

Научная статья

УДК 621.383

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186886>

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

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОНТРАСТА НА ВЕРОЯТНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ

А.М. Краснов¹ ✉, 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. 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/published.php?ID=186886>

Аннотация. Основными характеристиками, определяющими эффективность тепловизионных оптико-электронных систем, являются: функция передачи сигнала (SiTF), частотно-контрастная характеристика и шум. В статье рассмотрены определение SiTF и пространственных и временных составляющих 3-D шума по изображениям, полученным в лабораторных условиях. Были синтезированы однородные изображения объекта и фона по полученным функциям SiTF и составляющим 3-D шума, затем по этим изображениям

рассчитаны температурный контраст и отношение сигнал-шум (SNR), определена зависимость вероятности обнаружения объекта от SNR и температурного контраста.

Рассмотрена методика оценки влияния температурного контраста на вероятность обнаружения объекта по результатам лабораторных испытаний авиационных оптико-электронных систем, включающая: подготовку исходных данных и получение целевых изображений посредством оптико-электронных систем; обработку изображений, расчёт функций SiTF, шума и его составляющих; синтез изображений фона и цели; расчёт по изображениям средних значений температуры объекта, фона, среднеквадратического отклонения температуры объекта и фона, стандартного отклонения шума от объекта и фона; расчёт температурного контраста и отношения сигнал-шум; расчёт вероятности обнаружения объекта и построение зависимости вероятности обнаружения от температурного контраста.

Ключевые слова: эквивалентная разность температур, температурный контраст, оптический контраст, вероятность обнаружения, функция передачи сигнала, SiTF, 3-D шум и его составляющие.

.....

METHOD OF ASSESSING THE INFLUENCE OF TEMPERATURE CONTRAST ON THE PROBABILITY OF OBJECT DETECTION BASED ON THE RESULTS OF LABORATORY TESTS OF A THERMAL IMAGING ELECTRO-OPTICAL SYSTEM

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

¹Closed Joint Stock Company «Technological Park of Cosmonautics «LINKOS»,
Moscow, 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. Method of assessing the influence of temperature contrast on the probability of object detection based on the results of laboratory tests of a

Abstract. The main parameters characterizing the efficiency of thermal imaging electro-optical systems are the signal transfer function (SiTF), the frequency-contrast characteristic and noise. The article considers the definition of SiTF, and spatial and temporal components of 3-D noise from images obtained in laboratory conditions. Homogeneous images of the object and the background were synthesized from the obtained SiTF functions and 3-D noise components, then the temperature contrast and signal-to-noise ratio (SNR) were calculated from these images, and the dependence of the probability of detecting an object on SNR and temperature contrast was determined.

The article considers a method for assessing the influence of temperature contrast on the probability of object detection based on the results of laboratory tests of electro-optical systems, including: preparation of initial data and obtaining target images using electro-optical systems; image processing, calculation of SiTF functions, noise and its components; synthesis of background and target images; calculation of average values of object temperature, background, standard deviation of object temperature and background, standard deviation of noise from the object and background; calculation of temperature contrast and signal-to-noise ratio; calculation of object detection probability and plotting the dependence of detection probability on temperature contrast.

Keywords: equivalent temperature difference, temperature contrast, optical contrast, detection probability, signal transmission function, SiTF, 3-D noise and its components.

Введение

В статье рассмотрены вопросы, связанные с определением эквивалентной разности температур, температурного и оптического контраста в средневолновом и длинноволновом инфракрасных диапазонах, а также вероятностью обнаружения объекта, функции передачи сигналов *SiTF* и составляющих 3-D шума.

Актуальность данного материала обусловлена следующими факторами.

1. Возможностью определения минимального порога температурного контраста, необходимого для обнаружения сигнала по результатам лабораторных испытаний оптико-электронных систем (ОЭС).
2. Возможностью получения значений температурного контраста, при которых был установлен факт обнаружения (распознавания) объекта наблюдения по результатам натурных испытаний.
3. Возможностью синтеза выборки изображений объектов наблюдения с учётом характеристик ОЭС на различных фонах, необходимой для обучения нейронных сетей.
4. Возможностью расчёта среднего значения начального температурного контраста по температурной сигнатуре объекта и фона, полученных в полевых условиях с различных углов визирования (с учётом времени суток и года), необходимого для оценки результатов натурных испытаний ОЭС.

Эквивалентная разность температур

На поверхности физического объекта могут происходить четыре фотонных действия: поглощение, отражение, пропускание и излучение [1]

$$\alpha\alpha(\lambda\lambda) + \rho\rho(\lambda\lambda) + \tau\tau(\lambda\lambda) = 1,$$

где $\alpha\alpha(\lambda\lambda)$ – коэффициент поглощения, $\rho\rho(\lambda\lambda)$ – коэффициент отражения; $\tau\tau(\lambda\lambda)$ – коэффициент пропускания.

Большинство материалов не пропускают волны средневолнового инфракрасного (СВИК) и длинноволнового инфракрасного (ДВИК) диапазонов, за исключением селенида цинка, сапфира, шпинеля и германия. Для непрозрачных материалов $\tau\tau(\lambda\lambda)$ равно 0, следовательно:

$$\alpha\alpha(\lambda\lambda) + \rho\rho(\lambda\lambda) = 1.$$

Из этого равенства видно, что объекты с высокой отражающей способностью (цвета) имеют небольшое поглощение, и, наоборот, при большом поглощении отражение сигнала мало. В инфракрасном диапазоне сигнал от объекта формируется за счёт излучения. В соответствии с законом Кирхгофа, когда объект

находится в тепловом равновесии с окружающей средой, коэффициенты поглощения $\alpha(\lambda)$ и излучения $\varepsilon(\lambda)$ равны:

$$\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda),$$

Таким образом,

$$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) = 1,$$

то есть сильно излучающий в инфракрасном диапазоне объект имеет низкую отражательную способность.

В инфракрасном диапазоне характеристики поглощения и излучения объектов более значимы, чем их характеристики отражения и пропускания. Объекты имеют тенденцию поглощать солнечную энергию с последующим излучением, но существуют объекты, являющиеся источниками собственного излучения. Температура объектов обеспечивает энергию, необходимую для излучения фотонов. Два основных положения справедливы для излучения [1]:

- тело с более высокой температурой соответствует большему излучению потока;
- тело с более высокой температурой сдвигает максимум спектрального распределения потока в сторону более коротких длин волн.

Эти положения верны независимо от характеристик излучательной способности объекта. Излучательная способность объекта зависит от температуры объекта, спектрального распределения и коэффициента излучения:

$$(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \frac{c_1}{5} \frac{M_{\varepsilon}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad \text{Вт} \cdot \text{мкм}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$$

8

Вт·мкм²⁻¹; $c_2 = 14388 \text{ мкм} \cdot \text{К}$, где $c_1 = 3,7418 \times 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{мкм}^2 \cdot \text{К}^{-1}$

спектральная квантовая светимость:

$$(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \frac{3}{4} \frac{c_1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \frac{1}{\lambda^2} \quad \text{фотон} \cdot \text{мкм}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$$

где $c_3 = 1,88365 \times 10^{27} \text{ фотон} \cdot \text{мкм}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$

На рисунке 1 приведена зависимость спектральной квантовой светимости абсолютно чёрного тела от длины волны и температуры, рассчитанная по формуле Планка для абсолютно чёрного тела (АЧТ) [2], у которого $\varepsilon\varepsilon(\lambda\lambda)$ равен 1.

Данный график подтверждает положение о том, что тело с более высокой температурой соответствует большему излучению потока и сдвигает максимум спектрального распределения потока в сторону более коротких длин волн. Например, излучение АЧТ с температурой 1000 К наблюдается в видимом диапазоне, при температуре 300 К излучения АЧТ в видимом диапазоне нет, но наблюдается в СВИК (MWIR) и ДВИК (LWIR) диапазонах.

Следует обратить внимание на сдвиг длины волны максимального излучения $\lambda\lambda_{mmmmmm}$ для различных температур, значение которой определяется законом Вина [1]:

$$\lambda\lambda_{mmmmmm} WW = \frac{2897,8}{TT} \text{ [мкм]},$$

где температура дана в Кельвинах.

Таким образом, определив перечень объектов наблюдения и зная их среднюю температуру можно определить спектральный диапазон, в котором должна работать разрабатываемая ОЭС. Например, объекты со средней температурой 300 К имеют максимальное излучение на длине волны 9,66 мкм, т.е. ДВИК диапазон. Длина волны 4 мкм СВИК диапазона соответствует излучательной способности объектов с температурой 724,45 К.

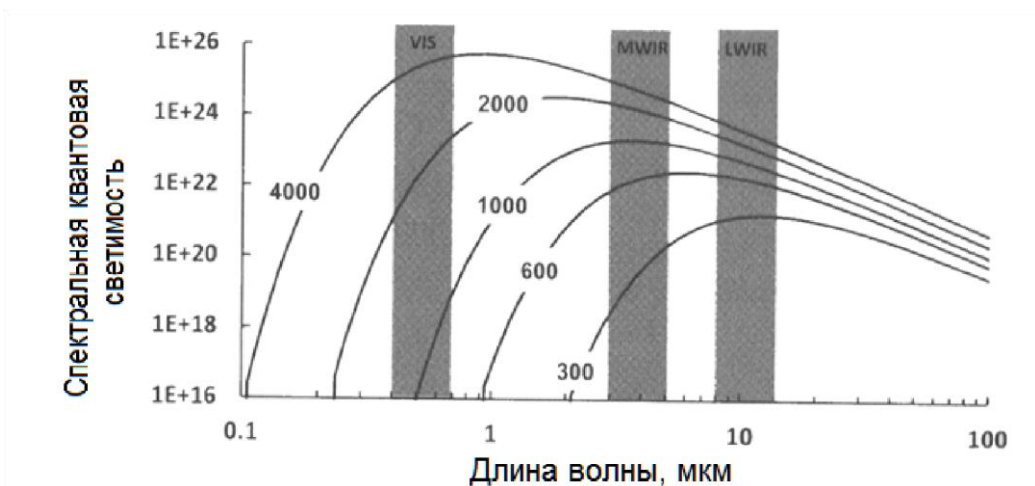


Рисунок 1 - Зависимость спектральной квантовой светимости абсолютно чёрного тела от длины волны и температуры.

Объекты, излучение которых зависит от длины волны, называют спектральными излучателями. Значение энергетической светимости в заданном спектральном диапазоне определяется во формуле [2]:

$$M_{\lambda\lambda}(\lambda\lambda, T) = \frac{\varepsilon(\lambda\lambda) \cdot 1}{\varepsilon(\lambda\lambda) \cdot \lambda^5 \cdot c_2} \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot \lambda_1$$

$$\varepsilon(\lambda\lambda) = \frac{M_{\lambda\lambda} - 1}{M_{\lambda\lambda}^{oooo}(\lambda\lambda)}$$

$$M_{\lambda\lambda}^{oooo}(\lambda\lambda)$$

$$M_{\lambda\lambda}^{BBBB}(\lambda\lambda)$$

где $M_{\lambda\lambda}^{oooo}(\lambda\lambda)$, $M_{\lambda\lambda}^{BBBB}(\lambda\lambda)$ – измеренные спектральные энергетические светимости объекта и АЧТ при температуре АЧТ, равной температуре объекта.

Объект с постоянным коэффициентом излучения $\varepsilon(\lambda\lambda)$ на всех длинах волн называется серым телом. Закон Стефана-Больцмана обеспечивает простые расчёты потока, когда желательно знать излучение во всём спектре:

$$M_{\lambda\lambda}^{ee}(T) = \frac{\varepsilon \sigma T^4}{\varepsilon \sigma T^4}$$

где константа Стефана-Больцмана σ равна $5,67032 \times 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{К}^{-4}$.

Уравнение применимо только к черным и серым телам.

Контраст объекта в инфракрасном диапазоне описывается эквивалентной разностью температур ΔT [2]:

$$T_{\lambda\lambda} = T_{BB} + \Delta T,$$

где T_{BB} , $T_{\lambda\lambda}$ – температура фона и объекта соответственно.

Величина ΔT может показаться величиной характеризующей температуру, но на самом деле она является радиометрической величиной. Разность между двумя величинами можно представить рядом Тейлора [2]:

$$M_{\lambda\lambda}^{ee}(\lambda\lambda, T_{BB} + \Delta T) - M_{\lambda\lambda}^{ee}(\lambda\lambda, T_{BB}) = \frac{\partial M_{\lambda\lambda}^{ee}(\lambda\lambda, T_{BB})}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial^2 M_{\lambda\lambda}^{ee}(\lambda\lambda, T_{BB})}{\partial T^2} \frac{\Delta T^2}{2} + \dots$$

Для небольших значений $\Delta T T$ достаточно учесть первое слагаемое ряда Тейлора:

$$M M_{ee}(\lambda \lambda, T T_{\lambda \lambda}) - M M_{ee}(\lambda \lambda, T T_{BB}) \approx \frac{\partial \partial M M_{ee}(\lambda \lambda, T T_{BB})}{\partial \partial T T} \Delta T T,$$

где

$$\frac{\partial \partial M M_{ee}(\lambda \lambda, T T_{BB})}{\partial \partial T T} = \frac{c c_2 e e_{cc2} / \lambda \lambda \lambda \lambda_{BB}}{M M_{ee}(\lambda \lambda, T T_{BB}) \lambda \lambda T T} \cdot 2(c c_2 e e_{cc2} / \lambda \lambda \lambda \lambda_{BB} - 1).$$

Следовательно,

$$\Delta T T \approx \frac{\int_{\lambda \lambda} \lambda \lambda^2 [M M_{ee}(\lambda \lambda, T T_{\lambda \lambda}) - M M_{ee}(\lambda \lambda, T T_{BB})] d d \lambda \lambda}{\int_{\lambda \lambda} \lambda \lambda \lambda \lambda_{12} \partial \partial M M_{ee} \partial \partial (\lambda \lambda T T, T T_{BB}) d d \lambda \lambda}.$$

Эквивалентная разность температур $\Delta T T$, как правило, используется при энергетическом расчёте для оценки характеристик ОЭС. На практике вместо $\Delta T T$ используется температурный контраст $\Delta T T_{RRRRRR}$, который рассчитывается по тепловизионным изображениям.

Оптический и температурный контраст

Оптический контраст $C C$ объекта наблюдения в СВИК и в ДВИК диапазонах определяется по формулам [1, 3, 4]:

$$C C = \frac{R R R}{T_{\lambda} + T_B};$$

$$\Delta T T_{RRRRRR} = \frac{\Delta T T}{(T T_{\lambda \lambda} - T T_{BB})^2 + (\sigma \sigma_{\lambda \lambda} - \sigma \sigma_{BB})^2};$$

$$T T = \frac{\sum_{nn} \sum_{mm} t t_{mm,nn}}{M M M M}; T T_{\lambda \lambda} = T T \text{ или } T T_{BB} = T T;$$

$$\sigma \sigma = \frac{\sum_{nn} \sum_{mm} t t_{mm,nn} - T T}{M M M M}; \sigma \sigma_{\lambda \lambda} = \sigma \sigma \text{ или } \sigma \sigma_{BB} = \sigma \sigma,$$

где ΔTT_{RRRRRR} – температурный контраст; $TT_{\lambda\lambda}$, TT_{BB} – средние значения температуры (°C или K) объекта и фона, вычисленные по значениям пикселей (DN); $\sigma\sigma_{\lambda\lambda}$, $\sigma\sigma_{BB}$ – среднеквадратическое отклонение (СКО) температуры объекта и фона; MM , MM – количество строк и столбцов в изображении объекта наблюдения (фона), $tt_{mm,nn}$ – температурные значения пикселей.

Напряжение на выходе пикселя пропорционально количеству электронов в потенциальной яме пикселя. При известной разрядности N аналого-цифрового преобразователя количество электронов преобразуется в цифрой уровень сигнала, его, как правило, обозначают $DDDD$ (*digital level*) или $DDMM$ (*digital number*). Из значений цифровых уровней сигналов $DDMM$ формируется кадр изображения ОЭС. В любой ОЭС формируется изображение в заданном диапазоне температур: от $TT_{mmmmmmn}$ до $TT_{mmmmmmm}$. Минимальному значению $DDDD$, равному 0, соответствует $TT_{mmmmmmn}$, а $TT_{mmmmmmm}$ соответствует максимальному $2^{NN} - 1$.

При расчёте ΔTT_{RRRRRR} , принимают допущение, о том, что площадь фона равна площади объекта, то есть если $HH_{\lambda\lambda}$, $WW_{\lambda\lambda}$ – это размеры объекта в метрах, то размеры фона будут равны [2]:

$$HH_{BB} = \sqrt{2}HH_{\lambda\lambda}; WW_{BB} = \sqrt{2}W_T.$$

В случае, если фон равномерный, выражение для ΔTT_{RRRRRR} , принимает вид [2]

$$\Delta TT_{RRRRRR} = (TT_{\lambda\lambda} - TT_{BB})^2 + \sigma\sigma_{\lambda\lambda}^2.$$

Часто изображения объекта имеют несколько фрагментов с различной температурой (рисунок 2), для вычисления температуры объекта TT_{cp} и температурного контраста ΔTT_{mtaeee} используют формулы [4]:

$$TT_{mtaeee} = \frac{\sum_{kk=1}^K AA_{kk} TT_{kk}}{\sum_{kk=1}^K AA_{kk}};$$

$$\Delta TT_{mtaeee} = TT_{mtaeee} - TT_{BB},$$

где K , AA_{kk} , TT_{kk} – количество фрагментов изображения, площадь и средняя температура k -го фрагмента изображения соответственно.

При допущении, если $\sigma\sigma_{\lambda\lambda}$ и $\sigma\sigma_{\nu\nu}$ равны нулю, то $\Delta T T_{RRRRRR}$ уменьшается до $\Delta T T_{mmmmmm}$.

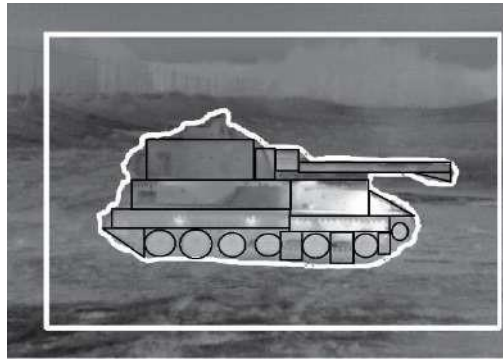


Рисунок 2 - Разбиение изображения на фрагменты

Площадь AA_{kk} фрагмента изображения – произведение количества пикселей в фрагменте изображения на площадь пикселя. Средняя температура TT_{kk} фрагмента изображения равна

$$TT_{kk} = \frac{\sum \sum_{nnmm} tt_{mmkk,nn}}{MMMM}.$$

Температурные значения пикселей $tt_{mm,nn}$ и tt_{mm}^{kk},nn определяются по аппроксимирующей зависимости функции передачи сигнала $SSSSTTSS$.

Определение функции передачи сигнала

Зависимость значений пикселей DN от значений температуры есть функция передачи сигнала $SiTF$ [1]. В общем случае испытательное оборудование, необходимое для определения $SiTF$, состоит из следующих модулей : абсолютное черное тело, зеркальный коллиматор, вращающийся диск с набором мишеней (мишеней), компьютер с платой видеозахвата и программное обеспечение для тестирования и контроля. Один из вариантов построения испытательного оборудования приведен на рисунке 3. В качестве тест-объекта необходимо использовать мишу, приведённую на рисунке 4. Размещение миш и тепловизора должно быть таким, чтобы белый квадрат миш занимал максимально поле зрения тепловизора.

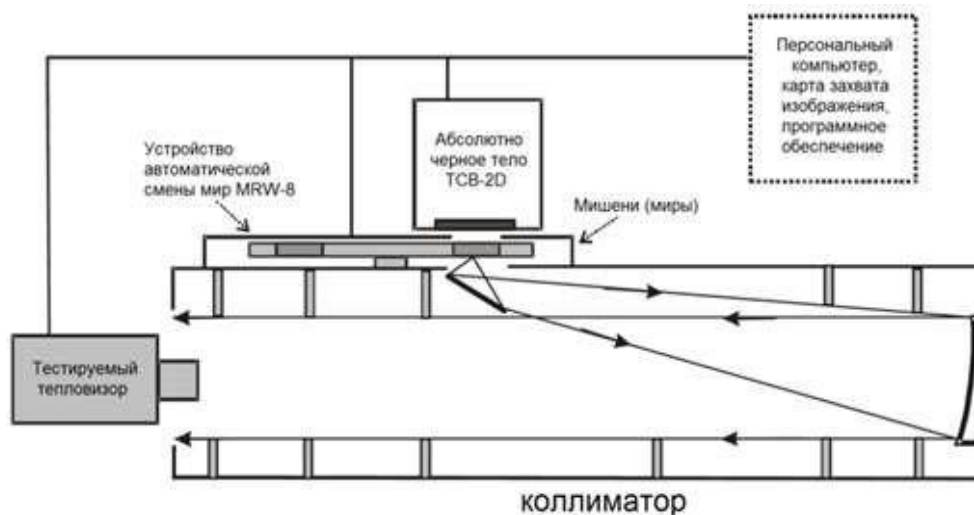


Рисунок 3 – Схема размещения испытательного оборудования



Рисунок 4 - Миры для измерения $SiTF$

До проведения работ при необходимости следует провести юстировку ОЭС и отключить все улучшения изображения и режимы усиления ОЭС.

В таблице 1 приведены значения температуры АЧТ T_{bb} и температурного контраста ΔT ; в таблице 2 приведены характеристики ОЭС, с помощью которой получены изображения миры (рисунок 5).

Таблица 1

Значения температуры АЧТ

$TT_{0000}, ^\circ C$	$\Delta\Delta TT_{0000}, ^\circ C$	$TT_{0000}, ^\circ C$	$\Delta\Delta TT_{0000}, ^\circ C$
15	-10	22	-3
16	-9	22,25	-2,75
17	-8	22,5	-2,5
18	-7	22,75	-2,25
19	-6	23	-2
20	-5	23,25	-1,75
21	-4	23,5	-1,5

22	-3	23,75	-1,25
23	-2	24	-1
24	-1	24,25	-0,75
25 (фон)	0	24,5	-0,5
26	1	24,75	-0,25
27	2	25 (фон)	0
28	3	25,25	0,25
29	4	25,5	0,5
30	5	25,75	0,75
31	6	26	1
32	7	26,25	1,25
33	8	26,5	1,5
34	9	26,75	1,75
35	10	27	2
		27,25	2,25
		27,5	2,5
		27,75	2,75
		28	3

Таблица 2

Характеристики ОЭС

Характеристика	Значение
Фокусное расстояние, мм	300
Диаметр входного зрачка, мм	75
Спектральный диапазон, мкм	3 - 5
Размер активного элемента пикселя, мкм	15
Угловой размер пикселя, мрад	0,05
Размер поля зрения, градус	1,8 x 1,5

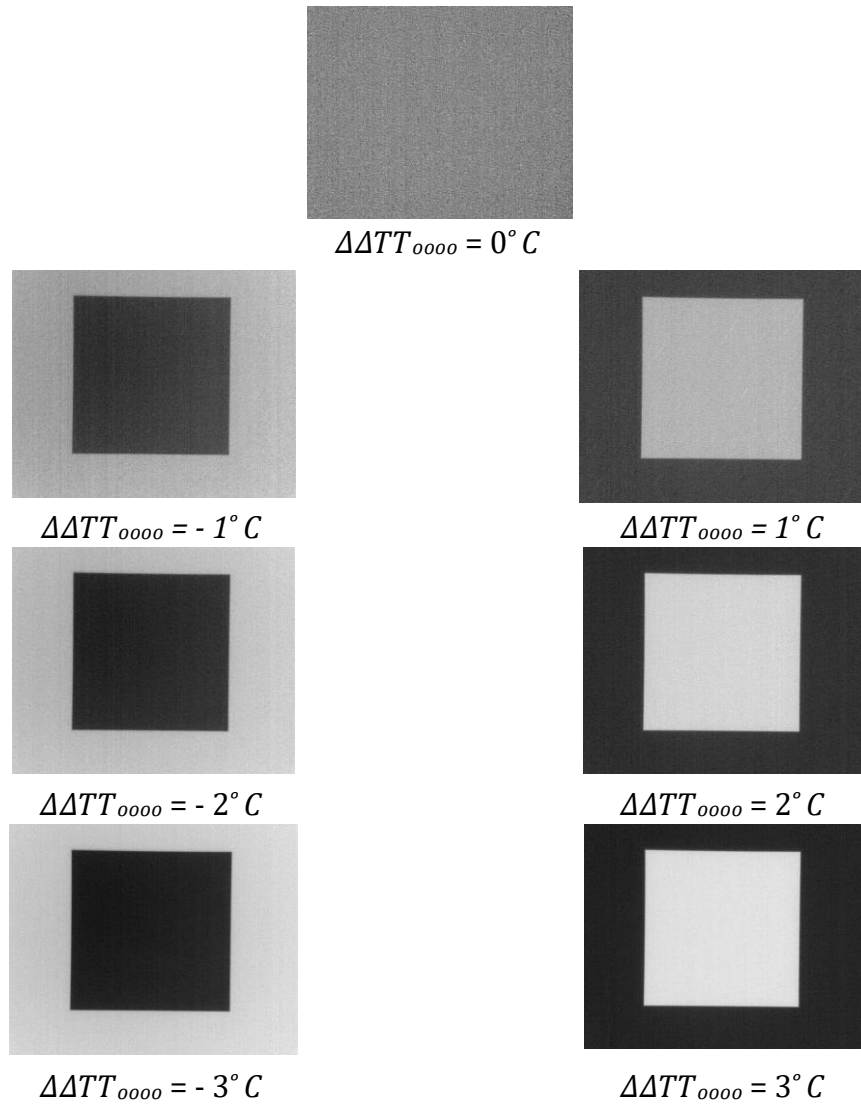


Рисунок 5 - Изображения мира, полученные посредством ОЭС.

На рисунках 6 и 7 приведены функции $SSSSTTSS(TT)$, $SSSSTTSS(\Delta\Delta TT)$ (синие маркеры) и аппроксимирующие функции $DDMM = ff(TT_{0000})$, $\Delta\Delta DDMM = ff(\Delta\Delta TT_{0000})$ (красные пунктирные линии).

В таблицах 3, 4 представлены значения коэффициентов функций $DDMM = ff(TT_{0000})$, $\Delta\Delta DDMM = ff(\Delta\Delta TT_{0000})$ и их обратных функций $TT_{0000} = ff(DDMM)$, $\Delta\Delta TT_{0000} = ff(\Delta\Delta DDMM)$.

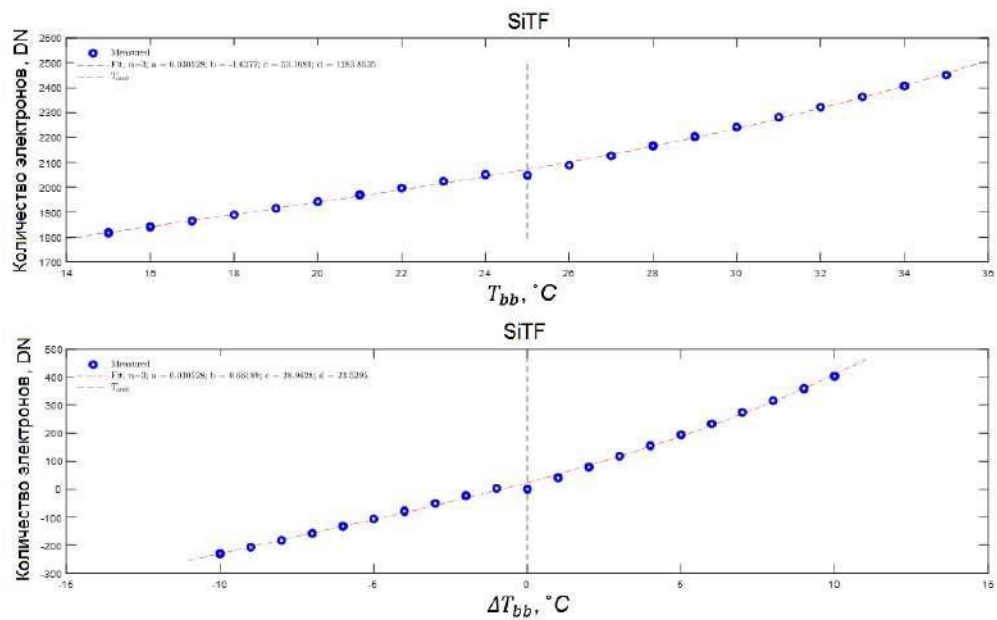


Рисунок 6 – График *SiTF* для диапазона от 15°C до 35°C

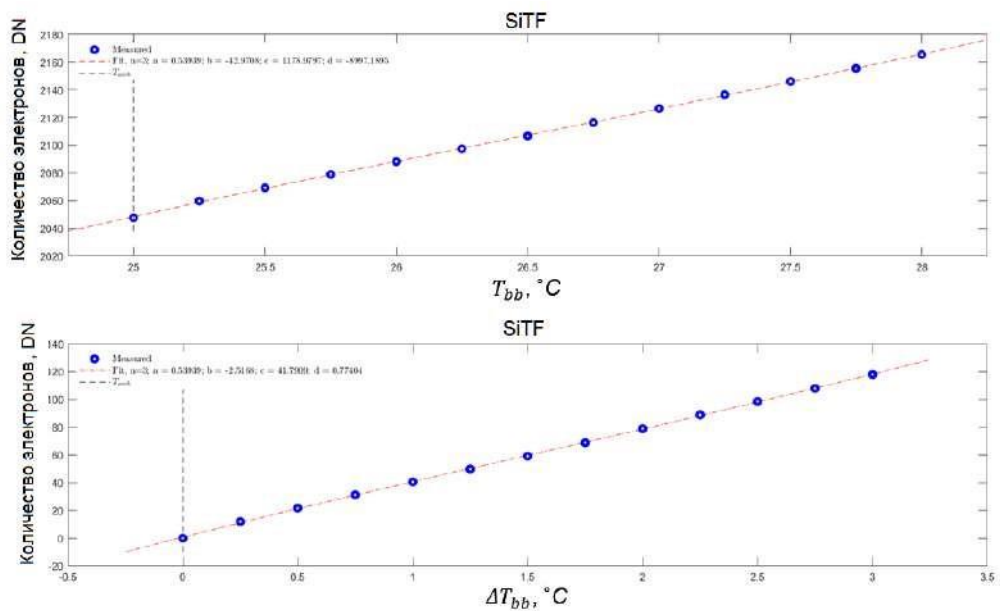


Рисунок 7 – График *SiTF* для диапазона от 25°C до 28°C

Таблица 3

Значения коэффициентов для температур от 15°C до 35°C

Функция	a	b	c	d
$DDMM = ff(TT_{0000})$	0,055	-4,596	167,75	-123,65
$TT_{0000} = ff(DDMM)$	$-1,886 \times 10^{-8}$	$1,22 \times 10^{-4}$	-0,2393	163,27
$\Delta DDMM = ff(\Delta \Delta TT_{0000})$	0,055	-0,5127	40,023	0,3959
$\Delta \Delta TT_{0000} = ff(\Delta \Delta DDMM)$	$-1,886 \times 10^{-8}$	$6,652 \times 10^{-6}$	0,0252	-0,0131

$\sigma\sigma = ff(TT_{oooo})$	-0.0026	-0.009	7.8604	-71.9394
$TT_{oooo} = ff(\sigma\sigma)$	-0.0067	1.4725	-1.056×10^2	2.465×10^3
Вид полинома	$yy = aaxx^3 + bbxx^2 + ccxx + dd$			

Таблица 4

Значения коэффициентов для температур от 25°C до 28°C

Функция	a	b	c	d
$DDMM = ff(TT_{oooo})$	0.5394	-42.9708	1178.98	-8997.1895
$TT_{oooo} = ff(DDMM)$	-2.4249×10^{-7}	0.0015	-3.2104	2246.6812
$\Delta\Delta DDMM = ff(\Delta\Delta TT_{oooo})$	0.5394	-2.5168	41.7909	0.7740
$\Delta\Delta TT_{oooo} = ff(\Delta\Delta DDMM)$	-2.4249×10^{-7}	4.483×10^{-5}	0.0236	-0.0171
$\sigma\sigma = ff(TT_{oooo})$	-0.0536	1.2153	49.6355	-1088.0358
$TT_{oooo} = ff(\sigma\sigma)$	0.0046	-1.1622	97.1317	-2678.1249
Вид полинома	$yy = aaxx^3 + bbxx^2 + ccxx + dd$			

Вероятность обнаружения объекта

Выражение для расчёта вероятности обнаружения объекта имеет вид [5, 6, 19, 20]

$$P_{dd} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left\{-\frac{SSMMSS}{2} \left[1 - \cos(\theta)\right]\right\} d\theta$$

$$SSMMSS = \frac{\Delta TT_{RRRRRR}}{\sigma\sigma_{\lambda\lambda}(TT_{\lambda\lambda}) + \sigma\sigma_{BB}(TT_{BB})},$$

где $SSMMSS$ – отношение сигнал-шум; $\sigma\sigma_{\lambda\lambda}(TT_{\lambda\lambda})$, $\sigma\sigma_{BB}(TT_{BB})$ - СКО шума ОЭС от объекта наблюдения и фона соответственно, рассчитываемые по формуле [6]:

$$\sigma\sigma(TT) = \sigma\sigma_{ddeemmtt2}(TT) + \sigma\sigma_{ssttmmdd2}(TT),$$

где $\sigma\sigma_{ddeemmtt}(TT)$ – СКО временного шум ОЭС; $\sigma\sigma_{ssttmdd}(TT)$ – СКО пространственного шума

ОЭС. Необходимо отметить, что рассмотренные выше СКО температуры объекта $\sigma\sigma_{\lambda\lambda}$, фона $\sigma\sigma_{BB}$ не есть $\sigma\sigma_{\lambda\lambda}(TT_{\lambda\lambda})$, $\sigma\sigma_{BB}(TT_{BB})$.

Модель шума, используемая для оценки эффективности разрабатываемой ОЭС посредством аналитической модели [7], на начальных этапах проектирования описана в [8]. Рассмотрим модель шума, которую можно использовать после изготовления опытного образца ОЭС при проведении его испытаний в лабораторных и полунатурных условиях. Также эту модель шума целесообразно применять при синтезе изображений с учётом характеристик данной ОЭС для заданных внешних условий.

Для определения функции $\sigma\sigma(TT)$ используется модель 3-D шума [9 - 11]. Суть данной модели в том, что формируется последовательность кадров в виде «куба» изображения, размер которого определяется следующими параметрами: H – ширина по горизонтали в пикселях, V – высота изображения по вертикали в пикселях, K – количество кадров. Затем рассчитывают семь компонентов шума, три из которых относятся к временному шуму, три – к пространственному, а один – к пространственно-временному:

$$\sigma\sigma(TT) = \sigma\sigma_{ddaah}^2(TT) + \sigma\sigma_{ddaa}^2(TT) + \sigma\sigma_{ddh}^2(TT) + \sigma\sigma_{dd}^2(TT) + \sigma\sigma_{aah}^2(TT) + \sigma\sigma_{aa}^2(TT) + \sigma\sigma_h^2(TT),$$

где $\sigma\sigma_{ddaah}(TT)$, $\sigma\sigma_{ddh}(TT)$, $\sigma\sigma_{dd}(TT)$ – составляющие временного шума; $\sigma\sigma_{ddeemmtt}(TT)$; $\sigma\sigma_{aah}(TT)$, $\sigma\sigma_{aa}(TT)$, $\sigma\sigma_h(TT)$ – составляющие пространственного шума; $\sigma\sigma_{ssttmdd}(TT)$; $\sigma\sigma_{ddaah}(TT)$ – пространственно-временной шум, его относят или к временному шуму

$\sigma\sigma_{ddeemmtt}(TT)$ или рассматривают отдельно [4]:

$$\sigma\sigma(TT) = \sigma\sigma ddaah(TT)1 + \sigma\sigma\sigma\sigma tttth^2 tttt2((\lambda\lambda\lambda\lambda)) + \sigma\sigma\sigma\sigma^2 tth2(\lambda\lambda\lambda\lambda) +$$

$$\sigma\sigma\sigma\sigma tttth^2 tt2(\lambda\lambda\lambda\lambda) + \sigma\sigma\sigma\sigma tttth^2 tth2(\lambda\lambda\lambda\lambda) +$$

$$\sigma\sigma\sigma\sigma tttth^2 tt2(\lambda\lambda\lambda\lambda) + \sigma\sigma\sigma\sigma tttth^2 h2(\lambda\lambda\lambda\lambda) . tttth$$

При допущении, что временной шум небольшой, выражение для $\sigma\sigma(TT)$ принимает вид

$$\sigma\sigma(TT) = \sigma\sigma ddaah(TT)1 + \sigma\sigma^2(TT) + \sigma\sigma ddaah^2(TT) + \sigma\sigma ddaah^2(TT).$$

Описание компонентов шума приведены в таблице 5 [4].

Таблица 5

Описание компонентов 3-D шума

Компонент	Описание	Источник
$\sigma\sigma ddaah$	Случайный пространственновременной шум	пространственно-временной шум пикселей (временной шум)
$\sigma\sigma ddh$	Временной шум столбцов (вертикальные линии, которые изменяются от кадра к кадру, изменение средней яркости столбца со временем)	Считывание электронов (временной шум)
$\sigma\sigma ddaa$	Временной шум строк (горизонтальные линии, которые изменяются от кадра к кадру; изменение средней яркости строки со временем)	Считывание электронов (временной шум)
$\sigma\sigma aah$	Случайный пространственный шум (не изменяется от кадра к кадру)	Неоднородность пикселей (пространственный шум)
$\sigma\sigma h$	Фиксированный шум столбцов (вертикальные линии; изменение средней яркости столбцов постоянное по времени)	Считывание электронов. Неоднородность столбцов (пространственный шум)
$\sigma\sigma aa$	Фиксированный шум строк (горизонтальные линии; изменение средней яркости строки постоянное по времени)	Считывание электронов. Неоднородность строк (пространственный шум)

$\sigma\sigma_{dd}$	Межкадровый шум (изменение яркости от кадра к кадру)	Обработка кадров (временной шум)
---------------------	--	----------------------------------

Расчёт шума $\sigma\sigma$ (TT) осуществляется по последовательности кадров, полученных для вычисления функции передачи сигнала $SSSSTTSS(TT)$. На рисунке 8 приведены графики составляющих 3-D шума, функции $\sigma\sigma$ (TT) и полинома $\sigma\sigma = ff(TT_{oooo})$, в таблицах 3, 4 - значения коэффициентов полиномов аппроксимации функций $\sigma\sigma = ff(TT_{oooo})$ и $TT_{oooo} = ff(\sigma\sigma)$.

С использованием полученных функций (таблицы 3, 4) были синтезированы однородные изображения объектов и фона (рисунок 9). Температура фона 25 °С, температура объектов от 25,01 °С до 26 °С с шагом 0,02 °С. На данном рисунке отмечено положение объекта с температурным контрастом ΔTT_{RRRRRR} , равным 0,43 °С.

Характеристический размер объекта наблюдения равен 3,1 м. Под характеристическим размером понимается корень квадратный площади объекта.

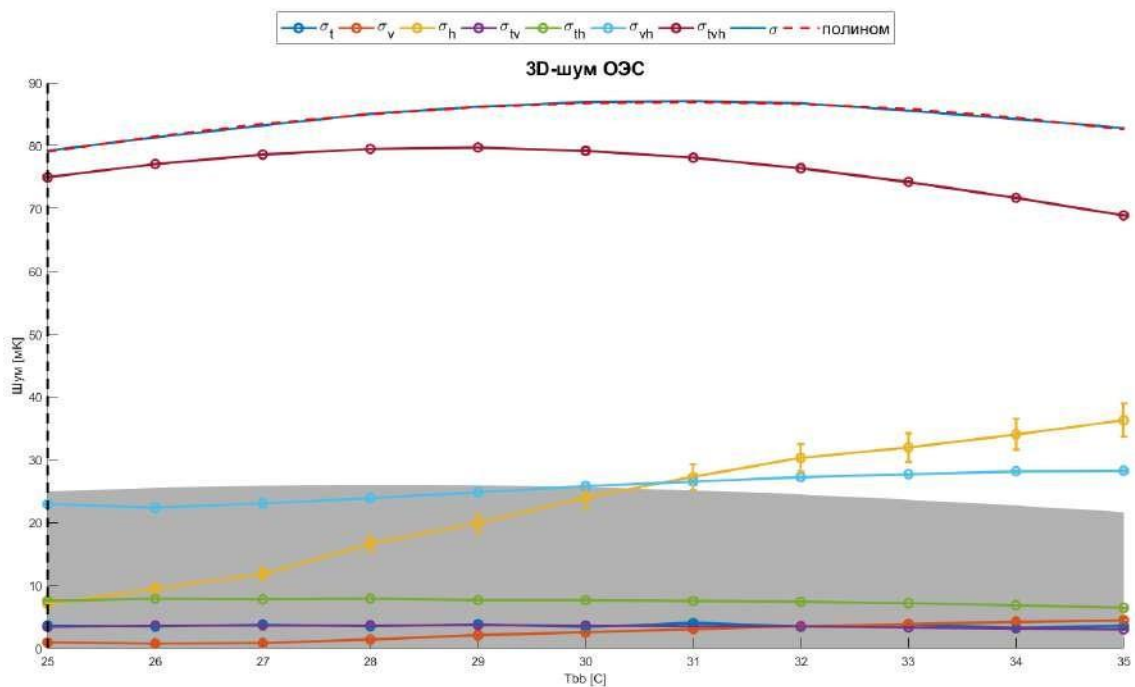


Рисунок 8 – Графики составляющих 3-D шума для диапазона от 25°С до 35°С

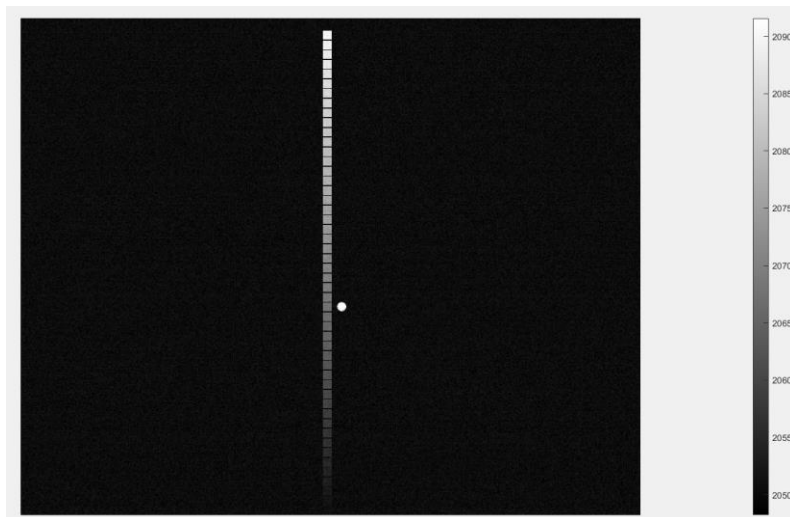


Рисунок 9 – Синтезированные изображения объектов и фона

На рисунке 10 представлена функция вероятности обнаружения объекта на дальности 7000 м для температуры фона 25 °С.

В таблице 6 приведены значения температурного контраста при вероятности равной 0,8 для различных значений температуры фона TT_{BB} . Температура объекта изменялась от $TT_{BB} + 0,01$ °С до $TT_{BB} + 1$ °С с шагом 0,02 °С. Таким образом, ОЭС, характеристики которой приведены в таблице 2, в температурном диапазоне от 25 °С до 35 °С обеспечивает обнаружение объекта наблюдения при среднем значении температурного контраста 0,46 °С.

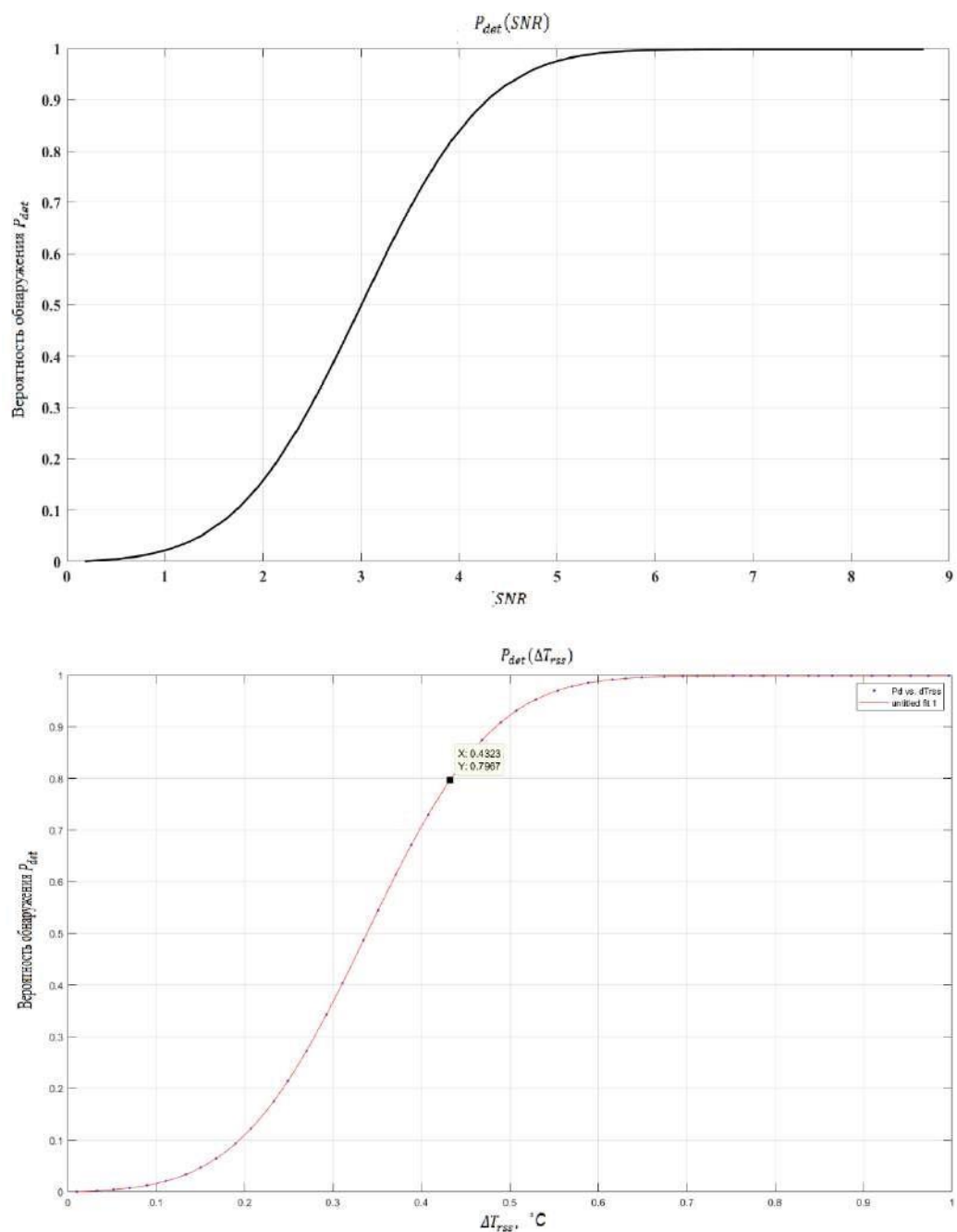


Рисунок 10 – Вероятность обнаружения $PP_{ddeedd}(SSMMSS)$, $PP_{ddeedd}(\Delta TT_{RRRRRR})$ объекта наблюдения на дальности 7000 м

Таблица

6 Значения теплового контраста при вероятности равной 0,8

$TT_{BB},$ $^{\circ}C$	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
$\Delta TT_{RRRRRR},$ $^{\circ}C$	0,43	0,45	0,46	0,46	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,46	0,46
$MM_{\Delta\lambda\lambda\lambda\lambda\lambda\lambda\lambda\lambda},$ $^{\circ}C$	0,46										

В общем виде методика оценки влияния температурного контраста на вероятность обнаружения объекта по результатам лабораторных испытаний ОЭС состоит из следующих этапов.

1. Подготовка исходных данных и получение изображений миры посредством ОЭС.

2. Обработка изображений , определение функций $SSSSTTSS(TT_{oooo})$, $SSSSTTSS(\Delta TT_{oooo})$ [12 – 14] и аппроксимирующих функций $DDMM = ff(TT_{oooo})$, $\Delta DDMM = ff(\Delta TT_{oooo})$, $TT_{oooo} = ff(DDMM)$, $\Delta TT_{oooo} = ff(\Delta DDMM)$.

3. Расчёт по изображениям шума $\sigma\sigma(TT)$ и его составляющих, определение аппроксимирующих функций $\sigma\sigma = ff(TT_{oooo})$, $TT_{oooo} = ff(\sigma\sigma)$ для шума и его составляющих $\sigma\sigma_{daa} = ff(TT_{oooo})$, $\sigma\sigma_{dh} = ff(TT_{oooo})$, $\sigma\sigma_{dd} = ff(TT_{oooo})$, $\sigma\sigma_{aah} = ff(TT_{oooo})$, $\sigma\sigma_{aa} = ff(TT_{oooo})$, $\sigma\sigma_h = ff(TT_{oooo})$, $\sigma\sigma_{daah}(TT) = ff(TT_{oooo})$.

4. Синтез изображений фона и цели по формульным зависимостям, полученным в п.п. 2 и 3 данной методики.

5. Расчёт по полученным синтезированным изображениям:

- средних значений температуры объекта $TT_{\lambda\lambda}$, фона TT_{BB} , СКО температуры объекта $\sigma\sigma_{\lambda\lambda}$ и фона $\sigma\sigma_{BB}$;
- СКО шума от объекта $\sigma\sigma_{\lambda\lambda}(TT_{\lambda\lambda})$, и фона $\sigma\sigma_{BB}(TT_{BB})$;

6. Расчёт температурного контраста ΔTT_{RRRRRR} и отношения сигнал - шум $SSMMSS$.

7. Расчёт вероятности обнаружения объекта $PP_{ddeedd}(SSMMSS)$, и построение зависимости вероятности обнаружения от температурного контраста $PP_{ddeedd}(\Delta TT_{RRRRRR})$.

На рисунках 11 и 12 показаны примеры изображений возможных целей для авиационных ОЭС, полученных в результате расчетов температурной сигнатуры, в том числе для разных фонов. Создание базы данных изображений , синтезированных в различных условиях, может стать основой для обучения нейронных сетей [15 - 18].

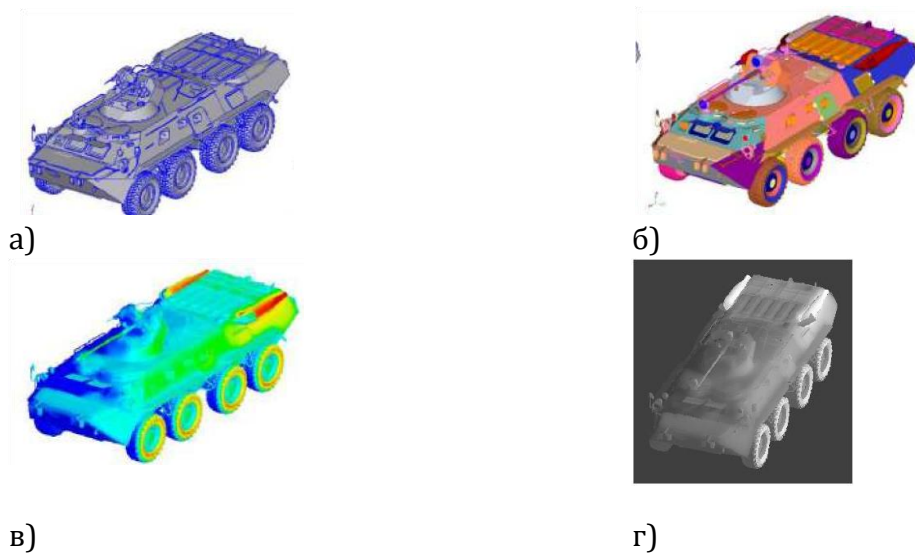


Рисунок 11 – Предварительные сигнатуры (а, б); температурная сигнатура, полученная в результате расчёта (в); синтезированное изображение ОЭС (г) БТР-82А



а) однородный фон

б) синтезированный фон

в) естественный фон и синтезированный объект

Рисунок 12 - Примеры изображений с различными описаниями фона

Заключение

Данная методика позволяет определить необходимый минимальный порог температурного контраста для обнаружения сигнала по результатам лабораторных испытаний авиационных ОЭС. При наличии необработанных («сырых») изображений, полученных при проведении натурных испытаний ОЭС, можно получить значения температурного контраста, при которых был установлен факт обнаружения (распознавания) объекта наблюдения. При известной температурной сигнатуре объекта и фона, полученной в полевых условиях с различных углов визирования (с учётом времени суток и года), можно получить среднее значение начального температурного контраста, которое

необходимо для оценки результатов натурных испытаний ОЭС. Кроме того, зная температурную сигнатуру объекта наблюдения, можно синтезировать набор изображений в различных внешних условиях для обучения нейронных сетей с учётом характеристик оптико-электронных систем на разнообразных фонах.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. 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.
2. Gerald C. Holst. Electro-Optical Imaging System Performance - Fifth edition. JCD Publishing and SPIE Press, 2008.
3. Bradley L. Preece, Eric A. Flug, "A wavelet contrast metric for the targeting task performance metric," Proc. SPIE 9820, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXVII, 98200E (24 June 2016); doi: 10.1117/12.2223855
4. Gerald C. Holst. Electro-Optical Imaging System Performance - Sixth edition. JCD Publishing and SPIE Press, 2017.
5. W. Wan. "Passive IR Sensor Performance Analysis using Mathcad Modeling". Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XX Proc. SPIE Vol. 7300 (2009); doi: 10.1117/12.815238.
6. Charles C. Kim, "Improved formulas for CSNR with an example," Proc. SPIE 11406, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXXI, 114060C (23 April 2020); doi: 10.1117/12.2551895.
7. 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

8. 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.
9. J. A. D'Agostino and C. M. Webb, «Three-dimensional analysis framework and measurement methodology for imaging system noise,» Proc. SPIE 1488, 110 (1991).
10. Patrick O'Shea, Stephen Souk "Practical Issues with 3D-Noise Measurements and Application to Modern Infrared Sensors". Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVI, Proceedings of SPIE Vol. 5784, 2005; doi: 10.1117/12.604588.
11. Haefner, D. P. and Burks, S., "Finite sampling corrected 3D noise with confidence intervals," Appl. Opt. 54, 4907-4915 (2015); doi:10.1364/AO.54.004907.
12. Ronald G. Driggers, Melvin H. Friedman, Jonathan Nichols. Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems. Second Edition. Artech House, Boston, London, 2012.
13. Chrzanowski K. Testing thermal imagers. Practical guidebook. // Military University of Technology, 00-908 Warsaw, Poland, 2010.
14. Bareła J., Kastek M., Firmanty K., Trzaskawka P. Determining the range parameters of observation thermal cameras on the basis of laboratory measurements. Proc. of SPIE Vol. 8896 889610-1, doi: 10.1117/12.2028703, 2013.
15. Corey D. Packard, Mark D. Klein, Timothy S. Viola, David C. Bell, Peter L. Rynes, "Automated simulation-generated EO/IR image library for artificial intelligence applications," Proc. SPIE 11406, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXXI, 1140606 (23 April 2020); doi: 10.1117/12.2558843.
16. Хисматов И.Ф. Методика воспроизведения метеоусловий при имитационном моделировании авиационных оптико-электронных систем базирования // Труды МАИ. Выпуск №108. <https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-18>.
17. Шипко В.В. Помехоустойчивое комплексирование мульти- и гиперспектральных изображений в оптико-электронных комплексах

информационного обеспечения современных и перспективных вертолетов // Труды МАИ. Выпуск №110. DOI: 10.34759/trd-2020-110-12.

18. Черников А. А. Алгоритм обнаружения и классификации объектов на неоднородном фоне для оптико-электронных систем // Труды МАИ. Выпуск № 129. DOI: 10.34759/trd-2023-129-26

19. Сельвесюк Н.И., Веселов Ю.Г., Гайденов А.В., Островский А.С. Оценка характеристик обнаружения и распознавания объектов на изображении от специальных оптико-электронных систем наблюдения летного поля // Труды МАИ. Выпуск № 103.

20. Яковлева Н. И. Оценка максимальной дальности обнаружения объектов с помощью пассивного фотоприемного устройства // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 5. С. 341

References

1. 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.

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

3. Bradley L. Preece, Eric A. Flug, "A wavelet contrast metric for the targeting task performance metric," Proc. SPIE 9820, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXVII, 98200E (24 June 2016); doi: 10.1117/12.2223855

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

5. W. Wan. "Passive IR Sensor Performance Analysis using Mathcad Modeling". Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XX Proc. SPIE Vol. 7300 (2009); doi: 10.1117/12.815238.

6. Charles C. Kim, "Improved formulas for CSNR with an example," Proc. SPIE 11406, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXXI, 114060C (23 April 2020); doi: 10.1117/12.2551895.

7. 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. Functions of threshold contrast and modulation transfer // information and measurement and controlling systems. 2021. Vol. 19. № 1. pp. 45-64. DOI: 10.18127/j20700814-202101-04
8. 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
9. J. A. D'Agostino and C. M. Webb, «Three-dimensional analysis framework and measurement methodology for imaging system noise» Proc. SPIE 1488, 110 (1991).
10. Patrick O'Shea, Stephen Souk "Practical Issues with 3D-Noise Measurements and Application to Modern Infrared Sensors". *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVI*, Proceedings of SPIE Vol. 5784, 2005; doi: 10.1117/12.604588.
11. Haefner, D. P. and Burks, S., "Finite sampling corrected 3D noise with confidence intervals," *Appl. Opt.* 54, 4907-4915 (2015); doi:10.1364/AO.54.004907.
12. Ronald G. Driggers, Melvin H. Friedman, Jonathan Nichols. *Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems*. Second Edition. Artech House, Boston, London, 2012.
13. Chrzanowski K. *Testing thermal imagers. Practical guidebook*. // Military University of Technology, 00-908 Warsaw, Poland, 2010.
14. Bareła J., Kastek M., Firmanty K., Trzaskawka P. Determining the range parameters of observation thermal cameras on the basis of laboratory measurements. *Proc. of SPIE Vol. 8896* 889610-1, doi: 10.1117/12.2028703, 2013.
15. Corey D. Packard, Mark D. Klein, Timothy S. Viola, David C. Bell, Peter L. Rynes, "Automated simulation-generated EO/IR image library for artificial intelligence applications," *Proc. SPIE 11406*, *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXXI*, 1140606 (23 April 2020); doi: 10.1117/12.2558843.

16. Khismatov I.F. Methodology of meteorological conditions reproduction at simulation modeling of aviation optoelectronic basing systems // Trudy MAI, 2023, no. 108 <https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-18>.
17. Shipko V.V. Interference-resistant complexing of multi- and hyperspectral images in optoelectronic complexes of information support of modern and perspective helicopters // Trudy MAI, 2020, no. 110. DOI: 10.34759/trd-2020-110-12.
18. Chernikov A.A. Algorithm for detecting and classification of objects on a unhomogeneous background for optoelectronic systems. Trudy MAI, 2023, no. 129. DOI: 10.34759/trd-2023-129-26
19. Selvesyuk N.I., Veselov Y.G., Gaidenkov A.V., Ostrovsky A.S. Evaluation of the characteristics of detection and recognition of objects in the image from specific optoelectronic systems of observation of the airfield // Trudy MAI, 2023, no. 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100782>
20. N. I. Iakovleva, Estimation of the maximum distance to observation objects using a staring FPA Usp. Prikl. Fiz. 8 (5), 341 (2020).

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 научноисследовательский институт авиационных систем», г. Москва, Россия.

Андрей Васильевич Румянцев, старший офицер смены, Центр (управления комплексной безопасностью) МО РФ, Москва, 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 1 июня 2025 ● Принято к публикации 24 сентября 2025 ● Опубликовано 30 декабря 2025
Received 1 June 2025 ● Accepted 24 September 2025 ● Published 30 December 2025
