

СРАВНЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ГИСТОГРАММ И МЕТОДА РАНЖИРОВАННЫХ АМПЛИТУД ПРИ АНАЛИЗЕ ШУМОВ ОДНОФОТОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Н.С. Перминов^{1,2}, М.А. Смирнов¹, Р.Р. Нигматуллин³, А.А. Талипов¹, С.А. Моисеев^{1,2}

¹ Казанский квантовый центр, КНИТУ-КАИ, Казань, Россия,

² Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН, Казань, Россия,

³ Кафедра радиоэлектроники и информационно-измерительной техники, КНИТУ-КАИ, Казань, Россия

Аннотация

Проведён сравнительный анализ возможностей метода гистограмм и метода последовательности ранжированных амплитуд при статистической параметризации работы однофотонного лавинного фотодетектора. Показано, что метод последовательности ранжированных амплитуд содержит в себе всю информацию, которую можно получить с помощью метода гистограмм, а также позволяет дать быстрое достоверное описание темновых отсчётов прибора для короткой (по сравнению с гистограммами) выборки из $\sim 10^3$ точек. Обнаруженные преимущества открывают перспективы внедрения метода последовательности ранжированных амплитуд в программное обеспечение высокочувствительных фотодетекторов.

Ключевые слова: шум, дискретная статистика, неинвазивный анализ, последовательности ранжированных амплитуд, лавинные фотодиоды.

Цитирование: Перминов, Н.С. Сравнение возможностей гистограмм и метода ранжированных амплитуд при анализе шумов однофотонных детекторов / Н.С. Перминов, М.А. Смирнов, Р.Р. Нигматуллин, А.А. Талипов, С.А. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 2. – С. 338-342. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-338-342.

Введение

Однофотонные детекторы на основе лавинных фотодиодов (ЛФД) активно применяются в локационных системах, квантовой оптике и коммуникациях [1]. Однако работу ЛФД в значительной мере осложняют темновые шумы, часть из которых (постимпульсные отсчёты) трудно устранить на практике [2]. Для характеристики работы ЛФД широко применяется ряд подходов [1], наиболее значимый из которых основан на построении гистограммы, редуцируемой из временных интервалов между отсчётами. При этом, в отличие от гистограммы, исходный набор временных интервалов содержит полную информацию о статистике отсчётов, необходимую для практического использования детектора.

В данной работе проводится сравнение метода гистограмм и метода последовательности ранжированных амплитуд (ПРА) [3] для количественной параметризации временных интервалов между темновыми отсчётами ЛФД. Метод ПРА уже демонстрировал свою эффективность при решении широкого круга задач дискретной статистики [4], возникающих в естественных науках. ПРА содержит в себе всю первоначальную информацию, полученную из исходного набора данных. На практике ПРА используется как промежуточное звено в построении гистограмм, в которых остаётся лишь часть исходной информации. Соответственно, метод, основанный на использовании ПРА, включает в себя всю информацию, которая используется в методе гистограмм. Ниже мы покажем, что метод ПРА позволяет намного быстрее характеризовать режим работы детектора, чем гистограммы, используя меньшую выборку данных.

1. Метод ПРА

Последовательность временных интервалов между отсчётами детектора $\{x_k\}$ ($k = \overline{1, N}$) всегда можно

распределить (ранжировать) по убыванию замеренных интервалов и получить ПРА вида $\{s_n\}$ ($s = \overline{1, N}$), где индекс n – порядковый номер уже в ПРА [3]. Очевидно, что по этому определению последовательность ПРА $\{s_n\}$ составлена ровно из тех же элементов, что и исходная последовательность $\{x_k\}$, поэтому ПРА является неинвазивной (без потери информации) статистической количественной характеристикой выборки данных [4]. ПРА связана с функцией распределения $F(x_n, N) = F(s_n, N)$ следующим приближённым соотношением (где N – размер выборки) [5,6]:

$$F(s_n, N) = (N + 1 - n(s_n)) / N. \quad (1)$$

Отметим также, что любые (даже негладкие и инфинитные) статистические функции (статистические средние по исходной выборке) от заданной выборки $\{x_k\}$ и ПРА $\{s_n\}$ строго совпадают. Математически это можно записать как условие

$$G[\{x_k\}] = \sum_{k=1}^N G(x_k) = \sum_{n=1}^N G(s_n) = G[\{s_n\}]$$

для любой функции $G(x)$, что касается и гистограммы как функции выборки. Таким образом, ПРА является натуральным способом представления данных, который сохраняет всю статистическую информацию о выборке.

Более того, дальнейшие исследования показывают, что если вычесть среднее от исходной выборки, а затем проинтегрировать её ПРА, то получится колоколообразная кривая, которая, как показывают исследования, хорошо подгоняется функцией $J_{x_n} = A(x_n - x_0)^\alpha (x_N - x_n)^\beta + B$. Подгоночные параметры функции J_{x_n} могут быть использованы для количественного описания случайных последовательностей без тренда, что с успехом было использовано в работе [7] для описания случайных флуктуаций расширенных временных рядов. Если возникает необходимость более детального описания, то

после вычитания среднего значения можно разбить исходную ПРА на две (положительную и отрицательную) ветви и описать количественно каждую ветвь по отдельности с помощью полиномиальной функции с нецелыми показателями. Простейшая из них имеет вид $Pr_n = A_0 + A_1 x_n^{\alpha_1} + A_2 x_n^{\alpha_2} + \dots$. Эта идея была с успехом применена в работе [8]. Поэтому метод ПРА, как следует из вышеизложенного, является весьма перспективным и гибким статистическим методом, применимым для количественного описания случайных последовательностей самой широкой природы, не имеющих явно выраженного тренда. Причём заметим, что истинная гистограмма исходной последовательности остаётся неизвестной, так как соотношение (1) остаётся приближённым, что подтверждается предыдущими исследованиями [5] и результатами этой работы при сравнении формулы (1) с реальными данными.

Гистограмма по своему определению приближается к плотности вероятности $\rho(x) = df/dx$ с ростом N , оставаясь инвазивной и не гладкой функцией (гладкость увеличивается с ростом N), зависящей от способа разбиения данных выборки. Шумы источников света и темновые шумы, соответствующие пуассоновским процессам [1], имеют плотность вероятности $\rho(x)$ для временных интервалов « x » между ближайшими отсчётами, описываемую распределением $df/dx = \rho(x) = \lambda \exp(-\lambda x)$, где λ – средняя частота фиксируемых событий. Для пуассоновских процессов ПРА описывается формулой [6] $s_n = \lambda^{-1} \ln(N/n)$, имеющей один свободный параметр λ . Для произвольного случая функция $F(x_n, N)$ может быть найдена из общего выражения (1).

2. Сравнительный анализ ПРА и гистограмм

Количественный анализ устойчивости метода к изменению размера выборки можно провести на основе коэффициента детерминации R^2 [4] или нормированной меры совпадения. Для Q подвыборок $\{x_{q,k}\}$ длины N , где $q = \overline{1, Q}$, $k = \overline{1, N}$, $\{y_k\} = \{Q^{-1} \sum_{q=1}^Q x_{q,k}\}$ – усреднённая выборка, $y = N^{-1} \sum_{k=1}^N y_k$ – полное среднее, относительный квадратичный (R^2 -подобный) коэффициент отклонения вида

$$\varepsilon(N) = Q^{-1} \sum_{k=1}^N \sum_{q=1}^Q (x_{q,k} - y_k)^2 / \sum_{k=1}^N (y_k - y)^2 \quad (2)$$

позволяет сравнить набор ПРА SPA $\{\{x_{q,k}\}\}$ длины N с набором гистограмм $Hist[\{x_{q,k}\}]$ ($m = 1, N_h$) оптимальной длины [11] $N_h(N) = [4(3(N-1)^2/4)^{1/5} div[1]$ (критерий Манна–Вильда). При этом очевидно, что $Hist[\{x_{q,k}\}] = HistSPA[\{x_{q,k}\}]$ и гистограмма является функцией уже только от ПРА и ПРА полностью включает гистограммы. Этот факт говорит о том, что из гистограмм по определению невозможно получить больше информации, чем из ПРА. И наоборот, ПРА содержит всю информацию о гистограмме. Ниже мы анализируем интервалы между темновыми отсчётами однофотонного детектора. Для эффективности детек-

тора ID210 (ID Quantique) 15% и мёртвого времени 24 μs была экспериментально получена выборка общей длины 10^5 точек. Из этой выборки формировался набор из $Q = 100$ подвыборок длины $N = 20j$ ($j = \overline{1, 50}$). Вычисляя отклонение ε из (2) для каждого N , в случае ПРА и гистограмм, соответствующих одинаковым подвыборкам, получим графики, изображённые на рис. 1.

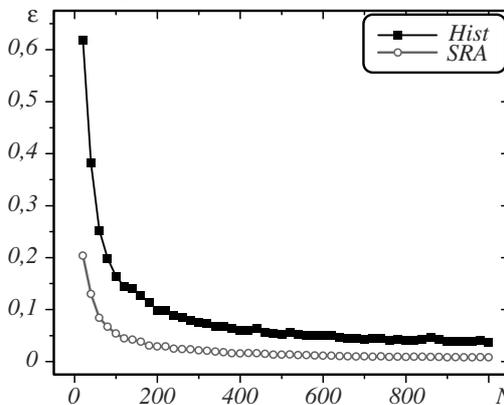


Рис. 1. Зависимость отклонения ε от N для ПРА (SRA – серые кружки) и гистограмм (Hist – чёрные квадратики)

Как видно из рис. 1, величина отклонения $\varepsilon(N)$ значительно меньше для метода ПРА, чем для гистограмм для любых значений N : $\varepsilon(10^3) = 0,0369$ для гистограммы и $\varepsilon(10^3) = 0,0078$ для ПРА, то есть отклонение ε оказывается в 4,7 раз меньше соответственно. Большое качественное различие наблюдается также и для других способов выбора параметра разбиений $N_h(N)$ в силу того, что гистограмма даже с максимальным параметром разбиений $N_h(N) = N/10$ (см. критерии в [11]) сокращает количество данных в статистическом анализе с N до $N/10$ точек, что обуславливает принципиальную инвазивность метода гистограмм. Существенным недостатком гистограмм, по сравнению с ПРА, является их зависимость от $N_h(N)$ (см. рис. 2).

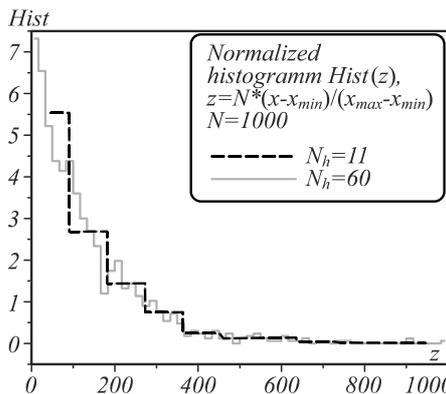


Рис. 2. Нормированные гистограммы $Hist(z)$, $z = N(x - x_{min}) / (x_{max} - x_{min})$, для первой подвыборки $\{x_k\}$ из рис. 1 для $N_h = 11$ (чёрная пунктирная кривая, критерий Стерджесса) и $N_h = 60$ (серая кривая, критерий Манна–Вильда) (более оптимальное разбиение)

Отметим, что выбор оптимального значения $N_h(N)$ не определяется универсальными критериями и явля-

ется отдельной проблемой для каждой конкретной физической задачи [11]. Для выборки с $N=10^3$, соответствующей рис. 2, и теоретической подгоночной кривой $p(x) = \lambda \exp(-\lambda x)$ для пуассоновских процессов, описанных выше, мы имеем меру отклонения $1-R^2=0,0125$ для оптимальной нормированной на среднее гистограммы ($N_h=60$, рис. 2) и $1-R^2=0,0043$ для нормированного на среднее ПРА (R^2 – коэффициент детерминации [4]).

То есть доля ошибок в задаче описания данных при использовании ПРА оказывается примерно в 3 раза меньше. Другим преимуществом ПРА по сравнению с гистограммами [3, 4] является выигрыш по скорости характеризации статистики отсчётов, что открывает важные перспективы внедрения метода ПРА в программное обеспечение высокочувствительной измерительной техники.

Заключение

Количественное сравнение методов гистограмм и ПРА демонстрирует значительные практические преимущества последнего метода для быстрого статического анализа шумов однофотонных детекторов благодаря возможности использования коротких выборок экспериментальных данных. Показано, что в этом случае метод ПРА содержит в себе всю информацию, которую можно получить с помощью метода гистограмм. В силу неинвазивности метод ПРА также применим в области идентификации различных источников сигналов [4, 10, 11] и шумов [6]. Продемонстрированные преимущества указывают на перспективы использования метода ПРА для высокоточной характеризации шумов однофотонных детекторов, что необходимо для проведения экспериментальных работ в области квантовой оптики, оптических квантовых вычислений и квантовых коммуникаций.

Благодарности

Исследования шумов в области фотоники и квантовых технологий были поддержаны грантом Правительства Российской Федерации, проект № 14.Z50.31.0040, 17 февраля 2017 г. (теоретическая часть). Работа также частично поддержана грантом РФФИ 16-32-60054 мол_а_дк (экспериментальная часть).

Литература

1. **Zhang, J.** Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication / J. Zhang, M.A. Itzler, H. Zbinden, J.W. Pan // *Light: Science & Applications*. – 2015. – Vol. 4(5). – e286. – DOI: 10.1038/lsa.2015.59.
2. **Cova, S.** Trapping phenomena in avalanche photodiodes on nanosecond scale / S. Cova, A. Lacaita, G. Ripamonti // *IEEE Electron Device Letters*. – 1991. – Vol. 12, Issue 12. – P. 685-687. – DOI: 10.1109/55.116955.
3. **Nigmatullin, R.R.** Fluctuation-noise spectroscopy and a “universal” fitting function of amplitudes of random sequences / R.R. Nigmatullin, G. Smith // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2003. – Vol. 320. – P. 291-317. – DOI: 10.1016/S0378-4371(02)01600-X.
4. **Baleanu, D.** New trends in nanotechnology and fractional calculus applications / ed. by D. Baleanu, Z.B. Güvenc, J.T. Machado. – New York: Springer, 2010. – 397 p. – ISBN: 978-90-481-3292-8.
5. **Nigmatullin, R.R.** Strongly correlated variables and existence of a universal distribution function for relative fluctuations / R.R. Nigmatullin // *Physics of Wave Phenomena*. – 2008. – Vol. 16, Issue 2. – P. 119-145. – DOI: 10.3103/S1541308X08020064.
6. **Smirnov, M.A.** Sequences of the ranged amplitudes as a universal method for fast noninvasive characterization of SPAD dark counts / M.A. Smirnov, N.S. Perminov, R.R. Nigmatullin, A.A. Talipov, S.A. Moiseev // *Applied Optics*. – 2018. – Vol. 57, Issue 1. – P. 57-61. – DOI: 10.1364/AO.57.000057.
7. **Nigmatullin, R.R.** Membrane current series monitoring: essential reduction of data points to finite number of stable parameters / R.R. Nigmatullin, R.A. Giniatullin, A.I. Skorinkin // *Frontiers in Computational Neuroscience*. – 2014. – Vol. 8. – 120. – DOI: 10.3389/fncom.2014.00120.
8. **Nigmatullin, R.R.** New methods of complex systems inspection: Comparison of the ADC device in different operating modes / R.R. Nigmatullin, Y.K. Evdokimov, E.S. Denisov, W. Zhang. – In book: *Computational Problems in Science and Engineering* / ed. by N. Mastrokakis, A. Bulucea, G. Tsekouras. – Chap. 9. – Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer, 2015. – P. 187-204. – DOI: 10.1007/978-3-319-15765-8_9.
9. **Орлов, Ю.Н.** Оптимальное разбиение гистограммы для оценивания выборочной плотности функции распределения нестационарного временного ряда / Ю.Н. Орлов // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2013. – 014. – 26 с.
10. **Спицын, В.Г.** Применение вейвлет-преобразования Хаара, метода главных компонент и нейронных сетей для оптического распознавания символов на изображениях в присутствии импульсного шума / В.Г. Спицын, Ю.А. Болотова, Н.Х. Фан, Т.Т.Ч. Буй // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 249-257. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-249-257.
11. **Умнов, А.В.** Исследование метода разреженных представлений для подавления эффекта ложного оконтуривания / А.В. Умнов, А.С. Крылов // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40, № 6. – P. 895-903. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-895-903.

Сведения об авторах

Перминов Николай Сергеевич, 1985 года рождения, в 2008 году окончил физический факультет Казанского федерального университета по направлению «Физика», работает младшим научным сотрудником в Казанском квантовом центре КНИТУ-КАИ. Область научных интересов: оптимальный контроль, квантовая информатика. E-mail: qm.kzn@ya.ru.

Смирнов Максим Александрович, 1990 года рождения, в 2013 году с отличием окончил магистратуру Института физики Казанского федерального университета по направлению «Физика», работает инженером в Ка-

занском квантовом центре КНИТУ-КАИ. Область научных интересов: нелинейная оптика, когерентная оптика, квантовые коммуникации, оптоэлектроника, фотоника. E-mail: maxim@kazanqc.org.

Нигматуллин Равиль Рашидович, 1947 года рождения, в 1970 году с отличием окончил физический факультет Казанского государственного университета и получил степень магистра в области теоретической физики. Доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры радиоэлектроники и информационно-измерительной техники КНИТУ-КАИ. Заслуженный деятель науки РТ. Область научных интересов: материаловедение, теоретическая и математическая физика, диэлектрическая спектроскопия, оптика и спектроскопия, электрохимия, математическая статистика. E-mail: renigmat@gmail.com.

Талипов Анвар Айратович, 1987 года рождения, в 2009 году окончил факультет радиоэлектроники и телекоммуникаций Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева по направлению «Телекоммуникации», работает старшим научным сотрудником в Казанском квантовом центре КНИТУ-КАИ. Область научных интересов: волоконная оптика, радиофотоника. E-mail: talipov.anvar@gmail.com.

Моисеев Сергей Андреевич, 1957 года рождения, в 1979 году с отличием окончил физический факультет Казанского государственного университета по направлению радиопизики. Доктор физ.-мат. наук, проф. кафедры радиофотоники и микроволновых технологий КНИТУ-КАИ, директор Казанского квантового центра КНИТУ-КАИ. Заслуженный деятель науки РТ. Область научных интересов: оптика и спектроскопия, когерентная нелинейная и квантовая оптика, квантовая информатика, квантовая память, квантовые коммуникации. E-mail: s.a.moiseev@kazanqc.org.

ГРПТИ: 29.31.29.

Поступила в редакцию 27 ноября 2017 г. Окончательный вариант – 23 января 2018 г.

COMPARISON OF THE CAPABILITIES OF HISTOGRAMS AND A METHOD OF RANGED AMPLITUDES IN NOISE ANALYSIS OF SINGLE-PHOTON DETECTORS

N.S. Perminov^{1,2}, M.A. Smirnov¹, R.R. Nigmatullin³, A.A. Talipov¹, S.A. Moiseev^{1,2}

¹Kazan Quantum Center, KNRTU-KAI, Kazan, Russia,

²Zavoisky Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia,

³Department of Radio-Electronics and Information-Measuring Technique, KNRTU-KAI, Kazan, Russia

Abstract

A comparative analysis of the method of histograms and the sequence of the ranged amplitudes (SRA) for statistical parametrization of the operation regime of a single-photon avalanche photodetector has been performed. It was shown that in addition to providing all the information that can be obtained using the histogram method, the SRA method also provides a quick and robust description of the dark counts of the detector for a shorter (compared to histograms) noise sample of $\sim 10^3$ points. The revealed advantages open prospects for introducing the SRA method in the software of high-sensitivity photodetectors.

Keywords: noise, discrete statistics, noninvasive analysis, SRA, SPAD.

Citation: Perminov NS, Smirnov MA, Nigmatullin RR, Talipov AA, Moiseev SA. Comparison of the capabilities of histograms and a method of ranged amplitudes in noise analysis of single-photon detectors. *Computer Optics* 2018; 42(2): 338-342. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-338-342.

Acknowledgements: This work was partly funded by the RF Government grant "Noise Analysis in Photonics and Quantum Technology" under project No. 14.Z50.31.0040 (Theoretical part) and by the Russian Foundation for Basic Research under grant 16-32-60054 mol_a_dk (Experimental part).

References

- [1] Zhang J, Itzler MA, Zbinden H, Pan JW. Advances in In-GaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication. *Light: Science & Applications* 2015; 4(5): e286. DOI: 10.1038/lsa.2015.59.
- [2] Cova S, Lacaita A, Ripamonti G. Trapping phenomena in avalanche photodiodes on nanosecond scale. *IEEE Electron Device Letters* 1991; 12(12): 685-687. DOI: 10.1109/55.116955.
- [3] Nigmatullin RR, Smith G. Fluctuation-noise spectroscopy and a "universal" fitting function of amplitudes of random sequences. *Phys A: Statist Mech Appl* 2003; 320: 291-317. DOI: 10.1016/S0378-4371(02)01600-X.
- [4] Baleanu D, Güvenç ZB, Machado JT, eds. *New trends in nanotechnology and fractional calculus applications*. New York: Springer; 2010. ISBN: 978-90-481-3292-8.
- [5] Nigmatullin RR. Strongly correlated variables and existence of a universal distribution function for relative fluctuations. *Physics of Wave Phenomena* 2008; 16(2): 119-145. DOI: 10.3103/S1541308X08020064.
- [6] Smirnov MA, Perminov NS, Nigmatullin RR, Talipov AA, Moiseev SA. Sequences of the ranged amplitudes as a uni-

- versal method for fast noninvasive characterization of SPAD dark counts. *Appl Opt* 2018; 57(1): 57-61. DOI:10.1364/AO.57.000057.
- [7] Nigmatullin RR, Giniatullin RA, Skorinkin AI. Membrane current series monitoring: essential reduction of data points to finite number of stable parameters, *Front Comput Neurosci* 2014; 8: 120. DOI: 10.3389/fncom.2014.00120.
- [8] Nigmatullin RR, Evdokimov YK, Denisov ES, Zhang W. New methods of complex systems inspection: Comparison of the ADC device in different operating modes. In Book: Mastorakis N, Bulucea A, Tsekouras G, eds. *Computational Problems in Science and Engineering*. Chap 9. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer; 2015: 187-204. DOI: 10.1007/978-3-319-15765-8_9.
- [9] Orlov YuN. Optimal histogram interval for non-stationary time-series distribution function density estimation. *Keldysh Institute Preprints* 2013; 014: 1-26.
- [10] Spitsyn VG, Bolotova YA, Phan NH, Bui TTT. Using a Haar wavelet transform, principal component analysis and neural networks for OCR in the presence of impulse noise. *Computer Optics* 2016; 40(2): 249-257. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-249-257.
- [11] Umnov AV, Krylov AS. Research of sparse representation method for ringing suppression. *Computer Optics* 2016; 40(6): 895-903. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-895-903.

Authors' information

Nikolay Sergeevich Perminov (b. 1985), in 2008 graduated from Physical faculty of Kazan Federal University in the direction "Physics". He is working as a junior researcher at the Kazan Quantum Center of the KNRTU-KAI. Research interests: optimal control, quantum informatics. E-mail: qm.kzn@ya.ru.

Maksim Aleksandrovich Smirnov (b. 1990), in 2013 graduated with honors from the Physics Institute of the Kazan Federal University in the direction "Physics", works as an engineer at the Kazan Quantum Center of the KNRTU-KAI. Research interests: nonlinear optics, coherent optics, quantum communications, optoelectronics, photonics. E-mail: maxim@kazanqc.org.

Raoul Rashidovich Nigmatullin (b. 1947), in 1970 graduated with honors from Physical faculty of Kazan State University and received a master's degree in theoretical physics. Doctor of Phys.-Math. Sciences, professor of Radio-electronics and Information-Measuring Techniques department of KNRTU-KAI. Honored Worker of Science of the Republic of Tatarstan. Research interests: materials science, theoretical and mathematical physics, dielectric spectroscopy, optics and spectroscopy, electrochemistry, mathematical statistics. E-mail: renigmat@gmail.com.

Anvar Ayratovich Talipov (b. 1987), in 2009 graduated from of Radio Electronics and Telecommunications faculty of A.N. Tupolev Kazan State Technical University, in the direction of "Telecommunications", he works as a senior researcher in the Kazan Quantum Center KNRTU-KAI. Research interests: fiber optics, radiophotonics. E-mail: talipov.anvar@gmail.com.

Sergey Andreevich Moiseev (b. 1957), in 1979 graduated with honors from Physical faculty of Kazan State University in the direction of Radiophysics. Doctor of Phys.-Math. Sciences, prof. of Radio-photonics and Microwave Technologies department, KNRTU-KAI, Director of the Kazan Quantum Center KNRTU-KAI. Research interests: optics and spectroscopy, quantum memory, quantum informatics, quantum communications, single-photon fields, nonlinear optics, soliton theory. E-mail: s.a.moiseev@kazanqc.org.

Received November 27, 2017. The final version – January 23, 2018.

Дизайн: Я.Е. Тахтаров. Оформление и верстка: М.А. Вахе, Е.В. Семиколенных, С.В. Смагин и Я.Е. Тахтаров.
Лит. редактор и корректор Ю.Н. Литвинова. Консультант по оформлению англоязычного блока М.И. Котляр.
E-mail: ko@smr.ru, <http://www.computeroptics.smr.ru>

Подписано в печать 20.04.2018 г. Усл. печ. л. 19,40.
Заказ № 11/2. Тираж 218 экз. Печать офсетная. Формат 62x84 1/8.
Цена: 550 рублей / Price of 550 rubles (6+)

Редакция: Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, (443010, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 151)
Соучредители: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва» (443086, г. Самара, Московское шоссе, д.34),
Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (117342, г. Москва, ул. Бултерова, д.17А)
Отпечатано в типографии ООО «Предприятие «Новая техника» (443013 г. Самара, пр-кт. Карла Маркса, 24-76)