

ИНФОРМАТИКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.383

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186316>

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

**МЕТОДИКА СИНТЕЗА ФОНОЦЕЛЕВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С УЧЕТОМ
ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ
СИСТЕМЫ**

**Александр Маркелович Краснов¹, Сергей Николаевич Шашков², Андрей
Васильевич Румянцев³**

¹ЗАО «Технологический парк космонавтики «ЛИНКОС»

Москва, Щербинка, Россия

²ФАУ «ГосНИИАС»

Москва, Россия

³Центр (управления комплексной безопасностью) МО РФ

¹a_krasnov@inbox.ru

Аннотация. Рассмотрены обобщённая схема обучения нейронной сети; методика синтеза фоноцелевых изображений с учетом характеристик тепловизионной оптико-электронной системы. В примере приведены результаты, полученные при выполнении каждого этапа методики, и продемонстрированы синтезированные фоноцелевые изображения. Определено необходимое обеспечение, в части

касающейся, программного обеспечения; средств измерений и рабочих мест; материально-технического обеспечения. Рассмотрена методика оценки соответствия синтезированных фоноцелевых изображений изображениям, формируемым оптико-электронной системы.

Ключевые слова: синтезированные фоноцелевые изображения, оптико-электронная система, функция передачи сигнала, 3D модель шума, частотно-контрастная характеристика, нейронная сеть

Для цитирования: 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>

COMPUTER SCIENCE, MODELING AND MANAGEMENT

Original article

A METHODS FOR SYNTHESIZING IMAGES OF TARGET ENVIRONMENT TAKING INTO ACCOUNT THE CHARACTERISTICS OF A THERMAL ELECTRO-OPTICAL IMAGING SYSTEM

Krasnov A.M.¹, Shashkov S.N.², Rumyantsev A.V.³

¹ZAO Technological Park of Cosmonautics LINKOS

Moscow, Shcherbinka, Russia

²FAI "GosNIIAS" Moscow, Russia

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

Moscow, Russia

Abstract. This article discusses a generalized training scheme for a neural network designed for object detection and recognition, as well as a method for synthesizing background-target images based on the characteristics of a imaging electro-optical system thermal system (EOS). This method includes the following stages: initial data preparation; energy calculation and synthesis of a set of initial images of objects and background environments; and synthesis of images of the background-target environment. The relevance of this material stems from the need to create training and test image sets for the neural network, taking into account EOS characteristics such as the signal transfer function, 3D noise models, and modulation transfer function. The system intensity transfer function (SiTF) characterizes the EOS sensitivity, the 3D noise model represents information about the EOS's temporal and spatial noise, and the modulation transfer function (MTF) is the key characteristic for measuring the EOS's resolution. The most fundamental stage of the methodology - initial data preparation - is examined in detail. The entire data set is divided into three groups: initial data on the observed object and the underlying surface (background); initial data on the state of the atmosphere (external conditions); and the characteristics and parameters of the EOS. The initial data preparation stage concludes with the specification of the target background environment and external conditions. Then, the synthesis of the set of initial object images (background environment) and the synthesis of target background environment images are described. The example presents the results obtained during each stage and demonstrates the initial and synthesized target background images. Following this, the necessary support is determined, including software, measuring instruments and workstations, and logistics. Next, the methods

for assessing the conformity of the synthesized target background images with the images generated by the EOS is discussed.

Keywords: Keywords: synthesized background-target images, electro-optical system, signal transfer function, 3D noise model, modulation transfer function, neural network

For citation: 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>

Введение

Рассмотрена обобщённая схема обучения нейронной сети, предназначенной для обнаружения и распознавания объектов, а также методика синтеза фоноцелевых изображений с учетом характеристик тепловизионной оптико-электронной системы (ОЭС), включающей следующие этапы: подготовка исходных данных; энергетический расчёт и синтез набора исходных изображений объектов и фоновой обстановки; синтез изображений фоноцелевой обстановки.

Актуальность данного материала обусловлена необходимостью создания обучающей и контрольной выборки изображений для нейронной сети с учётом таких характеристик ОЭС, как функция передачи сигнала, 3D модели шума и частотно-контрастной характеристики.

Функция передачи сигнала $SiTF(T)$ (System intensity Transfer Function) характеризует чувствительность ОЭС, 3D модель шума $\sigma(T)$ представляет информацию о временном и пространственном шуме ОЭС, а частотно-контрастная

характеристика *MTF* (Modulation Transfer Function) является основной характеристикой измерения разрешающей способности ОЭС.

Детально рассмотрен самый основной этап методики – этап подготовки исходных данных. Вся совокупность данных разделена на три группы: исходные данные об объекте наблюдения и подстилающей поверхности (фоне); исходные данные о состоянии атмосферы (внешних условиях); характеристики и параметры ОЭС. Этап подготовки исходных данных заканчивается заданием вариантов фоноцелевой обстановки и внешних условий.

Затем раскрыто содержание синтеза набора исходных изображений объектов (фоновой обстановки) и синтеза изображений фоноцелевой обстановки.

В примере приведены результаты, полученные при выполнении каждого этапа, и продемонстрированы исходные и синтезированные фоноцелевые изображения. После этого определено необходимое обеспечение, в части касающейся, программного обеспечения; средств измерений и рабочих мест; материально-технического обеспечения. Далее рассмотрена методика оценки соответствия синтезированных фоноцелевых изображений изображениям, формируемым ОЭС.

1 Общие положения

При разработке и отработке специального программного обеспечения функционирования ОЭС, обработки, комплексирования, синтеза комбинированных изображений и обучения нейронной сети необходимы наборы фоноцелевых изображений, полученных в различных внешних условиях с учётом характеристик ОЭС. На рисунке 1 приведена обобщённая схема обучения нейронной сети,

предназначенной для обнаружения и распознавания объектов [1]. Рассмотрим её более подробно.



Рисунок 1 – Модель обучения нейронной сети на основе синтезированных изображений

Началом является определение перечня объектов (целей) и формирование сигнатуры данных объектов, также необходимо сформировать аналогичный набор фоновой обстановки и определить внешние воздействующие факторы, соответствующие заданному району местности.

По совокупности перечисленных данных формируются варианты фоноцелевой обстановки и внешних условий для которых необходимо синтезировать наборы исходных изображений с учётом характеристик оптико-электронной системы. Для этого необходимо провести энергетический расчёт сигнала от всех элементов объекта и фона до входного зрачка ОЭС с учётом излучения, отражения и рассеяния сигнала при прохождении атмосферы (на основе спектральных характеристик объекта), положения естественных источников освещения и др.

После синтеза набора исходных изображений формируется набор изображений с учётом характеристик ОЭС, из которых формируются обучающая и контрольная выборки изображений.

Таким образом, процесс формирования обучающих (контрольных) выборок изображений, с учетом характеристик ОЭС, включает следующие этапы:

1. Подготовка исходных данных;
2. Энергетический расчёт и синтез набора исходных изображений объектов и фоновой обстановки;
3. Синтез изображений фоноцелевой обстановки.

Рассмотрим самый ответственный и трудоёмкий этап – подготовка исходных данных.

2 Подготовка исходных данных

В общем случае, исходные данные можно разделить на следующие группы:

- исходные данные об объекте наблюдения и подстилающей поверхности (фоне);
- исходные данные о состоянии атмосферы (внешних условиях);
- характеристики ОЭС;
- задание фоноцелевой обстановки и внешних условий.

3 Исходные данные об объекте наблюдения и фоне

3.1.1 Синтез изображений объектов с использованием 3D-модели

Одним из распространённых методов синтеза изображений объектов (целей) – это синтез 3D-модели объекта [1]. Сначала формируется предварительная сигнатура данных объектов (рисунок 2), затем для каждого элемента 3D-модели объекта

делается тепловой расчёт с использованием всех режимов теплопередачи (излучение, теплопроводность и конвекция) на основе внутренних источников тепла и граничных условий внешней среды (рисунок 3).

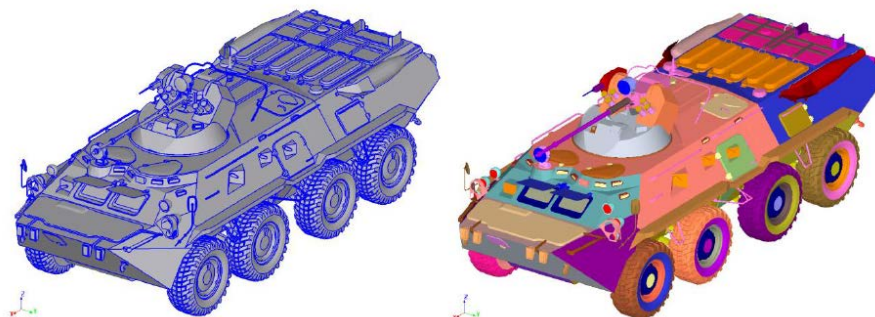


Рисунок 2 – Пример предварительной сигнатуры БТР-82А

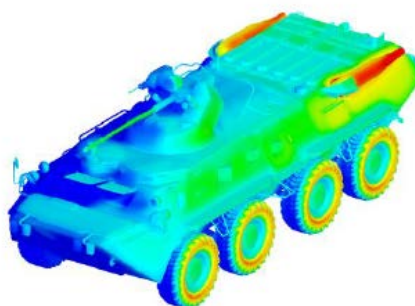


Рисунок 3 – Сигнатура, полученная в результате теплового расчёта

Достоинство данного метода: практически неограниченное количество изображений с различных направлений и углов визирования. Например, для восемнадцати значений азимута (каждые 20°), четырёх углов места цели (5° , 15° , 30° , 45°), трёх значений дальности цели, четырёх времён года и двенадцати часов суточного цикла (24-часовой период) количество вариантов изображений будет более 10000. Это без учёта состояния атмосферы (МДВ, турбулентность и т.д.) и районов земной поверхности (тропики, пустыня, северные широты и т.д.).

Недостатки: необходимость наличия специального программного обеспечения сторонних разработчиков; длительное время разработки предварительной сигнатуры

объекта; сложность и достоверность теплового расчёта, обусловленные необходимостью наличия достоверных исходных данных.

3.1.2 Натурная съёмка объектов оптико-электронными системами

Другой метод основан на непосредственной съёмке объектов оптико-электронной системы. Пример полученного изображения объекта приведен на рисунке 4.

Достоинство: относительно небольшое время получения тепловой сигнатуры объекта в сравнении с синтезом объектов с использованием 3D-модели; отсутствие специального программного обеспечения сторонних разработчиков; известны характеристики ОЭС и условия съёмки.



Рисунок 4 – Натурное изображение (термограмма) объекта

Недостатки: ограниченное количество изображений с различных направлений и углов визирования; необходимость покупки (аренды) нескольких ОЭС, функционирующих в различных спектрах оптического диапазона, с соответствующим программным обеспечением обработки изображений.

Требования по обеспечению:

- наличие измерительных ОЭС, функционирующих в различных спектрах оптического диапазона, с соответствующим программным обеспечением обработки изображений;
- измерительные ОЭС должна быть внесена в реестр средств измерений;
- измерительные средства фиксации условий съёмки, в частности: азимут, угол места и дальность объекта, координаты местоположения ОЭС, дата и время суток съёмки и др.;
- наличие мобильной метеостанции, необходимой для фиксации метеоусловий при проведении съёмок.

3.1.3 Комбинированный синтез изображений

Данный метод целесообразно использовать при синтезе фоноцелевых изображений. Синтез фоноцелевых изображений отличается учётом реалистичности фона:

- изображение объекта находится на однородном фоне, рисунок 5а. Это самая простая комбинированная модель синтеза изображений. Здесь используется изображение объекта, полученное при съёмке, а фон синтезирован искусственно;
- синтез изображения фона по аналогии синтеза изображения объекта [1]. В качестве объектов фона используются синтезированные изображения, рисунок 5б. Здесь добавлен более сложный фон с геометрическим рельефом и элементами, такими как заросли кустов и/или деревьев. Изображение объекта может быть, как синтезированное, так и натурное.

– синтез комбинированного изображения, то есть изображение объекта (виртуальное или натурное) объединяется с изображением реального фона (рисунок 5в). Это самая сложная модель синтеза. В этом случае необходимо при расчёте необходимо учитывать погодные условия, в которых было получено изображение фона. Кроме того, мгновенные поля зрения пикселей цели и фона должны быть согласованны, а масштаб цели должен соответствовать масштабу элементов фона и др. Эта модель синтеза наиболее близка к реалистичности.



а) однородный фон

б) синтезированный фон

в) естественный фон и
синтезированный объект

Рисунок 5 - Примеры изображений с различными описаниями фона

Требования по обеспечению: наличие виртуальных и натуральных изображений объектов и подстилающей поверхности; наличие программного обеспечения синтеза комбинированных изображений.

3.1.4 Получение спектральных характеристик объектов и фона

На поверхности физического объекта могут происходить четыре фотонных действия: поглощение, отражение, пропускание и излучение. Первые три свойства, в соответствие с законом сохранения энергии, связаны выражением [2]:

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

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

Для непрозрачных материалов $\tau(\lambda)$ равно нулю, следовательно:

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

Из этого равенства видно, что объекты с высокой отражающей способностью имеют небольшое поглощение и, наоборот, при большом поглощении отражение сигнала мало. В средневолновом (СВИК) и длинноволновом (ДВИК) инфракрасных диапазонах 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, а наоборот – объект с высокой отражательной способностью имеет низкое излучение, что наблюдается в ультрафиолетовом, видимом, в ближнем (БИК) и коротковолновом (КВИК) инфракрасных диапазонах.

Значения сигналов, поступающие в поле зрения ОЭС, зависят от спектральных характеристик излучения, пропускания, рассеяния, отражения и поглощения [3, 4].

Излучательная способность объекта зависят от температуры объекта T , спектрального диапазона λ и спектральной характеристики излучения $\varepsilon(\lambda)$:

$$M_e(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \frac{c_1}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \right) \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{мкм}} \right],$$

где $c_1 = 3,7418 \times 10^8 \frac{\text{Вт} \cdot \text{мкм}^4}{\text{м}^2}$; $c_2 = 14388 \text{ мкм} \cdot \text{К}$.

Спектральная характеристик пропускания (коэффициент пропускания атмосферы) [4]:

$$T_{ATM}(\lambda, R) = e^{-\gamma(\lambda)R},$$

где $\gamma(\lambda)$ – спектральный коэффициент ослабления излучения, зависящий от рассеяния и поглощения излучения, которые определяются выбранной моделями атмосферы и аэрозолей.

Спектральный коэффициент диффузного отражения (рассеяния) зависит от выбранной модели диффузного рассеяния. В свою очередь, выбор модели рассеяния определяется состоянием атмосферы. На данный момент наиболее распространены три модели: рассеяние Релея, Ми-рассеяние и модель геометрической оптики [2]. Модель Релея используется, когда размеры атмосферных частиц менее $0,1\lambda$ мкм; модель Ми-рассеяния при размерах частиц менее $0,25\lambda$ мкм; модель геометрической оптики - когда размер частиц больше длины волны.

Для определения спектральных характеристик отражения объектов и фона необходим спектральный прибор: спектрометр. Спектрометр предназначен для измерения в заданном диапазоне длин волны амплитуды излучения (отраженного) [5, 6].

Спектральный коэффициент поглощения не может быть вычислен прямым образом, он вычисляется косвенно.

Перечисленные спектральные характеристики используются при энергетическом расчёте сигнала, причём расчет таких характеристик как излучение, пропускание, рассеяние и поглощение заложен в модели энергетического расчёта,

характеристику отраженного сигнала необходимо знать заранее, так как она подается на вход модели.

Требования по обеспечению: наличие спектральной характеристики отражения излучения, следовательно, необходимы соответствующие базы данных, например, ASTER Spectral Library, или спектрометры.

3.1.5 Дополнительные параметры объектов (фона)

К дополнительным исходным параметрам объектов (фона) относятся:

- название объекта (класс, тип, модель);
- тип дальности (горизонтальная, наклонная, вертикальная);
- значение дальности объекта;
- азимут объекта (цели);
- высота объекта над уровнем поверхности Земли;
- диапазон начальной температуры объекта (фона).

3.2 Исходные данные о состоянии атмосферы (внешних условиях)

Перечень исходных данных о состоянии атмосферы определяется специальным программным обеспечением, предназначенным для проведения энергетического расчёта. В общем случае, в перечень исходных данных входят [7]:

- режим расчёта (коэффициент пропускания, энергетическая яркость или освещенность);
- модель атмосферы в зависимости от времени года и широты;
- тип рассеяния излучения в атмосфере;
- модель аэрозоля и его профили на различных высотах;
- метеорологическая дальность видимости;

- превышение поверхности Земли над уровнем моря;
- время суток;
- номер дня в году;
- источник энергетической яркости (Луна или Солнце) и его координаты относительно точки стояния ОЭС. Фаза Луна – при необходимости;
- оптическая турбулентность (структурный параметр показателя преломления).

Требования по обеспечению: наличие специального программного обеспечения по расчёту энергетической яркости объекта (фона) на входном зрачке ОЭС.

3.3 Характеристики оптико-электронных систем

Перечень основных параметров ОЭС: фокусное расстояние; диаметр входного зрачка; размер пикселя; формат приёмной матрицы; спектральный диапазон; размеры полей зрения; высота ОЭС над уровнем поверхности Земли; геодезические координаты местоположения ОЭС.

К основным характеристикам ОЭС относятся:

- функция передачи сигнала $SiTF(T)$;
- функция шума $\sigma(T)$ и её составляющие;
- частотно-контрастная характеристика $MTF_{lab}(\xi, \eta)$.

3.3.1 Определение функции передачи сигнала

Зависимость значений пикселей от значений температуры есть функция передачи сигнала $SiTF(T)$ [2]. В общем случае рабочее место, необходимое для определения $SiTF(T)$ состоит из следующих модулей: абсолютное черное тело, зеркальный коллиматор, вращающийся диск с набором мишеней, компьютер с платой видеозахвата и программное обеспечение для тестирования и контроля [8].

Один из вариантов рабочего места приведен на рисунке 6.

В качестве тест-объекта необходимо использовать миру, приведённую на рисунке 7. Размещение миры и тепловизора должны быть таким чтобы белый квадрат миры занимал максимально поле зрения тепловизора.

До проведения работ необходимо провести настройку (юстировку, калибровку) ОЭС и отключить все режимы улучшения изображений и усиления.

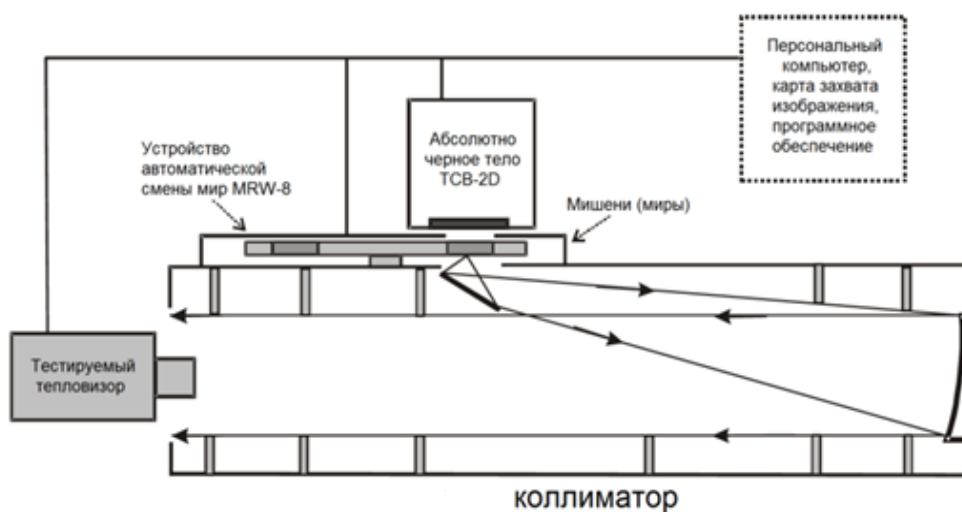


Рисунок 6 – Схема рабочего места для определения функций передачи сигнала $SiTF(T)$, 3D шума $\sigma(T)$ и ЧКХ $MTF_{lab}(\xi, \eta)$



Рисунок 7 - Миря для измерения $SiTF(T)$, 3D-шума $\sigma(T)$ и ЧКХ $MTF_{lab}(\xi, \eta)$

3.3.2 Модель шума, используемая при синтезе изображений

Модель шума, используемая для оценки эффективности разрабатываемой ОЭС посредством аналитической модели [9] на начальных этапах проектирования описана в [10]. При синтезе изображений используется модель 3-D шума [11 - 13]. 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:

$$\sigma(T) = \sqrt{\sigma_{tvh}^2(T) + \sigma_{tv}^2(T) + \sigma_{th}^2(T) + \sigma_t^2(T) + \sigma_{vh}^2(T) + \sigma_v^2(T) + \sigma_h^2(T)}$$

где $\sigma_{tv}(T), \sigma_{th}(T), \sigma_t(T)$ – составляющие временного шума $\sigma_{temp}(T)$; $\sigma_{vh}(T), \sigma_v(T), \sigma_h(T)$ – составляющие пространственного шума $\sigma_{spat}(T)$; $\sigma_{tvh}(T)$ – пространственно-временной шум. Описание компонентов шума приведены в таблице 1 [14].

Таблица 1 – Описание компонентов 3-D шума

Компонент	Описание	Источник
σ_{tvh}	Случайный пространственно-временной шум	Пространственно-временной шум пикселей
σ_{th}	Временной шум столбцов (вертикальные линии, которые изменяются от кадра к кадру, изменение средней яркости столбца со временем)	Считывание электронов (временной шум)
σ_{tv}	Временной шум строк (горизонтальные линии, которые изменяются от кадра к кадру; изменение средней яркости строки со временем)	Считывание электронов (временной шум)
σ_{vh}	Случайный пространственный шум (не изменяется от кадра к кадру)	Неоднородность пикселей (пространственный шум)
σ_h	Фиксированный шум столбцов (вертикальные линии; изменение средней яркости столбцов постоянное по времени)	Считывание электронов. Неоднородность столбцов (пространственный шум)
σ_v	Фиксированный шум строк (горизонтальные линии; изменение средней яркости строки постоянное по времени)	Считывание электронов. Неоднородность строк (пространственный шум)
σ_t	Межкадровый шум (изменение яркости от кадра к кадру)	Обработка кадров (временной шум)

3.3.3 Частотно-контрастная характеристика

Функция передачи модуляции или частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) есть зависимость контраста изображения мира, сгенерированного тестируемой камерой, от пространственной частоты. Частотно-контрастные характеристики MTF внешней среды и ОЭС подробно рассмотрены в [9].

При расчёте и анализе ЧКХ используют приведённую частоту $\xi_{пр}, \eta_{пр}$ (цикл/пиксель) в горизонтальном и в вертикальном направлениях. Значения приведённой частоты находятся в диапазоне от 0 до 1. По понятным причинам значения ЧКХ для частот более 0,5 цикл/пиксель не следует рассматривать. Связь между приведенной частотой $\xi_{пр}$ (цикл/пиксель) и частотой в пространстве предметов ξ (цикл/мрад) определяется следующей формулой:

$$\xi = \frac{\xi_{пр}^*}{DAS}; \eta = \frac{\eta_{пр}^*}{DAS}; DAS = \frac{d}{f'},$$

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.

Расчёт $MTF_{lab}(\xi)$, $MTF_{lab}(\eta)$ осуществляется по последовательности кадров, полученных для вычисления функции передачи сигнала $SiTF(T)$, функция $MTF_{lab}(\xi, \eta)$ по формуле:

$$MTF_{lab}(\xi, \eta) = MTF_{lab}(\xi)MTF_{lab}(\eta).$$

3.4 Задание фоноцелевой обстановки и внешних условий

Все рассмотренные исходные данные сведены в таблицу 2. Исходные данные целесообразно разделить на две группы:

- исходные данные, значения которых при энергетическом расчёте не изменяются;
- исходные данные, значения которых изменяются при проведении энергетического расчёта.

Состав этих групп зависит от цели энергетического расчета и такое разбиение удобно для формирования перечня вариантов (сценариев) внешних условий.

Таблица 2 – Исходные данные для задания фоноцелевой обстановки

Параметр (характеристика)	Значение
Параметры объекта	
Название объекта (класс, тип, модель)	
Тип дальности	
Дальность объекта	
Азимут объекта	
Угол места объекта (при необходимости)	
Высота объекта над уровнем поверхности Земли	
Диапазон начальной температуры объекта	
Спектральная характеристика отражения	
Параметры фона	
Диапазон начальной температуры фона	
Спектральная характеристика отражения	
Атмосфера (внешние условия)	
Режим расчёта	
Модель атмосферы	
Тип рассеяния излучения в атмосфере	
Модель аэрозоля и его профили на различных высотах	
Метеорологическая дальность видимости	
Превышение поверхности Земли над уровнем моря	

Время суток	
Номер дня в году	
Источник энергетической яркости	
Координаты источника относительно точки стояния ОЭС	
Фаза Луна (при необходимости)	
Структурный параметр показателя преломления (оптическая турбулентность)	
Параметры и характеристики ОЭС	
Фокусное расстояние	
Диаметр входного зрачка	
Размер пикселя	
Формат приёмной матрицы	
Спектральный диапазон	
Время экспозиции	
Размеры полей зрения	
Высота ОЭС над уровнем поверхности Земли	
Геодезические координаты местоположения ОЭС	
Функция передачи сигнала	
Функция шума и её составляющие	
Частотно-контрастная характеристика	

4 Энергетический расчёт и синтез набора исходных изображений

Содержание синтеза набора исходных изображений:

- расчет частотно-контрастной характеристики ОЭС с учетом заданной турбулентности;
- изменение размера изображения объекта с учетом заданной дальности объекта;
- расчёт энергетической светимости на входном зрачке и синтез исходных изображений объектов;
- синтез однородного фона и исходного фоноцелевого изображения.

4.1 Расчет частотно-контрастной характеристики с учетом заданной турбулентности

Частотно-контрастная характеристика учета оптической турбулентности $MTF_{turb}(\xi)$ имеет вид [9]:

$$MTF_{turb}(\xi) = \left[-3,44 \left(\frac{\lambda \xi * 10^{-3}}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}} \left(1 - \alpha_T \left(\frac{\lambda \xi * 10^{-3}}{D} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \right];$$

$$r_0 = 0,185 \lambda^{6/5} \left[\frac{R}{H-1} \int_1^H \left(\frac{h-1}{H-1} \right)^{5/3} C_N^2(h) dh \right]^{-3/5};$$

$$C_N^2(h) = C_{N0}^2 h^{-4/3};$$

$$\lambda = \frac{\lambda_{max} + \lambda_{min}}{2},$$

где λ , λ_{max} , λ_{min} – среднее, максимальное и минимальное значения длины волны выбранного оптического диапазона, мкм; r_0 – параметр Фрида для наклонной трассы, когда ОЭС находится на высоте H , а объект наблюдения ниже ОЭС, м; α_T – параметр, учитывающий экспозицию, диаметр входного зрачка, дальность цели и длину волны излучения, б/р; D – диаметр входного зрачка ОЭС, мм; H – высота нахождения ОЭС над поверхностью Земли, м. Значение H не более 500 м, на больших высотах турбулентность невысокая и она не учитывается; C_{N0}^2 – структурный параметр показателя преломления на высоте 1 м, м^{-2/3}; $C_N^2(h)$ – структурный параметр показателя преломления на высоте h м, м^{-2/3}.

Отметим, что $MTF_{turb}(\xi)$, $MTF_{turb}(\eta)$ зависит от дальности цели R , поэтому при изменении значения дальности данную функцию необходимо пересчитать. Тогда,

ЧКХ, учитывающая $MTF_{lab}(\xi), MTF_{lab}(\eta)$ и $MTF_{turb}(\xi), MTF_{turb}(\eta)$, будет иметь вид:

$$MTF_{lab}^{turb}(\xi, \eta) = MTF_{lab}^{turb}(\xi) MTF_{lab}^{turb}(\eta);$$

$$MTF_{lab}^{turb}(\xi) = MTF_{lab}(\xi) MTF_{turb}(\xi);$$

$$MTF_{lab}^{turb}(\eta) = MTF_{lab}(\eta) MTF_{turb}(\eta).$$

4.2 Изменение размера изображения объекта с учетом заданной дальности объекта

Для того чтобы изменить размер изображения объекта I_{ob} необходимо знать масштаб изменения изображения:

$$Scale = \frac{GSD_{FLIR}}{GSD_{Rtgt}};$$

$$GSD_{FLIR} = R_{FLIR} DAS_{FLIR};$$

$$GSD_{Rtgt} = R_{tgt} DAS,$$

где GSD_{FLIR} , GSD_{Rtgt} – проекция пикселя в пространстве предметов ОЭС, посредством которой получена термограмма, и исследуемой ОЭС; R_{FLIR} – дальность на которой была получена термограмма; DAS_{FLIR} – угловой размер пикселя термографа; R_{tgt} – заданная дальность объекта; DAS – угловой размер пикселя исследуемой ОЭС.

Интерполяция изображения была осуществлена методом по соседним элементам, при котором значение пикселя определяется значениями соседних пикселей, значения других пикселей не учитывается. Выбор данного метода обусловлен тем, что он вносит минимальные искажения в значения пикселей отмасштабированного изображения.

Затем каждое значение пикселя интерполированного изображения I_R в DL (*Digital Level*), с использованием функции передачи сигнала $SiTF_{Th}$ термографа, пересчитывается в соответствующие значения температуры. Эти значения температуры используются при энергетическом расчёте в качестве входных данных.

4.3 Расчёт энергетической светимости на входном зрачке и синтез исходных изображений объекта

Результат энергетического расчета – это есть значение энергетической яркости $L_e(\lambda, T)$, по которой вычисляется энергетическая светимость:

$$M_e(\lambda, T) = \pi L_e(\lambda, T).$$

При известном значении $M_e(\lambda, T)$, в соответствии с законом Планка, можно определить температуру объекта на входном зрачке ОЭС для заданных исходных данных (таблица 2):

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln \left(\frac{c_1}{\lambda^5 M_e(\lambda, T)} + 1 \right)}.$$

И теперь, для получения значений пикселей в DL , с использованием функции передачи сигнала $SiTF$ исследуемой ОЭС, необходимо пересчитать соответствующие значения температуры. Таким образом формируется исходное изображение I_{tgt} объекта.

4.4 Синтез изображений однородного фона и исходного фоноцелевого изображения

Порядок действий аналогичен порядку расчёта, изложенному в п. 5.3. Отличие только в том, что при энергетическом расчёте однородного фона I_{bb} используется

только одно значение температуры T_{bb} , а не массив значений температуры как в п. 5.3.

В результате размещения изображения объекта I_{tgt} на изображении фона I_{bb} формируется исходное изображение I_{app} фоноцелевой обстановки.

4.5 Синтез изображений фоноцелевой обстановки

Содержание данного этапа:

- синтез фоноцелевых изображений шума;
- синтез фоноцелевых изображений с учётом характеристик ОЭС.

4.5.1 Теоретические основы фильтрации

Основой линейной фильтрации в частотной и пространственной области служит теорема о свертке, которую можно сформулировать так [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 $H(u, v)$ – преобразование Фурье пространственного фильтра. Функция $H(u, v)$ – это передаточная функция фильтра. Основная идея фильтрации в

частотной области заключается в подборе передаточной функции фильтра, которая модифицирует $F(u, v)$. Например, если фильтр имеет передаточную функцию, которая, будучи умноженной на центрированную функцию $F(u, v)$, ослабляет высокочастотные компоненты $F(u, v)$ и оставляет низкочастотные компоненты относительно неизменными, то фильтр с такими характеристиками называется низкочастотным. 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 8 изображён процесс ухудшения изображения смоделирован в виде функции искажения, которая вместе с шумом действует на исходное изображение $f(x, y)$ и порождает искаженное изображение $g(x, y)$ [15]:

$$g(x, y) = H[f(x, y)] + \eta(x, y).$$



Рисунок 8 – Моделирование процесса искажения изображения

Искаженное изображение $g(x, y)$ представимо в пространственной области:

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + \eta(x, y),$$

и в частотной области:

$$G(x, y) = H(x, y)F(x, y) + N(x, y),$$

где функцию $H(x, y)$ часто называют оптической передаточной функцией OTF (Optical Transfer Function). В пространственной области функция $h(x, y)$ называется функцией рассеяния точки PSF (Point Spread Function). Функции $h(x, y)$, $H(x, y)$ переходят друг в друга под действием прямого и обратного преобразований Фурье. В свою очередь, частотно-контрастная характеристика равна [2]:

$$MTF = |OTF|.$$

Следовательно, PSF – это есть обратное преобразование Фурье функции MTF . Таким образом, размытое (сглаженное) изображение I_{MTF} в пространственной области равно

$$I_{MTF} = PSF * I_{app};$$

$$I_g = I_{MTF} + I_{noise} = PSF * I_{app} + I_{noise},$$

где I_g – фоноцеловое изображение с учетом характеристик ОЭС; I_{noise} – фоноцеловое изображение шума.

4.5.2 Синтез фоноцеловых изображений шума

Первым шагом является преобразование изображения однородного фона I_{bb} в изображение I_{bb}^{nose} , в котором значения пикселей равны температуре фона с учетом параметров шума $\sigma(T)$. Затем посредством функции передачи сигнала $SiTF$ пересчитываются значения температуры в цифровые уровни сигнала DL . Аналогичные преобразования проводятся для изображения объекта I_{tgt} .

Изображение фоноцелевой обстановки I_{app}^{noise} создаётся размещением изображения объекта I_{app}^{nose} на изображении фона I_{bb}^{nose} . Фоноцелевое изображение шума I_{noise} есть разность между изображениями I_{app}^{nose} и I_{app} .

$$I_{noise} = I_{app}^{nose} - I_{app}.$$

4.5.3 Синтез фоноцелевых изображений с учётом характеристик оптико-электронной системы

После вычисления $MTF_{lab}^{turb}(\xi, \eta)$ (п. 3.1) и обратного преобразования Фурье центрированной функции $MTF_{lab}^{turb}(\xi, \eta)$ рассчитывается соответствующая функция рассеяния точки $PSF(x, y)$, после чего, применив данный фильтр к изображению I_{app} формируется сглаженное изображение I_{MTF} . Сумма изображения I_{MTF} и шума I_{noise} и есть синтезированное фоноцелевое изображение I_g с учетом характеристик ОЭС.

5 Пример синтеза фоноцелевых изображений с учётом характеристик оптико-электронной системы

5.1 Подготовка исходных данных

Съёмки объекты проводились термографом FLIR SC7700M. Условия съемки объекта представлены в таблице 3, а термограммы объекта приведены на рисунке 9. Таблица 3 – Условия съемки объекта

Дата	Угол поворота, градус	Наклонная дальность, м	Метеоусловия	Фон	Время	Высота ОЭС, м
21.10.22	0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315	45	Твоз = 7,6 °С, ОВ = 73 %, МДВ = 10 км;	бетон растительность	10:00	21

Исходные данные, значения которых при энергетическом расчёте не изменяются приведены в таблице 4, а в таблице 5 – переменные.

Таблица 4 – Постоянные исходные данные

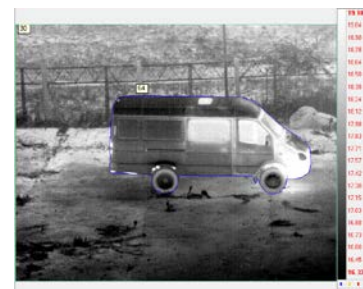
Параметр (характеристика)	Значение
Параметры объекта	
Название объекта (класс, тип, модель)	Автомобиль типа «Газель»
Тип дальности	наклонная
Азимут объекта, градус	137
Высота объекта над уровнем поверхности Земли, м	0
Спектральная характеристика отражения	Камуфляж (рисунок 10)
Параметры фона	
Спектральная характеристика отражения	Асфальт (рисунок 10)
Атмосфера (внешние условия)	
Режим расчёта	Энергетическая яркость
Модель атмосферы	Субарктическое лето
Тип рассеяния излучения в атмосфере	Простое рассеяние
Модель аэрозоля и его профили на различных высотах	осень – зима
Метеорологическая дальность видимости	10 км
Превышение поверхности Земли над уровнем моря	0
Параметры и характеристики ОЭС	
Фокусное расстояние, мм	300
Диаметр входного зрачка (D), мм	75
Размер пикселя (d), мкм	15
Формат приёмной матрицы, пиксель	640 x 512
Спектральный диапазон, мкм	3 – 5
Время экспозиции, с	0,002
Размеры полей зрения	1,8 x 1,5
Функция передачи сигнала	рисунок 11
Функция шума и её составляющие	рисунок 12
Частотно-контрастная характеристика	рисунок 13



alt298.tif



alt299.tif



alt300.tif



alt301.tif



alt302.tif



alt303.tif



alt304.tif



alt305.tif

Рисунок 9 – Термограммы объекта

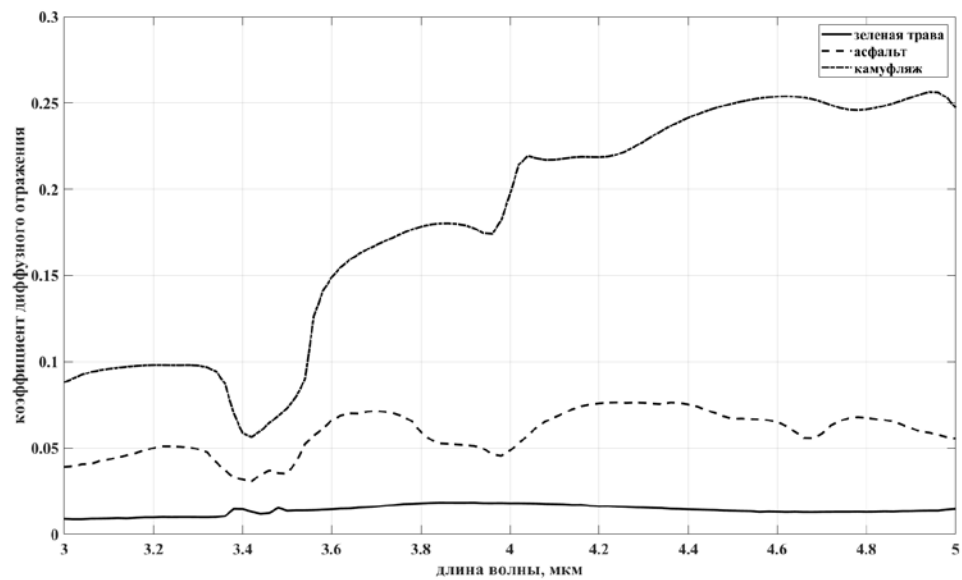


Рисунок 10 – Спектральные характеристики объекта и фона

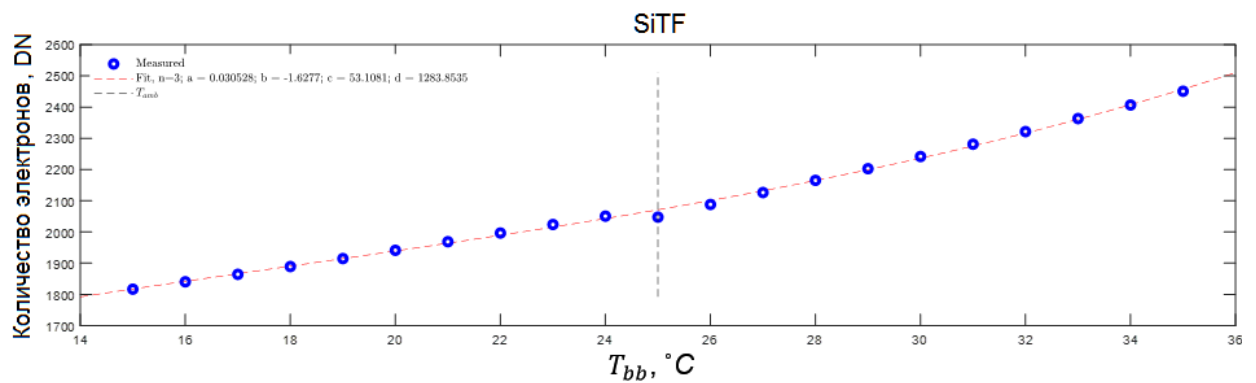


Рисунок 11 – Функция передачи сигнала $SiTF(T)$

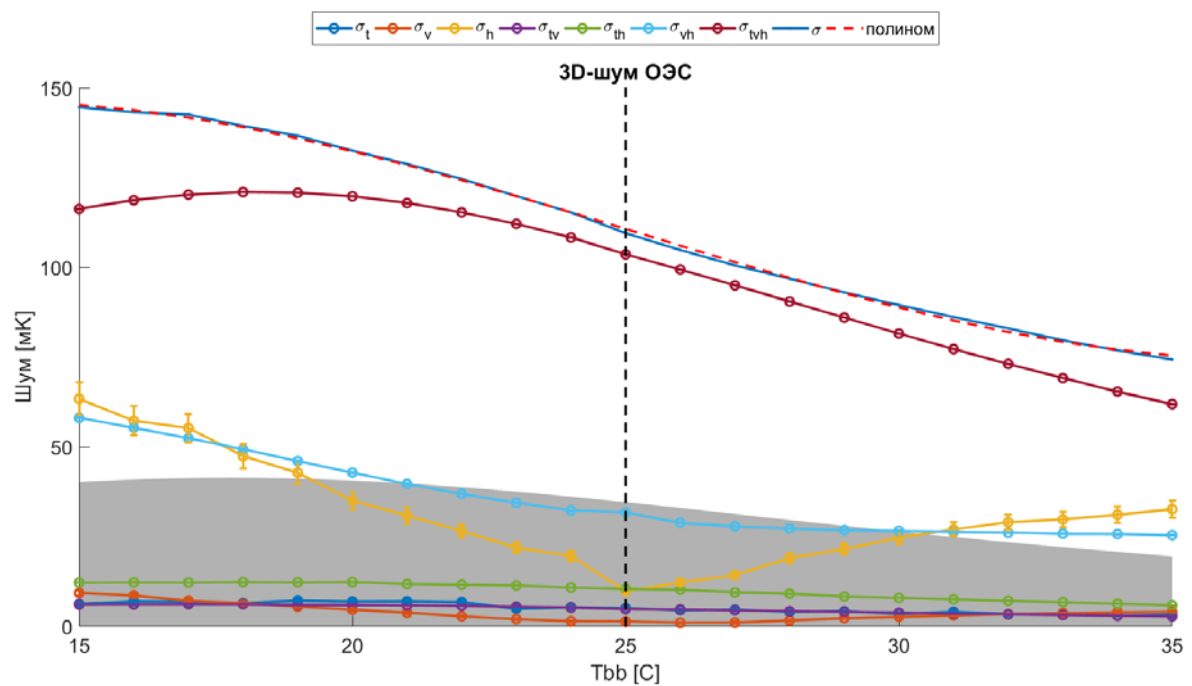


Рисунок 12 – Функция шума $\sigma(T)$ и её составляющие

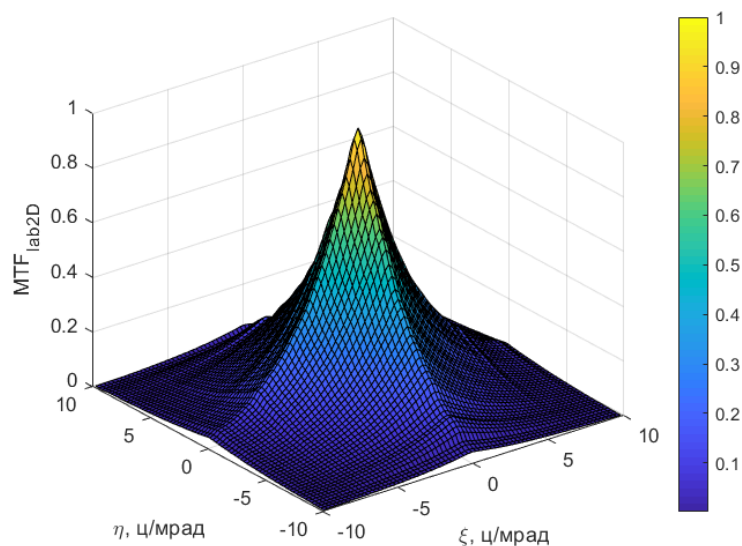


Рисунок 13 – Частотно-контрастная характеристика $MTF_{lab}(\xi, \eta)$

Таблица 5 – Варианты условий применения ОЭС (переменные исходные данные)

Номер варианта	Переменные								
	Дальность, м	Высота, м	Показатель C_{N0}^2	Температура фона, °С	День в году	Время суток, ч	Источник	Координаты источника	
								Азимут	Зенитный угол
Турбулентность									
Вариант 1	1500	25	$1 * 10^{-15}$	12	294	14:00	Солнце	202,46	61,61
Вариант 2			$1 * 10^{-12}$						
Температура фона									
Вариант 3	1500	697	$1 * 10^{-15}$	16	294	10:00	Солнце	137,34	68,71
Вариант 4				14					
Вариант 5				12					
Время суток (расположение источника яркости)									
Вариант 6	3000	1395	$1 * 10^{-15}$	14	294	10:00	Солнце	137,34	68,71
Вариант 7						14:00		202,46	61,61
Вариант 8									283
Идеальные условия									
Вариант 9	500	232	$1 * 10^{-15}$	12	294	14:00	Солнце	202,46	61,61
Вариант 10	45	21	$1 * 10^{-15}$	12	294	14:00	Солнце	202,46	61,61

Для вариантов в таблице 5 методом анализа иерархии [16, 17] было проведено ранжирование вариантов экспертом с целью определения наилучших и наихудших условий. На рисунке 14 приведены результаты, наилучшие условия применения ОЭС – это вариант № 1, наихудшие – вариант № 6.

вариант	вес	место
10	0,1482	1
9	0,1383	2
1	0,1108	3
3	0,1021	4(5)
5	0,1021	5(4)
2	0,093	6
4	0,0888	7
8	0,0843	8
7	0,0835	9
6	0,0607	10

Рисунок 14 - Результаты ранжирования вариантов условий применений ОЭС

5.2 Синтез изображений фоноцелевой обстановки

На рисунке 15 представлены комплект фоноцелевых изображений I_g для варианта № 10 внешних условий, данные условия наиболее приближены к условиям съёмки объекта термографом. На рисунке 16 для сравнения приведены исходные I_{app} и синтезированные изображения I_g объектов.

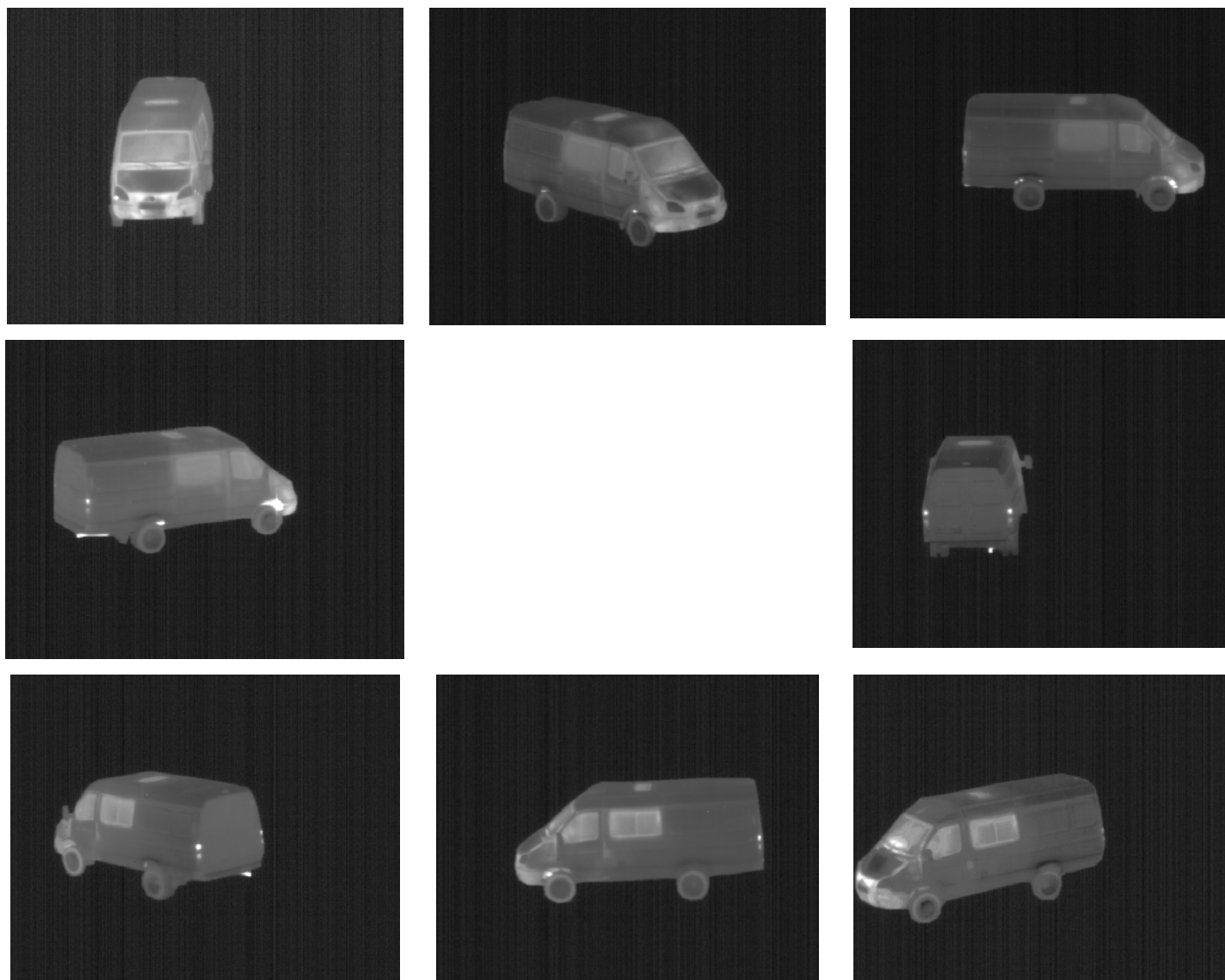


Рисунок 15 - Фоноцелевые изображения I_g для варианта № 10 внешних условий

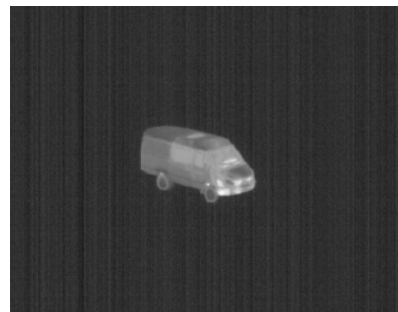
Изображения I_{app}



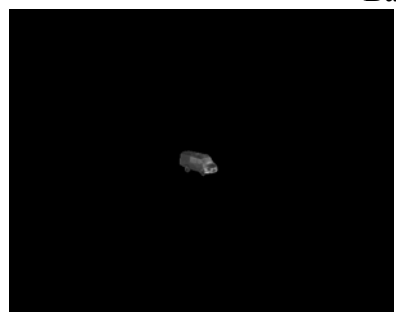
Изображения I_g



Вариант № 10



Вариант № 9



Вариант № 1

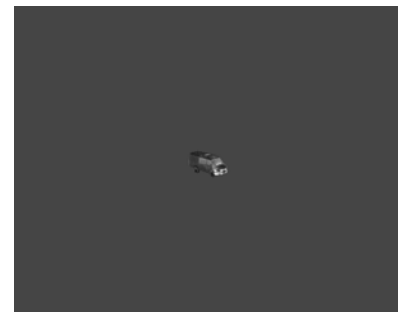
Изображения I_{app}



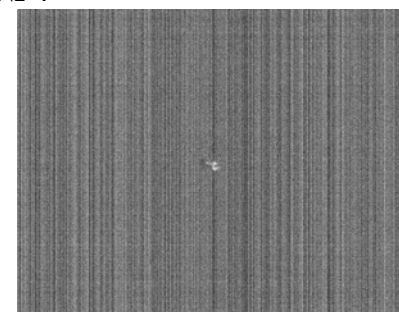
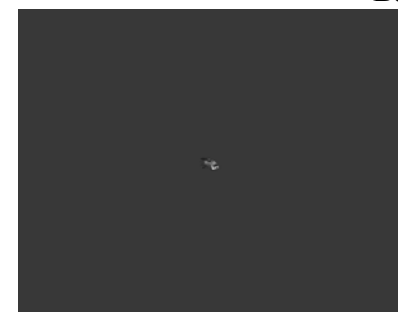
Изображения I_g



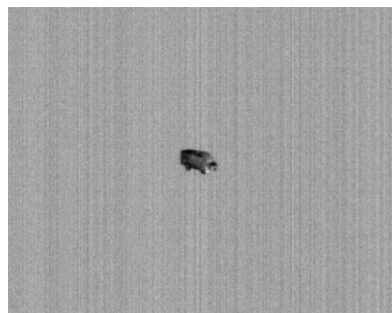
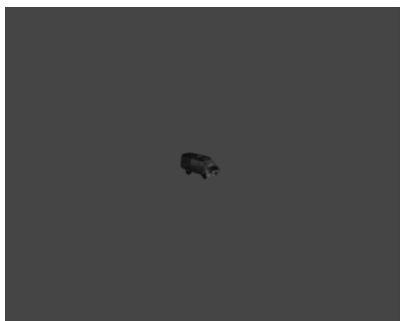
Вариант № 2



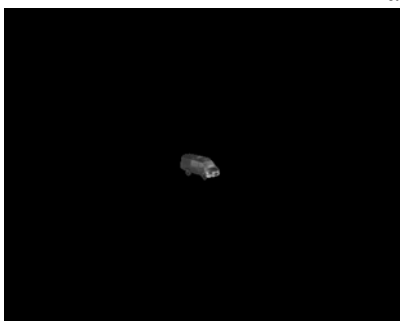
Вариант № 4



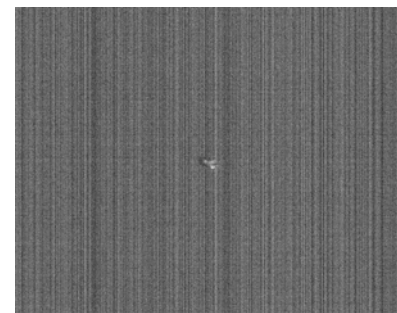
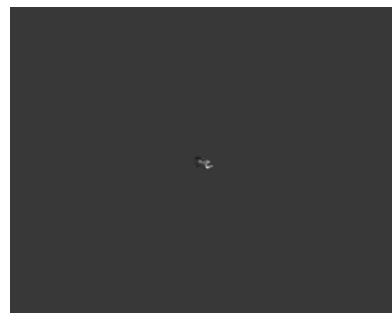
Вариант № 8



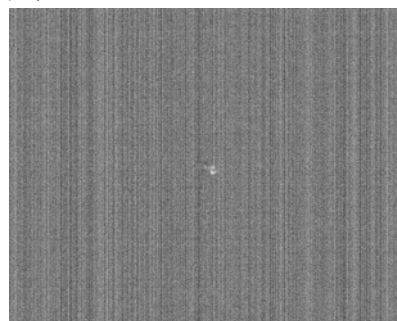
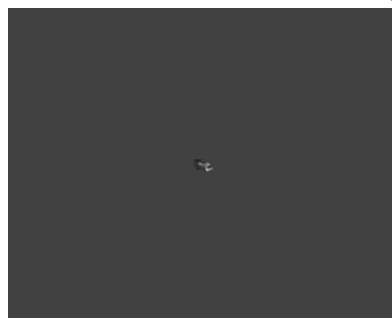
Вариант № 3



Вариант № 5



Вариант № 7



Вариант № 6

Рисунок 16 – Исходные I_{app} и синтезированные изображения I_g объектов

6 Обеспечение необходимое для синтеза фоноцелевых изображений

Для синтеза фоноцелевых изображений необходимо:

1) программное обеспечение:

- программное обеспечение формирования предварительной сигнатуры объектов;

- программное обеспечение теплового расчёта;

- программное обеспечение синтеза комбинированных изображений;

- программное обеспечение, поставляемое вместе с измерительными ОЭС;

- программное обеспечение расчёта характеристик ОЭС;

- программное обеспечение расчёта частотно-контрастной характеристики ОЭС с учетом заданной турбулентности;

- программное обеспечение изменения размера изображения объекта с учетом заданной дальности объекта;

- программное обеспечение расчёта энергетической светимости на входном зрачке и синтеза исходных изображений объектов, фона и фоноцелевого изображения;

- программное обеспечение синтеза изображений фоноцелевой обстановки.

2) средства измерений и рабочие места:

- измерительные ОЭС (термографы, спектрометры и др.);

- метеостанция для фиксации метеоусловий при проведении съёмок;

- средства фиксации условий съёмки, в частности: азимут, угол места и дальность объекта, координаты местоположения ОЭС;

- рабочие места для определения характеристик ОЭС.

3) материально-техническое обеспечение:

- программная документация на программное обеспечение;
- техническая документация на средства измерения и рабочие места;
- нормативная техническая документация (ГОСТ, ОСТ, ТУ и др.);
- средства размещения измерительных ОЭС на заданной высоте (при необходимости);
- источники электрического питания;
- автотранспорт и горюче-смазочные материалы (при необходимости);
- расходные материалы, необходимые для технического обслуживания средств измерений и рабочих мест.

7 Методика оценки соответствия синтезированных фоноцелевых изображений изображениям, формируемым ОЭС

Оценку результатов полученных рассмотренной методикой синтеза фоноцелевых изображений I_g предлагается проводить по результатам натурных испытаний. Необходимые средства измерения указаны на рисунке 17. По сигналу системы единого времени проводится одновременная съемка фоноцелевой обстановки ОЭС и термографом, а также включаются все средства измерения.

Затем по информации от термографа и средств измерений, с учётом характеристик ОЭС и заданных внешних условий, максимально приближённым натурным, формируется набор фоноцелевых изображений I_g в соответствии с полученным набором изображений $I_{ОЭС}$.

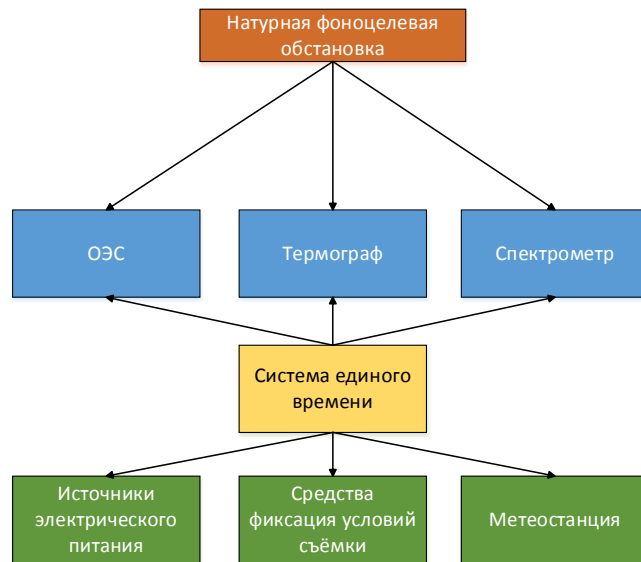


Рисунок 17 – Схема размещения средств измерений и вспомогательного оборудования

Степень соответствия изображений I_g изображениям $I_{OЭС}$ определяется значениями коэффициента корреляции:

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A}) (B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{[\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2] [\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2]}};$$

$$\bar{A} = \frac{1}{mn} \sum_m \sum_n A_{mn};$$

$$\bar{B} = \frac{1}{mn} \sum_m \sum_n B_{mn}.$$

В связи с тем, что на данный момент отсутствует возможность проведения натуральных испытаний была проведена оценка соответствия фоноцелевых изображений I_g исходным изображениям I_{app} . Результаты приведены на рисунке 18 и, как видно, распределение вариантов экспертом по сложности внешних условий (метод анализа иерархии) и по соответствию изображений I_g изображениям I_{app} (коэффициент корреляции) практически совпадают.

вариант	вес	место	r	вариант
10	0,148	1	0,85	10
9	0,138	2	0,75	9
1	0,111	3	0,38	1
3	0,102	4	0,33	5
5	0,102	5	0,32	2
2	0,093	6	0,31	3
4	0,089	7	0,12	4
8	0,084	8	0,04	7
7	0,084	9	0,04	8
6	0,061	10	0,03	6

Рисунок 18 - Распределение вариантов по сложности внешних условий и по соответствию изображений

8 Заключение

Рассмотрена методика синтеза фоноцелевых изображений с учетом характеристик тепловизионной ОЭС, включающей следующие этапы:

1. Подготовка исходных данных;
2. Энергетический расчёт и синтез набора исходных изображений объектов и фоновой обстановки;
3. Синтез изображений фоноцелевой обстановки.

Из полученных фоноцелевых изображений для заданных условий применения ОЭС с её учётом характеристик формируются обучающая и контрольная выборки изображений для нейронной сети. Контрольная выборка изображений применяется для оценки обучения нейронной сети. Обученная нейронная сеть используется в составе программного обеспечения ОЭС в процессе её эксплуатации.

Процесс обучения нейронной сети целесообразно проводить на первичных («сырых») файлах, то есть на тех файлах, которые не подвергались вторичной обработке. Любая вторичная обработка видеоинформация (фильтрация, интерполяция и др.) проводится с целью улучшения восприятия информации

оператором, но приводит к ухудшению исходной информации для алгоритмов автоматического обнаружения, распознавания и идентификации объектов.

Дальнейшее направления развития данной методики:

- разработка версии методики синтеза изображений фоноцелевой обстановки со вторичной обработкой тепловизионной видеоинформации для последующей визуализации её оператору;

- разработка версии методики синтеза изображений фоноцелевой обстановки для телевизионной системы;

- разработка версии методики синтеза изображений фоноцелевой обстановки со вторичной обработкой телевизионной видеоинформации для последующей визуализации её оператору.

Необходимо отметить ещё одно очень важное направление в рамках данной работы – формирование во всём оптическом диапазоне базы данных сигнатуры (визуальные образы и спектральные характеристики) объектов из числа трофейной техники ВСУ, захваченной в ходе СВО. Примером такой базы данных является библиотека спектральных характеристик географических объектов в структуре геопортала МГУ имени М.В. Ломоносова [18].

Таким образом, рассмотренная методика синтеза изображений фоноцелевой обстановки, в совокупности с аналитической моделью оценки эффективности ОЭС, представленной в [9, 10], может рассматриваться как составная часть программно-аппаратного комплекса моделирования информационных каналов ОЭС и фоноцелевой обстановки. Данный программно-аппаратный комплекс – это составная часть цифровой модели комбинированной системы технического зрения [19 – 22]. В

свою очередь, цифровая модель комбинированной системы технического зрения 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 используют при проведении приёмочных, приёма-сдаточных, предварительных, государственных, квалификационных, серийных и иных испытаний;

- при проведении цифровых (виртуальных) испытаниях, проводимые с целью подготовки натурных испытаний.

Список источников

1. 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.

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. Alijafar Mousivand, Wout Verhoef, Massimo Menenti, Ben Gorte “Modeling Top of Atmosphere Radiance over Heterogeneous Non-Lambertian Rugged Terrain”. Remote Sens. 2015, 7, 8019-8044; doi:10.3390/rs70608019.

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

5. А. А. Черторийский. Методы и технические средства измерения параметров оптического излучения. Учебное пособие. Ульяновск, УЛГТУ, 2020.

6. Datasheet Mid-IR Spectrometer ATP8250, www.optosky.com, Optosky Photonics Inc., 2015.

7. Хисматов И.Ф. Методика воспроизведения метеоусловий при имитационном моделировании авиационных оптико-электронных систем // Труды МАИ. Выпуск №108. <https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-18>.

8. Chrzanowski K. Testing thermal imagers. Practical guidebook. // Military University of Technology, 00-908 Warsaw, Poland, 2010.

9. 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

10. 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.

11. J. A. D'Agostino and C. M. Webb, «Three-dimensional analysis framework and measurement methodology for imaging system noise,» Proc. SPIE 1488, 110 (1991).

12. 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.

13. Alan Irwin, "Performance prediction from EO system measurements using IRWindows and NV-IPM," Proc. SPIE 10625, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIX, 1062502 (26 April 2018); doi: 10.1117/12.2315492
14. Gerald C. Holst. Electro-Optical Imaging System Performance - Sixth edition. JCD Publishing and SPIE Press, 2017.
15. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. Москва: Техносфера, 2006.
16. Т. Саати. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Москва, «Радио и связь», 1993 г.
17. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных задачах: аналитические сети. Пер. с англ./Науч.ред. А.В. Андрейчиков-М.: Издательство ЛКИ, 2008, 360с.
18. Н.С. Касимов, Е.И. Голубева, И.К. Лурье, М.В. Зимин, Т.Е. Самсонов, О.В. Тутубалина, У.Г. Рис, А.И. Михеева, А.Р. Аляутдинов. Библиотека спектральных характеристик географических объектов в структуре геопортала МГУ имени М.В. Ломоносова. Вестник Московского университета. Серия 5. ГЕОГРАФИЯ. 2015. № 5.
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. 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.
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. Alijafar Mousivand, Wout Verhoef, Massimo Menenti, Ben Gorte "Modeling Top of Atmosphere Radiance over Heterogeneous Non-Lambertian Rugged Terrain". Remote Sens. 2015, 7, 8019-8044; doi:10.3390/rs70608019.
4. Gerald C. Holst. Electro-Optical Imaging System Performance - Fifth edition. JCD Publishing and SPIE Press, 2008.
5. A. A. Chertoriyskiy. Methods and technical means of measuring optical radiation parameters. The training manual. Ulyanovsk, ULSTU, 2020.
6. Dataset Mid-IR Spectrometer ATP8250, www.optosky.com , Opto-sky Photonics Inc., 2015.
7. Khismatov I.F. Methodology of reproducing meteorological conditions in the simulation of aviation optoelectronic systems // Proceedings of the MAI. Issue No. 108. <https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-18> .
8. Czrzanowski K. Testing thermal imagers. Practical guidebook. // Military University of Technology, 00-908 Warsaw, Poland, 2010.

9. Krasnov A.M., Tregubenkov S.Yu., Rumyantsev A.V., Khismatov R.F., Shashkov S.N. Evaluation of the effectiveness of optoelectronic systems using an analytical model. Functions of threshold contrast and modulation transmission // Information-measuring and control systems. 2021. Vol. 19. No. 1. pp. 45-64. DOI: 10.18127/j20700814-202101-04
10. Krasnov A.M., Tregubenkov S.Yu., Rumyantsev A.V., Khismatov R.F., Shashkov S.N. Evaluation of the effectiveness of optoelectronic systems using an analytical model. The noise model of the ECO-Operator system. Proceedings of MAY 2022. No. 122. DOI: 10.34759/trd-2022-122-22 .
11. J. A. D'Agostino and C. M. Webb, «Three-dimensional analysis framework and measurement methodology for imaging system noise,» Proc. SPIE 1488, 110 (1991).
12. 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.
13. Alan Irwin, "Performance prediction from EO system measurements using IRWindows and NV-IPM," Proc. SPIE 10625, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIX, 1062502 (26 April 2018); doi: 10.1117/12.2315492.
14. Gerald C. Holst. Electro-Optical Imaging System Performance - Sixth edition. JCD Publishing and SPIE Press, 2017.
15. Gonzalez R., Woods R., Eddins S. Digital image processing in the MATLAB environment. Moscow: Technosphere, 2006.
16. T. Saati. Decision-making. A method for analyzing hierarchies. Moscow, Radio and Communications, 1993.

17. Saati T.L. Decision-making with dependencies and feedback: analytical networks. Translated from English/Scientific ed. by A.V. Andreychikov, Moscow: LKI Publishing House, 2008, 360 s.

18. N.S. Kasimov, E.I. Golubeva, I.K. Lurie, M.V. Zimin, T.E. Samsonov, O.V. Tutubalina, U.G. Ris, A.I. Mikheeva, A.R. Alyautdinov. Library of spectral characteristics of geographical objects in the structure of the Lomonosov Moscow State University Geoportal. Bulletin of the Moscow University. Series 5. GEOGRAPHY. 2015. № 5

19. GOST R57700.37-2021. Computer models and modeling. Digital counterparts of products. General provisions

20. GOST R 57700.24. Computer models and modeling. 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.