

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИКО- ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПОСРЕДСТВОМ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ. МОДЕЛЬ ШУМА СИСТЕМЫ «ОЭС-ОПЕРАТОР»

Александр Маркелович Краснов^{1✉}, Сергей Юрьевич Трегубенков²,
Андрей Васильевич Румянцев³, Ринат Федорович Хисматов⁴,
Сергей Николаевич Шашков⁵

¹ЗАО «Технологический парк космонавтики «ЛИНКОС»,
Москва, Щербинка, Россия

^{2,3}Военное представительство Министерства обороны Российской Федерации,
Москва, Россия

^{4,5}Специальное конструкторское бюро АО «Раменский приборостроительный
завод»,
Раменское, Московская область, Россия

¹a_krasnov@inbox.ru✉

Аннотация. Оценка эффективности является неотъемлемой частью этапов разработки, испытаний и эксплуатации оптико-электронных систем (ОЭС). Отсутствие единой методики оценки эффективности оптико-электронных систем приводит к тому, что для сравнения различных систем используются различные методики оценки, в результате чего полученные результаты противоречивы и не дают объективных данных для принятия соответствующих решений на различных этапах

жизненного цикла оптико-электронных систем, особенно на этапах определения технического задания в конкурсных работах. Одним из путей решения данной проблемы является разработка аналитической модели, которая может быть основой построения единого комплекса средств интеллектуальной поддержки проектирования и сопровождения оптико-электронных систем на всех этапах жизненного цикла.

Целью статьи является описание аналитической модели оценки эффективности оптико-электронных систем, в части касающейся модели шума системы «ОЭС-оператор».

Рассмотрены составляющие шума системы «ОЭС-оператор»: дисперсия шума зрительной системы оператора ОЭС и дисперсия шума, отображаемого на дисплее ОЭС. Приведены формульные зависимости составляющих дисперсии шума, отображаемого на дисплее ОЭС: это спектральная плотность шума на дисплее, полоса пропускания временного шума и полоса пропускания пространственного шума. Рассмотрена модель расчёта разности температур, эквивалентной шуму.

Приведён пример представления исходных данных в аналитической модели оценки эффективности оптико-электронных систем и проведена оценка влияния шума на такие показатели эффективности ОЭС как дальности обнаружения, распознавания и идентификации объекта.

Таким образом, рассмотрена реализация модели шума системы «ОЭС-оператор», являющейся составной частью единого программного комплекса средств интеллектуальной поддержки проектирования и сопровождения оптико-электронных систем на всех этапах жизненного цикла.

Ключевые слова: оптико-электронная система, пространственный шум, временной шум, обнаружение, распознавание, идентификация

Для цитирования: Краснов А.М., Трегубенков С.Ю., Румянцев А.В., Хисматов Р.Ф., Шашков С.Н. Методика оценки эффективности оптико-электронных систем посредством аналитической модели. Модель шума системы «ОЭС-ОПЕРАТОР» // Труды МАИ. 2022. № 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-22](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-22)

METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE EFFICIENCY OF OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEMS USING AN ANALYTICAL MODEL. NOISE MODEL OF THE «OES-OPERATOR» SYSTEM

Alexander M. Krasnov¹✉, Sergey Yu. Tregubenkov², Andrey V. Rumyantsev³, Rinat F. Khismatov⁴, Sergey N. Shashkov⁵

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

^{2,3}Military Representation of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russia

^{4,5}Special design bureau of JSC "Ramenskiy instrument-making plant", Ramenskoye, Moscow region, Russia

¹a_krasnov@inbox.ru✉

Abstract. Efficiency assessment is an integral part of optoelectronic systems (OES) development stages, testing and operation. The lack of a unified technique for optoelectronic systems effectiveness assessing leads to the fact that various assessment methods are employed to compare different systems, which results in obtaining contradictory results that

do not provide objective data for making appropriate decisions at various stages of optoelectronic systems life cycle. One of the ways to this problem solving consists in an analytical model developing, which will represent the basis for creating the unified complex of means for intellectual support for optoelectronic systems design and maintenance at all stages of the lifecycle.

The purpose of the presented article consists in describing an analytical model for the optoelectronic systems effectiveness assessing, in a part concerning the noise model of the “OES-operator” system.

The following noise components of the “OES-operator” system are considered: the noise variance of the visual system of the OES operator, and the noise variance displayed on the OES display. The article presents the formula dependences of the noise variance components displayed on the OES display. These are the spectral density of the noise on the display, the temporal noise bandwidth and the spatial noise bandwidth. A model for computing the temperature difference equivalent to the noise was considered.

Further, the article presents the example of the initial data presentation in the analytical model for optoelectronic systems effectiveness assessing, and the results of the noise impact assessment on such OES efficiency indicators as detection range, recognition and identification of an object.

The considered noise model of the “OES-operator” system as an integral part of the analytical model for optoelectronic systems effectiveness assessing is a tool for an objective assessment of the of the optoelectronic systems sensitivity, which excludes the subjective opinion caused by the human factor.

It is advisable to employ this noise model of the “OES-operator” system in the development of tactical and technical requirements for optoelectronic systems, and optoelectronic systems themselves at the preliminary and technical design stages.

Computing temperature difference equivalent to the noise allows performing assessment:

- Of noise components impact on the values of detection range, recognition and identification of the object to the specified tactical-and-technical requirements at the stage products testing;

- Of the OES radiation receiver sensitivity for this parameter compliance with the values indicated in the specified in operational documentation at the stages of mass production and operation.

Thus, the noise model of the “OES-operator” system implementation, which is an constituent part of a single software package for intelligent support of design and maintenance of optoelectronic systems at all stages of the life cycle, was considered.

Keywords: electro-optical imaging system, spatial noise, temporal noise, detection, recognition, identification

For citation: 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](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-22)

Введение

В статье [1] приведён анализ моделей NVL 1975, FLIR92, NVTerm, NVTermIP и NV-IPM оценки эффективности оптико-электронных систем, рассмотрены основные различия между данными моделями. Было установлено, что в настоящее время используется модель NV-IPM [2, 3]:

$$P(V) = \frac{\left(\frac{V}{V_{50}}\right)^E}{1 + \left(\frac{V}{V_{50}}\right)^E};$$

$$V = \frac{\sqrt{A_{tgt}}}{R} TTP;$$

$$TTP = \sqrt{TTP_h TTP_v};$$

$$TTP_h = \int_{\xi_{low h}}^{\xi_{cut h}} \sqrt{\frac{C_{tgt}}{CTF_{sys h}(\xi_h)}} d\xi_h;$$

$$TTP_v = \int_{\xi_{low v}}^{\xi_{cut v}} \sqrt{\frac{C_{tgt}}{CTF_{sys v}(\xi_v)}} d\xi_v;$$

$$E = 1,5; \text{ для цели типа танк } V_{50} = [2; 7,5; 13],$$

где C_{tgt} – контраст цели на входной апертуре ОЭС; $CTF_{sys h}(\xi_h)$, $CTF_{sys v}(\xi_v)$ – функция порогового контраста в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно; A_{tgt} – площадь объекта наблюдения, м; R – дальность объекта наблюдения, км; ξ_{low} , ξ_{cut} – значения пространственной частоты, при которых значения функции $CTF_{sys}(\xi)$ меньше контраста C_{tgt} ; ξ_h , ξ_v – пространственная частота, ц/мрад.

В случае, если минимальное значение $CTF_{sys}(\xi)$ больше C_{tgt} , то цель не наблюдается. Схематичное представление модели NV-IPM приведено на рисунке 1.

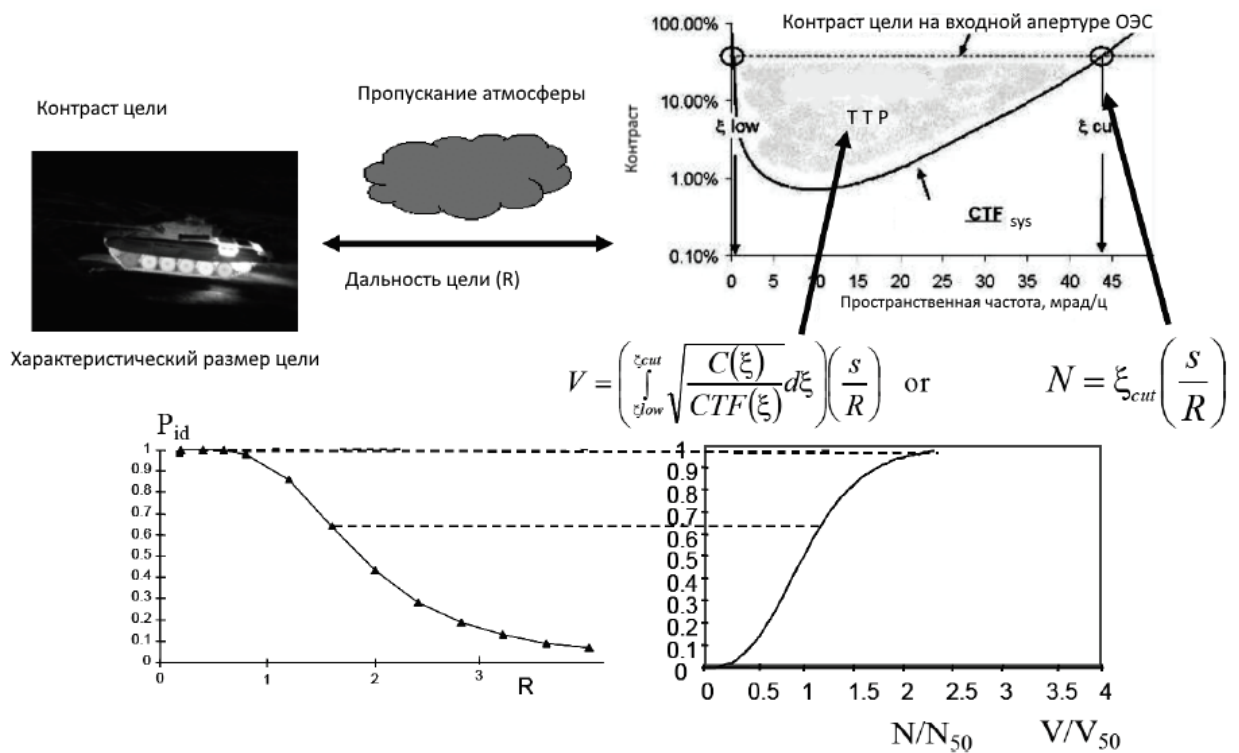


Рисунок 1 – Схематичное представление модели NV-IPM

Функция порогового контраста CTF_{sys} вычисляется по формуле [4, 5]:

$$CTF_{sys}(\xi) = \frac{CTF_{eye}(\xi_{eye})}{MTF_{sys}^*(\xi)} NF(\xi_e),$$

где $CTF_{eye}(\xi_{eye})$ – функция порогового контраста зрительной системы человека; $MTF_{sys}^*(\xi)$ – функция передачи модуляции (частотно-контрастная характеристика, ЧКХ) ОЭС и внешней среды; $NF(\xi_e)$ – шум системы «ОЭС-оператор»; ξ – пространственная частота в пространстве объектов, цикл/мрад; ξ_{eye} – пространственная частота в пространстве изображений, цикл/угл. град; ξ_e – пространственная частота в пространстве изображений, цикл/мрад.

Анализ функций $CTF_{eye}(\xi_{eye})$, $MTF_{sys}^*(\xi)$ проведён в статье [1], целью данной работы является рассмотрение функции $NF(\xi_e)$, учитывающей шум системы «ОЭС-оператор».

1 Модель шума системы «ОЭС-оператор»

Шум системы «ОЭС-оператор» определяется с учётом ограничений зрительной системы оператора и включает большинство источников шума ОЭС. Выражение для $NF(\xi_e)$ имеет вид [2, 6]:

$$NF(\xi_e) = \sqrt{1 + \frac{\sigma_{disp}^2(\xi_e)}{\sigma_{eye}^2}}$$

где $\sigma_{disp}^2(\xi_e)$ – дисперсия шума, отображаемого на дисплее ОЭС; σ_{eye}^2 – дисперсия шума зрительной системы оператора ОЭС.

1.1 Дисперсия шума σ_{eye}^2 зрительной системы оператора ОЭС

Дисперсия шума зрительной системы оператора σ_{eye}^2 определяется по формуле [2, 6, 7]:

$$\sigma_{eye}^2 = \frac{1}{\gamma^2 n_{eye}} \left(1 + \frac{\beta^2 Q_{eye,t}}{B_0 A_{eff}} \right);$$

$$Q_{eye,t} = \frac{1}{\tau_{eye}};$$

$$\tau_{eye} = 4 \left[0,0192 + 0,0625 \left(\frac{1,076}{B_0} \right)^{0,17} \right];$$

$$A_{eff} = \frac{\pi}{4} d_{pup}^2 \left[1 - \left(\frac{d_{pup}}{9,7} \right)^2 + \left(\frac{d_{pup}}{12,4} \right)^4 \right];$$

$$d_{pup} = 5 - 3 \tanh \left[0,4 \log_{10} \left(3,426 B_0 \frac{(X_0 Y_0)^2}{40^2} \right) \right];$$

где γ, β – калибровочные константы; $Q_{eye,t}$ – полоса пропускания зрительной временного шума системой оператора, 1/с; τ_{eye} – время интегрирования (экспозиции) зрительной системы оператора, с; B_0 – яркость дисплея, фут-ламберт; A_{eff} – эффективная площадь зрачка глаза оператора, мм²; d_{pup} – диаметр зрачка глаза оператора, мм; X_0, Y_0 – поле зрения кадра изображения на мониторе, градус.

1.2 Дисперсия шума $\sigma_{disp}^2(\xi)$, отображаемого на дисплее ОЭС

Дисперсия $\sigma_{disp}^2(\xi_e)$ определяется по формуле [2, 6]:

$$\sigma_{disp}^2(\xi_e) = \frac{N_{disp}^2}{B_0^2} Q_{disp+eye,t} Q_{eye,s}(\xi_e),$$

где N_{disp}^2 – спектральная плотность шума на дисплее, фут-ламберт²·мрад²·с; $Q_{disp+eye,t}$ – полоса пропускания временного шума, 1/с; $Q_{disp,s}(\xi_e)$ – полоса пропускания пространственного шума, 1/мрад².

1.2.1 Спектральная плотность шума N_{disp}^2

Спектральная плотность шума на дисплее N_{disp}^2 определяется по формуле [2, 6]:

$$N_{disp}^2 = \sigma_{disp}^2 DAS_M^2 t_{disp};$$

$$DAS_M = \frac{d_M}{R_M},$$

где σ_{disp}^2 – дисперсия шума на экране, фут-ламберт; t_{disp} – время между двумя кадрами, то есть величина обратно пропорциональная частоте кадров, с; DAS_M –

угловой размер пикселя монитора, мрад; d_M – размер пикселя монитора, мкм; R_M – расстояние от монитора до оператора, мм.

Дисперсия шума на экране σ_{disp}^2 зависит от дисперсии $\sigma_{общ}^2$ шума на выходе детектора, средней яркости монитора B_0 и полезного сигнала Δn_{PE} от цели [2, 3]:

$$\sigma_{disp}^2 = \sigma_{общ}^2 G_{disp}^2;$$

$$G_{disp} = \frac{B_0}{\Delta n_{pe}}.$$

где G_{disp} – коэффициент усиления.

Расчёт дисперсии $\sigma_{общ}^2$ шума на выходе детектора проводится по формуле [3, 8]:

$$\sigma_{общ}^2 = \sigma_{temp}^2 + \sigma_{spat}^2;$$

где σ_{temp}^2 – дисперсия временного шума; σ_{spat}^2 – дисперсия пространственного шума.

Выражение для σ_{temp}^2 имеет вид [9, 10, 12, 22]:

- для средневолнового (MWIR) и длинноволнового (LWIR) инфракрасных спектральных диапазонов:

$$\sigma_{temp}^2 = n_{PE-B} + n_{opt} + n_h + n_{cf} + n_{cs} + n_{dark} + \sigma_{ADC}^2 + \sigma_{ReadOut}^2;$$

- для видимого (VIS) спектрального диапазона, а также для ближнего (NIR) и коротковолнового (SWIR) инфракрасных спектральных диапазонов:

$$\sigma_{temp}^2 = n_{PE-B} + n_{dark} + \sigma_{ADC}^2 + \sigma_{ReadOut}^2,$$

где n_{PE-B} – число электронов от фона; n_{opt} – число электронов, образованных излучением оптической системы ОЭС; n_h – число электронов, образованных

излучением элементов конструкции (корпуса) ОЭС; n_{cf} – число электронов, образованных излучением холодного фильтра приёмника излучения; n_{cs} – число электронов, образованных излучением конструкцией холодильника приёмника излучения; n_{dark} – число электронов темнового тока; σ_{ADC}^2 – дисперсия шума квантования; $\sigma_{ReadOut}^2$ – дисперсия шума считывания.

Значения параметров n_{PE-B} , Δn_{pe} , n_{opt} , n_h , n_{cf} , n_{cs} являются результатом энергетического расчёта, рассмотрение данного расчёта в данной статье не предусмотрено.

Рассмотрим модель расчёта составляющих шума на выходе детектора. Шум темнового сигнала можно определить, если на вход приемника излучения не подавать световой сигнал (например, плотно закрыть светонепроницаемой крышкой объектив ОЭС, помещённой в тёмную комнату). Тогда на выходе системы получим так называемые «темновые» кадры. Основной составляющей темнового сигнала является термоэлектронная эмиссия. Чем ниже температура, тем ниже и темновой сигнал. Термоэлектронная эмиссия подчиняется статистике Пуассона и количество электронов темнового тока n_{dark} вычисляется следующим образом [3]:

$$n_{dark} = I_d \frac{t_{int}}{q},$$

где I_d – темновой ток, А; t_{int} – время экспозиции ОЭС, с; q - заряд электрона, Кл.

Пример расчёта темнового тока приведен в [13].

Формула вычисления среднеквадратического отклонения шума квантования σ_{ADC} имеет вид [3]:

$$\sigma_{ADC} = \frac{n_{well}}{2^N \sqrt{12}};$$

где N – разрядность аналого-цифрового преобразователя, n_{well} - емкость потенциальной ямы приёмника излучения.

Шумом считывания (собственным шумом) называют дополнительный шум, образующийся при преобразовании сигнала, накопленного в детекторе, в напряжение, его усилении и выводе из приёмника излучения. Шум считывания можно представить, как некоторый базовый уровень шума, который присутствует даже в изображении с нулевым уровнем экспозиции, когда матрица находится в полной темноте, и шум темнового сигнала равен нулю. Значение среднеквадратического отклонения $\sigma_{ReadOut}$ шума считывания, как правило, является паспортной характеристикой приёмника излучения.

Выражение для дисперсии σ_{spat}^2 пространственного шума имеет вид [9, 10]:

$$\sigma_{spat}^2 = \sigma_{DSNU}^2 + \sigma_{PRNU}^2,$$

где σ_{PRNU}^2 – дисперсия неоднородности чувствительности приёмника излучения [11]; σ_{DSNU}^2 – дисперсия неоднородности темнового тока (обычно эта составляющая для ОЭС, работающих в MWIR и LWIR диапазонах, игнорируется). Пример расчёта неоднородности темнового тока приведен в [14 - 17], а неоднородности чувствительности приёмника излучения в [18 - 21].

При моделировании пространственного шума обычно используется отношение

$\frac{\sigma_{spat}}{\sigma_{temp}}$, значения отношения приведены в таблице 1 [3]. С учётом отношения $\frac{\sigma_{spat}}{\sigma_{temp}}$

выражение дисперсии $\sigma_{общ}^2$ шума на выходе детектора имеет вид:

$$\sigma_{\text{общ}}^2 = \sigma_{\text{temp}}^2 \left(1 + \frac{\sigma_{\text{spat}}^2}{\sigma_{\text{temp}}^2} \right);$$

ИЛИ

$$\sigma_{\text{общ}} = \sigma_{\text{temp}} \sqrt{1 + \frac{\sigma_{\text{spat}}^2}{\sigma_{\text{temp}}^2}}.$$

Таблица 1 – Значения $\frac{\sigma_{\text{spat}}}{\sigma_{\text{temp}}}$

	Низкий шум	Средний шум	Высокий шум
$\frac{\sigma_{\text{spat}}}{\sigma_{\text{temp}}}$	0.2	0.5	От 1 до 2

При известном значении $\sigma_{\text{общ}}$ можно рассчитать разность температуры эквивалентная шуму $NEDT$ [3]:

$$NEDT = \frac{4F^2 \sigma_{\text{общ}}}{A_D t_{\text{int}} \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} \eta(\lambda) \tau(\lambda) \frac{\partial M_q(\lambda, T_B)}{\partial T} d\lambda};$$

$$\frac{\partial M_q(\lambda, T_B)}{\partial T} = M_q(\lambda, T_B) \left[\frac{c_2 e^{\frac{c_2}{\lambda T_B}}}{\lambda T_B^2 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T_B}} - 1 \right)} \right],$$

$$M_q(\lambda, T_B) = \frac{c_3}{\lambda^4} \left(\frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_B}} - 1} \right);$$

$$c_2 = 14388 \text{ мкм} \cdot \text{К}; c_3 = 1,88365 \cdot 10^{27} \left(\frac{\text{ФОТОНОВ} \cdot \text{МКМ}^3}{\text{С} \cdot \text{М}^2} \right),$$

где A_D - площадь детектора матрицы, м²; t_{int} – время экспозиции матрицы, с; $\tau(\lambda)$ – коэффициент пропускания оптической системы ОЭС; $\lambda_{\text{min}}, \lambda_{\text{max}}$ – спектральный

диапазон ОЭС, мкм; $\eta(\lambda)$ – квантовая эффективность матрицы; $M_q(\lambda, R)$ – энергетическая светимость на входном зрачке ОЭС, $\frac{\text{фотон}}{\text{ср}\cdot\text{м}^2\cdot\text{с}\cdot\text{мкм}}$; F – отношение фокусного расстояния к диаметру входного зрачка оптической системы ОЭС.

1.2.2 Расчёт полосы пропускания $Q_{disp+eye,t}$ временного шума

Формула расчёта полосы пропускания $Q_{disp+eye,t}$ временного шума системы «глаз-дисплей» имеет вид [2, 6]:

$$Q_{disp+eye,t} = \frac{1}{\tau_{disp}} \left[1 + \left(e^{-2\frac{\tau_{disp}}{\tau_{eye}}} - 1 \right) \frac{\tau_{eye}}{2\tau_{disp}} \right],$$

где τ_{disp} – время между двумя кадрами, с; τ_{eye} – время интегрирования (экспозиции) зрительной системы оператора, с.

1.2.3 Расчёт полосы пропускания $Q_{eye,s}(\xi)$ пространственного шума

Формула расчёта полосы пропускания пространственного шума $Q_{eye,s}(\xi)$ (1/мрад) имеет вид [2, 6]:

$$Q_{eye,s}(\xi_e) = 2 \int_0^\infty \left(MTF_{monitor}(\xi') MTF_{eye}(\xi') MTF_{chan}(\xi_e, \xi') \right)^2 d\xi',$$

где $MTF_{monitor}(\xi')$ – функция передачи модуляции монитора; $MTF_{eye}(\xi')$ – передаточная функция зрительной системы наблюдателя; $MTF_{chan}(\xi_e, \xi')$ – передаточная функция пространственно-частотных каналов зрительной системы оператора; ξ' – пространственная псевдочастота, цикл/мрад.

Функция передачи модуляции монитора $MTF_{monitor}(\xi)$ имеет вид [1]:

$$MTF_{monitor}(\xi) = \text{sinc} \left(d_{Mh} \frac{HFOV}{W_M E_{zoom}} \xi \right);$$

где d_{Mh} – размер пикселя монитора, мм; W_M – ширина экрана монитора, мм; E_{zoom} – электронное увеличение (при его наличии); $HFOV$ – горизонтальный размер поля зрения ОЭС, мрад.

Формула для MTF_{eye} имеет вид [2, 6]:

$$MTF_{eye}(\xi') = MTF_{pup}(\xi') MTF_{ret}(\xi') MTF_{tre}(\xi');$$

$$MTF_{pup}(\xi') = \exp\left(-(\xi' f_{pup})^{N_{pup}}\right);$$

$$MTF_{ret}(\xi') = \exp(-0,3750 \xi'^{1,21});$$

$$MTF_{tre}(\xi') = \exp(-0,4441 \xi'^2);$$

$$D_{pup} = -9.011 + 13.23 \exp\left(-\frac{\log_{10}(B_0)}{21.082}\right) - 0.5(N_{eye} - 1);$$

$$f_{pup} = \frac{43,63}{\exp\left(3,663 - 0,0497 D_{pup}^2 \log_{10}(D_{pup})\right)};$$

$$N_{pup} = \left(0.7155 + \frac{0.277}{\sqrt{D_{pup}}}\right)^2,$$

где $MTF_{pup}(\xi')$ - функция передачи модуляции зрачка зрительной системы наблюдателя оператора; $MTF_{ret}(\xi')$ - функция передачи модуляции сетчатки зрительной системы оператора; $MTF_{tre}(\xi')$ - функция передачи модуляции движения глаза; D_{pup} – диаметр зрачка глаза.

Функция $MTF_{chan}(\xi_e, \xi')$ определяется по формуле [2, 6]:

$$MTF_{chan}(\xi_e, \xi') = \exp\left(-2,2 \left[\ln\left(\frac{\xi'}{\xi_e}\right)\right]^2\right).$$

2 Влияние шума на показатели эффективности ОЭС

Основное достоинство рассматриваемой модели заключается в том, что она охватывает и учитывает большое количество факторов, влияющих на эффективность ОЭС. Следствием такого достоинства является необходимость подготовки большого массива исходных данных, поэтому целесообразно подготавливаемые исходные данные разделить на четыре группы: «Объект наблюдения», «Атмосфера и поверхность»; «ОЭС»; «Монитор». Пример основных исходных данных, используемых в расчётах, приведены в таблицах 2 – 6.

Таблица 2 – Параметры объекта наблюдения

Параметр	Значение
Размер по горизонтали, м	3
Размер по вертикали, м	3
Температура, К	301
Значения V_{50} :	
- обнаружение	2
- распознавание	7,5
- идентификация	13

Таблица 3 – Параметры атмосферы и поверхности

Параметр	Значение
Высота поверхности в районе цели над уровнем моря, м	0

Температура поверхности (фона), К	299
Метеорологическая дальность видимости, км	20
Структурный параметр показателя преломления на высоте 1 м, $m^{-2/3}$	10^{-14}
Стандартная модель атмосферы	Таблица 4
Модель аэрозоля	модель загородного аэрозоля

Таблица 4 – Параметры модели атмосферы

Время года	Давление (мБар)	Температура воздуха (К)	Относительная влажность (%)	Абсолютная влажность (г/м ³)
Лето	1013	294	76	13,9

Таблица 5 – Параметры тепловизионного канала ОЭС

Параметр	Значение
Диаметр входного зрачка объектива, мм	100
Фокусное расстояние объектива, мм	300
Спектральный диапазон, мкм	3 – 5
Формат матрицы, пиксель	1280x1024
Размер активного пикселя (детектора), мкм	10
Диафрагменное число объектива	3

Средняя длина волны, мкм	4
Коэффициент пропускания ОС канала	0.8
Температура корпуса ОЭС, К	293
Коэффициент излучения корпуса ОЭС	0,3
Темновой ток, А	1,37e-13
Шум считывания, е	1125
Разрядность АЦП	14
Ёмкость потенциальной ямы пикселя, е	2 400 000
Параметр $\frac{F\lambda}{d}$	1.2

Таблица 6 – Параметры монитора

Параметр	Значение
Размер изображения на мониторе, пиксель	1280x1024
Расстояние от монитора до наблюдателя, мм	610
Размер пикселя экрана монитора, мм	0.217
Размер экрана монитора, мм	277,8 x 222,2
Тип наблюдения	бинокулярное
Яркость дисплея $\frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$	34,4
Частота экрана монитора, Гц	50

Рассмотрим, для заданных исходных данных, расчёт влияния шума на показатели эффективности ОЭС: дальности обнаружения, распознавания и

идентификации. При значении $\frac{\sigma_{spat}}{\sigma_{temp}}$ равным 0.4 значение разности температуры $NEDT$ эквивалентное шуму $\sigma_{общ}$ равно 69,4 мК. При значении $\frac{\sigma_{spat}}{\sigma_{temp}}$ равным 2 – значение $NEDT$ равно 144,1 мК. Вид функции $NF(\xi)$ для $\frac{\sigma_{spat}}{\sigma_{temp}}$ равным 0.4 и 2 представлен на рисунках 2 и 3.

На рисунках 4 и 5 приведены зависимости вероятностей обнаружения (P_{det}), распознавания (P_{rec}) и идентификации (P_{id}) от дальности объекта наблюдений для значений $\frac{\sigma_{spat}}{\sigma_{temp}}$ равных 0.4 и 2. Анализ этих графиков показал, что наличие шума, для заданных исходных данных, незначительно влияет на значения дальности обнаружения, распознавания и идентификации объекта наблюдения.

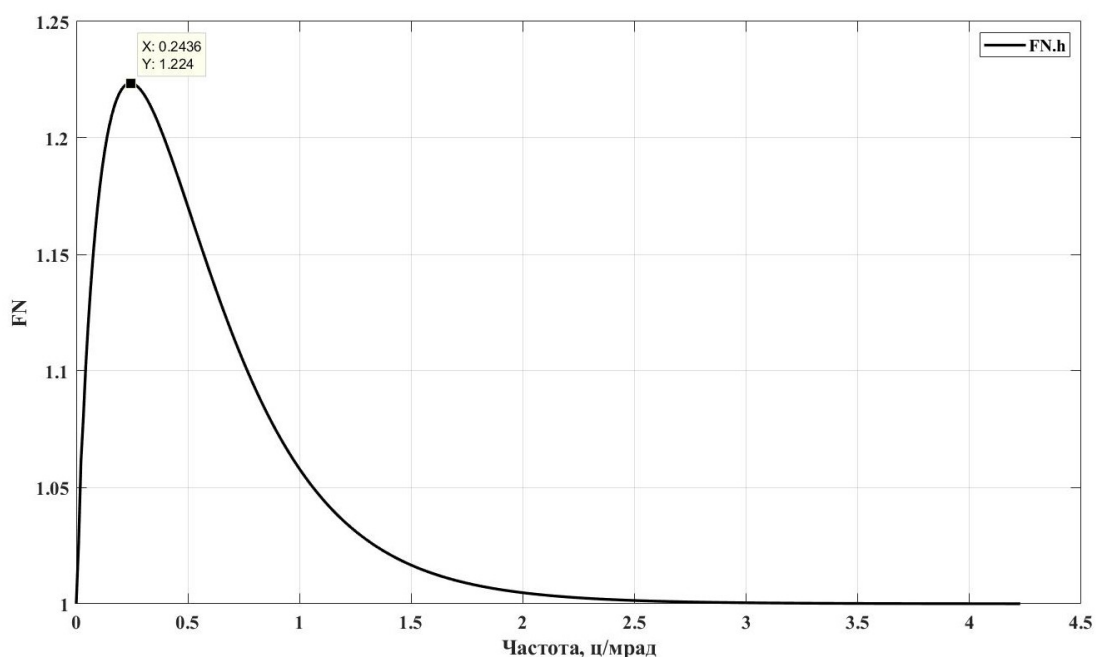


Рисунок 2 – Вид функции $NF(\xi)$ при $\frac{\sigma_s}{\sigma_t}$ равным 0,4

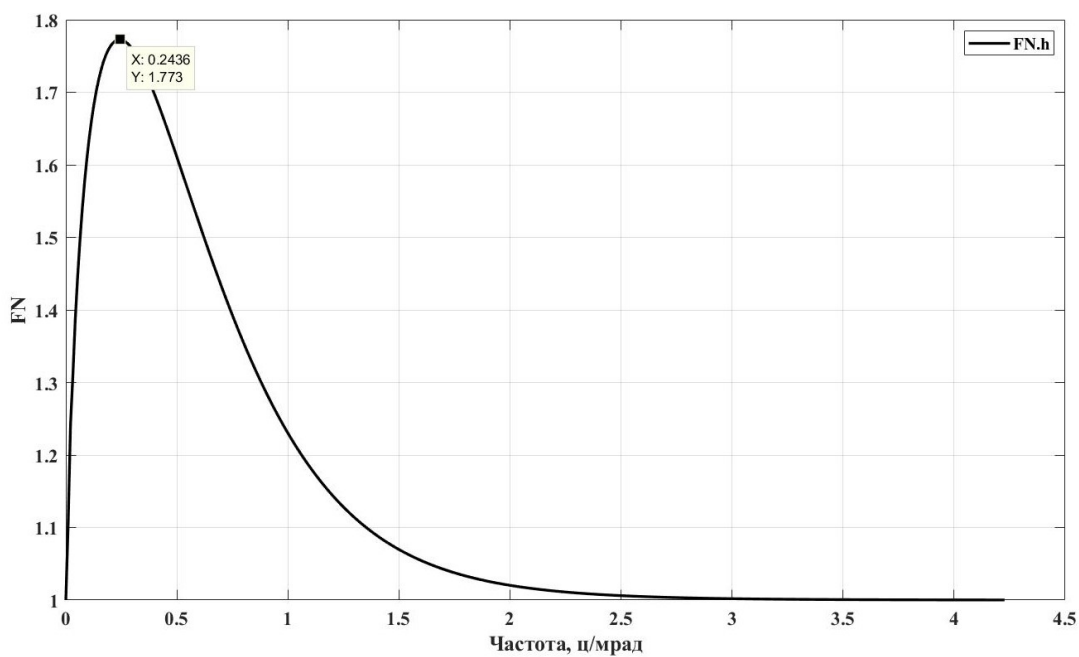


Рисунок 3 – Вид функции $NF(\xi)$ при $\frac{\sigma_s}{\sigma_t}$ равным 2,0

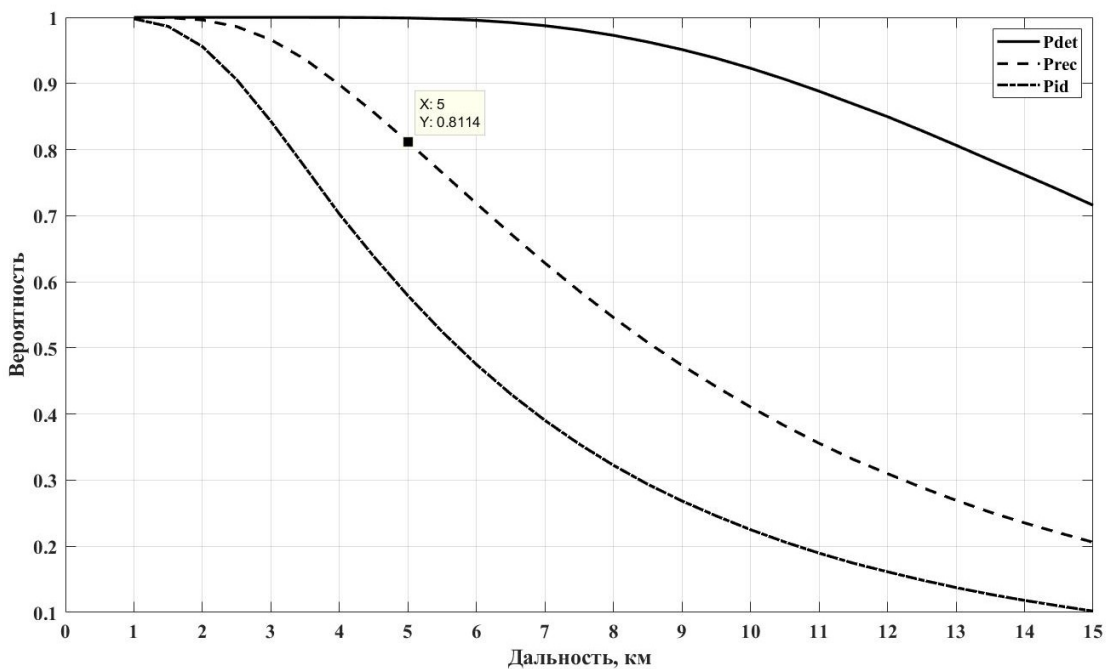


Рисунок 4 - Зависимость вероятностей P_{det} , P_{rec} и P_{id} (обнаружения, распознавания и идентификации) от дальности объекта наблюдений при $\frac{\sigma_s}{\sigma_t} = 0,4$.

Характеристический размер объекта – 3 метра, начальный температурный контраст – 2 К.

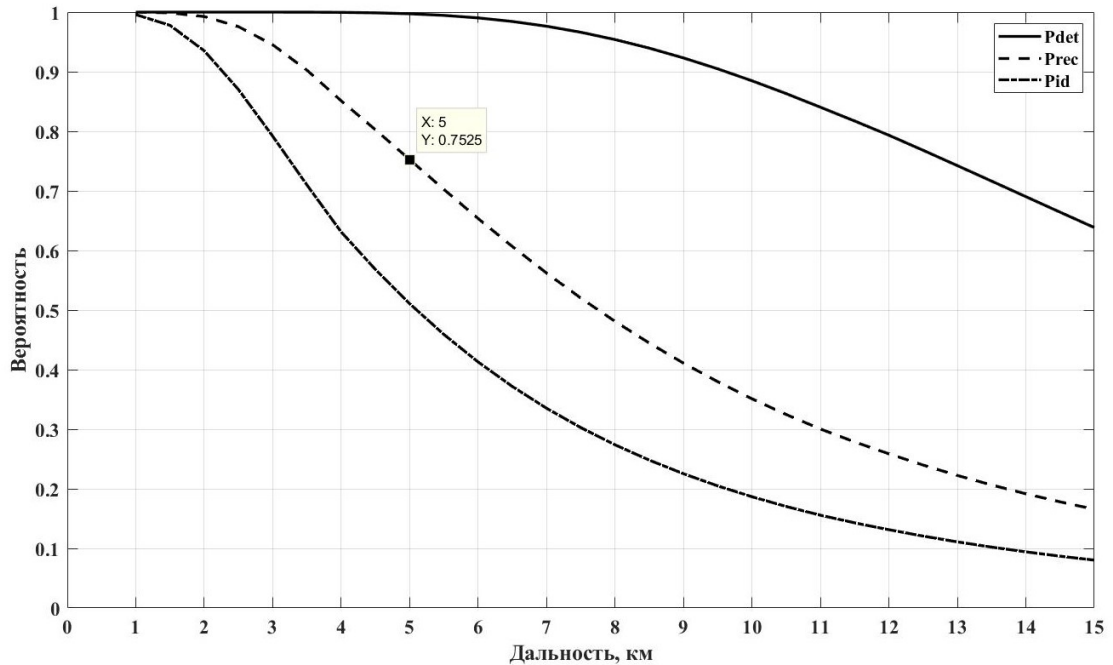


Рисунок 5 - Зависимость вероятностей P_{det} , P_{rec} и P_{id} (обнаружения, распознавания и идентификации) от дальности объекта наблюдений при $\frac{\sigma_s}{\sigma_t} = 2$. Характеристический размер объекта – 3 метра, начальный температурный контраст – 2 К.

Заключение

Рассмотрена модель шума системы «ОЭС-оператор» и её составляющих: шум зрительной системы оператора ОЭС, спектральная плотность шума на дисплее, полоса пропускания временного шума и полоса пропускания пространственного шума.

Анализ приведённого примера расчёта показал, что данная модель позволяет оперативно оценивать влияние шума на показатели эффективности ОЭС при

различных условиях применения ОЭС на начальных этапах проектирования. На этапе изготовления опытного образца ОЭС модель шума позволяет получить оценку показателей эффективности полунатурным методом, когда параметры временного и пространственного шума рассчитывают по видеокадрам, снятым в лабораторных условиях.

Таким образом, рассмотренная модель шума системы «ОЭС-оператор» может использоваться в аналитической модели оценки эффективности оптико-электронных систем, являющаяся основой построения в отечественной промышленности единого программного комплекса средств интеллектуальной поддержки проектирования и сопровождения оптико-электронных систем на всех этапах жизненного цикла.

Список источников

1. Краснов А.М., Трегубенков С.Ю., Румянцев А.В., Хисматов Р.Ф., Шашков С.Н. Оценка эффективности оптико-электронных систем посредством аналитической модели. Функции порогового контраста и передачи модуляции // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2021. Т. 19. № 1. С. 45-64. DOI: [10.18127/j20700814-202101-04](https://doi.org/10.18127/j20700814-202101-04)
2. Ronald G. Driggers, Melvin H. Friedman, Jonathan Nichols. Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems. Second Edition. Artech House, Boston, London, 2012, 599 p.
3. Gerald C. Holst. Electro-Optical Imaging System Performance - sixth edition. JCD Publishing and SPIE Press, 2017, 407 p.

4. Vollmerhausen R.H., Jacobs E. Driggers R.G. New metric for predicting target acquisition performance // The International Society for Optical Engineering, 2004, vol. 43, no. 11, pp. 2806–2818. DOI:[10.1117/12.487215](https://doi.org/10.1117/12.487215)
5. Brian P. Teaney, David P. Haefner. Evaluating the performance of an IR imaging system: a tutorial // Conference: Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIX26, April 2018. DOI: [10.1117/12.2303975](https://doi.org/10.1117/12.2303975)
6. Preece B., Olson J., Reynolds J., Fanning J., Haefner D. Human vision noise model validation for the U.S. Army sensor performance metric // Optical Engineering, 2014, vol. 53(6), pp. 061712. DOI:[10.1117/1.OE.53.6.061712](https://doi.org/10.1117/1.OE.53.6.061712)
7. Barten P. G. J. Contrast Sensitivity of the Human Eye and Its Effects on Image Quality, 1999, 232 p. DOI:[10.1117/3.353254](https://doi.org/10.1117/3.353254)
8. Бухалёв В.А., Болдинов В.А. Фильтрация сигналов при низкочастотных помехах в измерительно-информационных системах беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 97. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=87283>
9. Tristan M. Goss and Cornelius J. Willers. Small pixel cross-talk MTF and its impact on MWIR sensor performance // Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXVIII, Proc. of SPIE, 2017, vol. 10178. DOI:[10.1117/12.2262454](https://doi.org/10.1117/12.2262454)
10. Tristan M. Goss, Henning Fouriea, Johan W. Viljoena. SWIR sensor design considerations // Fifth Conference on Sensors, MEMS, and Electro-Optic Systems, Skukuza, South Africa, 2018. DOI:[10.1117/12.2501317](https://doi.org/10.1117/12.2501317)
11. Ajay Kumar. Sensor non uniformity correction algorithms and its real time implementation for infrared focal plane array-based thermal imaging system // Defence Science Journal, 2013, vol. 63, no. 6, pp. 589-598. DOI:[10.14429/DSJ.63.5768](https://doi.org/10.14429/DSJ.63.5768)

12. W. Wan. Passive IR Sensor Performance Analysis using Mathcad® Modeling // Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XX,2009, vol. 7300. DOI: [10.1117/12.815238](https://doi.org/10.1117/12.815238)
13. A. Theuwissen. How to measure the average dark signal? URL: <https://harvestimaging.com/blog/?p=795>
14. A. Theuwissen. How to measure the Fixed-Pattern Noise in Dark or DSNU (1). URL: <https://harvestimaging.com/blog/?p=814>
15. A. Theuwissen. How to measure the Fixed-Pattern Noise in Dark or DSNU (2). URL: <https://harvestimaging.com/blog/?p=838>
16. A. Theuwissen. How to measure the Fixed-Pattern Noise in Dark or DSNU (3). URL: <https://harvestimaging.com/blog/?p=849>
17. A. Theuwissen. How To Measure The Dark Shading? URL: <https://harvestimaging.com/blog/?p=866>
18. A. Theuwissen. How To Measure: Average Signal with Light Input. URL: <https://harvestimaging.com/blog/?p=909>
19. A. Theuwissen. How to Measure: Fixed-Pattern Noise in Light or PRNU (1). URL: <https://harvestimaging.com/blog/?p=916>
20. A. Theuwissen. How to Measure: Fixed-Pattern Noise in Light or PRNU (2). URL: <https://harvestimaging.com/blog/?p=937>
21. A. Theuwissen. How to Measure: Fixed-Pattern Noise in Light or PRNU (3). URL: <https://harvestimaging.com/blog/?p=959>
22. Зиновьев Ю.С., Мишина О.А., Захаров А.Ю., Хатанзейская М.А. Методика оценки характеристик обнаружения оптико-электронной системы ГЕОДСС наземного

References

1. Krasnov A.M., Tregubenkov S.Yu., Rumyantsev A.V., Khismatov R.F., Shashkov S.N. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy*, 2021, vol. 19, no 1, pp. 45-64. DOI: [10.18127/j20700814-202101-04](https://doi.org/10.18127/j20700814-202101-04)
2. Ronald G. Driggers, Melvin H. Friedman, Jonathan Nichols. *Introduction to Infrared Electro-Optical Systems*. Second Edition. Artech House, Boston, London, 2012, 599 p.
3. Gerald C. Holst. *Electro-Optical Imaging System Performance - sixth edition*. JCD Publishing and SPIE Press, 2017, 407 p.
4. Vollmerhausen R.H., Jacobs E. Driggers R.G. New metric for predicting target acquisition performance, *The International Society for Optical Engineering*, 2004, vol. 43, no. 11, pp. 2806–2818. DOI:[10.1117/12.487215](https://doi.org/10.1117/12.487215)
5. Brian P. Teaney, David P. Haefner. Evaluating the performance of an IR imaging system: a tutorial // Conference: Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIX26, April 2018. DOI: [10.1117/12.2303975](https://doi.org/10.1117/12.2303975)
6. Preece B., Olson J., Reynolds J., Fanning J., Haefner D. Human vision noise model validation for the U.S. Army sensor performance metric // *Optical Engineering*, 2014, vol. 53(6), pp. 061712. DOI:[10.1117/1.OE.53.6.061712](https://doi.org/10.1117/1.OE.53.6.061712)
7. Barten P. G. J. *Contrast Sensitivity of the Human Eye and Its Effects on Image Quality*, 1999, 232 p. DOI:[10.1117/3.353254](https://doi.org/10.1117/3.353254)

8. Bukhalev V.A., Boldinov V.A. *Trudy MAI*, 2017, no. 97. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=87283>
9. Tristan M. Goss and Cornelius J. Willers. Small pixel cross-talk MTF and its impact on MWIR sensor performance, *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXVIII*, Proc. of SPIE, 2017, vol. 10178. DOI:[10.1117/12.2262454](https://doi.org/10.1117/12.2262454)
10. Tristan M. Goss, Henning Fouriea, Johan W. Viljoena. SWIR sensor design considerations, *Fifth Conference on Sensors, MEMS, and Electro-Optic Systems*, Skukuza, South Africa, 2018. DOI:[10.1117/12.2501317](https://doi.org/10.1117/12.2501317)
11. Ajay Kumar. Sensor non uniformity correction algorithms and its real time implementation for infrared focal plane array-based thermal imaging system, *Defence Science Journal*, 2013, vol. 63, no. 6, pp. 589-598. DOI:[10.14429/dsj.63.5768](https://doi.org/10.14429/dsj.63.5768)
12. W. Wan. Passive IR Sensor Performance Analysis using Mathcad® Modeling // *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XX*, 2009, vol.7300. DOI: [10.1117/12.815238](https://doi.org/10.1117/12.815238)
13. A. Theuwissen. *How to measure the average dark signal?* URL: <https://harvestimaging.com/blog/?p=795>
14. A. Theuwissen. *How to measure the Fixed-Pattern Noise in Dark or DSNU (1)*. URL: <https://harvestimaging.com/blog/?p=814>
15. A. Theuwissen. *How to measure the Fixed-Pattern Noise in Dark or DSNU (2)*. URL: <https://harvestimaging.com/blog/?p=838>
16. A. Theuwissen. *How to measure the Fixed-Pattern Noise in Dark or DSNU (3)*. URL: <https://harvestimaging.com/blog/?p=849>

17. A. Theuwissen. *How To Measure The Dark Shading?* URL: <https://harvestimaging.com/blog/?p=866>
18. A. Theuwissen. *How To Measure: Average Signal with Light Input.* URL: <https://harvestimaging.com/blog/?p=909>
19. A. Theuwissen. *How to Measure: Fixed-Pattern Noise in Light or PRNU (1).* URL: <https://harvestimaging.com/blog/?p=916>
20. A. Theuwissen. *How to Measure: Fixed-Pattern Noise in Light or PRNU (2).* URL: <https://harvestimaging.com/blog/?p=937>
21. A. Theuwissen. *How to Measure: Fixed-Pattern Noise in Light or PRNU (3).* URL: <https://harvestimaging.com/blog/?p=959>
22. Zinov'ev Yu.S., Mishina O.A., Zakharov A.Yu., Khatanzeiskaya M.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 109. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=111397>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-16](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-16)

Статья поступила в редакцию 26.11.2021; одобрена после рецензирования 15.12.2021; принята к публикации 21.02.2022.

The article was submitted on 26.11.2021; approved after reviewing on 15.12.2021; accepted for publication on 21.02.2022.