1 приведены характеристики рассматриваемой тепловизионной ОЭС.

Таблица 1

Характеристики ОЭС

Фокусное расстояние (f'), мм	300
Диаметр входного зрачка (D), мм	75
Размер пикселя (d), мкм	15
Формат приёмной матрицы, пиксель	640 x 512
Спектральный диапазон (λ), мкм	3 – 5
Угловой размер пикселя (DAS), мрад	0,0500
Пределы Sparrow / Релея, мрад	0,0533 / 0,0651
Диаметр диска Эйри (dA), мрад / мкм	0,1301 / 39,04
Параметр $F\lambda/d$	1,07

Расчёт и анализ частотно-контрастной характеристики

Лабораторная ЧКХ $MTF_{lab2D}(\xi, \eta)$ определяется по тем же изображениям, по которым были рассчитаны функция передачи сигнала $SiTF(T)$ и функция $\sigma(T)$ 3D-шума [8, 9]. Графики функций тепловизионной ОЭС представлены на рисунке 3.

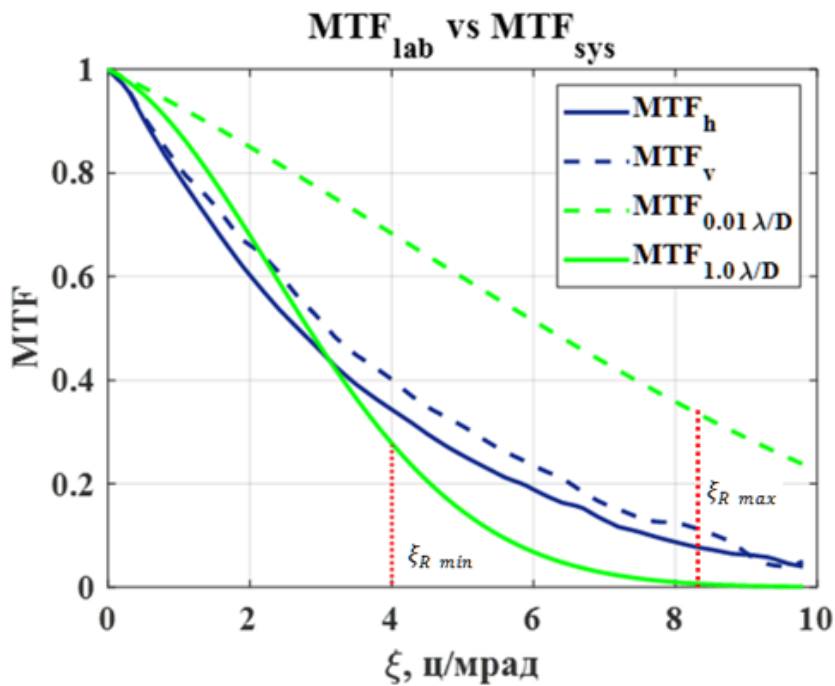
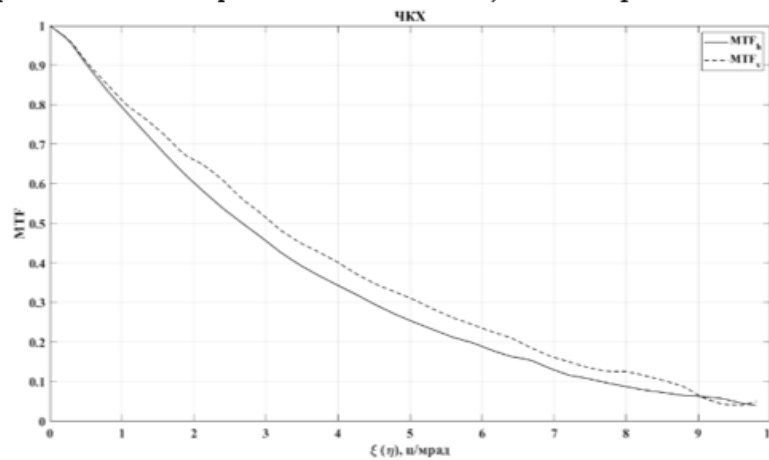
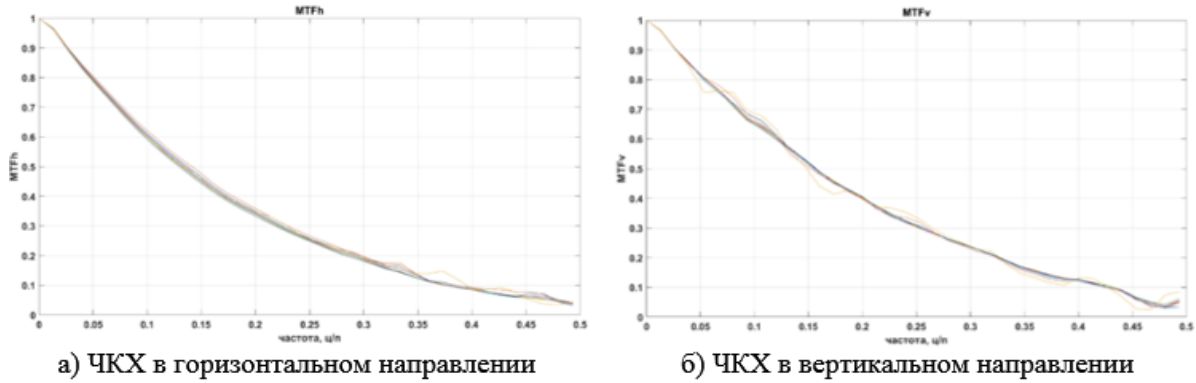


Рисунок 3 – Графики функций MTF_h , MTF_v и MTF_{sys} тепловизионной ОЭС

Сначала ЧКХ были рассчитаны по каждой видеопоследовательности файлов (одна видеопоследовательность содержит 256 кадров, всего видеопоследовательностей – 11) в горизонтальном (рисунок 3а) и вертикальном направлении (рисунок 3б). Затем по этим ЧКХ получены средние значения $MTF_h(\xi)$, $MTF_v(\eta)$ (рисунок 3в). На рисунке 3г приведены графики $MTF_h(\xi)$, $MTF_v(\eta)$ и расчётной MTF_{sys} при значениях σ_{blr} равным $0.01 \frac{\lambda}{D}$ и $1.0 \frac{\lambda}{D}$.

Эффективная разрешающая способность определяется по формуле [3, 12]:

$$R_{eq} = \frac{1}{2 \int_0^{\infty} MTF^2(\xi) d\xi}.$$

Величина $1/R_{eq}$ – это пространственная частота ξ_R , соответствующая эффективной разрешающей способности R_{eq} [3].

Для полученных ЧКХ были рассчитаны эффективная разрешающая способность R_{eq} и соответствующие ей частоты в пространстве предметов ξ_R и изображений ξ_{IR} :

- для $MTF_{0.01\lambda/D}$: $R_{eq\ max} = 0,1198$ мрад; $\xi_{R\ max} = 8,35$ ц/мрад; $\xi_{IR\ max} = 27,8$ ц/мм;
- для $MTF_{1,0\lambda/D}$: $R_{eq\ min} = 0,2453$ мрад; $\xi_{R\ min} = 4,08$ ц/мрад; $\xi_{IR\ min} = 13,6$ ц/мм;
- для MTF_v : $R_{eq\ v} = 0,2271$ мрад; $\xi_{R\ v} = 4,40$ ц/мрад; $\xi_{IR\ v} = 14,7$ ц/мм;
- для MTF_h : $R_{eq\ h} = 0,2596$ мрад; $\xi_{R\ h} = 3,85$ ц/мрад; $\xi_{IR\ h} = 12,8$ ц/мм.

Из приведенных результатов расчёта можно сделать вывод о том, что разрешающая способность рассматриваемой тепловизионной ОЭС является невысокой, так в вертикальной плоскости $R_{eq\ v}$ незначительно больше $R_{eq\ min}$, а в горизонтальной плоскости $R_{eq\ h}$ меньше $R_{eq\ min}$. На рисунке 3г видно, что в низкочастотной области функции $MTF_h(\xi)$, $MTF_v(\eta)$ проходят ниже функции $MTF_{1,0\lambda/D}$. Это тоже свидетельствует о том, что разрешающая способность ОЭС в этой области невысокая [10].

Двумерная лабораторная ЧКХ $MTF_{lab2D}(\xi, \eta)$, представленная на рисунке 4, равна произведению функций $MTF_h(\xi)$, $MTF_v(\eta)$ [11, 12]:

$$MTF_{lab2D}(\xi, \eta) = MTF_h(\xi)MTF_v(\eta).$$

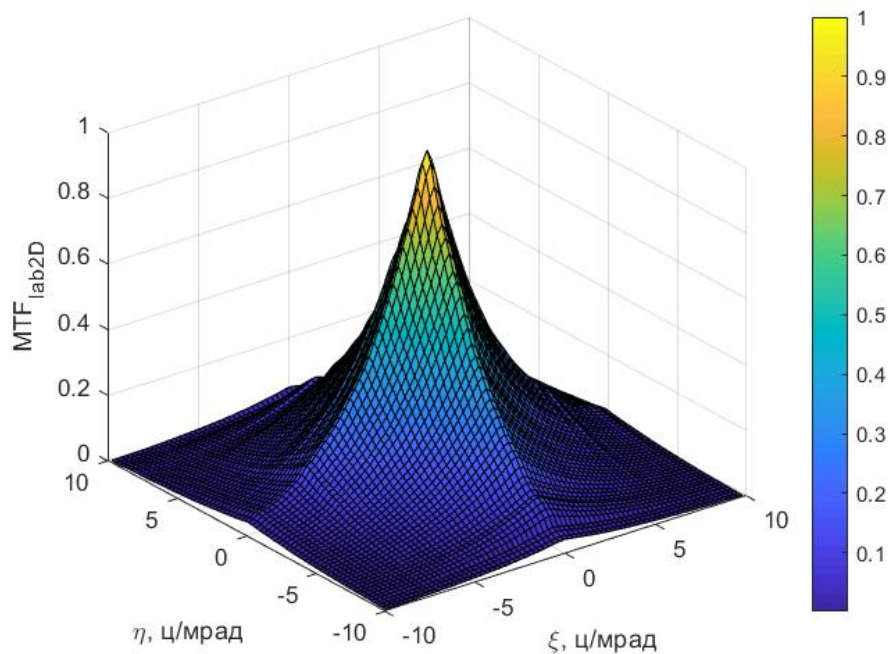


Рисунок 4 – График функции $MTF_{lab2D}(\xi, \eta)$

Теперь проведем оценку разрешающей способности ОЭС по изображению, синтезированному с учётом $MTF_{lab2D}(\xi, \eta)$.

Синтез изображений посредством частотно-контрастной характеристики

Основы теории синтеза изображения с учетом частотно-контрастной характеристики

Основой линейной фильтрации в частотной и пространственной областях служит теорема о свертке, которую можно сформулировать так [13 - 15]:

$$f(x, y) * h(x, y) \equiv H(u, v)F(u, v),$$

где " * " означает операцию свертки двух функций. Данное выражение означает, что свертку двух пространственных функций $f(x, y), h(x, y)$ можно получить, если выполнить обратное преобразование Фурье от произведения прямых преобразований Фурье $H(u, v), F(u, v)$ этих двух функций. И наоборот, прямое преобразование Фурье свертки двух пространственных функций $f(x, y), h(x, y)$ дает произведение их прямых преобразований Фурье.

Фильтрация в пространственной области состоит из свертки изображения $f(x, y)$ и маски $h(x, y)$. В частотной области тот же результат можно получить умножив $F(u, v)$ на $H(u, v)$, где $F(u, v), H(u, v)$ есть преобразование Фурье

изображения $f(x, y)$ и фильтра $h(x, y)$. Функцию $H(u, v)$ принято называть передаточной функцией фильтра, в нашем случае, это оптическая передаточная функция OTF (Optical Transfer Function) [2, 13]:

$$|OTF| = MTF,$$

а в пространственной области фильтр $h(x, y)$ - это функция рассеяния точки $PSF(x, y)$ [2, 13].

Основная идея фильтрации в частотной области заключается в подборе передаточной функции фильтра $H(u, v)$, которая модифицирует $F(u, v)$ [13 - 15]. Как отмечалось ранее, результатом низкочастотной фильтрации является размытие (сглаживание) изображения. Для получения соответствующего отфильтрованного изображения в пространственной области следует просто выполнить обратное преобразование Фурье от произведения $H(u, v), F(u, v)$. Результат этих действий будет идентичен выполнению операции свертки в пространственной области с маской $h(x, y)$, которая и есть обратное преобразование Фурье передаточной функции фильтра $H(u, v)$.

На рисунке 5 изображён процесс фильтрации в частотной области, на входе которого исходное изображение $f(x, y)$, а на выходе результат фильтрации – изображение $g(x, y)$ [13 - 15].

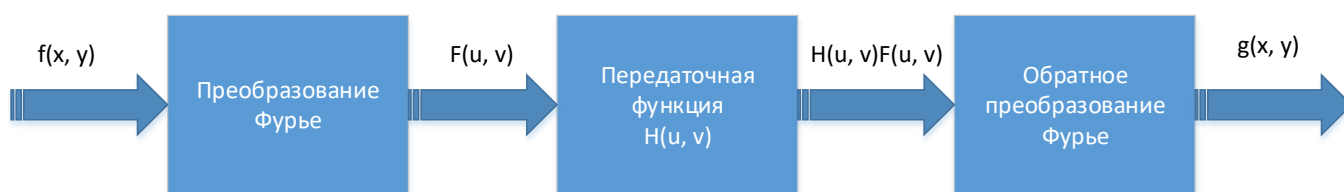


Рисунок 5 – Процесс фильтрации в частотной области

Синтез сглаженного изображения

В качестве объекта наблюдения была выбрана машина типа «Газель». Термограмма изображения данного объекта приведена на рисунке 6. Съёмки объекта проводились термографом FLIR SC7700M, его основные характеристики приведены в таблице 2, условия съёмки – в таблице 3.



Рисунок 6 – Термограмма объекта, полученная посредством FLIR SC7700M

Таблица 2

Характеристики FLIR SC7700M

Характеристика	Значение
Фокусное расстояние, мм	50
Диаметр входного зрачка, мм	25
Спектральный диапазон, мкм	3 - 5
Размер активного элемента пикселя, мкм	15
Угловой размер пикселя, мрад	0,3
Размер поля зрения, градус	11 x 8,8
Формат приёмной матрицы, пиксель	640 x 512

Таблица 3

Условия съёмки автомобиля «ГАЗель»

Дата	Наклонная дальность, м	Метеоусловия	Фон	Время	Высота ОЭС, м
21.10.22	45	Твоз = 7,6 °С, ОВ = 73 %, МДВ = 10 км;	бетон растительность	10:00	21

Затем для заданных условий (таблица 4) был проведён расчёт энергетической яркости $L_e(\lambda, T)$ объекта и фона посредством программного обеспечения MODTRAN [16] и по его результатам с учетом характеристик

тепловизионной ОЭС (см. таблица 1) синтезировано для заданных условий исходное изображение I_{app} .

Таблица 4

Заданные условия расчёта энергетической яркости

Параметр (характеристика)	Значение
Дальность, м	450
Высота, м	209
Показатель C_{N0}^2 (турбулентность)	$1 \cdot 10^{-15}$
Температура фона, °С	12
Источник	Солнце
Координаты источника (азимут / зенитный угол)	202,46 / 61,61
Азимут объекта, градус	137
Высота объекта над уровнем поверхности Земли, м	0
Спектральная характеристика отражения объекта	Камуфляж
Спектральная характеристика отражения фона	Асфальт
Модель атмосферы	Субарктическое лето
Тип рассеяния излучения в атмосфере	Простое рассеяние
Метеорологическая дальность видимости, км	10
Превышение поверхности Земли над уровнем моря, м	0

По лабораторной функции $MTF_{lab2D}(\xi, \eta)$ (см. рисунок 4), обратным преобразованием Фурье была получена функция $PSF_{lab2D}(x, y)$ и её составляющие PSF_x, PSF_y (рисунок 7).

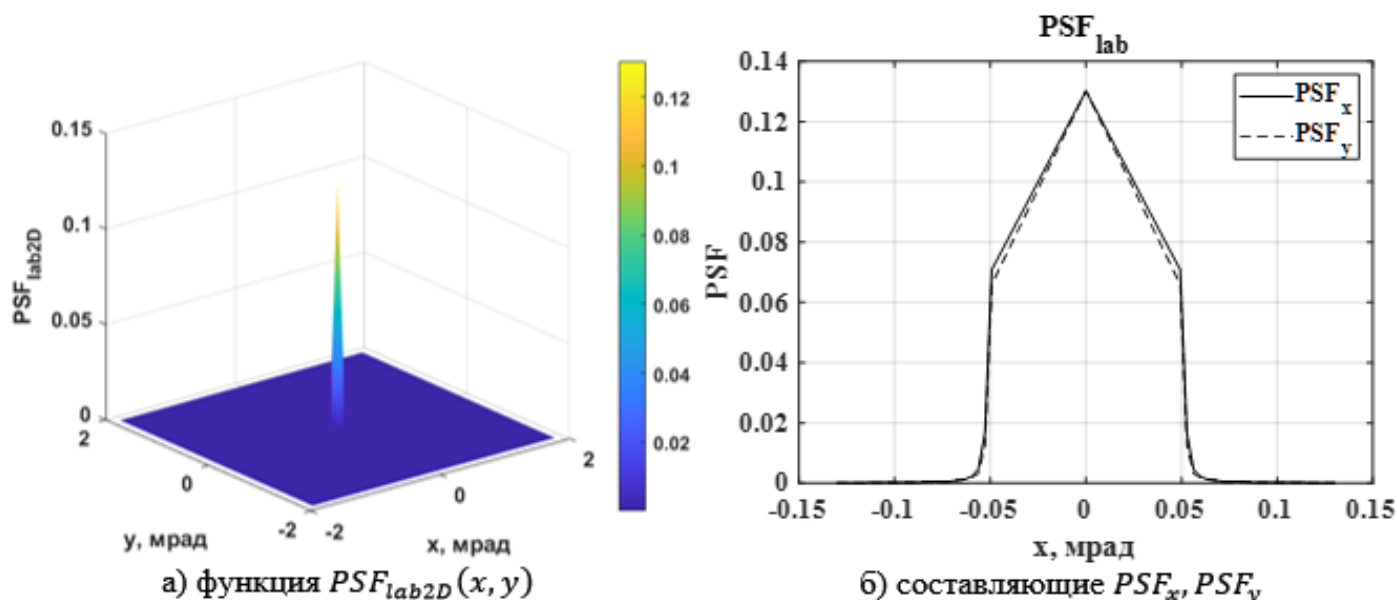


Рисунок 7 – Графики функции $PSF_{lab2D}(x, y)$ и её составляющих PSF_x, PSF_y

Затем были проведены процедуры фильтрации изображения I_{app} в частотной и пространственной областях, с целью синтеза соответствующих изображений I_{MTF} и I_{PSF} (рисунок 8). Минимальное значение разности между I_{PSF} и I_{MTF} равно минус $2,5 \cdot 10^{-12}$, максимальное – $2,27 \cdot 10^{-12}$, это свидетельствует о том, что I_{MTF} и I_{PSF} идентичны.

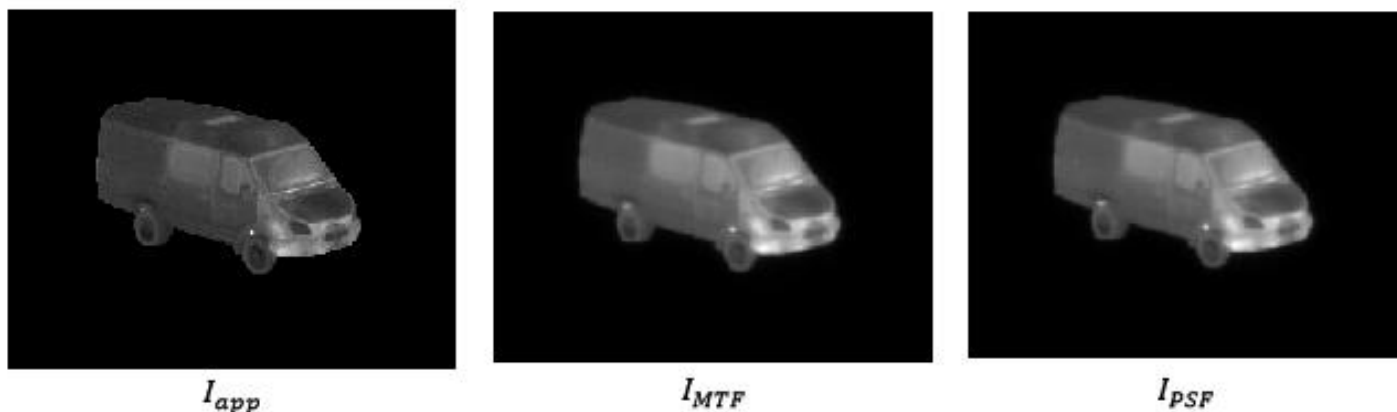


Рисунок 8 – Результаты фильтрации изображения I_{app} в частотной (I_{MTF}) и пространственной (I_{PSF}) областях

Для оценки качества изображения I_{PSF} было получено, с использованием расчётной (теоретической) функции psf (см. рисунок 2б), изображение I_{psf} . Все три изображения I_{app} , I_{PSF} , I_{psf} показаны на рисунке 9 и видно, что самая худшая резкость у изображения I_{PSF} .

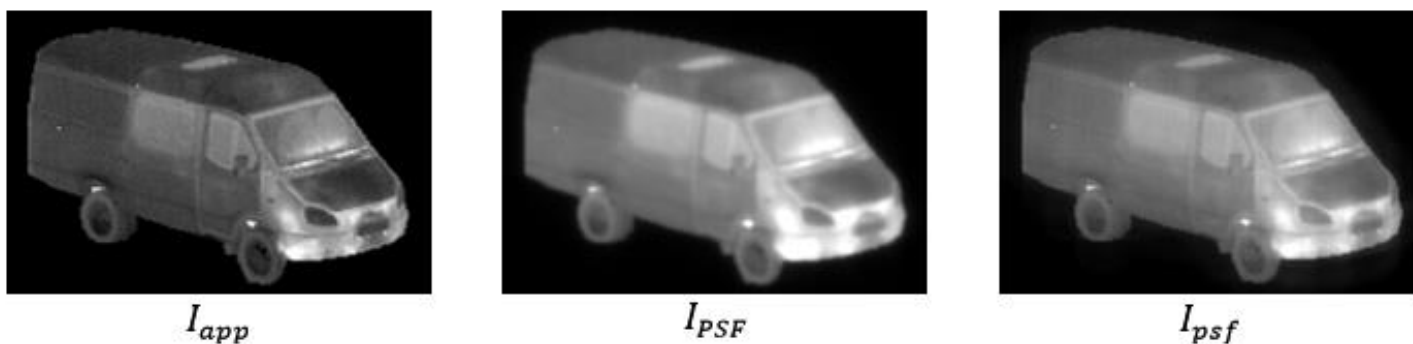


Рисунок 9 – Синтезированные изображения объекта

Для подтверждения этого вывода на рисунке 10 приведены гистограммы разностей:

$$\Delta_1 = I_{PSF} - I_{MTF};$$

$$\Delta_2 = I_{PSF} - I_{psf}.$$

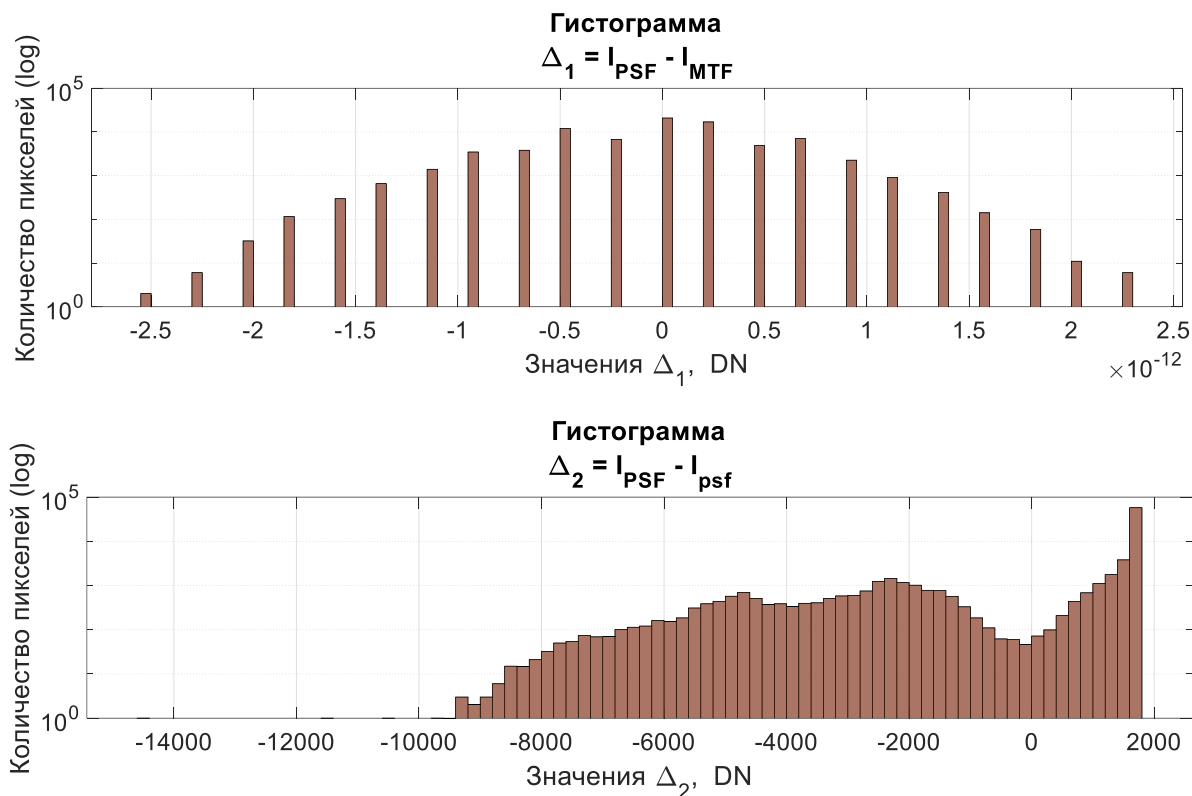


Рисунок 10 – Гистограммы разностей Δ_1 и Δ_2

В [17] рассмотрены различные виды aberrаций, в том числе и астигматизм, представлены на рисунке 11.

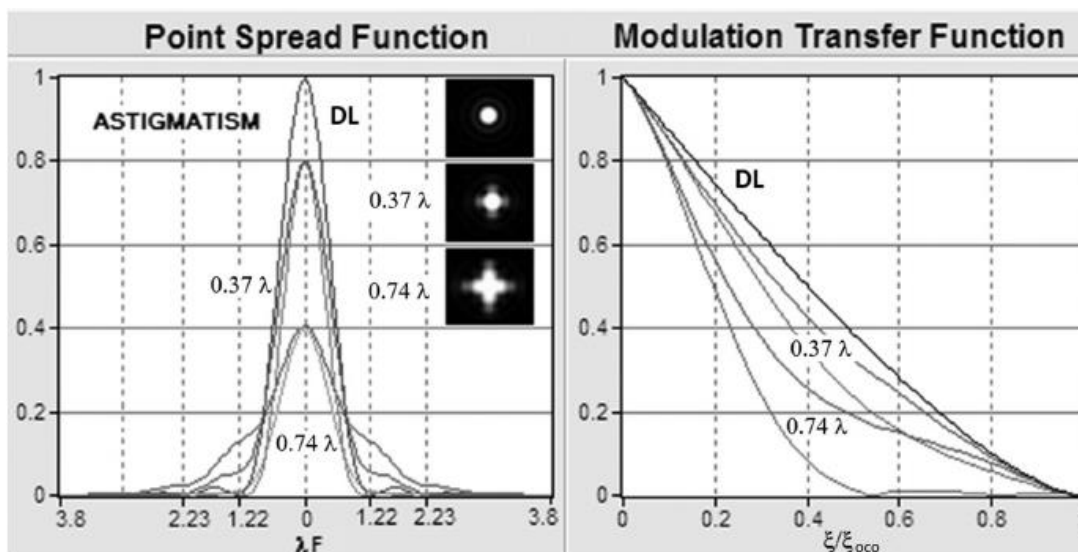


Рисунок 11 - Графики функций psf^* и mtf^* и изображения psf^*

В левой части представлены функции psf^* и их изображения для различных искажений волнового фронта. Верхний график – это функция psf^* без искажений, графики расположенные ниже функции psf^* – это функции при наличии искажений. В рассматриваемом случае функции psf^* , кроме функции без искажений, являются несимметричными, поэтому приведены графики для различных направлений. В правой части рисунка изображены графики функций mtf^* , соответствующие функциям psf^* .

На рисунке 12 приведены графики функции psf и составляющих PSF_x, PSF_y функции PSF_{lab2D} , соответствующие им $MTF_{0,01\lambda/D}, MTF_h, MTF_v$ и изображение функции PSF_{lab2D} .

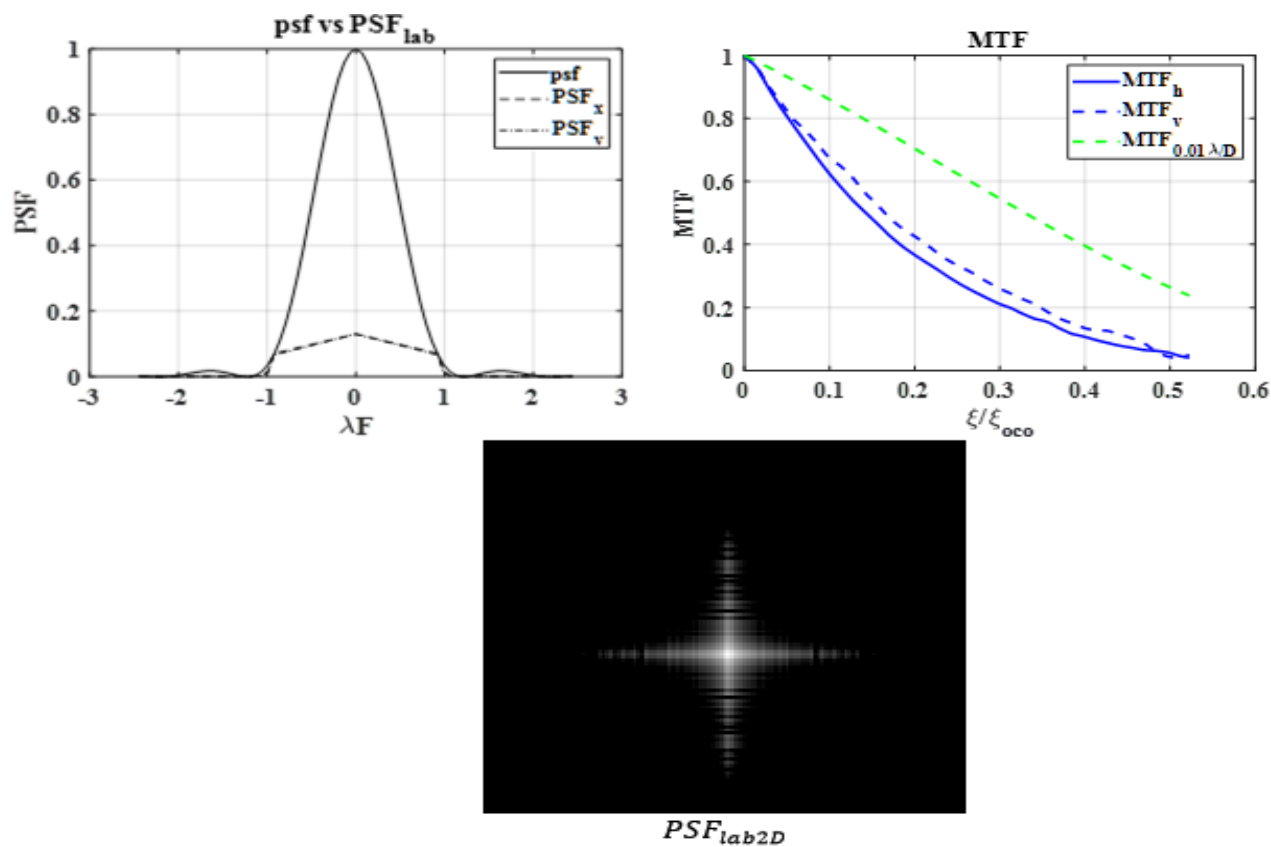


Рисунок 12 – Графики функций psf, PSF_{lab}, MTF и изображение PSF_{lab2D}

Из анализа графиков и изображений на рисунках 11 и 12 следует, что угловой размер пятна аберрации (астигматизма) функций PSF_x, PSF_y больше углового размера пятна дифракции функции psf . Таким образом, рассмотренная тепловизионная ОЭС не является дифракционно-ограниченной, хотя при теоретическом расчёте заложено что ОЭС является дифракционно-ограниченной оптической системой, так как $\frac{F\lambda}{d}$ равно 1,07 (см. таблица 1).

Результаты

Приведено определение частотно-контрастной характеристики оптико-электронной системы, полученной при лабораторных испытаниях, а также проанализированы такие параметры ОЭС как угловой размер пятна нечёткости изображения σ_{blr} , мгновенное (элементарное) поле зрения $IFOV$, угловой размер детектора DAS , пределы Спарроу и Релея, диск Эйри, параметр $\frac{F\lambda}{d}$, а также функция рассеяния точки psf и показана взаимосвязь между ними.

Затем был проведен расчёт эффективной разрешающей способности и сделан вывод о том, что разрешающая способность ОЭС является невысокой, так как её составляющие $R_{eq\ h}$ (53,5"), $R_{eq\ v}$ (46,8") практически равны предельной разрешающей способности $R_{eq\ min}$ (50,6"), которая рассчитана по функции $MTF_{1,0\lambda/D}$, соответствующей максимальному угловому размеру пятна нечёткости изображения σ_{blr} .

Синтез изображений посредством частотно-контрастной характеристики $MTF_{lab2D}(\xi, \eta)$ и функции рассеяния точки функция $PSF_{lab2D}(x, y)$ продемонстрировал, что резкость изображений I_{MTF} и I_{PSF} хуже, чем у изображения I_{psf} , полученного по расчётной функции psf . Данный вывод подтверждается угловыми размерами пятна абберации и пятна дифракции. Одной из возможных причин того, что рассмотренная тепловизионная ОЭС не является дифракционно-ограниченной, могут быть ограничения (нарушения) технологического процесса при изготовлении ОЭС.

Таким образом, синтез изображения с использованием аппарата частотно-контрастных характеристик является качественным инструментом объективной оценки разрешающей способности ОЭС, исключая субъективное мнение, обусловленное человеческим фактором, а также, в совокупности с аналитической моделью оценки эффективности ОЭС, представленной в [1, 18], может рассматриваться как составная часть программно-аппаратного комплекса моделирования информационных каналов ОЭС и фоноцелевой обстановки. Данный программно-аппаратный комплекс является частью цифровой модели комбинированной системы технического зрения (КСТЗ) [19 – 22].

Цифровая модель авиационной комбинированной системы технического зрения представлена на рисунке 13.

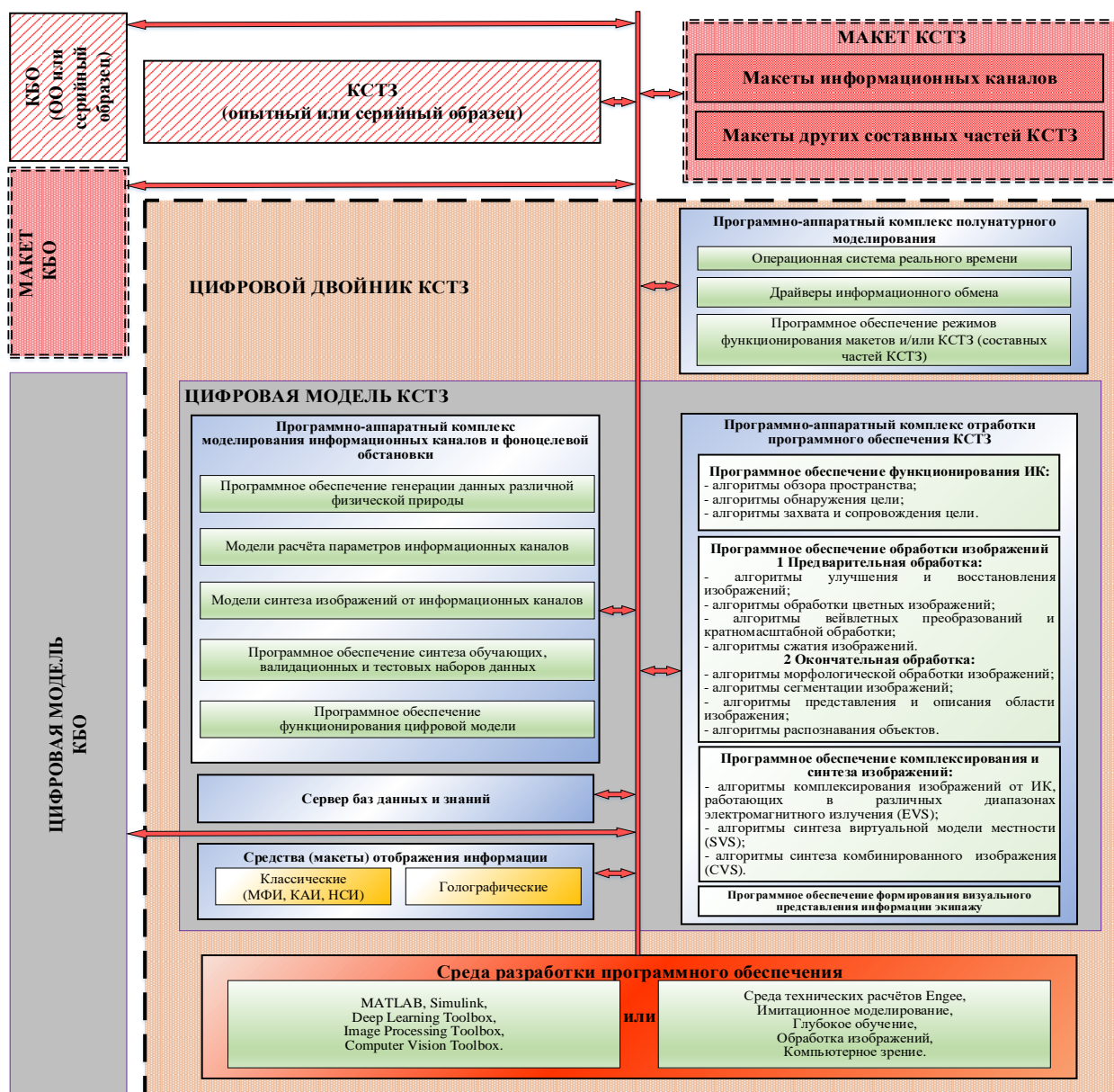


Рисунок 13 – Цифровая модель комбинированной системы технического зрения

Она может использоваться:

- на стадиях «Научные исследования и обоснование разработки», «Аванпроект», а также на этапах эскизного и технического проекта жизненного цикла изделия;
- при проведении виртуальных экспериментов, результаты которых используются при проведении приёмо-сдаточных, предварительных, государственных, квалификационных и иных испытаний;
- при проведении цифровых (виртуальных) испытаний, необходимых для подготовки натуральных испытаний.

Заключение

Авторами статьи рассмотрено определение частотно-контрастной характеристики и её составляющих на этапе лабораторных испытаний.

Измерение частотно-контрастной характеристики позволяет:

– на этапе испытаний изделий провести оценку соответствия разрешающей способности заданным тактико-техническим требованиям;

– на этапе серийного производства при проведении входного и выходного контроля изделий – соответствия разрешающей способности заданным требованиям технических условий;

– на этапе эксплуатации – соответствия разрешающей способности характеристикам, указанным в эксплуатационной документации.

Кроме того, наряду с функцией передачи сигнала $SiTF(T)$, характеризующей чувствительность ОЭС, 3D-моделью шума $\sigma(T)$, представляющей информацию о временном и пространственном шуме ОЭС, частотно-контрастная характеристика MTF является необходимой характеристикой при синтезе фоноцелевых изображений, используемых для обучения нейронной сети [8]. В совокупности с аналитической моделью оценки эффективности ОЭС, может рассматриваться как составная часть программно-аппаратного комплекса моделирования информационных каналов ОЭС и фоноцелевой обстановки, который является частью цифровой модели комбинированной системы технического зрения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Краснов А.М., Трегубенков С.Ю., Румянцев А.В., Хисматов Р.Ф., Шашков С.Н. Оценка эффективности оптико-электронных систем посредством аналитической модели. Функции порогового контраста и передачи модуляции // Информационно-

измерительные и управляющие системы. 2021. Т. 19. № 1. С. 45-64. DOI: 10.18127/j20700814-202101-04

2. Ronald G. Driggers, Melvin H. Friedman, John W. Devitt, Orges Furxhi, Anjali Singh. Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems - Third Edition. Artech House, 2022.

3. Gerald C. Holst. Electro-Optical Imaging System Performance - Fifth edition. JCD Publishing and SPIE Press, 2008.

4. MAVIISS ver. 1.5 (MTF based Visible and Infrared Imaging Systems Simulation) is an Interactive Software program available from JCD Publishing Company and Interactive Software-Integrated Solutions for the 21st Century (ISIS21), 2005.

5. Gerald C. Holst, Ronald G. Driggers. Small detectors in infrared system design. Optical Engineering 51(9), 096401, 2012.

6. Rachel Hughes. Sensor Model Requirements for TAWS/IRTSS Operation. Naval Postgraduate School. Monterey, CA 93943-5000, 2007.

7. Night Vision Thermal Imaging Systems Performance Model. User's Manual & Reference Guide. U.S Army Night Vision and Electronic Sensors Directorate Modeling & Simulation Division Fort Belvoir, VA, 2001.

8. Краснов А. М., Шашков С. Н., Румянцев А. В. Методика синтеза фоноцелевых изображений с учетом характеристик тепловизионной оптико-электронной системы // Труды МАИ. 2025. № 144. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186316>

9. Краснов А. М., Шашков С. Н., Румянцев А. В. Методика оценки влияния температурного контраста на вероятность обнаружения объекта по результатам лабораторных испытаний тепловизионной оптико-электронной системы // Труды МАИ. 2025. № 145. URL: <https://trudymai.ru/publications.php?ID=186886>

10. Michael C. Dudzik, Editor. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook. Joseph S. Accetta, David L. Shumaker, Executive Editors. VOLUME 4 Electro-Optical Systems Design, Analysis, and Testing. Infrared Information Analysis Center and SPIE Optical Engineering Press, 1993.

11. Gerald C. Holst. Electro-Optical Imaging System Performance - Sixth edition. JCD Publishing and SPIE Press, 2017.

12. Krzysztof Chrzanowski. Testing thermal imagers. Practical guidebook. Military University of Technology, Warsaw, Poland, 2010.
13. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. Москва: Техносфера, 2006.
14. Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, Steven L. Eddins. Digital Image Processing Using MATLAB. Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ 07458, 2004.
15. Gonzalez, Rafael C., Woods, Richard E., Eddins, Steven L. Digital Image Processing using MATLAB. Gatesmark Publishing, 2020.
16. A. Berk, G.P. Anderson, P.K. Acharya, M.L. Hoke, J.H. Chetwynd, L.S. Bernstein, E.P. Shettle, M.W. Matthew and S.M. Adler-Golden. MODTRAN4 Version 3 Revision 1 USER'S MANUAL. Air Force Research Laboratory, Space Vehicles Directorate, Air Force Materiel Command, HANSCOM AFB, MA 01731-3010, 2003.
17. Glenn D. Boreman. Modulation transfer function in optical and electro-optical systems. Second edition. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2021.
18. Краснов А.М., Трегубенков С.Ю., Румянцев А.В., Хисматов Р.Ф., Шашков С.Н. Оценка эффективности оптико-электронных систем посредством аналитической модели. Модель шума системы «ОЭС-оператор». Труды МАИ. 2022. № 122. DOI: 10.34759/trd-2022-122-22.
19. ГОСТ Р 57700.37 – 2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения
20. ГОСТ Р 57700.24. Компьютерные модели и моделирование. Валидационный базис.
21. ГОСТ Р 57700.22. Компьютерные модели и моделирование. Классификация.
22. ГОСТ Р 57412. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения.

References

1. Krasnov A.M., Tregubenkov S.Yu., Rumyantsev A.V., Khismatov R.F., Shashkov S.N. Methodology for estimating the efficiency of optical-electronic systems using an analytical model. Functions of threshold contrast and modulation transfer //

Information-measuring and control systems. 2021. Vol. 19. No. 1. pp. 45-64. DOI: 10.18127/j20700814-202101-04

2. Ronald G. Driggers, Melvin H. Friedman, John W. Devitt, Orges Furxhi, Anjali Singh. Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems - Third Edition. Artech House, 2022.

3. Gerald C. Holst. Electro-Optical Imaging System Performance - Fifth edition. JCD Publishing and SPIE Press, 2008.

4. MAVIISS ver. 1.5 (MTF based Visible and Infrared Imaging Systems Simulation) is an Interactive Software program available from JCD Publishing Company and Interactive Software-Integrated Solutions for the 21st Century (ISIS21), 2005.

5. Gerald C. Holst, Ronald G. Driggers. Small detectors in infrared system design. Optical Engineering 51(9), 096401, 2012.

6. Rachel Hughes. Sensor Model Requirements for TAWS/IRTSS Operation. Naval Postgraduate School. Monterey, CA 93943-5000, 2007.

7. Night Vision Thermal Imaging Systems Performance Model. User's Manual & Reference Guide. U.S. Army Night Vision and Electronic Sensors Directorate Modeling & Simulation Division Fort Belvoir, VA, 2001.

8. Krasnov A.M., Shashkov S.N., Rumyantsev A.V. A methods for synthesizing images of target environment taking into account the characteristics of a thermal electro-optical imaging system // Trudy MAI. 2025. No. 144. (In Russ.) URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186316>

9. Krasnov A.M., Shashkov S. N., Rumyantsev A.V. Methodology for assessing the effect of temperature contrast on the probability of object detection based on laboratory tests of a thermal imaging optoelectronic system // Trudy MAI. 2025. No. 145. (In Russ.) URL: <https://trudymai.ru/publications.php?ID=186886>

10. Michael C. Dudzik, Editor. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook. Joseph S. Accetta, David L. Shumaker, Executive Editors. VOLUME 4 Electro-Optical Systems Design, Analysis, and Testing. Infrared Information Analysis Center and SPIE Optical Engineering Press, 1993.

11. Gerald C. Holst. Electro-Optical Imaging System Performance - Sixth edition. JCD Publishing and SPIE Press, 2017.

12. Krzysztof Chrzanowski. Testing thermal imagers. Practical guidebook. Military University of Technology, Warsaw, Poland, 2010.
13. Gonzalez R., Woods R., Eddins S. Digital image processing in the MATLAB environment. Moscow: Technosphere, 2006.
14. Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, Steven L. Eddins. Digital Image Processing Using MATLAB. Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ 07458, 2004.
15. Gonzalez, Rafael C., Woods, Richard E., Eddins, Steven L. Digital Image Processing using MATLAB. Gatesmark Publishing, 2020.
16. A. Berk, G.P. Anderson, P.K. Acharya, M.L. Hoke, J.H. Chetwynd, L.S. Bernstein, E.P. Shettle, M.W. Matthew and S.M. Adler-Golden. MODTRAN4 Version 3 Revision 1 USER'S MANUAL. Air Force Research Laboratory, Space Vehicles Directorate, Air Force Materiel Command, HANSCOM AFB, MA 01731-3010, 2003.
17. Glenn D. Boreman. Modulation transfer function in optical and electro-optical systems. Second edition. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2021.
18. Krasnov A.M., Tregubenkov S.Yu., Rummyantsev A.V., Khismatov R.F., Shashkov S.N. Methodology for estimating the efficiency of optical-electronic systems using an analytical model. Noise model of the «OES-operator» system. Trudy MAI, 2022, no.122. DOI: 10.34759/trd-2022-122-22
19. GOST R 57700.37 – 2021. Computer models and modeling. Digital counterparts of products. General provisions
20. GOST R 57700.24. Computer models and modeling. The validation basis.
21. GOST R 57700.22. Computer models and modeling. Classification.
22. GOST R 57412. Computer models in the processes of product development, production and operation. General provisions.

Информация об авторах

Александр Маркелович Краснов, доктор технических наук, Первый заместитель генерального директора-главный конструктор, Закрытое акционерное общество «Технологический парк космонавтики «ЛИНКОС», г. Москва, г. Щербинка, Россия; e-mail: a.krasnov@inbox.ru

Сергей Николаевич Шашков, кандидат технических наук, ведущий инженер, Федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», г. Москва, Россия.

Андрей Васильевич Румянцев, старший офицер смены, Центр (управления комплексной безопасностью) МО РФ, Москва, г. Щербинка, Россия.

Information about the authors

Aleksandr M. Krasnov, D. Sc. (Engineering), First Deputy General Director-Chief Designer, Closed Joint Stock Company «Technological Park of Cosmonautics «LINKOS», Moscow, Shcherbinka, Russia; e-mail: a_krasnov@inbox.ru

Sergey N. Shashkov, Ph. D. (Engineering), Leading Engineer, Federal Autonomous Institution «State Research Institute of Aviation Systems», Moscow, Russia.

Andrey V. Rumyantsev, Senior hift officer Center (control of integrated safety and security) the MoD RF, Moscow, Russia.

Получено 19 декабря 2025 ● Принято к публикации 26 января 2026 ● Опубликовано 27 февраля 2026
Received 19 December 2025 ● Accepted 24 January 2026 ● Published 27 February 2026
