

УДК 621.383  
EDN: VNHVNO

PACS: 52.70.Kz



## Исследование влияния топологических параметров фоточувствительного элемента в ФПУ второго поколения на погрешность измерения частотно-контрастной характеристики объективов

А. Д. Юдовская

*Исследовано влияние топологических параметров фотоприемного устройства (ФПУ) второго поколения на погрешность измерения частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) объектива при измерении качества изображения объектива. Проведены теоретические исследования путем математического моделирования для пятен рассеяния дифракционного качества и матричных ФПУ с различными коэффициентами фотоэлектрической связи (ФЭС) при различных функциях распределения чувствительности фоточувствительного элемента (ФЧЭ).*

*Ключевые слова:* погрешность измерения, пятно рассеяния, МФПУ, фотоэлектрическая связь, чувствительность ФЧЭ, ЧКХ.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-1-51-57

### Введение

В условиях современности наибольшую актуальность приобрела задача измерения пятен рассеяния инфракрасных (ИК) объективов с возможностью сохранения цифровой информации с целью последующего пересчета в ЧКХ и другие параметры исследуемого ИК-объектива. Современный уровень отработки технологии ФПУ второго поколения позволяют использовать их в качестве аналитического оборудования при проведении оптических измерений. Согласно [1] к фотоприемным устройствам второго поколения относятся ФПУ с БИС считывания форматом до  $1280 \times 1024$  элемента, каждый пиксель которого передает информацию только об уровне собственной облученности в одном спектральном диапазоне.

Ранее в АО «НПО «Орион» была проведена серия исследований [2–4], направленных на формирование требований к МФПУ как к анализатору изображения при проведении оптических измерений, послуживших основой при создании ГОСТ Р 59606-2021 [5] в части измерения пятен рассеяния оптических зондов. При проведении измерений пятен рассеяния объективов и оптических зондов согласно схеме, указанной в ГОСТ Р 59606-2021, важнейшими параметрами МФПУ, используемого в качестве анализатора изображения, являются шаг матрицы ФЧЭ, пороговая характеристика, геометрическая неоднородность элементов матрицы, динамический диапазон, а также такие топологические параметры матрицы, как фотоэлектрическая связь и распределение чувствительности по пикселю матрицы.

Преимуществами использования «смотрящих» матриц является возможность получения полнокадрового изображения исследуемого пятна рассеяния, отсутствие систем сканирования и необходимости использования сменных диафрагм для селекции дискретных областей освещенности в изображении светящейся точки (при использовании методов изофотометрии [6]). К недостаткам МФПУ следует отнести наличие фотоэлектрической

Юдовская Александра Дмитриевна, вед. инженер.

E-mail: tigris\_kisa@mail.ru

АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Статья поступила в редакцию 8.12.2023

После доработки 26.12.2023

Принята к публикации 11.01.2024

Шифр научной специальности: 2.2.6.

© Юдовская А. Д., 2024

связи между соседними элементами матрицы и нелинейность энергетической характеристики МФПУ при проведении измерений.

Фотоэлектрическая связь ФЧЭ обусловлена диффузией носителей заряда из облученного элемента в соседние и является трудноустраняемой для современных МФПУ, создаваемых по технологии гибридизации. Кроме того, при уменьшении шага матрицы наблюдается увеличение ФЭС из-за более высокой боковой диффузии носителей заряда [7]. ФЭС задается коэффициентом, который согласно [1] определяется как отношение напряжения сигнала с необлученного элемента в многоэлементном ФЭПП к напряжению фотосигнала с облученного элемента, определяемого на линейном участке энергетической характеристики.

Распределение чувствительности по ФЧЭ МФПУ также является топологическим параметром, требующим детального изучения, так как он может вносить дополнительную погрешность при проведении измерений. Таким образом, изучение влияния топологических параметров МФПУ (коэффициента ФЭС и распределения чувствительности по ФЧЭ МФПУ) на погрешность измерений при использовании ИК МФПУ в качестве анализатора изображения при измерении ЧКХ объектов, является актуальной задачей.

### Математическая модель

Для оценки погрешности, вносимой топологическими параметрами матричного анализатора, было проведено математическое моделирование работы оптико-электронного тракта, в том числе процесса приема и обработки сигнала матрицей ФЧЭ. В качестве объекта наблюдения было выбрано пятно рассеяния дифракционно-ограниченной оптической системы, распределение освещенности в котором описывается функцией [4]:

$$Inten(x) = \left( \frac{2 \cdot J_1(x)}{x} \right)^2 \quad (1)$$

где  $J_1(x)$  – функция Бесселя 1 порядка, имеющая главный максимум при  $x = 0$  и осциллирующей с постепенным уменьшением амплитуды.

Математическая модель МФПУ включает в себя набор параметров, характеризующих работу МФПУ как анализатора изображения: шаг ФЧЭ; распределение чувствительности по площадке ФЧЭ; коэффициент ФЭС; степень дискретизации сигнала по амплитуде.

На первом этапе распределение чувствительности по пикселю описывалось функцией  $rect(x)$ :

$$rect(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq \frac{p}{2}, \\ 0, & |x| > \frac{p}{2} \end{cases} \quad (2)$$

где  $p$  – ширина эффективной площадки пикселя.

В случае, когда чувствительность пикселя матрицы описывается прямоугольной функцией, значение энергии, падающей на каждый пиксель матрицы можно записать в виде интеграла:

$$En_i = \int_{T \cdot k_i - \frac{p}{2}}^{T \cdot k_i + \frac{p}{2}} Inten(x) dx \quad (3)$$

где  $En_i$  – количество энергии, попавшей на  $i$ -й пиксель матрицы;  $T$  – шаг матрицы;  $p$  – ширина эффективной площадки пикселя;  $Inten(x)$  – функция распределения энергии в пятне рассеяния, вычисленная по формуле (1).

На выходе получается строка дискретных сигналов  $En_i$ , полученных с каждого пикселя МФПУ. На рисунке 1 приведены диаграммы распределения сигнала по пикселям строки матрицы для МФПУ с фотоэлектрической связью с коэффициентом  $k_{ФЭС} = 15\%$  и МФПУ без ФЭС.

Из рисунка 1 видно, что наличие ФЭС в МФПУ приводит к перераспределению энергии в исследуемом пятне рассеяния и появлению сигнала в зонах дифракционных минимумов, что находит отражение и в ЧКХ исследуемой оптической системы. Для нахождения ЧКХ оптической системы, необходимо произвести прямое Фурье-преобразование исходной функции и взять её модуль [5]:

$$MTF(\omega) = \left| \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} En(x) \cdot e^{(-i\omega x)} dx \right| \quad (4)$$

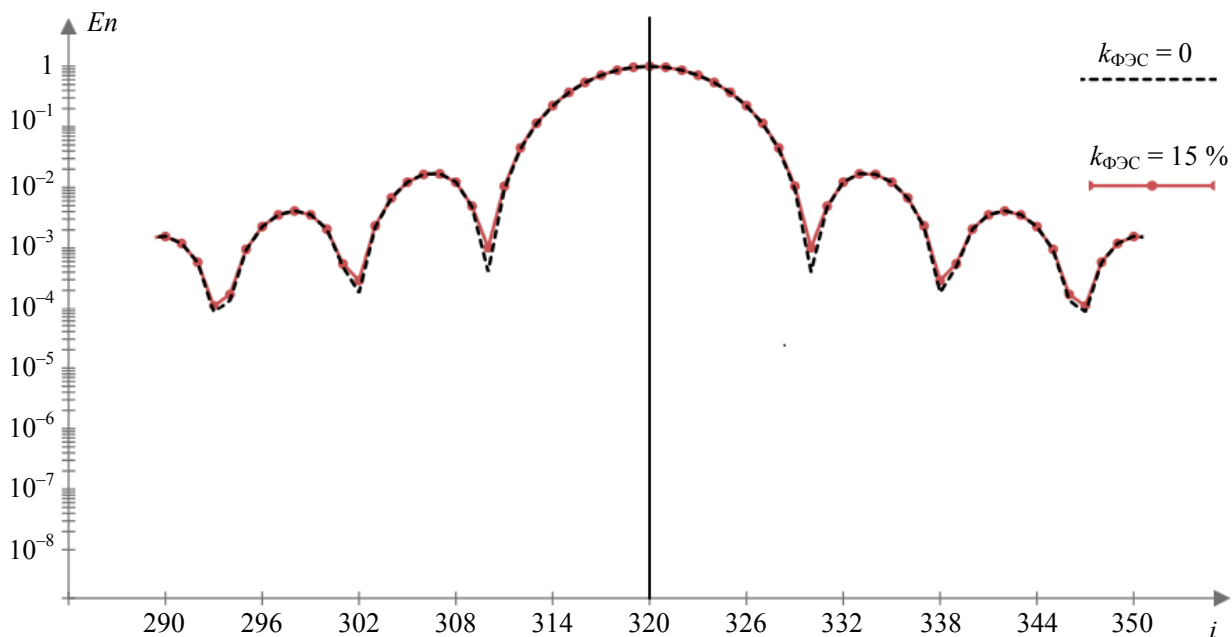


Рис. 1. Диаграмма распределения энергии для матрицы с ФЭС и без ФЭС

Использование программных пакетов типа MathCAD для проведения вычислений позволяет использовать встроенные функции дискретного преобразования Фурье, такие как CFFT и DFT, работающие с векторами или матрицами данных. Данные функции широко применяются в областях, связанных с анализом частот в дискретных сигналах и в алгоритмах цифровой обработки сигналов [6, 7] и использовались в данной работе для анализа частотного спектра дискретного сигнала. На рисун-

ке 2 представлены графики ЧКХ объектива, измеренные с помощью МФПУ с фотоэлектрической связью с коэффициентом  $k_{\text{ФЭС}} = 15\%$  и МФПУ без ФЭС. Масштаб исследуемого пятна рассеяния задан в соответствии с рекомендацией ГОСТ Р 59605-2021 и составляет 20 отсчетов матричного анализатора на центральную часть пятна рассеяния (в пределах кружка Эйри). Далее в статье будут приведены результаты и для других относительных масштабов пятен рассеяния и коэффициентов ФЭС.

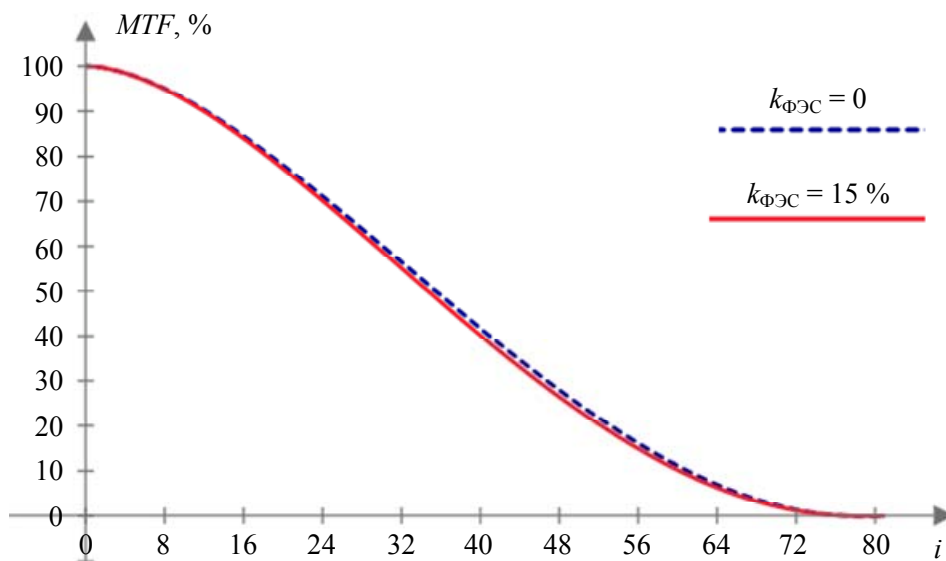


Рис. 2. Графики ЧКХ объектива, измеренные с помощью матрицы с ФЭС и без ФЭС

Наличие ФЭС в матричном анализаторе приводит к падению контраста на средних частотах в исследуемом сигнале. В результате график абсолютной погрешности измерения ЧКХ объектива будет иметь вид, как на рисунке 3, относительной погрешности измерения ЧКХ – на рисунке 4. С точки зрения автора, относительная погрешность измерения ЧКХ объектива является менее информативной, поскольку отражает максимальные значения погрешности в зоне частот, находящихся на пределе разрешения оптической системы, в то время как оценка качества оптических систем по графикам ЧКХ производится до уровня 0,1 от максимального контраста. Кроме того, для объективов с остаточными aberrациями график ЧКХ может иметь просадки в области средних частот, и вычисление относительной погрешности ЧКХ путем приведения абсолютной погрешности ЧКХ к её текущему значению может дать обманчивое представление о погрешности измерения.

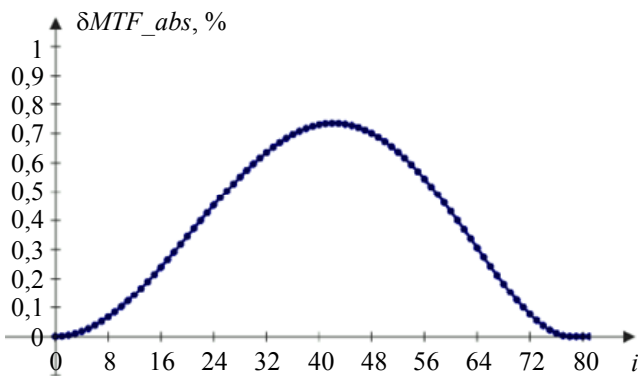


Рис. 3. График абсолютной погрешности измерения ЧКХ объектива ( $k_{ФЭС} = 15\%$ , пятно рассеяния занимает 20 пикселей МФПУ)

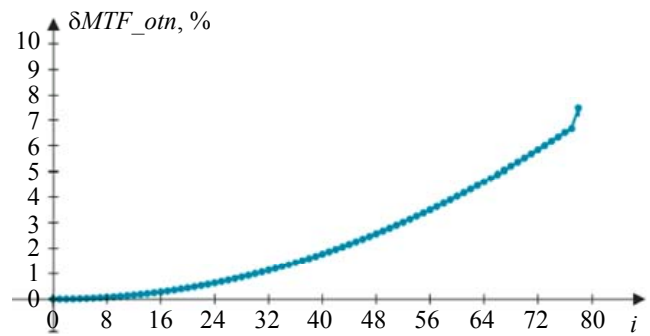


Рис. 4. График относительной погрешности измерения ЧКХ объектива ( $k_{ФЭС} = 15\%$ , пятно рассеяния занимает 20 пикселей МФПУ)

Стоит отметить, что согласно последним исследованиям [8], распределение чувствительности по площади пикселя матричного фотоприемника имеет куполообразную форму. В процессе математического моделирования было также исследовано влияние ФЭС для матрицы пикселей, чувствительность которых описывалась функцией Гаусса:

$$G(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (5)$$

где  $\sigma$  – коэффициент масштабирования гауссоиды по оси абсцисс;  $\mu$  – коэффициент сдвига по оси абсцисс.

На рисунке 5 показана диаграмма распределения чувствительности по пикселям матрицы в случае задания её через функцию Гаусса.

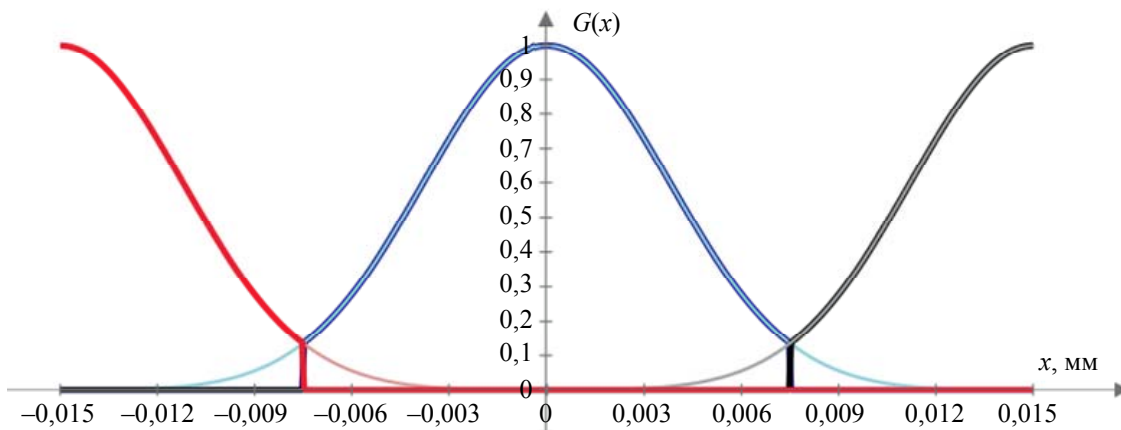


Рис. 5. Матрица Гауссоид

В таблице и на рисунке 6 представлены данные по максимальной абсолютной погрешности измерения ЧКХ объектива (в процентах) для различных коэффициентов  $k_{ФЭС}$  и различных относительных размеров пятен рассеяния на матрице ФЧЭ для площадок, заданных функциями  $rect(x)$  и  $G(x)$ .

Из таблицы следует, что разница между площадкой, описанной функцией  $rect(x)$  и функцией Гаусса становится заметна только для матрицы с коэффициентом ФЭС более 15 % при относительном размере пятна рассе-

яния менее 14 элементов матричного анализатора. Для меньших ФЭС и больших относительных размеров пятна рассеяния для удобства вычислений можно использовать функцию  $rect(x)$  при моделировании процессов приема и обработки информации ячейками МФПУ. Для пятен рассеяния, относительный размер которых превышает 16 пикселей МФПУ, погрешность, вносимая фотоэлектрической связью для  $k_{ФЭС}$  вплоть до 20 % при измерении ЧКХ не превышает 1,5 % (рис. 6).

Таблица

Максимальная абсолютная погрешность измерения ЧКХ объектива при описании чувствительности пикселя матрицы функцией $rect(x)$										
$k_{ФЭС}$	Относительный размер пятна рассеяния на матрице ФЧЭ, эл.									
	6 эл.	8 эл.	10 эл.	12 эл.	14 эл.	16 эл.	18 эл.	20 эл.	22 эл.	24 эл.
5 %	2,7	1,6	1,1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2
10 %	4,9	3,0	2,0	1,4	1,1	0,8	0,7	0,5	0,4	0,4
15 %	6,8	4,2	2,8	2,0	1,5	1,1	0,9	0,7	0,6	0,5
20 %	8,4	5,2	3,4	2,4	1,8	1,4	1,1	0,9	0,8	0,6

Максимальная абсолютная погрешность измерения ЧКХ объектива при описании чувствительности пикселя матрицы функцией Гаусса $G(x)$										
$k_{ФЭС}$	Относительный размер пятна рассеяния на матрице ФЧЭ, эл.									
	6 эл.	8 эл.	10 эл.	12 эл.	14 эл.	16 эл.	18 эл.	20 эл.	22 эл.	24 эл.
5 %	2,7	1,7	1,1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2
10 %	5,0	3,0	2,0	1,4	1,1	0,8	0,7	0,5	0,4	0,4
15 %	6,9	4,2	2,8	2,0	1,5	1,1	0,9	0,7	0,6	0,5
20 %	8,6	5,3	3,5	2,5	1,9	1,4	1,1	0,9	0,8	0,6

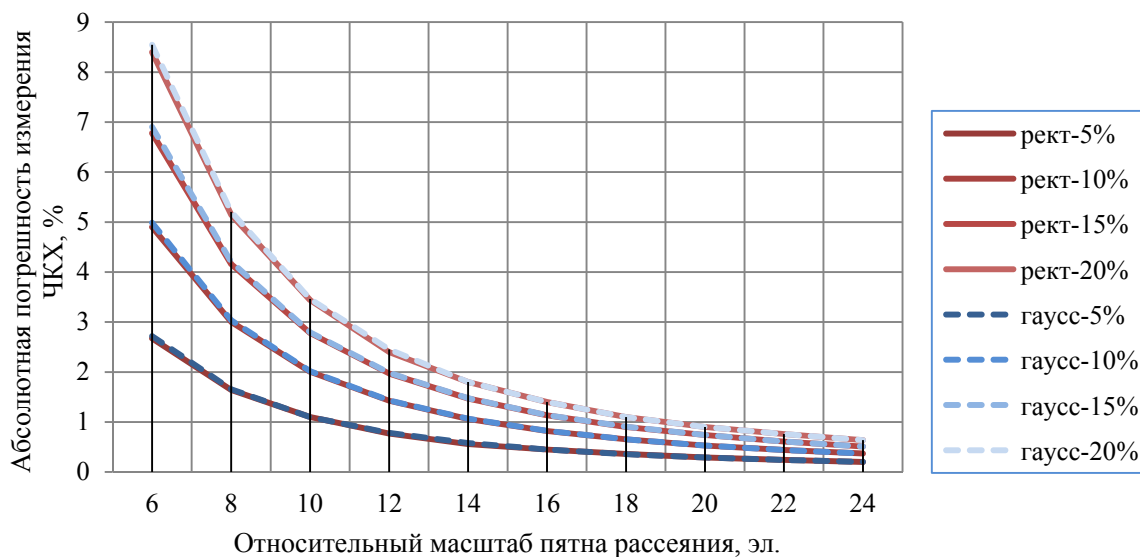


Рис. 6. Максимальная абсолютная погрешность измерения ЧКХ объектива

Согласно [9] значения фотоэлектрической связи ИК МФПУ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм составляет порядка 9–13 %. При использовании подобного МФПУ в качестве анализатора изображения при измерении пятен рассеяния объективов следует учитывать вносимую ФЭС погрешность измерений. Вклад систематической погрешности, вносимой ФЭС, в суммарную погрешность измерений можно определить с помощью математической модели, описанной выше.

### Заключение

Проведено исследование влияния топологических параметров МФПУ (фотоэлектрической связи и распределения чувствительности по пикселю), используемого в качестве анализатора изображения при проведении измерений ЧКХ объективов, на погрешность измерений. С помощью математического моделирования получены результаты, показывающие необходимость учета погрешности, вносимой ФЭС МФПУ при проведении измерений, особенно если относительный размер исследуемого пятна рассеяния на матричном анализаторе мал. Также показано, что форма функции распределения чувствительности по пикселю практически перестает влиять на погрешность измерений при условии достаточного масштабирования пятна рассеяния на матричном анализаторе. Показано, что использование МФПУ с коэффициентом ФЭС до 15 % в качестве анализатора изображения вносит погрешность не более 1,5 % при измерении ЧКХ объектива, если центральная часть

пятна рассеяния занимает не менее 16 пикселей МФПУ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 59605-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Оптика и фотоника. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения.
2. Полесский А. В., Юдовская А. Д. / Прикладная физика. 2017. № 3. С. 115.
3. Андосов А. И., Полесский А. В., Романова Т. Н., Юдовская А. Д., Трищенко М. А. / Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 5. С. 508.
4. Полесский А. В. / Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 350.
5. ГОСТ Р 59606-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Оптика и фотоника. Устройства фотоприемные второго и последующих поколений. Методы измерений фотоэлектрических параметров и определения характеристик.
6. Кирилловский В. К. Оптические измерения. Часть 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик. – СПб ГУ ИТМО, 2005.
7. Berthoz J., Grill R., Rubaldo L., Gravrand O., Kerlain A., Pere-Laperne N., Martineau L., Chabuel F., Leclercq D. / Journal of Electronic Materials. 2015. Vol. 44. № 9. P. 3157.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973.
9. Мосягин Г. М., Немтинов В. Б., Лебедев Е. Н. Теория оптико-электронных систем. – М.: Машиностроение, 1990.
10. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. Изд. 2-е. – СПб.: Питер, 2006.
11. Коберниченко В. Г. Основы цифровой обработки сигналов: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018.
12. Лопухин А. А., Болтарь К. О., Акимов В. М., Арбузов М. А. / Прикладная физика. 2021. № 5. С. 44–52.
13. Болтарь К. О., Власов П. В., Лазарев П. С., Лопухин А. А., Чижко В. Ф. / Прикладная физика. 2020. № 1. С. 18–24.

## Investigation of the influence the topological parameters of FPA's photosensitive element on the lenses' MTF measurement error

*A. D. Yudovskaya*

Orion R&P Association, JSC  
9 Kosinskaya st., Moscow, 111358, Russia  
E-mail: tigris\_kisa@mail.ru

*Received 8.12.2023; revised 26.12.2023; accepted 11.01.2024*

*The article is devoted to the study of the influence of the topological parameters of the second-generation photodetector on the measurement error of the Modulation Transfer Function (MTF) of the lens when evaluating the quality of the lens. Theoretical studies have been carried out by mathematical modeling for diffraction-quality scattering spots and FPA with different crosstalk coefficients at different sensitivity distribution functions of the photosensitive element.*

*Keywords:* measurement error, point spread function, FPA, crosstalk, sensitivity of the photosensitive element, MTF.

### REFERENCES

1. GOST R 59605-2021. Natsional'nyi standart Rossiiskoi Federatsii. Optika i fotonika. Priemniki iz-lucheniya poluprovodnikovye. Fotoelektricheskie i fotopriemnye ustroistva. Terminy i opredeleniya.
2. Poleskiy A. V. and Yudovskaya A. D., Applied Physics, № 3, 115 (2017) [in Russian].
3. Andosov A. I., Poleskiy A. V., Romanova T. N., Yudovskaya A. D. and Trishenkov M. A., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) 7 (5), 508 (2019) [in Russian].
4. Poleskiy A. V., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) 5 (4.), 350 (2017) [in Russian].
5. GOST R 59606-2021. Natsional'nyi standart Rossiiskoi Federatsii. Optika i fotonika. Ustroistva fotopriemnye vtorogo i posleduyushchikh pokolenii. Metody izmerenii fotoelektricheskikh parametrov i opredeleniya kharakteristik.
6. Kirillovskii V. K., Opticheskie izmereniya. Chast' 4. Otsenka kachestva opticheskogo izobrazheniya i izmereniya kharakteristik, SPb GU ITMO, 2005.
7. Berthoz J., Grill R., Rubaldo L., Gravrand O., Kerlain A., Pere-Laperne N., Martineau L., Chabuel F. and Leclercq D., Journal of Electronic Materials 44 (9), 3157 (2015).
8. Born M. and Vol'f E., Osnovy optiki, Moscow, Nauka, 1973.
9. Mosyagin G. M., Nemtinov V. B. and Lebedev E. N., Teoriya optiko-elektronnykh system, Moscow, Mashinostroenie, 1990.
10. Sergienko A. B., Tsifrovaya obrabotka signalov. Izd. 2-e., SPb, Piter, 2006.
11. Kobernichenko V. G., Osnovy tsifrovoi obrabotki signalov: ucheb. posobie, Ekaterinburg. Izd-vo Ural. un-ta, 2018.
12. Lopukhin A. A., Boltar K. O., Akimov V. M. and Arbuzov M. A., Applied Physics, № 5, 44–52 (2021) [in Russian].
13. Boltar K. O., Vlasov P. V., Lazarev P. S., Lopukhin A. A. and Chishko V. F., Applied Physics, № 1 (18–24) (2020) [in Russian].