Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича Міністерство освіти і науки України

Вінницький національний технічний університет Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

## ОДАЙСЬКА ХРИСТИНА САВЕЛІЇВНА

УДК 004.921; 004.932.4; 621.391.8; 621.397.42

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

# МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ВІЗУАЛЬНОЇ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ У КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело Х. С. Одайська

Науковий керівник:

Баловсяк Сергій Васильович, доктор техн. наук, доцент

Чернівці – 2020

#### АНОТАЦІЯ

*Одайська Х. С.* Методи та засоби підвищення візуальної якості зображень у комп'ютеризованих оптико-електронних системах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – "Комп'ютерні системи та компоненти". – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2020.

Дисертаційну роботу присвячено розробленню математичних моделей, методів і програмно-апаратних засобів підвищення візуальної якості формування зображень, що дозволило одержати нове рішення важливого науково-технічного завдання підвищення точності та швидкодії оброблення зображень у комп'ютеризованих оптико-електронних системах (КОЕС), які як джерело початкових зображень використовують цифрові відеокамери.

Важливим етапом оброблення зображень у комп'ютеризованих і комп'ютерних системах є підвищення їх візуальної якості, яка кількісно описується, зокрема, співвідношенням сигнал/шум (ВСШ). Висока якість формування зображень необхідна ïχ коректного оброблення ДЛЯ В комп'ютерних системах (КС), наприклад, у КС медичної та технічної діагностик, КС розпізнавання облич. Підвищення якості зображень виконується, наприклад, шляхом зниження рівня шуму й адаптивної зміни параметрів відеокамер. У сучасних комп'ютерних системах висока якість зображень є необхідною умовою для ефективного виконання таких важливих етапів їх оброблення: візуалізації, сегментації, розпізнавання, підготовки до якісного фотодруку, передавання по комп'ютерним мережам та ін. Завдання зниження рівня шуму € важливим для практики, оскільки на експериментальних зображеннях, отриманих y КОЕС 3a допомогою фоточутливих матриць (ФМ), у більшості випадків присутній шум, наприклад,

гаусовий. Значні рівні шуму на цифрових зображеннях часто спричинюються за рахунок зменшення розмірів елементів ФМ, оскільки існує тенденція до збільшення кількості пікселів ФМ при збереженні фізичних розмірів матриць.

Для отримання максимального співвідношення сигнал/шум зображень при їх фільтрації потрібне точне значення рівня шуму. Проте, існуючі методи та апаратно-програмні засоби визначення рівня шуму мають обмежену точність і швидкодію, а сучасні методи фільтрації зображень у КОЕС у загальному випадку забезпечують ВСШ, яке менше за теоретично можливе. Це зменшує точність результатів для прикладних задач оброблення зображень. Крім цього, швидкодія існуючих методів та засобів є недостатньою для цифрового оброблення зображень у КОЕС медичної діагностики в режимі реального часу. З цієї причини завдання вдосконалення методів і засобів зниження рівня шуму на зображеннях є актуальним.

Процес апаратного оброблення зображень у КОЕС регулюється такими параметрами цифрових відеокамер, як «Яскравість», «Контраст» та ін. Проте, параметри відеокамери за замовчуванням звичайно не забезпечують максимального співвідношення сигнал/шум для експериментальних зображень. Це призводить до зниження ВСШ зображень, отриманих, наприклад, у системах відеоспостереження. В той же час, налаштування параметрів відеокамер у ручному режимі є трудомістким процесом. Тому актуальним завданням є розроблення високоточних методів і засобів для адаптивної зміни параметрів відеокамер.

Прикладне науково-технічне завдання полягає в розробленні високоточних і швидкодійних програмно-апаратних засобів комп'ютеризованих систем, призначених для підвищення візуальної якості зображень шляхом зниження їх рівня шуму та адаптивної зміни параметрів відеокамер.

Запропоновано архітектуру КОЕС для підвищення якості формування зображень, яка як джерело початкових зображень використовує цифрові відеокамери. Згідно із запропонованою архітектурою комп'ютеризована система складається з підсистем визначення рівня шуму, фільтрації шуму та адаптивної зміни параметрів відеокамер. Запропонована архітектура комп'ютеризованої системи передбачає спільне застосування високоточної підсистеми визначення рівня шуму як при його фільтрації, так і при зміні параметрів відеокамер, що дозволяє уникнути дублювання блоків КОЕС, а також збільшити ВСШ на оброблених зображеннях.

Підсистему визначення рівня шуму  $\sigma_{NE}$  на зображеннях реалізовано на основі запропонованих методів LLROI та HLROI. Метод LLROI (Low-pass & Low-pass filtration & Region Of Interest) засновано на низькочастотній фільтрації шумової складової та низькочастотній фільтрації при виділенні ділянки інтересу зображення ROI. Метод HLROI (High-pass & Low-pass filtration & Region Of Interest) засновано на високочастотній фільтрації при виділенні шумової складової та низькочастотній фільтрації при виділенні ділянки інтересу. Характерною особливістю запропонованих методів є врахування (за допомогою емпіричних формул) статистичних характеристик гаусового шуму при виділенні ділянок інтересу на зображеннях, на яких переважає такий шум. Це дозволило підвищити точність визначення СКВ шуму до 30% і збільшити співвідношення сигнал/шум для фільтрованих зображень. Показано, що за точністю метод HLROI незначно переважає метод LLROI. На основі запропонованих методів створено програми в системі MATLAB, синтезовано структури КОЕС та їх Simulink-моделі, розроблено структурні схеми блоків підсистеми. Апаратна реалізація блоків фільтрації зображень у КОЕС виконана засобами ПЛІС (FPGA) Artix-7, що дозволило на порядок підвищити швидкодію роботи системи та виконувати оброблення не тільки окремих (статичних) зображень, але й кадрів відеопотоку в режимі реального часу.

Реалізовано програмно-апаратні засоби підсистеми зменшення рівня шуму на цифрових зображеннях. Для цього розроблено математичну модель і метод автоматичної фільтрації шуму на зображеннях за допомогою фільтра Гауса, особливістю якого є обчислення усереднених амплітудних і частотних параметрів корисного сигналу на основі енергетичного спектра зображення. Оптимальне значення СКВ ядра фільтра отримано як значення, при якому мінімізується СКВ яскравості фільтрованого зображення від яскравості корисного сигналу. На основі запропонованого методу реалізовано програмні засоби в системі Matlab, синтезовано структуру КОЕС фільтрації шуму на зображеннях, розроблено структурні схеми основних блоків КОЕС. Точність розробленого методу фільтрації перевірено при зменшені рівня шуму на множині з 100 тестових зображень. Показано, що розроблений метод є квазіоптимальним, оскільки обчислені значення пікового ВСШ у середньому менші за оптимальні на 0.14 дБ. Швидкодія розробленого методу більш ніж у 2 рази вища за швидкодію методів-аналогів, які володіють співрозмірною точністю.

Розроблено методи адаптивної зміни параметрів «Яскравість» і «Контраст» комп'ютеризованих Ha відеокамер системах. основі V запропонованих методів розроблено апаратні та програмні засоби для підсистеми адаптивної зміни параметрів відеокамер, синтезовано структуру КОЕС та її Simulink-модель, а також розроблено структурні схеми блоків підсистеми. Розроблено програму в системі МАТLAB, призначену для адаптивної зміни параметрів відеокамери на основі критеріїв якості зображень  $K_V$ . Критерії якості зображень  $K_V$  побудовано на основі ВСШ з врахуванням насичення зображення (параметр  $R_A$ ) та ВСШ з обмеженнями на екстремальні значення сигналу (параметр  $R_L$ ). Точність розроблених методів перевірено при адаптивній зміні параметрів трьох моделей відеокамер, при цьому отримано збільшення ВСШ до 1.4 дБ у порівнянні з аналогами та високу якість для отриманих зображень. Показано, що комплексне використання критеріїв якості  $R_A$  та  $R_L$  забезпечує вищу точність адаптивної зміни параметрів відеокамер, порівняно з використанням окремих критеріїв.

Розроблено метод і програмні засоби для визначення рівня шуму зображень з використанням паралельних обчислень, що у випадку двохядерних процесорів забезпечує збільшення швидкодії до 1.5 разів.

Комп'ютерне моделювання, експериментальні дослідження та розроблених програмно-апаратних засобів впровадження y комп'ютеризованих системах підтвердили адекватність розроблених математичних моделей і ефективність запропонованих методів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на основі запропонованих математичних моделей і методів розроблено:

- прикладне програмне забезпечення в системі МАТLAВ для визначення рівня шуму, яке використовує низькочастотну та високочастотну фільтрації зображень, завдяки чому отримано вищу точність оцінки якості зображень, ніж для програм-аналогів;

програмні засоби в системі МАТLAВ для підвищення якості зображень у комп'ютеризованій системі шляхом зменшення рівня шуму, які використовують фільтр Гауса та виконують аналіз енергетичних спектрів зображень, що забезпечують квазіоптимальну якість фільтрованих зображень згідно з критерієм ВСШ і можуть використовуватися в системах відеоспостереження й автоматичної фільтрації цифрових зображень, системах розпізнавання зображень облич і візуального контролю виробничих процесів, тощо;

- апаратні засоби на основі FPGA для цифрової фільтрації зображень, отриманих за допомогою відеокамер, що забезпечило на порядок вищу швидкодію фільтрації та дозволило виконувати оброблення не тільки окремих (статичних) зображень, але й кадрів відеопотоку в режимі реального часу;

- програмно-апаратні засоби для адаптивної зміни параметрів «Яскравість» і «Контраст» цифрових відеокамер у КОЕС відповідно до умов освітленості сцени, завдяки чому отримано зображення з відеокамер із вищим ВСШ, ніж при використанні налаштувань камер за замовчуванням.

Розроблені програмно-апаратні засоби практично використані при фільтрації зображень та адаптивній зміні параметрів цифрових відеокамер в ІТ-компанії «Юкон-Софтваре» (м. Чернівці).

Ключові слова: комп'ютеризовані оптико-електронні системи, цифрове оброблення зображень, цифрова відеокамера, якість зображення, співвідношення сигнал/шум, фільтрація гаусового шуму, енергетичний спектр, адаптивна зміна параметрів відеокамери, ПЛІС, паралельні обчислення.

#### ABSTRACT

*Odaiska Kh. S.* Methods and means for enhancing the visual quality of images in computerized optoelectronic systems. – Qualification research on the rights of manuscript.

Dissertation for the scientific degree of Ph.D. of Technical Sciences in specialty 05.13.05 "Computer systems and components". – Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2020.

The dissertation is devoted to the development of mathematical models, software and hardware means and methods to improve the visual quality of images formation, which allowed obtaining a new solution to the important scientific and technical problem of improving the accuracy and speed of image processing in computerized optoelectronic systems (COES), which use digital video cameras as the source of the original images.

An important step in image processing in computerized and computer systems is to improve their visual quality, which is quantified, in particular, the signal-to-noise ratio (SNR). High quality image formation is necessary for their correct processing in computer systems (CS), for example, in the CS of medical and technical diagnostics, the CS of face recognition. Image quality improvement is carried out, for example, by reducing noise and adaptive change of camcorder's settings. In modern computer systems, high image quality is a necessary condition for the effective implementation of the following important stages of their processing: visualization, segmentation, recognition, preparation for high-quality photo printing, transmission over computer networks, etc. The task of noise reducing is important for practice, as in experimental images obtained at COES using photosensitive matrices (PM), in most cases noise is present, such as Gaussian. Significant levels of noise in digital images are often caused by the size reduction of the PM elements, as there is a tendency to raise in number of PM pixels while maintaining the physical size of the matrices.

To obtain the maximum signal-to-noise ratio of images while filtering them, the exact value of the noise level is required. However, existing methods and software and hardware means for determining the noise level have limited accuracy and speed, and modern methods of image filtering in COES generally provide SNR, which is less than theoretically possible. This reduces the accuracy of the results for applied image processing tasks. In addition, the speed of existing methods and tools is insufficient for digital image processing in COES of medical diagnostics in real time. For this reason, the task of improving methods and means of reducing noise in images is relevant.

The process of computer image processing in COES is regulated by such parameters of digital video cameras as "Brightness", "Contrast" and others. However, the default camcorder settings usually do not provide the maximum signal-to-noise ratio for experimental images. This leads to a decrease in the SNR of images obtained, for example, in video surveillance systems. At the same time, adjusting the settings of camcorders manually is a time consuming process. Therefore, the relevant task is to develop high-precision methods and tools for adaptive changes in the parameters of video cameras.

The applied scientific and technical task is to develop high-precision and high-speed software and hardware means of computerized systems designed to improve the visual quality of images by reducing their noise level and adaptively changing the parameters of video cameras.

The COES architecture is offered to improve the quality of image formation, which uses digital video cameras as a source of initial images. According to the offered architecture, the computerized system consists of subsystems for determining the noise level, noise filtering and adaptive change of camera settings. The proposed architecture of the computerized system provides for the joint use of a high-precision subsystem for determining the noise level both when filtering and changing the parameters of video cameras, which avoids duplication of COES units, as well as increase the SNR in the processed images.

The subsystem for determining the noise level  $\sigma_{NE}$  in the images is implemented on the basis of the offered LLROI and HLROI methods. The LLROI (Low-pass & Low-pass filtration & Region Of Interest) method is based on lowpass filtering of the noise component and low-frequency filtering when selecting the area of interest of the ROI image. The HLROI (High-pass & Low-pass filtration & Region Of Interest) method is based on high-frequency filtering when selecting the noise component and low-frequency filtering when selecting the area of interest. A characteristic feature of the proposed methods is to take into account (using empirical formulas) the statistical characteristics of Gaussian noise when selecting areas of interest in images in which such noise predominates. This allowed to increase the accuracy of determination of noise standard deviation to 30% and increase the signal-to-noise ratio for filtered images. It is shown that the accuracy of the HLROI method slightly exceeds the LLROI method. On the basis of the offered methods programs in the MATLAB system are created, structures of COES and their Simulink-models are synthesized, structural schemes of blocks of a subsystem are developed. Hardware implementation of image filtering units in COES is made by PLD (FPGA) Artix-7, which allowed to increase the speed of the system and process not only individual (static) images, but also frames of the video stream in real time.

The software and hardware means of the subsystem of noise reduction in digital images are implemented. To do this, a mathematical model and method of automatic noise filtering in images using a Gaussian filter, a feature of which is the calculation of the average amplitude and frequency parameters of the useful signal based on the energy spectrum of the image. The optimal value of the standard deviation of the filter core is obtained as a value at which the standard deviation of the brightness of the filtered image is minimized from the brightness of the useful signal. Based on the proposed method, software was implemented in the Matlab system, the structure of COES of noise filtering on images was synthesized, structural diagrams of the main blocks of COES were developed. The accuracy of the developed filtering method was tested by reducing the noise level on a set of 100 test images. It is shown that the developed method is quasi-optimal, since the calculated values of peak SNR are on average less than optimal by 0.14 dB. The speed of the developed method is more than 2 times higher than the speed of analog methods that have proportional accuracy.

Methods of adaptive change of parameters of "Brightness" and "Contrast" of video cameras in computerized systems are developed. On the basis of the offered methods the hardware and software for the subsystem of adaptive change of parameters of video cameras are developed, the structure of COES and its Simulink-model is synthesized, and also the structural schemes of subsystem blocks are developed. A program in the MATLAB system has been developed, designed to adaptively change the parameters of the camcorder based on the quality criteria of  $K_V$  images.  $K_V$  image quality criteria are based on SNR taking into account image saturation (parameter  $R_A$ ) and SNR with restrictions on extreme signal values (parameter  $R_L$ ). The accuracy of the developed methods was checked by adaptive change of parameters of three models of video cameras, at the same time increase of SNR to 1.4 dB in comparison with analogs and high quality for the received images is received. It is shown that the integrated use of quality criteria  $R_A$  and  $R_L$  provides higher accuracy of adaptive change of video camera parameters, compared to the use of individual criteria.

A method and program means have been developed to determine the noise level of images using parallel calculations, which in the case of dual-core processors provides an increase in speed up to 1.5 times.

Computer modeling, experimental research and implementation of developed software and hardware in computerized systems have confirmed the adequacy of the developed mathematical models and the effectiveness of the proposed methods. The practical significance of the obtained results is that on the basis of the proposed mathematical models and methods developed:

- application software in the MATLAB system for noise level determination, which uses low-frequency and high-frequency image filtering, due to which a higher accuracy of image quality assessment is obtained than for analog programs;

- MATLAB computerized means to improve image quality in a computerized system by reducing noise, using a Gaussian filter and analyzing the energy spectra of images that provide quasi-optimal quality of filtered images according to the SNR criterion and can be used in video surveillance and automatic filtering digital images, face recognition systems and visual control of production processes, etc.;

- FPGA-based hardware for digital filtering of images obtained with the help of video cameras, which provided an order of magnitude higher filtering speed and allowed processing not only individual (static) images, but also frames of the video stream in real time;

- software and hardware means for adaptive change of parameters of "Brightness" and "Contrast" of digital video cameras in COES according to conditions of illumination of a scene thanks to what the image from video cameras with higher SNR, than at use of settings of cameras by default is received.

Developed software and hardware means are practically used in image filtering and adaptive change of parameters of digital video cameras in the IT company "Yukon-Software" (Chernivtsi).

**Keywords:** computerized optoelectronic systems, digital image processing, digital video camera, image quality, signal to noise ratio, Gaussian noise filtering, energy spectrum, optimization of video cameras parameters, FPGA, parallel computing.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Автоматичне визначення рівня гаусового шуму на цифрових зображеннях методом виділених областей", *Кибернетика и вычислительная техника*, т. 189, № 3, с. 44-60, 2017. doi: 10.15407/kvt189.03.044.
- [2] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Автоматичне видалення гаусового шуму на цифрових зображеннях за допомогою квазіоптимального фільтра Гауса", *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, № 3 (83), с. 26-35, 2017.
- [3] S. V. Balovsyak, and Kh. S. Odaiska, "Automatic Highly Accurate Estimation of Gaussian Noise Level in Digital Images Using Filtration and Edges Detection Methods", *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing* (*IJIGSP*), vol. 9, no. 12, pp. 1-11, 2017. doi: 10.5815/ijigsp.2017.12.01.
- [4] S. V. Balovsyak, and Kh. S. Odaiska, "Automatic Determination of the Gaussian Noise Level on Digital Images by High-Pass Filtering for Regions of Interest", *Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 54, no. 4, pp. 662-670, 2018. https://doi.org/10.1007/s10559-018-0067-3.
- [5]S.V. Balovsyak, and Kh.S. Odaiska, "Hardware and Software Complex for Automatic Level Estimation and Removal of Gaussian Noise in Images", Advances in Computer Science for Engineering and Education, ICCSEEA 2018, Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 754, pp.144-154, 2019. doi: 10.1007/978-3-319-91008-6\_15.
- [6]С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Оцінка рівня Гаусового шуму на цифрових зображеннях за допомогою виділення області інтересу методом сегментації", *Науковий вісник Чернівецького національного університету. Комп'ютерні системи та компоненти*, т. 7, № 1, с. 92-99, 2016.
- [7] С. В. Баловсяк, Х. С. Одайська, та Н. В. Рощупкіна, "Визначення рівня гаусового шуму на цифрових зображеннях методом фільтрації", *Науковий вісник Чернівецького національного університету. Комп'ютерні системи та компоненти*, т. 7, № 2, с. 75-82, 2016.

- [8] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Реконструкція зображень символів за допомогою штучних нейронних мереж на основі аналізу локальних областей", на Ш Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» "ПІКТ 2014", Чернівці, 2014, с. 99-101.
- [9] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Метод автоматичної просторовооднорідної фільтрації зображень з Гаусовим шумом", на *IV Міжнар. наук.практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» "ПІКТ* – 2015 ", Чернівці, 2015, с. 151-153.
- [10] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Визначення оптимальної дисперсії ядра фільтра Гауса при фільтрації Гаусового шуму на зображеннях з однією просторовою частотою корисного сигналу", на V Міжнар. наук.практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» "ПІКТ – 2016", Чернівці, 2016, с. 133-135.
- [11] S. V. Balovsyak, and Kh. S. Odaiska, "Automatic estimation of Gaussian noise level in digital images by methods of low-pass and high-pass filtrations", in VI International Scientific Practical Conference (I International Symposium) "Practical Application of Nonlinear Dynamic Systems for Infocommunication", Chernivtsi, Ukraine, 2017, pp. 79-80.
- [12] С. В. Баловсяк, Х. С. Одайська, та О. С. Чуб, "Обчислення рівня гаусового шуму для фотосенсорів веб-камер методами низькочастотної фільтрації зображень", на *II Всеукр. наук.-практ. конф. «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем» MEICS-2017*, Дніпро, 2017, с. 104-105.
- [13] С. В. Баловсяк, Х. С. Одайська, та О. В. Фочук, "Розпаралелювання обчислень при визначенні рівня гаусового шуму на цифрових зображеннях", на VII Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» "ПІКТ – 2018", Чернівці, 2018, с. 76-78.

- [14] С. В. Баловсяк, С. Л. Воропаєва, С. О. Летучий, та Х. С. Одайська, "Апаратно-програмний комплекс для автоматичного вибору параметрів відеокамер з використанням паралельних обчислень", на VII Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» "ПІКТ – 2018", Чернівці, 2018, с. 116-118.
- [15] S. V. Balovsyak, O. V. Derevyanchuk, I. M. Fodchuk, O. P. Kroitor, Kh. S. Odaiska, and O. O. Pshenychnyi, "Adaptive oriented filtration of digital images in the spatial domain", *in Intern. Scientific and Technical Internet Conf. "Computer Graphics and Image Recognition"*, Vinnytsya, Ukraine, 2018, vol. 2, pp. 5-10.
- [16] Х.С. Одайська, та С.В. Баловсяк, Комп'ютерна програма "Визначення рівня гаусового шуму на зображеннях", ("GaussNoise18"), *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, № 91159*, 31.07.2019.
- [17] Х.С. Одайська, та С.В. Баловсяк, Комп'ютерна програма "Видалення гаусового шуму на зображеннях фільтром Гауса", ("GNoiseFilter18"), *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, № 91158*, 31.07.2019.
- [18] Х.С. Одайська, та С.В. Баловсяк, Комп'ютерна програма "Налаштування параметру "Яскравість" цифрової відеокамери", ("VideoParameter18"), Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, № 91160, 31.07.2019.

# **3MICT**

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	. 17
ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ВІЗУАЛЬНОЇ	
ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ У КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ ОПТИКО-	
ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ	26
1.1 Комп'ютеризовані системи формування та оброблення	
цифрових зображень	27
1.2 Аналіз побудови та принципів роботи відеокамер	35
1.3 Методи та засоби підвищення якості зображень	
у комп'ютеризованих системах	. 42
1.4 Вибір напряму й обґрунтування завдань досліджень	. 50
Висновки до розділу 1	52
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИ	Х
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ВІЗУАЛЬНОЇ	
ЯКОСТІ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ	.53
2.1 Архітектура та функції комп'ютеризованої системи	
для підвищення візуальної якості формування зображень	. 54
2.2 Математична модель процесу фільтрації зображень,	
сформованих у фоточутливих матрицях відеокамер	. 59
2.3 Метод визначення рівня шуму зображень з використанням	
їх низькочастотної фільтрації	. 64
2.4 Метод визначення рівня шуму зображень з використанням	
їх високочастотної фільтрації	. 72
2.5 Метод квазіоптимальної фільтрації вихідного сигналу відеокамер	)
за допомогою фільтра Гауса	. 79
Висновки до розділу 2	. 91
РОЗДІЛ З ПРОГРАМНО-АПАРАТНІ ЗАСОБИ ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ	
ШУМУ ЗОБРАЖЕНЬ У КОМП'ЮТЕРИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ	. 92
3.1 Програмно-апаратні засоби для визначення рівня шуму	93

3.2 Програмно-апаратні засоби для фільтрації шуму	108
3.3 Експериментальні дослідження запропонованих методів та зас	обів
визначення рівня шуму на зображеннях	112
3.4 Експериментальні дослідження розробленого методу та засобі	В
фільтрації зображень	123
Висновки до розділу 3	130
РОЗДІЛ 4 КОМП'ЮТЕРИЗОВАНІ СИСТЕМИ ДЛЯ АДАПТИВНОЇ	
ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ЦИФРОВИХ ВІДЕОКАМЕР	131
4.1 Комп'ютеризована система для адаптивної зміни	
параметру «Яскравість» відеокамери	132
4.1.1 Метод та програмно-апаратні засоби для адаптивної змін	НИ
параметру «Яскравість» відеокамери	132
4.1.2 Експериментальні дослідження розроблених засобів для	Ŧ
адаптивної зміни параметру «Яскравість» відеокамери	144
4.2 Комп'ютеризована система для адаптивної зміни	
параметру «Контраст» відеокамери	152
4.3 Метод і програмні засоби для визначення рівня шуму	
зображень за допомогою паралельних обчислень	161
Висновки до розділу 4	169
ВИСНОВКИ	170
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	172
ДОДАТКИ	189
Додаток А Список публікацій здобувача за темою дисертації	
та відомості про апробацію результатів дисертації	190
Додаток Б Оброблення цифрових зображень у частотній області	193
Додаток В Тестові цифрові зображення та приклади їх фільтрації.	204
Додаток Г Приклади оброблення зображень при адаптивній зміні	
параметрів відеокамери	226
Додаток Д Фрагменти лістингів комп'ютерних програм	234
Додаток Е Характеристики запропонованих методів	242
Додаток Ж Акти впровадження результатів дисертації	243

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

 $A_{S}$ ,  $A_{SE}$  – теоретичний та експериментальний діапазони значень корисного сигналу  $f_{S}$ .

AWGN – Additive White Gaussian Noise (адитивний білий гаусовий шум).

*Ес*, *Есе* – теоретичний та експериментальний ексцентриситети зображення.

*f* – нормоване еталонне цифрове зображення.

*F* – спектр (коефіцієнти) Фур'є зображення.

*f*<sub>*dc*</sub> – усереднене зображення рівня шуму.

*f*<sub>e</sub> – розширене початкове зображення.

*f*<sub>h</sub> – зображення шумової складової.

*f*<sub>*n*</sub> – початкове зображення з шумом.

FPGA – Field-Programmable Gate Array (програмована користувачем вентильна матриця).

*g* – фільтроване зображення.

*h* – гістограма зображення.

HLROI (High-pass & Low-pass filtration & Region Of Interest) – метод обчислення рівня гаусового шуму на зображенні, заснований на високочастотній фільтрації при виділенні шумової складової і низькочастотній фільтрації при виділенні ділянки інтересу ROI.

і – номер рядка пікселів зображення.

*k* – номер стовпця пікселів зображення.

LLROI (Low-pass & Low-pass filtration & Region Of Interest) – метод обчислення рівня гаусового шуму на зображенні, заснований на низькочастотній фільтрації шумової складової та низькочастотній фільтрації при виділенні ділянки інтересу ROI.

М, N – висота та ширина зображення в пікселях.

*т. п. –* номери просторових частот спектра зображення за висотою та шириною.

*М*<sub>w</sub>, *N*<sub>w</sub> – висота та ширина ядра фільтра в пікселях.

*P*<sub>NSRg</sub> – ПВСШ для фільтрованого зображення *g*.

- $P_R$  радіальний розподіл енергетичного спектра  $P_S$ .
- $P_{RN}$  нормований радіальний розподіл енергетичного спектра  $P_S$ .
- $P_S$  енергетичний спектр зображення (power spectrum).

ROI – Region Of Interest (ділянка інтересу зображення).

*R*<sub>wg</sub> – КСКП яскравості фільтрованого зображення *g* відносно початкового.

- *T<sub>h</sub>* поріг ділянки інтересу ROI на зображенні.
- *T<sub>S</sub>*, *T<sub>SE</sub>* теоретичний та експериментальний періоди сигналу.
- и, v просторові частоти спектра зображення за висотою та шириною.
- *v*<sub>*r*</sub> радіальна просторова частота спектра зображення.
- *w* ядро фільтра Гауса.
- *w<sub>H</sub>* ядро високочастотного фільтра.
- *z* яскравість зображення.
- *σ<sub>h</sub>* середнє квадратичне відхилення гістограми.
- $\sigma_N$ ,  $\sigma_{NE}$  теоретичне та експериментальне СКВ гаусового шуму.
- σ<sub>*S*</sub> СКВ яскравості зображення.
- *σ*<sub>*w*</sub> СКВ ядра фільтра Гауса.
- $\sigma_{wT}$ ,  $\sigma_{wE}$  оптимальне та експериментальне СКВ ядра фільтра Гауса.
- ВСШ співвідношення сигнал/шум (signal-to-noise ratio SNR).

КМОН – комплементарні приймачі метал-оксид-напівпровідник (complementary metal-oxide semiconductor – CMOS).

КОЕС – комп'ютеризована оптико-електронна система.

- КС комп'ютерна система.
- КСКП корінь середньої квадратичної похибки (Root Mean Square Error RMSE).
- ПВСШ пікове співвідношення сигнал/шум (peak signal-to-noise ratio PSNR).
- ПЗЗ прилад із зарядовим зв'язком (charge-coupled device CCD).
- ПЛІС програмована логічна інтегральна схема.
- СКВ середнє квадратичне відхилення (standard deviation).
- СКП середня квадратична похибка (Mean Square Error MSE).
- ФМ фоточутлива матриця.
- ЦОС цифрове оброблення сигналів.

#### ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Комп'ютеризовані оптикоелектронні системи (КОЕС) формування та оброблення цифрових зображень широко використовуються в різних галузях науки, техніки та медицини [1]-[28]. Висока якість формування зображень необхідна для їх коректного оброблення в комп'ютерних системах (КС), наприклад, у КС медичної та технічної діагностик [6]-[9], КС розпізнавання облич [29]-[32]. Джерелом початкових зображень для таких КОЕС і КС у більшості випадків є цифрові відеокамери [10]-[13]. При цьому роль відеокамер як джерела інформації постійно зростає, наприклад, у 2019 році реалізовано понад 10 млн. відеокамер для систем відеоспостереження [12]. Важливим етапом оброблення зображень у КОЕС є підвищення їх візуальної якості [7], [8], [21], яка кількісно описується, зокрема, співвідношенням сигнал/шум (BCIII). Підвищення якості зображень виконується за допомогою програмно-апаратних засобів, наприклад, шляхом зниження рівня шуму та налаштування параметрів відеокамер [14]-[24]. У сучасних комп'ютерних системах висока якість зображень є необхідною умовою для ефективного виконання таких важливих етапів їх оброблення: візуалізації, сегментації, розпізнавання, підготовки до якісного фотодруку, передавання по комп'ютерним мережам та ін. [25]-[33].

Завдання підвищення якості зображень шляхом фільтрації шуму є важливим для практики, оскільки на експериментальних зображеннях, отриманих у КОЕС за допомогою фоточутливих матриць (ФМ), у більшості випадків присутній шум, наприклад, гаусовий [14], [20], [25]-[28], [32]. Значні рівні шуму на зображеннях у сучасних КОЕС часто спричинюються за рахунок зменшення розмірів елементів ФМ, оскільки існує тенденція до збільшення кількості пікселів ФМ при збереженні фізичних розмірів матриць. З метою отримання максимального ВСШ при фільтрації зображень потрібно попередньо обчислити значення рівня шуму. Проте, існуючі методи та апаратно-програмні засоби визначення рівня шуму мають обмежену точність і швидкодію [22], [26], [34]-[39], а сучасні методи фільтрації зображень у КОЕС [29]-[34], [40] - [50] у загальному випадку забезпечують ВСШ, яке менше за теоретично можливе [42], [43]. Це зменшує точність результатів для прикладних задач оброблення зображень. Крім цього, швидкодія існуючих методів та засобів є недостатньою для цифрового оброблення зображень у КОЕС медичної діагностики в режимі реального часу [11], [18]. З цієї причини завдання вдосконалення методів і засобів зниження рівня шуму на зображеннях є актуальним.

Процес апаратного оброблення зображень у комп'ютеризованих системах регулюється такими параметрами відеокамер, як «Яскравість», «Контраст» та ін., які в значній мірі впливають на якість отриманих зображень [10]-[12]. Проте, параметри відеокамер, які встановлюються за замовчуванням, звичайно не забезпечують максимальну якість зображень [29], [30]. У той же час, налаштування параметрів відеокамер у ручному режимі є трудомістким процесом. Тому актуальним завданням є розроблення компонентів КОЕС для адаптивної зміни параметрів відеокамер.

Отже, розроблення високоточних і швидкодійних програмно-апаратних засобів комп'ютеризованих оптико-електронних систем, призначених для підвищення візуальної якості зображень шляхом зниження їх рівня шуму та адаптивної зміни параметрів відеокамер, є актуальним завданням з наукової та практичної точок зору.

Дослідженнями в даній галузі займався ряд вітчизняних і закордонних вчених, прізвища яких наведено в літературі.

#### Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дослідження, результати яких подані в дисертації, виконані на кафедрі комп'ютерних систем та мереж Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича згідно плану держбюджетних науково-дослідних тем:

- "Мультифункціональний адаптивно реконфігуровний модуль цифрової обробки інформації для задач медико-екологічного і технологічного профілю" (2015-2016 рр., № держреєстрації 0115U003239).
- "Високопродуктивні комп'ютерні засоби і системи багатомасштабної і багатопараметричної ідентифікації та обробки інформації в режимі реального часу" (2016-2020 рр., № держреєстрації 0116U007043).

Під час виконання дисертаційної роботи здобувач проходила стажування в Політехнічному університеті Валенсії (Іспанія) з 24.08.2015 по 26.06.2016 р. у рамках програми Erasmus Mundus EUROEAST.

У вищевказаних темах і програмі здобувач брала участь як виконавець, під час виконання яких автором удосконалено метод обчислення рівня шуму на зображеннях у КОЕС, який реалізовано програмно в системі МАТLAB та апаратно засобами ПЛІС, розроблено метод та апаратно-програмні засоби для зменшення рівня шуму на зображеннях, розроблено апаратно-програмні засоби для адаптивної зміни параметрів відеокамер у КОЕС.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає в підвищенні точності та швидкодії програмно-апаратних засобів КОЕС, призначених для покращення візуальної якості зображень за рахунок зниження їх рівня шуму й адаптивної зміни параметрів відеокамер.

Досягнення мети передбачало виконання таких завдань:

- 1. Провести аналіз побудови та принципів роботи КОЕС формування зображень, які як джерело початкового сигналу використовують відеокамери; запропонувати високоефективну архітектуру таких систем.
- Провести аналіз методів і засобів підвищення візуальної якості зображень, які застосовують фільтрацію зображень та адаптивну зміну параметрів відеокамер, з метою визначення основних напрямів підвищення їх точності та швидкодії.
- Розробити математичну модель, методи та програмно-апаратні засоби комп'ютеризованих систем для оцінки якості зображень з урахуванням їх рівня шуму, виконати дослідження запропонованих методів.
- Розробити математичну модель, метод і програмно-апаратні засоби для підвищення якості зображень у комп'ютеризованих системах шляхом фільтрації, дослідити можливості запропонованого методу.
- 5. Розробити методи та створити програмно-апаратні засоби КОЕС для адаптивної зміни параметрів цифрових відеокамер.
- 6. Розробити метод та створити програмно-апаратні засоби КОЕС для підвищення якості зображень із використанням паралельних обчислень.

**Об'єктом дослідження** є процес підвищення візуальної якості формування цифрових зображень у комп'ютеризованих оптико-електронних системах.

**Предметом** дослідження є методи та програмно-апаратні засоби зменшення рівня шуму цифрових зображень та адаптивної зміни параметрів відеокамер у комп'ютеризованих оптико-електронних системах.

Методи дослідження. У роботі використовувались: теорія чисельних методів, теорія алгоритмів, теорія диференціально-інтегрального числення, лінійна алгебра, методи фільтрації зображень для розробки моделей і методів підвищення якості формування зображень. Для аналізу та перевірки достовірності отриманих теоретичних положень проведено комп'ютерне моделювання засобами MATLAB і Simulink.

Наукова новизна отриманих результатів роботи полягає в розробленні методів підвищення візуальної якості зображень, сформованих за допомогою цифрових відеокамер, що забезпечує вирішення актуального завдання підвищення точності та швидкодії оброблення зображень у комп'ютеризованих оптико-електронних системах.

1. Подальшого розвитку отримала архітектура побудови комп'ютеризованої системи формування зображень, яка відрізняється від існуючих спільним застосуванням високоточної підсистеми визначення рівня шуму як при його фільтрації, так і при адаптивній зміні параметрів відеокамер, що дозволяє виключити дублювання блоків комп'ютеризованої системи, а також збільшити співвідношення сигнал/шум на оброблених зображеннях.

2. Вперше розроблено метод підвищення візуальної якості зображень шляхом їх фільтрації, особливістю якого є обчислення амплітудних і частотних параметрів корисного сигналу на основі радіального розподілу для енергетичного спектру, що забезпечує спрощення реалізації апаратних засобів комп'ютеризованої системи формування зображень, квазіоптимальний результат фільтрації та більш ніж у 2 рази вищу швидкодію.

3. Подальшого розвитку отримали методи оцінки якості формування цифрових зображень, основані на їх згортанні, які відрізняються від існуючих врахуванням статистичних характеристик яскравості зображень при виділенні їх ділянок інтересу, що дозволяє зменшити обчислювальні витрати за рахунок використання операцій типу MADD, підвищити точність визначення рівня шуму до 30 % і збільшити співвідношення сигнал/шум на зображеннях, отриманих у комп'ютеризованій системі за допомогою відеокамери.

4. Подальшого розвитку отримали методи оброблення зображень з адаптивною зміною параметрів «Яскравість» і «Контраст» цифрової відеокамери відповідно до умов освітленості сцени з використанням зворотного зв'язку між комп'ютеризованою системою та відеокамерою, які відрізняються від відомих урахуванням кількості пікселів зображення з допустимими значеннями яскравості, що дозволяє до 1.4 дБ збільшити співвідношення сигнал/шум для оброблених зображень.

5. Подальшого розвитку отримав метод визначення рівня шуму зображень із використанням паралельних обчислень, який відрізняється від існуючих розширенням тайлів зображень перед їх паралельним згортанням на величину половини від розміру ядра фільтра, що забезпечує незалежне оброблення тайлів зображень різними ядрами процесорів SIMD системи, усунення крайових ефектів при фільтрації зображень і збільшення швидкодії оброблення зображень у комп'ютеризованих системах до 1.5 разів.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що на основі запропонованих методів розроблено:

- прикладне програмне забезпечення в системі МАТLAВ для визначення рівня шуму, яке використовує низькочастотну та високочастотну фільтрації зображень, завдяки чому отримано вищу точність оцінки якості зображень, ніж для програм-аналогів;

- програмні засоби в системі МАТLAВ для підвищення якості зображень у КОЕС шляхом зменшення рівня шуму, які використовують фільтр Гауса та виконують аналіз енергетичних спектрів зображень, що забезпечують квазіоптимальну якість фільтрованих зображень згідно з критерієм ВСШ; такі засоби можуть використовуватися в системах відеоспостереження й автоматичної фільтрації цифрових зображень, системах розпізнавання зображень облич і візуального контролю виробничих процесів, тощо; - апаратні засоби на основі ПЛІС для цифрової фільтрації зображень, отриманих за допомогою відеокамер, що забезпечило на порядок вищу швидкодію фільтрації та дозволило виконувати оброблення не тільки окремих (статичних) зображень, але й кадрів відеопотоку в режимі реального часу;

- програмно-апаратні засоби для адаптивної зміни параметрів «Яскравість» і «Контраст» цифрових відеокамер у КОЕС відповідно до умов освітленості сцени, завдяки чому отримано зображення з відеокамер із вищим ВСШ, ніж при використанні налаштувань камер за замовчуванням.

Розроблені програмно-апаратні засоби практично використані при фільтрації зображень та адаптивній зміні параметрів цифрових відеокамер в ІТ-компанії «Юкон-Софтваре» (м. Чернівці).

Теоретичні та практичні результати роботи використано при викладанні дисциплін «Пристрої зв'язку з об'єктом» і «Комп'ютерні системи» (Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича – ЧНУ), а також при виконанні держбюджетних тем на кафедрі комп'ютерних систем та мереж ЧНУ.

#### Особистий внесок здобувача

За час підготовки дисертаційної роботи здобувач приймала участь у розробленні математичних моделей і методів оброблення зображень, а також в їх програмно-апаратній реалізації. Усі основні результати дисертаційної роботи, яка винесена на захист, отримані здобувачем самостійно (додаток А). У роботах, які опубліковані у співавторстві, здобувачу належить: [52], [58] – аналіз методів фільтрації шуму на цифрових зображеннях; [51], [53], [54], [56], [57], [63] – розроблення та програмна реалізація методів обчислення рівня гаусового шуму з використанням виділених ділянок, низькочастотної та високочастотної фільтрації; [52], [55], [59], [60], [65] – розроблення методу обчислення параметрів квазіоптимального фільтра Гауса та створення на його основі програмного забезпечення для квазіоптимальної фільтрації гаусового шуму на зображеннях, [55], [62], [64] – створення апаратнопрограмних засобів для адаптивної зміни параметрів відеокамер, [52], [53], [61] – тестування розробленого програмно-апаратного забезпечення при

підвищенні якості зображень, [66], [67], [68] – програмна реалізація методів обчислення рівня та фільтрації шуму, методи адаптивної зміни параметрів відеокамер у КОЕС.

#### Апробація матеріалів дисертації

Результати досліджень, що становлять основу дисертації, доповідались і обговорювались на семи конференціях, тези доповідей опубліковані у збірниках праць відповідних конференцій:

 III, IV, V, VII Міжнародні науково-практичні конференції: «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» "ПІКТ – 2014", "ПІКТ – 2015", "ПІКТ – 2016", "ПІКТ – 2018" (Чернівці, 2014, 2015, 2016, 2018).

2. VI International Scientific Practical Conference (I International Symposium) «Practical Application of Nonlinear Dynamic Systems for Infocommunication» (Chernivtsi, Ukraine, 2017).

3. II Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем» MEICS-2017 (Дніпро, 2017).

4. International Scientific and Technical Internet Conference "Computer Graphics and Image Recognition" (Vinnytsya, Ukraine, 2018).

### Публікації

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 18 наукових робіт, із них 7 – статей у фахових виданнях, 7 – доповіді у матеріалах міжнародних конференцій, 1 – доповідь у матеріалах всеукраїнської конференції, 3 – свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір (комп'ютерну програму), 2 – роботи у міжнародних виданнях, що входять до наукометричної бази SCOPUS. Список публікацій [51]-[68] наведено в кінці дисертаційної роботи.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 245 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (172 найменування) і 7 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 135 сторінок друкованого тексту. Робота містить 108 рисунків і 19 таблиць.

#### **РОЗДІЛ 1**

# АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ВІЗУАЛЬНОЇ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ У КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ

Оброблення зображень у КОЕС широко використовується при вирішенні прикладних задач у науці, техніці та медицині. Джерелом початкових зображень для таких систем у більшості випадків є цифрові відеокамери. Важливим етапом формування та попереднього оброблення зображень є зниження їх рівня шуму, що в поєднанні з адаптивною зміною параметрів відеокамер підвищує співвідношення сигнал/шум на зображеннях, а відповідно покращує візуальну якість зображень. Це значно збільшує ефективність наступних етапів оброблення зображень у КОЕС та КС: візуалізації, сегментації, розпізнавання образів та ін.

На цифрових зображеннях, отриманих у КОЕС за допомогою відеокамер, присутні декілька видів шумів, сумарний вплив яких відповідає моделі гаусового шуму. Зменшити рівень шуму на зображеннях у КОЕС можна апаратними або програмними засобами, а також їх комбінацією.

Аналіз існуючих методів обчислення рівня шуму на зображеннях показав, що існує потреба в розробленні автоматичного та точного методу визначення рівня шуму. Показано, що для зменшення рівня шуму доцільно використати низькочастотний фільтр Гауса, який описується тільки одним параметром – СКВ ядра. Розглянуто можливість програмного керування такими параметрами відеокамер, як «Яскравість» і «Контраст», зроблено висновок про доцільність підвищення співвідношення сигнал/шум зображень за рахунок адаптивної зміни параметрів відеокамер у КОЕС.

Показано, що розроблення високоточних і швидкодійних програмноапаратних засобів КОЕС, призначених для підвищення візуальної якості зображень шляхом зниження їх рівня шуму й адаптивної зміни параметрів відеокамер, є актуальним завданням.

# 1.1 Комп'ютеризовані системи формування та оброблення цифрових зображень

Формування та попереднє оброблення цифрових зображень у КОЕС визначає точність і швидкодію наступних етапів оброблення: візуалізації, морфологічного вейвлет-аналізу, збереження, оброблення, сегментації, стиснення, розпізнавання та ін. (рис. 1.1) [24]-[29]. Важливим етапом попереднього оброблення зображень є зниження їх рівня шуму, що в поєднанні з налаштуванням параметрів фото- і відеокамер (зокрема, параметрів «Яскравість» і «Контраст») забезпечує підвищення ВСШ на зображеннях. Існуючі методи зниження рівня шуму виділяються серед інших методів попереднього оброблення зображень (наприклад, гамма-корекції, виділення контурів та ін.) тим, що у загальному випадку забезпечують ВСШ, менше за теоретично можливе [42], [43]. Також відомо, що параметри відеокамер (за замовчуванням) у більшості випадків не забезпечують максимального ВСШ для експериментальних зображень [29], [30].



Рисунок 1.1 – Послідовність формування та оброблення цифрових зображень у комп'ютеризованих системах [24]-[29]

Тому актуальним завданням є розроблення КОЕС, призначених для підвищення візуальної якості зображень [7], [8], [21], [69] шляхом зниження їх рівня шуму, оптимізації або адаптивної зміни параметрів відеокамер. Якість зображень кількісно описується, зокрема, їх ВСШ.

Структура формування та оброблення цифрових зображень у КОЕС передбачає їх формування за допомогою оптичного вузла та фоточутливої матриці (ФМ), апаратне оброблення в аналоговому та цифровому блоках і програмне оброблення в комп'ютері (рис. 1.2) [10]-[13]. Оптичний вузол, ФМ і блок аналогового оброблення входять до складу фото- та відеокамер, тому їх корекція є недоцільною. В той же час, блок цифрового оброблення зображень, який є окремим блоком або входить до складу відеокамери, може перепрограмовуватися. Тому КОЕС, призначені для зниження рівня шуму цифрових зображень та налаштування параметрів відеокамер, доцільно реалізувати апаратно в блоці цифрового оброблення або програмними засобами в комп'ютері.



Рисунок 1.2 – Структура формування та оброблення цифрових зображень у комп'ютеризованих системах [10]-[13]

У КОЕС та КС растрове цифрове зображення f розміром  $M \times N$  пікселів записується в прямокутну матрицю f = (f(i, k)), де i = 1,..., M, k = 1,..., N [26]. Оброблення напівтонових зображень виконується у відтінках сірого, а яскравість f нормується в діапазоні від 0 до 1. Такий формат представлення зображень відповідає формату, який використовується, зокрема, у системі MATLAB [27], [28], тому зображення f записується у вигляді

$$f = \begin{bmatrix} f(1,1) & \dots & f(1,k) & \dots & f(1,N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f(i,1) & \dots & f(i,k) & \dots & f(i,N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f(M,1) & \dots & f(M,k) & \dots & f(M,N) \end{bmatrix}.$$
 (1.1)

При обробленні кольорових зображень для кожного каналу кольору RGB (червоного, зеленого, синього) створюється окрема матриця ( $f_R$ ,  $f_G$  та  $f_B$ ). У даній роботі передбачається, що оброблення зображень виконується у відтінках сірого. За потреби фільтроване зображення перетворюється в кольорове з урахуванням складових кольору для початкового зображення. При фільтрації окремо кожного RGB каналу кольору час оброблення збільшується в 3 рази. Яскравість початкового зображення з шумом записується в матрицю  $f_n$  у такому ж форматі, як для f.

Основні джерела шуму на зображенні в КОЕС – це сам процес його отримання, а також процес передавання [26, с.334-339]. Якість отриманого зображення залежить від різних факторів, таких як зовнішні умови в процесі формування зображення та параметри сенсорів. Наприклад, у процесі отримання зображення за допомогою твердотільної ФМ основними факторами, які впливають на величину шуму, є рівень освітленості та сенсорів. процесі температура У передавання зображення можуть спотворюватися завадами, які виникають у каналах зв'язку. Завдання зменшення рівня шуму є важливим тому, що воно є основою для підвищення якості вирішення інших завдань цифрового оброблення зображень у КОЕС.

Розглянемо основні типи шумів цифрового зображення, а саме адитивний і мультиплікативний, та принципи їх формування [21, с.38-39]. Обчислення яскравості зображення з адитивним шумом описується формулою

$$f_n(i,k) = f(i,k) + n_A(i,k),$$
(1.2)

де f = (f(i, k)) – еталонне зображення без шуму;  $f_n = (f_n(i, k))$  – зображення з шумом;  $n_A = (n_A(i, k))$  – адитивний і незалежний від сигналу шум (звичайно з гаусовим розподілом функції густини ймовірності); i = 1,..., M; k = 1,..., N. Яскравість зображення з мультиплікативним шумом рівна

$$f_n(i,k) = f(i,k) \cdot n_M(i,k),$$
 (1.3)

де  $n_M = (n_M(i, k)) - мультиплікативний шум; i = 1,..., M; k = 1,..., N.$ 

До мультиплікативних належать такі види шумів, як пуасонівський та імпульсний, оскільки їх величина залежить від яскравості пікселів.

Яскравість зображення з імпульсним шумом описується формулою

$$f_n(i,k) = (1 - p_i) \cdot f(i,k) + p_i \cdot n_i(i,k), \qquad (1.4)$$

де  $n_i = (n_i(i, k))$  – імпульсний шум;  $p_i$  – бінарний параметр, який приймає значення 0 або 1; i = 1, ..., M; k = 1, ..., N.

У комп'ютерних оптико-електронних системах загальноприйнятим вважається використання адитивної гаусової моделі завад з рівномірним спектральним розподілом, тому в роботі розглядаються методи оцінки та фільтрації шуму в моделі адитивного білого гаусового шуму (Additive White Gaussian Noise – AWGN) або спрощено в моделі гаусового шуму [14], [20], [25, с. 335-339], [26, с. 334-339], [32]. Шум AWGN також називається нормальним шумом. Походження терміну «адитивний білий гаусовий шум» пов'язане з фізичними властивостями білого світла, яке містить практично всі частоти видимого спектра в рівних пропорціях.

Теоретичне значення СКВ гаусового шуму, яке є однаковим для всіх пікселів початкового зображення f, позначимо  $\sigma_N$ . Густина розподілу ймовірності (Probability Density Function – PDF) для гаусового шуму описується формулою [25, с.335-339], [26, с.334-339]

$$p_{DF}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_N}} \exp\left(\frac{-(z-z_C)^2}{2\sigma_N^2}\right),\tag{1.5}$$

де z – яскравість зображення;  $z_C$  – математичне сподівання розподілу;  $\sigma_N$  – СКВ шуму, яке у випадку AWGN є рівнем шуму. Квадрат СКВ шуму називається дисперсією  $D_N = \sigma_N^2$ . Гаусовий шум особливо помітний на зображеннях, отриманих при низькій освітленості. Чим менша усереднена яскравість сцени, тим менше співвідношення сигнал/шум на отриманих зображеннях.

Іншим видом адитивного шуму є шум Релея [26, с.334-339]. Функція густини розподілу ймовірностей шуму Релея описується виразом

$$p_{DFR}(z) = \begin{cases} \frac{2}{b}(z-a) \cdot \exp\left(\frac{-(z-a)^2}{b}\right), z \ge a\\ 0, z < a \end{cases},$$
(1.6)

де z – яскравість зображення; a, b – параметри розподілу.

Середнє значення  $z_C$  і дисперсія  $\sigma_N^2$  для цього розподілу дорівнюють:

$$z_C = a + \sqrt{\frac{\pi b}{4}} , \ \sigma_N^2 = \frac{b(4-\pi)}{4} .$$
 (1.7)

При необхідності до моделі гаусового шуму за допомогою варіаційностабілізуючих перетворень можна звести шум Релея, а також складніші моделі мультиплікативного сигнало-залежного шуму або змішаного (пуасонівського й адитивного) [70].

У загальному випадку КОЕС отримання відеосигналу складається з комп'ютера та кількох під'єднаних до нього цифрових відеокамер (або фотоапаратів), а процес отримання сигналу з відеокамери описується такою схемою (рис. 1.3) [71], [72]. Зображення досліджуваної сцени через систему лінз проектується на ФМ. Отримання зображення виконується протягом часу експозиції. Після цього відеосигнал підсилюється, проводиться інтерполяція зображення, встановлюється баланс білого та виконується гамма-корекція сигналу. Далі відеосигнал перетворюється в цифрову форму в АЦП і записується в комп'ютер (наприклад, через USB порт). Отримане цифрове зображення спотворюється за рахунок атмосферних впливів (наприклад, туману) і недосконалостей оптичної системи, а також за рахунок різних видів шумів, які виникають у ФМ та в схемах подальшого оброблення сигналу.



Рисунок 1.3 – Схема отримання цифрових зображень з відеокамери, де як фоточутливі матриці використовуються ПЗЗ або КМОН-сенсори

У більшості випадків при отриманні зображень в КОЕС їх спотворення за рахунок атмосферних впливів і недосконалостей оптичної системи є незначними. Шуми, які виникають в цифрових фото- та відеокамерах, поділяються на такі види (рис. 1.3) [20, с.39-47], [71]:

1. Шум падаючого потоку світла (фотонний шум).

2. Шуми, які виникають у ФМ: дробовий, темновий, тепловий, шум фіксованих пікселів і шум зчитування.

3. Шум, який виникає при перетворенні аналогового сигналу в цифровий в АЦП (шум квантування або оцифрування).

Фотонний шум зумовлений квантовою природою світла, виникає через флуктуації кількості фотонів відносно середнього значення та зростає при збільшені освітлення. Падаючі на ФМ матрицю фотони породжують фотоелектрони. Кількість фотоелектронів, які накопичуються за час експозиції, у кожній комірці матриці описується розподілом Пуассона. При великих рівнях освітленості (>> 0.1 лк) [73] кількість фотонів є значною і тому розподіл Пуссона може бути апроксимований розподілом Гауса. Дробовий шум зумовлений дискретною природою носіїв заряду і зростає при підвищенні температури ФМ [20]. Флуктуації виникають внаслідок статистичної незалежності впорядкованого переміщення носіїв зарядів.

Темновий шум, який зумовлюється темновим струмом, не залежить від освітленості ФМ і виникає за рахунок термогенерації носіїв заряду (електронів і дірок) у напівпровідниковому матеріалі (у більшості випадків, у кремнії) [20]. Кількість термоелектронів, які накопичуються в комірках ФМ за час експозиції (як і кількість фотоелектронів), описується розподілом Пуассона. На даний час типові значення темнового струму при кімнатній температурі для кращих ПЗЗ-матриць складають соті долі нА/см<sup>2</sup>. Такий струм зменшується приблизно в 2 рази на при зменшенні температури на 10°С. Для любительських фото- і відеокамер темновий струм (при кімнатних температурах) незначно спотворює отримані зображення. У деяких випадках величину темнового струму зменшують (наприклад, в астрономічних системах) за рахунок охолодження фоточутливих матриць з використанням термоелектронного охолодження або з використанням азотних кріостатів.

Тепловий шум зумовлений флуктуаціями кількості носіїв заряду в провіднику або в напівпровіднику; такий шум зростає при підвищенні температури ФМ [20].

Шум фіксованих пікселів (шум із фіксованим рисунком) виникає через пошкодження окремих комірок фоточутливої матриці, у результаті чого яскравості відповідних пікселів завжди будуть заниженими або завищеними [10]. В сучасних фоточутливих матрицях кількість таких пошкоджених пікселів є незначною. Крім цього, існують алгоритми, які дозволяють обчислювати коректні значення пошкоджених пікселів на основі сусідніх пікселів шляхом інтерполяції.

Шум зчитування в основному зумовлений попереднім підсилювачем сенсора (підсилювачем аналогового сигналу, отриманого у фоточутливій комірці), не залежить від величини світлового потоку та описується розподілом Гауса [20].

Тому при низьких освітленостях об'єктів сцени ( $\approx 0.1$  лк) переважає шум зчитування, а при високих (>>0.1 лк) – фотонний шум [73]. Для фоточутливих матриць також вводиться поняття порогової (мінімальної) освітленості, при якій СКВ корисного сигналу рівне СКВ шуму. Для поширених фоточутливих матриць порогова освітленість об'єктів  $\approx 10^{-2}$  лк, що близько до освітленості вночі при повному Місяці [74].

Шум квантування виникає в АЦП при перетворенні аналогового сигналу в цифровий; такий шум залежить від сигналу та характеризується вибраним кроком квантування [75], [76]. АЦП перетворюють кожний відлік вхідного аналогового сигналу в *n*-бітний двійковий код, де *n* називається розрядністю АЦП. При цьому АЦП з розрядністю *n* дозволяє розрізнити 2<sup>*n*</sup> відтінків сірого, а СКВ його шуму квантування дорівнює [20, с.151-152]

$$\sigma_K = \frac{1}{2^n - 1} \sqrt{\frac{f_{\text{max}}^2}{12}} , \qquad (1.8)$$

де  $f_{max}$  – максимальне значення яскравості зображення.

При обробленні кольорових зображень кількість розрядів двійкового коду для всіх складових кольору називається глибиною кольору (наприклад, при 24-бітній глибині кольору можливо розрізнити 16777216 відтінків кольору). Шум квантування може призводити до небажаних артефактів, наприклад, до появи паразитних контурів.

Більшість шумів, які формують яскравість зображення в цифровій відеокамері (рис. 1.2), описуються або розподілом Пуссона (який може бути апроксимований розподілом Гауса при великих рівнях освітленості), або розподілом Гауса. Згідно з центральною граничною теоремою теорії ймовірності сума великої кількості взаємно незалежних випадкових величин описується розподілом, близьким до нормального [76]. Оскільки шуми цифрового зображення, отриманого за допомогою відеокамери (рис. 1.2), є взаємно незалежними, тому сумарний шум цифрового зображення в КОЕС досить точно описується вибраною моделлю гаусового шуму [20, с. 44-47].

#### 1.2 Аналіз побудови та принципів роботи відеокамер

У цифрових відеокамерах, які перетворюють оптичний потік у потік цифрових зображень (кадрів), одним із головних елементів є ФМ. Для під'єднання відеокамер до комп'ютера звичайно використовується USBінтерфейс. Більшість фоточутливих сенсорів містить прямокутну гратку з комірок, кожній з яких відповідає піксель зображення.

ФМ є важливим елементом всіх КОЕС, зокрема, систем потокового оброблення зображень у режимі реального часу. Отримані в таких системах цифрові зображення можуть також зберігатися в файлах і оброблятися в довільні моменти часу. Як фоточутливі сенсори звичайно використовуються прилади із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) /charge-coupled device – CCD/ або матриці комплементарних приймачів метал-оксид-напівпровідник (КМОН) /complementary metal-oxide semiconductor – CMOS/. В англійській технічній літературі для КМОН-матриць найбільше розповсюдження отримала абревіатура CIS (CMOS Image Sensor).

Основні параметри ПЗЗ-фотоприймачів наступні [77]-[79]:

- Квантова ефективність відношення кількості фотонів, поглинання яких викликало утворення неосновних носіїв, до загальної кількості поглинутих фотонів (може досягати 90% для деяких довжин хвиль).
- Спектральна чутливість для квантової ефективності у залежності від довжини хвилі [10, с.34-58]. Практично всі ПЗЗ і КМОП-сенсори мають високу спектральну чутливість у діапазоні довжин хвиль від 0.3..0.4 мкм до 1.1 мкм (тобто, від ультрафіолетових до інфрачервоних променів).
- 3. Динамічний діапазон це відношення максимально можливого значення сигналу до шуму фотоприймача, при цьому значення сигналу пропорційне до величини освітленості. Розробники фоточутливих матриць намагаються розширити їх динамічний діапазон до діапазону чутливості ока людини, який складає не менше 8 порядків (при зміні освітлення від денного до нічного, тобто від 10<sup>5</sup> до 10<sup>-3</sup>...10<sup>-4</sup> лк) [10, с.88-89].

 Фотонний, дробовий, темновий і тепловий шуми, а також шум фіксованих пікселів і шум зчитування; такі шуми зменшують динамічний діапазон і візуальну якість отриманого зображення.

Для збільшення освітлення фоточутливих ділянок у деяких моделях матриць над ними встановлюють мікролінзи, які фокусують падаюче випромінювання саме на потрібній ділянці сенсора.

Принцип роботи кольорових ФМ подібний до монохромних, але для більшості таких матриць різні комірки чутливі до світла червоного, зеленого та синього кольору завдяки використанню фільтрів, які пропускають тільки певну складову спектра (рис. 1.4). Поширеним варіантом кольорового фільтру є мозаїка з блоків  $2 \times 2$ , які складаються з двох зелених, одного червоного та одного синього рецепторів (модель Байера RGBG, рис. 1.4, а) [30].

Іншим поширеним сенсором зображень є КМОН матриця [80]-[84], яка складається з двовимірної матриці комірок на основі фотодіодів або фототранзисторів [79, с.73-84]. Комірки відповідають окремим елементам зображення (пікселям), у кожній з яких згенерований при освітленні заряд зберігається в конденсаторі. КМОН-фотоприймачі є розвитком фотодіодних матриць, в яких координатна вибірка здійснюється за допомогою металоксид-напівпровідник (МОН) дешифраторів (рис. 1.5).

	G	R	G	R		W	R	W	R		W	В	W	G
	В	G	В	G		В	G	В	G		В	W	G	W
	G	R	G	R		W	R	W	R		W	G	W	R
a)	В	G	В	G	ெ	В	G	В	G	B)	G	W	R	W

Рисунок 1.4 – Варіанти кольорових фільтрів для фоточутливих сенсорів [30, c.5]: a) Bayer RGBG; б) Bayer RGBW; в) Kodak RGBW1; R – світлофільтр, який пропускає червоне світло; G – світлофільтр, який пропускає зелене світло; B – світлофільтр, який пропускає синє світло; W – світлофільтр, який пропускає біле світло.


Рисунок 1.5 – Структурна схема КМОН-фотоприймача [79, с.73-84]

У ФМ зчитування сигналу виконується по шинам стовпця, які під'єднують виходи комірок до блоку аналогового оброблення, в якому виконується накопичення заряду, підсилення сигналу, вибірка та зберігання його значень.

Сучасні КМОН-фотоприймачі — це, в першу чергу, сенсори з внутрішньокристальним процесором [10, с.59-87]. Вони містять матрицю активних фоточутливих елементів, схеми керування, аналогові підсилювачі зчитування на виході кожного стовпця, мультиплексор, АЦП, блок цифрового оброблення та ін. На даний час використовуються КМОН-фотоприймачі з активним пікселем, в яких вихід кожного пікселя підсилюються транзистором. Використання активних пікселів дозволяє значно підвищити співвідношення сигнал/шум для отриманих зображень.

В останній час у КМОН-відеосенсорах використовують схеми з активним цифровим пікселем, в яких кожен світлочутливий елемент містить пам'ять і АЦП. У процесі зчитування зображення оцифрування сигналу виконується паралельно для всіх елементів матриці, що дозволяє збільшити швидкість зчитування. Особливістю таких перетворювачів є інтеграція в кожний піксель не тільки активного підсилювача, але й безпосередньо АЦП. При цьому частота перетворення АЦП стає рівною кадровій частоті фотоприймача, а смуга частот відеосигналу зменшується до мінімальних значень. У КМОН з активним пікселем відеосигнал з усіх пікселів рядка поступає на підсилювачі стовпців. Далі сигнал за допомогою аналогового мультиплексора горизонтальної розгортки подається на вбудований у відеопроцесорі АЦП. Оцифрований відеосигнал оброблюється цифровим процесором, в якому також можуть виконуватися такі перетворення відеосигналу, як гамма-корекція, баланс чорного і білого та ін.

У більшості фоточутливих сенсорів формується вихідний сигнал у цифровій формі. Зовнішнє керування сенсором виконується за допомогою стандартних інтерфейсів, наприклад, USB, I<sup>2</sup>C, SPI [85], [86], що дозволяє встановити такі параметри, як розмір вікна зчитування, коефіцієнт підсилення відеопроцесора, значення гамма-характеристики та ін.

Таким чином, КМОН-матриці є альтернативою ПЗЗ матриць. До переваг ПЗЗ матриць належить ширший динамічний діапазон, проте параметри КМОНматриць постійно покращуються. До переваг КМОН-матриць можна віднести їх інтеграцію з іншими пристроями цифрового оброблення зображень (зокрема, з надвеликими інтегральними схемами), меншу вартість і споживану потужність (10-50 мВт). Суттєвою перевагою КМОН є також їх координатна або ХҮадресація, тобто можливість доступу до будь-якого пікселя зображення в довільному порядку. Тому в даній роботі практичне зчитування відеосигналу реалізовано саме за допомогою КМОН-матриць.

Принципи роботи однокристальних відеокамер, побудованих на основі ФМ, розглянемо на прикладі моделі камери OV7640 [10] (рис. 1.6), яка містить такі складові:

- 1. Фоточутлива КМОН-матриця зображення (682 × 482 пікселів).
- Схема аналогового оброблення сигналу (регулювання яскравості, контрасту, насиченості та ін.).
- Схема таймінг-генератора (тактового генератора), яка виконує формування кадру зображення з вибором відповідних рядків матриці, керування часом експозиції (схема використовує зовнішню синхронізацію – сигнал CLK).



Рисунок 1.6 – Структурна схема відеокамери OV7640 фірми OmniVision [10, с.236-238]

- 4. Блок форматування з цифровим відеовиходом, який виконує постобробку цифрового відеосигналу *D*, наприклад, зчитування сигналу з окремої ділянки (вікна) матриці.
- 5. Трипровідний інтерфейс керування SCCB (аналог інтерфейсу І<sup>2</sup>С) [86].
- Набір регістрів (регістровий банк), які описують конфігурацію параметрів однокристальної відеокамери, а саме параметрів аналогового та цифрового оброблення сигналу.
- 7. Аналогові мультиплексори MUX, на входи яких подаються сигнали червоної (R), зеленої (G) і синьої (B) складових зображення.
- 8. АЦП, які перетворюють аналогові сигнали в цифрові D.

Універсальність КМОН-технології дозволяє створювати електронні пристрої, які характеризуються функціональною завершеністю завдяки інтеграції всіх або більшості функціональних вузлів на одному кристалі. Такий напрям отримав назву «Системи на кристалі» (System on Chip, SoC). У

системах на кристалі в одній мікросхемі фотосенсора розміщується більшість вузлів цифрового оброблення зображення: ФМ з активними пікселями, цифровий і аналоговий відеопроцесори, АЦП, блок керування та ін.

Більшість цифрових відеокамер [87], [88] дозволяють програмно керувати своїми режимами роботи за допомогою таких параметрів:

- 1. Яскравість (Brightness) регулює яскравість зображення шляхом зміни рівня чорного та контролем підсилення відеосигналу.
- 2. Контраст (Contrast) регулює контрастність зображення шляхом зміни амплітуди відеосигналу.
- Чіткість (Sharpness) регулює чіткість зображення за рахунок виділення дрібних деталей і збільшення чіткості контурів; технічно це виконується шляхом збільшення частки високочастотної складової в спектрі відеосигналу (виконується регульована частотна фільтрація сигналу).
- Баланс білого (White Balance) регулювання балансу між каналами кольору; виконується шляхом регулювання рівнів сигналів червоної та синьої складової відносно рівня сигналу зеленої складової.
- Кольорове насичення (Saturation) регулює насичення кольорового зображення. Технічно виконується шляхом зміни відношення між сигналом яскравості (монохромної складової відеосигналу) і сигналами кольору.
- Гамма-корекція (Gamma) використовується для узгодження чутливості фотоприймача (лінійної) з градаційною характеристикою пристрою відображення інформації – монітора (нелінійною).

Глибина кольору для графічних файлів (у форматах BMP, JPEG, TIFF та ін.) у більшості випадків обмежена 24 бітами (по 8 біт на кожний канал кольору – червоний, зелений, синій). У деякий випадках при формуванні цифрових зображень використовуються АЦП з розрядністю 10, 12 або 16 біт (тобто глибиною кольору 30, 36 або 48 біт відповідно), що дозволяє зберігати зображення з розширеним динамічним діапазоном у графічні файли спеціального формату (наприклад, у RAW-файли).

Сучасні цифрові фотоапарати та відеокамери мають подібну структуру, що дозволяє формувати як статичні зображення, так і відео [80]. Функції

оброблення зображень можуть реалізовуватися як безпосередньо в самому відеосенсорі, так і в пристрої цифрового оброблення або в комп'ютері.

При обробленні зображень у КОЕС з точки зору обчислювальної складності найбільш затратними є операції фільтрації, які реалізуються звичайно програмними засобами. Апаратна реалізація фільтрації зображень потенційно дозволяє підвищити швидкодію оброблення відеопотоку (у режимі реального часу), проте вимагає спеціального апаратного забезпечення – наприклад, програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) з архітектурою програмованої користувачем вентильної матриці (ПКВМ) (англ. Field-Programmable Gate Array – FPGA) [89], [90]. З метою підвищення швидкодії оброблення зображень перспективним є розпаралелювання обчислень [91].

Розглянуті ПЗЗ та КМОН-відеосенсори є основою цифрових відеокамер, які на даний час широко використовуються в КОЕС (наприклад, у смартфонах, ноутбуках, системах відеоспостереження та моніторингу технологічними процесами). Такі КОЕС надзвичайно поширені, наприклад, у 2018 році в світі реалізовано понад 1.4 млрд. смартфонів, 160 млн. ноутбуків [92]. До категорії відеокамер належать IP-камери та веб-камери. Особливістю IP-камер (англ. IP camera, Internet protocol camera) є передавання відеопотоку в цифровому форматі в мережах Ethernet i Token Ring. Веб-камера (також вебкамера) – цифрова відео- чи фотокамера, яка має можливість в реальному часі фіксувати зображення, призначені для подальшого передавання по мережі Інтернет (у програмах Skype, Viber тощо). Наступним кроком у розвитку відеокамери з високою роздільною здатністю та пристрої оброблення відеопотоку в режимі реального часу з використанням засобів штучного інтелекту, наприклад, штучних нейронних мереж [93], [94].

Основними розробниками та виробниками ПЗЗ і КМОН відеосенсорів є такі компанії, як AMI Semiconductor, Aptina, Cypress, Fill Factory, Kodak, Kyosera, Micron, OmniVision, Philips, PixelPlus, Samsung, SONY та інші [80]-[84]. На даний час виготовлюється значна кількість типорозмірів матричних і лінійних відеосенсорів. Виготовляються матриці великого розміру для наукових досліджень (з діагоналлю від 2/3 дюйма до 2.5 дюйма), а також малого розміру для охоронних телевізійних систем і мобільних телефонів (смартфонів) з вбудованими фотоапаратами та відеокамерами – розміром від 1/3 до 1/10 дюйма. Виробники випускають ФМ з роздільною здатністю до 5664 × 4248 (і більше), частотою кадрової розгортки до 2500 кадрів в секунду (при роздільній здатності 512 × 512) [84], [95].

Оскільки виробники ФМ йдуть по шляху збільшення кількості пікселів матриць при незмінних фізичних розмірах ФМ, то це призводить до зменшення розмірів фоточутливих елементів [96]. Наприклад, для ФМ розміром 1/2.83 дюйма з роздільною здатністю  $640 \times 480$  пікселів розмір елемента рівний  $8.0 \times 8.0$  мкм, а для роздільної здатності  $5664 \times 4248$  пікселів розмір елемента складає  $0.9 \times 0.9$  мкм [95]. Таке зменшення розмірів фоточутливих елементів спричинює значні рівні шуму на цифрових зображеннях, тому існує потреба у розробленні програмно-апаратних засобів для фільтрації шуму.

## 1.3 Методи та засоби підвищення якості зображень у комп'ютеризованих системах

Підвищення якості зображень, зокрема, шляхом зниження рівня шуму та оптимізацією параметрів фото- і відеокамер, є важливим етапом їх попереднього оброблення в КОЕС. Для квазіоптимального зниження рівня шуму (за критерієм співвідношення сигнал/шум) попередньо визначається відповідними методами та засобами його рівень [34]-[38].

Методи оцінювання рівня шуму  $\sigma_{NE}$  на зображеннях поділяються на ручні й автоматичні [97]-[100]. До ручних методів належить метод аналізу гістограм розподілу яскравості для виділеної ділянки зображення, на якій в основному присутній шум. При цьому виділена ділянка називається також ділянкою інтересу (ділянкою уваги) (Region Of Interest – ROI) [25, c.100], [26], [27, c.153-158]. Рівень гаусового шуму визначається через СКВ гістограми ділянки ROI. Перевагою методу є його простота, проте висока точність

обчислення рівня шуму забезпечується тільки тоді, коли у виділеній ділянці зображення СКВ шуму значно перевищує СКВ корисного сигналу. Суттєвим недоліком ручних методів є трудомісткість. З метою підвищення швидкодії для автоматичних методів обчислення рівня шуму в КОЕС застосовується їх апаратна реалізація, наприклад, за допомогою ПЛІС [90].

Розглянемо можливості та обмеження методу аналізу гістограм h(z)[25]-[28] розподілу яскравості для виділеної ділянки зображення ROI, на якій в основному присутній шум (рис. 1.7); з метою аналізу гістограма h(z)апроксимується розподілом Гауса  $h_G$ . Важливо, що на експериментальних зображеннях переважає гаусовий шум, про що свідчить мале значення  $\Delta_h$  – КСКП між значеннями h(z) та  $h_G$  (рис. 1.7, в); такий результат узгоджується з даними інших досліджень шуму [14], [20], [25], [26], [32]. Рівень гаусового шуму визначається через СКВ гістограми ділянки ROI, а ділянка ROI виділяється, наприклад, шляхом сегментації зображення.

Метод гістограм забезпечує високу точність обчислення рівня шуму  $\sigma_{NE}$ , проте, передбачає вибір ділянки інтересу в ручному режимі, що є трудомістким. Тому для програмної реалізації перспективними є автоматичні методи оцінювання рівня шуму на зображеннях, які поділяються на:

1. Засновані на фільтрації методи (filter-based approaches) [34], в яких зображення обробляється високочастотними або низькочастотними фільтрами. Рівень шуму обчислюється на основі фільтрованого зображення для високочастотних фільтрів і на основі різниці початкового та фільтрованого зображень для низькочастотних фільтрів. Головним недоліком цих методів є залежність результату фільтрації не тільки від шуму, але й від корисного сигналу, особливо для зображень з чіткими контурами та яскраво вираженими текстурами.

2. Кускові або блокові методи (patch-based approaches or block-based methods) [34]-[36], в яких на зображеннях виділяється множина блоків (ділянок). У межах блоків зміна яскравості зображення спричинюється в основному шумом, а рівень шуму обчислюється, наприклад, за методом головних компонент (principal component analysis – PCA) [34], [37], [38]. Недоліком блокових методів є залежність обчисленого рівня шуму від корисного сигналу.



Рисунок 1.7 – Визначення рівня гаусового шуму на експериментальному зображенні *f<sub>n</sub>*, отриманому відеокамерою Samsung PNO-9080R при низькій освітленості 0.3 лк [100]: а) зображення з прямокутною ділянкою інтересу

ROI; б) в) гістограми h(z) для ділянки інтересу,  $\sigma_{NE} = \sigma_h = 0.02858$ ;

σ<sub>h</sub> – СКВ гістограми; Q<sub>h</sub> – кількість напівінтервалів гістограми

3. Статистичні методи [39], засновані на фільтрації зображень і аналізі значення ексцесу для розподілу яскравості зображення залежно від рівня шуму. Точність методів значно залежить від частотного спектру зображення.

 Методи, засновані на аналізі Фур'є спектрів зображень [22], [26].
 Точність таких методів значно знижується при обробленні зображень, для яких спектри корисного сигналу та шуму подібні.

5. Методи, засновані на використанні вейвлет-перетворень (Wavelet transform) [25], [26], які передбачають аналіз вейвлет-коефіцієнтів із певним порогом. Проте, вибір оптимального значення порогу є складним завданням.

Недоліками перерахованих методів є їх недостатня точність або швидкодія. Проте, перспективним є метод обчислення рівня шуму, заснований на фільтрації, який володіє високою точністю та швидкодією. Недолік методу фільтрації, а саме зниження точності для зображень з чіткими контурами та текстурами, можна усунути за рахунок обчислення рівня шуму тільки в ділянках інтересу.

Методи фільтрації гаусового шуму на цифрових зображеннях у КОЕС поділяються на лінійні та нелінійні [25], [26], [101]-[103] (рис. 1.8). Лінійна фільтрація в просторовій області зводиться до множення кожного пікселя заданого околу на відповідний коефіцієнт і додавання отриманих добутків для отримання результату фільтрації для кожного пікселя. Коефіцієнти лінійної фільтрації записуються у вигляді прямокутної матриці, яка називається маскою або ядром фільтра. Відомим лінійним фільтром є фільтр Гауса, в якому як ядро використовується двовимірна функція Гауса з СКВ  $\sigma_w$ .

Одним з класичних методів лінійної фільтрації шуму на зображенні є вінерівська фільтрація [2], [21], яка заснована на розгляді яскравості зображення і шуму як випадкових процесів. Задача фільтрації формулюється так: потрібно знайти таку оцінку g для неспотвореного зображення f, щоб середня квадратична похибка між g та f була мінімальною. Середня квадратична похибка (mean square error – MSE) фільтрації описується формулою

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i}^{M} \sum_{k}^{N} [f(i,k) - g(i,k)]^2, \qquad (1.9)$$

де i = 1, ..., M; k = 1, ..., N; M, N – висота і ширина зображення в пікселях.

Суттєвий недолік вінерівської фільтрації полягає в тому, що потрібні емпіричні дані про спектр шуму та спектр неспотвореного зображення.

Нелінійна фільтрація є складнішою за лінійну, оскільки вихід нелінійного фільтра нелінійно залежить від яскравостей початкового зображення. До поширених нелінійних фільтрів належать блокові [104]-[105], медіанні [102] та білатеральні [48], Фур'є- [106]-[109] і вейвлет-фільтри [110]-[112], фільтри з використанням диференційних рівнянь з частинними похідними (які використовують градієнт яскравості зображень) [113]-[115] та ін.



Рисунок 1.8 – Класифікація основних цифрових фільтрів

У випадку медіанних фільтрів [102] значення відліків усередині вікна фільтра сортуються в порядку зростання (спадання), а виходом фільтру є значення, що знаходиться в середині упорядкованого списку.

Білатеральні фільтри [48] будуються поєднанням двох фільтрів Гауса, які працюють в просторовій області та в області яскравості; білатеральні фільтри зменшують рівень шуму при збереженні чіткості контурів.

Вейвлет-фільтрація [110]-[112] цифрових зображень використовує дискретне вейвлет-перетворення, в результаті чого отримуються матриці вейвлет-коефіцієнтів за рівнями, які обробляються пороговими функціями. Фільтроване зображення отримується на основі зворотного дискретного вейвлет-перетворення коректованих матриць вейвлет-коефіцієнтів.

Нелінійні фільтри менше згладжують контури [116]-[118], але вибір оптимальних параметрів нелінійної фільтрації значно складніший, ніж лінійної [119]-[120]. Тому для зменшення рівня шуму доцільно використати низькочастотний фільтр Гауса, який описується одним параметром – СКВ  $\sigma_w$  ядра. Вибір оптимальних параметрів фільтрації зображень є настільки складним, що у багатьох поширених графічних редакторах [121], [122] користувачі повинні вибирати ці параметри в ручному режимі (рис. 1.9).

В КОЕС використовують суб'єктивні та об'єктивні критерії якості зображень [116]-[118]. Об'єктивна оцінка якості враховує міру близькості яскравості двох зображень: зразка *g* і еталону *f*. У випадку суб'єктивного оцінювання якість розглядається як параметр самого зображення.



Рисунок 1.9 – Вибір СКВ фільтра Гауса в ручному режимі в графічних редакторах: a) Adobe Photoshop [121]; б) PhotoScape [122]

Поширеним методом суб'єктивної оцінки візуальної якості зображення є експертиза, в якій застосовується абсолютні та порівняльні експертні оцінки. У випадку абсолютних оцінок виконується оцінка якості зображення за наперед встановленою шкалою, а у випадку порівняльних оцінок – впорядкування зображень за спаданням (або зростанням) якості. Однакові умови проведення експертиз забезпечуються згідно вимог рекомендації ITU-R BT.500-11 міжнародного союзу електрозв'язку [118].

Використовуються такі об'єктивні критерії якості зображень:

1. З врахуванням особливостей системи зору людини (PSNR-HVS-M) [118].

2. Без врахування особливостей системи зору людини: середня квадратична похибка (1.9), корінь СКП, співвідношення сигнал/шум (ВСШ) [25], пікове співвідношення сигнал/шум [116]-[118].

Для оцінки якості зображень з врахуванням особливостей системи зору людини використовуються спеціалізовані критерії, так звані метрики HVS (Human Visual System) [118]. До поширених HVS-метрик належить, зокрема, PSNR-HVS-M — критерій з врахуванням пікового співвідношення сигнал/шум PSNR. Такий критерій враховує закон Фехнера-Вебера, у відповідності до якого зір має логарифмічну характеристику для яскравості світла.

У КОЕС підвищення якості зображень доцільним є використання об'єктивних критеріїв, оскільки такі критерії є однозначними та відносно просто реалізуються програмно.

рівня Вищеописані зменшення ШУМУ зображеннях методи на реалізуються в КОЕС і КС апаратно за допомогою процесорів цифрового оброблення сигналів (ЦОС) [119], [120] або ПЛІС (наприклад, FPGA) [123], [124] (рис. 1.10), що забезпечує значне підвищення швидкодії оброблення зображень (порівняно з програмним обробленням). У такій КОЕС (рис. 1.10) значення елементів ядра фільтра Гауса записуються в модуль блокової пам'яті з довільним доступом (Block Random Access Memory – BRAM1), а яскравості пікселів вхідного (початкового) зображення – в модуль пам'яті BRAM2 (запис виконується з джерела зображення через модуль взаємодії з портами). Номер рядка та стовпця елементів ядра фільтра задаються лічильниками MY1 та MX1 відповідно, а номер рядка та стовпця пікселів початкового зображення лічильниками MY2 та MX2 відповідно. Виконання всіх операцій синхронізується сигналом Clk. Сигнал SoP (Sum of Products) вказує на завершення кожної операції згортання. У модуль згортання (Convolution Module) спочатку записуються з BRAM1 значення елементів ядра фільтра, потім з BRAM2 записуються яскравості пікселів, а в результаті їх згортання обчислюється яскравість пікселя фільтрованого зображення (Pixel-conv).



Рисунок 1.10 – Структура КОЕС фільтрації цифрових зображень засобами FPGA (Xilinx Virtex 5) [123], [124]

Фільтроване зображення зберігається в BRAM3, після чого через модуль взаємодії з портами виводиться в приймач зображення. У КОЕС зниження рівня шуму також застосовуються медіанні та інші типи фільтрів [125], [126]. Проте, в усіх випадках ядро фільтра є або фіксованим, або обчислюється на основі тільки амплітудних параметрів розподілу яскравості зображення та рівня шуму (який визначається існуючими методами зі значною похибкою). За рахунок цього існуючі КОЕС зниження рівня шуму в більшості випадків не забезпечують оптимальне ВСШ для фільтрованих зображень.

Для більшості моделей відеокамер при використанні стандартного програмного забезпечення параметри камер «Яскравість», «Констраст» та ін. встановлюються в ручному режимі. Існуючі програмні засоби для автоматичного налаштування параметрів відеокамер є платними, опис принципів їх роботи відсутній у вільному доступі, відповідно складно оцінити якість роботи таких засобів (наприклад, програма «Интеллект» [93]). Методи налаштування параметрів відеокамер апаратно реалізуються, зокрема, на ПЛІС (FPGA) (рис. 1.11). Принцип їх роботи полягає у знаходження таких параметрів відеокамери, які забезпечують максимум об'єктивного критерію якості зображень (наприклад, співвідношення сигнал/шум) [116]-[118]. Тому для ефективного налаштування параметрів відеокамер потрібно розробити високоточні методи та засоби для оцінки рівня шуму на зображенні.



Рисунок 1.11 – Структура КОЕС налаштування параметрів відеокамери, де блок оброблення зображення реалізовано засобами FPGA (Xilinx Spartan-3A) [127]

Таким чином, розроблення методів і засобів підвищення якості формування зображень у КОЕС, яке виконується шляхом зниження рівня шуму та адаптивної зміни параметрів відеокамер, є актуальним завданням.

#### 1.4 Вибір напряму й обґрунтування завдань досліджень

Дисертаційна робота присвячена розробленню методів та програмноапаратних засобів підвищення візуальної якості формування зображень у комп'ютеризованих оптико-електронних системах шляхом зниження рівня шуму й адаптивної зміни параметрів відеокамер, де джерелами зображень є цифрові фото- та відеокамери.

Як модель шуму використано адитивний білий гаусовий шум, рівень якого описується середнім квадратичним відхиленням  $\sigma_N$ . Розглянуто побудову і принципи роботи КОЕС формування та попереднього оброблення цифрових зображень на основі фото- та відеокамер, а також основні види шумів, які виникають у таких системах. Проаналізовано методи та засоби визначення рівня та фільтрації шумів на зображеннях, розглянуто засоби налаштування параметрів цифрових відеокамер.

У результаті аналізу побудови та принципів роботи фоточутливих сенсорів фото- та відеокамер, а саме ПЗЗ та матриць КМОН, підтверджено правильність опису шумів відеосигналу в моделі гаусового шуму. Розглянуто можливість програмного керування такими параметрами відеокамер, як «Яскравість» і «Контраст». Зроблено висновок про доцільність підвищення якості зображень у КОЕС за рахунок адаптивної зміни параметрів відеокамер і програмно-апаратної фільтрації шуму на зображеннях.

Аналіз існуючих методів і засобів обчислення рівня шуму на зображеннях показав, що існує потреба в автоматичному та точному методі визначення рівня шуму. Тому доцільно, як аналог, використати заснований на фільтрації метод обчислення рівня шуму, який володіє високою точністю та швидкодією. Точність такого методу можна підвищити за рахунок обчислення рівня шуму на зображеннях тільки в ділянках інтересу ROI.

Зниження рівня шуму на зображеннях у КОЕС виконується за допомогою лінійних і нелінійних фільтрів, при цьому вибір оптимальних параметрів нелінійної фільтрації значно складніший, ніж параметрів лінійної. Тому для фільтрації шуму доцільно використати лінійний низькочастотний фільтр Гауса, який описується тільки одним параметром – СКВ ядра. Апаратну реалізацію методу зниження рівня шуму доцільно виконувати засобами ПЛІС з метою підвищення швидкодії оброблення зображень.

Отже, розроблення високоточних і швидкодійних програмно-апаратних засобів комп'ютеризованих систем, призначених для підвищення якості зображень шляхом зниження їх рівня шуму та адаптивної зміни параметрів відеокамер, є актуальним завданням з наукової та практичної точок зору.

Метою роботи є збільшення точності та швидкодії програмно-апаратних засобів комп'ютеризованих оптико-електронних систем, призначених для покращення візуальної якості формування зображень за рахунок зниження їх рівня шуму й адаптивної зміни параметрів відеокамер.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі завдання:

- Провести аналіз побудови та принципів роботи КОЕС формування зображень, які як джерело початкового сигналу використовують відеокамери; запропонувати високоефективну архітектуру таких систем.
- Провести аналіз методів і засобів підвищення якості формування зображень, які застосовують фільтрацію зображень та адаптивну зміну параметрів відеокамер, з метою визначення основних напрямів підвищення їх точності та швидкодії.
- Розробити математичну модель, методи та програмно-апаратні засоби комп'ютеризованих систем для оцінки якості зображень з урахуванням їх рівня шуму, виконати дослідження запропонованих методів.
- Розробити математичну модель, метод і програмно-апаратні засоби для підвищення якості зображень у комп'ютеризованих системах шляхом фільтрації, дослідити можливості запропонованого методу.
- Розробити методи та створити програмно-апаратні засоби КОЕС для адаптивної зміни параметрів цифрових відеокамер.
- Розробити метод та створити програмно-апаратні засоби КОЕС для підвищення якості зображень із використанням паралельних обчислень.

#### Висновки до розділу 1

1. Розглянуто побудову та принципи роботи комп'ютеризованих оптико-електронних систем формування та попереднього оброблення зображень на основі фото- та відеокамер. Проаналізовано основні види шумів, які виникають у КОЕС, а саме фотонний, дробовий, темновий, тепловий, шум фіксованих пікселів, шуми зчитування та квантування. Встановлено, що сумарний вплив таких шумів описується моделлю гаусового шуму, рівень якого визначається як СКВ.

2. Розглянуто побудову та принцип роботи фоточутливих сенсорів фотота відеокамер, а саме приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) і матриць комплементарних приймачів метал-оксид-напівпровідник (КМОН). Показано, що підвищення якості зображень у КОЕС доцільно виконувати за рахунок адаптивної зміни параметрів «Яскравість» і «Контраст» відеокамер і програмно- апаратної фільтрації шуму на зображеннях.

3. Проаналізовано існуючі методи та засоби оцінки якості зображень у КОЕС з урахуванням рівня шуму на зображеннях. Встановлено, що перспективним методом визначення рівня шуму є метод, заснований на фільтрації. Точність такого методу можна підвищити за рахунок обчислення рівня шуму на зображеннях тільки в ділянках інтересу, а швидкодію доцільно підвищити шляхом апаратної реалізації методу засобами ПЛІС.

4. Проаналізовано існуючі методи та засоби підвищення якості зображень шляхом фільтрації шуму. Показано, що зменшення рівня шуму на зображеннях доцільно виконувати фільтром Гауса, а швидкодію фільтрації зображень можна підвищити завдяки використанню апаратних засобів, зокрема, шляхом розпаралелювання обчислень.

#### **РОЗДІЛ 2**

# ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ВІЗУАЛЬНОЇ ЯКОСТІ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Підвищення візуальної якості формування зображень у комп'ютеризованих оптико-електронних системах, яке виконується шляхом зниження рівня шуму зображень та адаптивної зміни параметрів відеокамер, вимагає узгодження всіх етапів оброблення зображень. З цією метою запропоновано архітектуру КОЕС, яка складається зі взаємозв'язаних підсистем визначення рівня шуму, фільтрації шуму та адаптивної зміни параметрів відеокамер.

Точність обчислення рівня шуму на зображеннях визначає ефективність їх наступного оброблення в КОЕС і КС, тому вдосконалено методи визначення рівня шуму. Для цього розроблено математичну модель фільтрації гаусового шуму, яка дозволяє точно виділяти ділянки інтересу ROI. На основі математичної моделі фільтрації шуму удосконалено методи LLROI та HLROI визначення рівня шуму на зображеннях. Метод LLROI (Low-pass & Low-pass filtration & Region Of Interest) засновано на низькочастотній фільтрації шумової складової та низькочастотній фільтрації при виділенні ROI. Метод HLROI (High-pass & Low-pass filtration & Region Of Interest) засновано на високочастотній фільтрації при виділенні шумової складової та низькочастотній фільтрації при виділенні фільтрації при виділенні шумової складової та низькочастотній фільтрації при виділенні цілянок інтересу.

Важливим завданням попереднього оброблення зображень у КОЕС є зменшення рівня шумів з високою точністю та швидкодією, тому для вирішення цього завдання розроблено метод фільтрації шуму на зображеннях за допомогою фільтра Гауса. Шляхом оброблення тестових зображень показано, що оптимальне СКВ  $\sigma_{wT}$  ядра фільтра Гауса залежить від рівня шуму, а також від просторового періоду, діапазону значень та орієнтації корисного сигналу. Тому запропонована математична модель корисного сигналу забезпечує зменшення спотворень корисного сигналу, які виникають при фільтрації зображень.

# 2.1 Архітектура та функції комп'ютеризованої системи для підвищення візуальної якості формування зображень

З метою обґрунтованого формування вимог до комп'ютеризованих систем, які отримують початковий сигнал з відеокамер і призначені для підвищення якості формування зображень шляхом зниження рівня шуму та адаптивної зміни параметрів відеокамер, розроблено відповідні послідовності оброблення зображень у КОЕС (рис. 2.1).

Послідовність оброблення зображень у КОЕС (рис. 2.1, а) при зниженні рівня шуму визначено на основі аналізу методів-аналогів (підрозділ 1.3) та існуючих КС і КОЕС (рис. 1.10). Рівень шуму знижується в підсистемі фільтрації шуму, а для точного визначення параметрів фільтра обчислюється рівень шуму у відповідній підсистемі (рис. 2.1, а). Джерелом початкових зображень  $f_n$ , які містять корисний сигнал  $f_s$  і шумову складову  $f_h$ , для КОЕС є цифрові фото- та відеокамери. Як було показано в розділі 1, шум на цифрових зображеннях у КОЕС задовільно описується моделлю гаусового шуму, тому як рівень такого шуму використано його СКВ  $\sigma_{NE}$ . Особливість запропонованої підсистеми визначення рівня шуму полягає в обчисленні рівня шуму не для всього зображення, а тільки для ділянки інтересу ROI [25], на якій переважає шум. При виділенні ділянки ROI, яка описується сигналом  $f_{ROI}$ , враховуються статистичні характеристики шуму, що дозволяє підвищити точність обчислення його рівня. Рівень шуму  $\sigma_{NE}$  обчислюється на основі СКВ гістограми  $\sigma_h$  шумової складової  $f_h$  з врахуванням ROI.

Особливістю запропонованої підсистеми фільтрації шуму (рис. 2.1, а) є визначення параметрів ядра фільтра w не тільки на основі рівня шуму  $\sigma_{NE}$ , але й з урахуванням частотних (середня частота  $v_{SE}$ ) та амплітудних (діапазон значень  $A_{SE}$ ) параметрів корисного сигналу. Це є важливим, оскільки в існуючих КОЕС [123]-[126] застосовуються або фіксовані ядра фільтрів, або ж для обчислення ядра фільтра використовуються тільки амплітудні параметри зображення. Врахування частотних параметрів сигналу при обчисленні ядер w потенційно дозволяє підвищити ВСШ для фільтрованих зображень g.



a)



Рисунок 2.1 – Послідовності цифрового оброблення зображень у КОЕС для підвищення якості формування зображень:

а) послідовність оброблення при зниженні рівня шуму;

б) послідовність оброблення при адаптивній зміні параметрів B<sub>r</sub> «Яскравість»

і С<sub>t</sub> «Контраст» відеокамер

Послідовність оброблення зображень у КОЕС (рис. 2.1, б) при адаптивній зміні параметрів B<sub>r</sub> «Яскравість» і C<sub>t</sub> «Контраст» відеокамер визначено на основі аналізу програм-аналогів (підрозділ 1.3) [93] та існуючих КОЕС (рис. 1.6, рис. 1.11). Параметри відеокамери «Яскравість» і «Контраст» суттєво впливають на ВСШ зображень f<sub>n</sub>, оскільки визначають режими оброблення відеосигналу на апаратному рівні (рис. 1.6). Адаптивна зміна параметрів відеокамер виконується з урахуванням рівня шуму  $\sigma_{NE}$  на експериментальних зображеннях f<sub>n</sub>, який обчислюється у відповідній підсистемі (аналогічно як на рис. 2.1, а). Принцип роботи підсистеми адаптивної зміни параметрів відеокамери полягає у знаходження таких параметрів B<sub>r</sub> і C<sub>t</sub> (шляхом перебору множини їх дискретних значень), які забезпечують максимум об'єктивного критерію якості зображень  $f_n$  [116]-[118] у відповідному модулі. Параметри  $B_r$  і  $C_t$  уточнюють почергово (зміна одного параметру виконується при фіксованому іншому). При використанні як критерію якості зображень відношення сигнал/шум значення СКВ  $\sigma_{so}$ яскравості зображення  $f_n$  обчислюється в модулі обчислення параметрів  $f_n$ . Особливість запропонованої послідовності зміни параметрів відеокамер полягає у застосуванні високоточної підсистеми визначення рівня шуму.

На основі вищеописаних послідовностей оброблення зображень (рис. 2.1) запропоновано архітектуру КОЕС для підвищення візуальної якості зображень (рис. 2.2), яка враховує спільне використання високоточної підсистеми визначення рівня шуму при його фільтрації та при адаптивній зміні параметрів відеокамер. Це дозволяє уникнути дублювання блоків КОЕС, а також збільшити ВСШ на оброблених зображеннях. Згідно з такою архітектурою КОЕС для підвищення якості зображень повинна виконувати наступні функції:

1. Зчитування початкового цифрового зображення  $f_n$  з відеокамери.

- 2. Визначення рівня шуму  $\sigma_{NE}$ .
- 3. Фільтрацію шуму на зображеннях за допомогою фільтра Гауса.
- 4. Адаптивну зміну параметрів відеокамер  $B_r$  «Яскравість» і  $C_t$  «Контраст».
- 5. Вивід зображення-результату *g* з метою його подальшого аналізу, візуалізації та збереження.



Рисунок 2.2 – Архітектура КОЕС для підвищення візуальної якості зображень

Забезпечується програмне керування всіма частинами КОЕС. З урахуванням вищенаведених функцій КОЕС визначено такі вимоги до частин системи, джерел і приймачів цифрових зображень, форматів даних:

- USB-відеокамера формує зображення *f<sub>n</sub>* розмірами *M* × *N* пікселів, які не перевищують 1920×1080 пікселів (Full HD) з частотою кадрів *f<sub>K</sub>* (*f<sub>K</sub>* ≤ 30 Гц); зображення формуються в кольоровій моделі RGB з глибиною кольору 8 біт на канал. Як фоточутливі матриці застосовуються ПЗЗ або КМОН сенсори.
- У підсистемі визначення рівня шуму значення σ<sub>NE</sub> обчислюються методом фільтрації з врахуванням ділянки ROI; зображення f<sub>n</sub> обробляються як прямокутні матриці чисел, моделі кольору такі: відтінки сірого або RGB. КСКП обчислення рівня шуму не повинен перевищувати 0.003 [34] при 0 ≤ σ<sub>NE</sub> ≤ 0.2 для серії тестових зображень.
- 3. Підсистема фільтрації шуму на зображеннях виконує зменшення рівня шуму за допомогою фільтра Гауса, параметри ядра якого обчислюються на основі рівня шуму о<sub>NE</sub>, а також амплітудних і частотних параметрів корисного сигналу. Оцінка якості зображень виконується на основі об'єктивних критеріїв якості (СКП (1.9), ВСШ [25], пікового ВСШ), а також суб'єктивних критеріїв якості для випадку порівняльних оцінок [118]. Пікове ВСШ для тестових зображень повинно відрізнятися від значень, отриманих за допомогою оптимального фільтра Гауса, не більше ніж на 1 дБ [125].

- 4. Підсистема адаптивної зміни параметрів відеокамер B<sub>r</sub> «Яскравість» і C<sub>t</sub> «Контраст» обчислює значення B<sub>r</sub> і C<sub>t</sub> за максимумом критерію якості зображень [118]. Зміна параметрів відеокамер виконується через задані проміжки часу (≈ 30 хв) або у випадку зміни умов освітлення сцени; в інших випадках використовуються параметри відеокамер за замовчуванням.
- 5. Підсистема аналізу, візуалізації та збереження виконує постоброблення зображень g (наприклад, засобами персональних комп'ютерів та мережевого обладнання) з метою вирішення прикладних задач у системах відеоспостереження, контролю виробничих процесів та ін.

З врахуванням вищенаведених вимог для кожної підсистеми (рис. 2.2) розроблено відповідні вимоги до методів оброблення зображень:

- Методи визначення рівня шуму у відповідній підсистемі повинні виділяти шумову складову зображення з використанням низькочастотної або високочастотної фільтрації та з врахуванням ділянки ROI. При обробленні зображень потрібно використовувати операцію згортання (базову операцію ЦОЗ) та прості з обчислювальної точки зору операції (віднімання, поелементного множення матриць, обчислення суми елементів матриці та ін.), що дозволяє реалізувати їх апаратно і забезпечує високу швидкодію методів.
- 2. Метод фільтрації шуму у відповідній підсистемі повинен використовувати низькочастотний фільтр Гауса. Параметри ядра фільтра обчислювати на основі рівня шуму та параметрів корисного сигналу, які потрібно визначати шляхом аналізу енергетичного спектра зображення. При обчисленні спектра зображення застосовувати швидке дискретне перетворення Фур'є, що забезпечує високу швидкодію методу.
- Методи адаптивної зміни параметрів відеокамер «Яскравість» і «Контраст», реалізація яких передбачена у відповідній підсистемі, повинні використовувати критерій якості зображень з врахуванням рівня шуму, обчисленого запропонованим методом.

Отже, реалізація КОЕС для підвищення візуальної якості зображень згідно з запропонованою архітектурою передбачає розроблення відповідних методів для зниження рівня шуму та адаптивної зміни параметрів відеокамер.

## 2.2 Математична модель процесу фільтрації зображень, сформованих у фоточутливих матрицях відеокамер

Шум зображень, сформованих у фоточутливих матрицях відеокамер, досить точно описується моделлю гаусового шуму (див. підрозділ 1.1). Тому при обчислені рівня шуму в КОЕС з використанням відеокамер можна вважати, що спектральна густина потужності шуму є постійною для всіх просторових частот, а для корисного сигналу переважають низькі та середні просторові частоти [128]-[131]. Тобто, у високочастотній складовій для розподілу яскравості зображення переважає шумова складова, СКВ  $\sigma_N$  якої є рівнем шуму.

Дослідження шумової складової яскравості цифрового зображення  $f_n$ виконано шляхом аналізу радіального розподілу  $P_R$  та нормованого радіального розподілу  $P_{RN}$  для енергетичного спектра  $P_S$  зображення (див. додаток Б1). У результаті отримано, що якщо на зображенні присутній гаусовий шум, то для високих просторових частот  $v_r$  рівень шуму  $\sigma_N \approx P_{RN}(v_r)$ . Тому суттєво відрізняються зміни статистичних характеристик (зокрема, СКВ) шуму та корисного сигналу, які виникають у процесі фільтрації зображення. Такі закономірності доцільно використати для виділення ділянок зображень з переважаючою шумовою складовою [34].

Розроблено математичну модель процесу оцінки статистичних характеристик гаусового шуму з використанням низькочастотної фільтрації. У результаті низькочастотної фільтрації зображення  $f_n$  (рівень шуму якого дорівнює  $\sigma_N$ ) з ядром фільтра отримується згладжене зображення g, для якого СКВ шуму дорівнює  $\sigma_{NC}$ . Знаючи коефіцієнти ядра фільтра w, необхідно встановити зв'язок між параметрами шуму  $\sigma_{NC}$  та  $\sigma_N$ , а далі на основі такого зв'язку виділити ділянки зображення  $f_n$ , на яких переважає шум.

Просторова низькочастотна фільтрація [25]-[26] полягає в згортанні зображення  $f_n = (f_n(i,k))$  з ядром (вікном) низькочастотного фільтра w = (w(m,n)) розміром  $M_w \times N_w$  елементів за формулою

$$g(i,k) = \sum_{m=1}^{Mw} \sum_{n=1}^{Nw} f_n(i - m + m_c, k - n + m_c) \cdot w(m,n), \qquad (2.1)$$

де

g = (g(i,k)) - фільтроване зображення; i = 1,...,M, k = 1,...,N; $M_{w2}$ ,  $N_{w2} - цілі частини від половини розмірів ядра фільтра,$  $<math>m_c = (M_{w2} + 1) - центр ядра фільтра за висотою;$  $n_c = (N_{w2} + 1) - центр ядра фільтра за шириною.$ 

Сума елементів низькочастотного ядра *w* дорівнює 1. Операція згортання зображення *f<sub>n</sub>* з ядром *w* спрощено записується у вигляді

$$g = f_n * w. \tag{2.2}$$

Центром ядра фільтра є елемент  $w (M_{w2} + 1, N_{w2} + 1) = w (m_c, n_c)$ . Ядро фільтра записано у вигляді прямокутної матриці w = (w(m, n))

$$w = \begin{bmatrix} w(1,1) & \dots & w(1,n_c) & \dots & w(1,N_w) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w(m_c,1) & \dots & w(m_c,n_c) & \dots & w(m_c,N_w) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w(M_w,1) & \dots & w(M_w,n_c) & \dots & w(M_w,N_w) \end{bmatrix},$$
(2.3)

де *m* – номер рядка, *n* – номер стовпця.

Ядро фільтра w описано двовимірною функцією Гауса

$$w(m,n) = \frac{1}{\sigma_w \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-((m-m_c)^2 + (n-n_c)^2)}{2\sigma_w^2}\right),$$
(2.4)

де  $\sigma_w$  – СКВ розподілу Гауса;  $m = 1,...,M_w$ ,  $n = 1,...,N_w$ ;

 $m_c$ та  $n_c$  – координати центру ядра фільтра за висотою та шириною.

З врахуванням правила Зо для нормального розподілу отримано такі розміри фільтра:

$$M_w = [6 \cdot \sigma_w], \ N_w = [6 \cdot \sigma_w]. \tag{2.5}$$

У підрозділі 1.1 було показано, що на цифрових зображеннях  $f_n$ , отриманих за допомогою фото- та відеокамер, переважає гаусовий шум з СКВ  $\sigma_N$ . У такому випадку яскравість кожного пікселя  $f_n(i_1, k_1)$  можна розглядати як випадкову величину з дисперсією  $D_N = \sigma_N^2$ . Дисперсію гаусового шуму для довільного пікселя зображення g(i, k), отриманого в результаті згортання  $f_n$  з ядром w (розміром  $M_w \times N_w$  елементів) за формулою (2.1), обчислено як дисперсію  $D_{NC}$  середнього арифметичного  $M_w \times N_w$ однаково розподілених взаємно незалежних випадкових величин  $f_n(i_1, k_1)$ , помножених на відповідні елементи ядра w(m, n). Тому дисперсію  $D_{NC}$ зображення g обчислено за отриманою формулою

$$D_{NC} = D(g_c(i,k)) = D\left(\sum_{m=1}^{M_w} \sum_{n=1}^{N_w} f_n(i_1,k_1) \cdot w(m,n)\right) = D_N \sum_{m=1}^{M_w} \sum_{n=1}^{N_w} w^2(m,n), (2.6)$$

де  $D_N$  – дисперсія кожної з випадкових величин  $f_n(i_1, k_1)$ ,

$$D_N = D(f_n(i_1, k_1)), i_1 = i - m + m_c, k_1 = k - n + n_c.$$

У формулі (2.6) використані такі властивості дисперсії: постійний множник можна винести за знак дисперсії, піднісши його до квадрату; дисперсія суми незалежних величин дорівнює сумі дисперсії складових [132] –[133].

СКВ гаусового шуму  $\sigma_{NC}$  для зображення *g* обчислено через його дисперсію (2.6) за формулою

$$\sigma_{NC} = \sqrt{D_{NC}} = \sqrt{D_N} \sqrt{\sum_{m=1}^{M_w} \sum_{n=1}^{N_w} w^2(m,n)} = \sigma_N \sqrt{\sum_{m=1}^{M_w} \sum_{n=1}^{N_w} w^2(m,n)} .$$
(2.7)

Формула (2.7) показує зменшення СКВ гаусового шуму  $\sigma_{NC}$  у результаті згортання зображення  $f_n$  з ядром w фільтра Гауса з СКВ  $\sigma_w$  (табл. 2.1). При  $\sigma_w = 1$  обчислені на основі (2.7) значення СКВ гаусового шуму ( $\sigma_{NC} = 0.02823$ ) практично рівні експериментальним СКВ шуму ( $\sigma_{NCE} = \sigma_h = 0.02822$ ) (рис. 2.3). Для інших значень  $\sigma_w$  отримано аналогічні результати, що підтверджує правильність отриманої залежності  $\sigma_{NC}(\sigma_w)$ .



Рисунок 2.3 – Гістограми зображень: а) зображення  $f_n$  з гаусовим шумом ( $\sigma_N = 0.1$ ); б) гістограма h(z) зображення  $f_n$ ; в) профілі зображень  $f_n$  та g( $\sigma_w = 1$ ), обчислені в  $Q_p$  точках; г) гістограми зображень  $f_n$  та g; д) гістограма зображення  $f_n$  ( $\sigma_{NE} = 0.10006$ ); е) гістограма зображення g ( $\sigma_{NCE} = 0.02822$ )

Таблиця 2.1 – Обчислені на основі (2.7) значення СКВ гаусового шуму  $\sigma_{NC}$  на зображенні *g*, отриманому шляхом згортання зображення  $f_n$  ( $\sigma_N = 0.1$ ) з ядром фільтра Гауса з СКВ  $\sigma_w$ 

σ <sub>w</sub> , пікселі	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	5,00	7,00
$\sigma_{NC}, 10^{-2}$	2,823	2,258	1,881	1,6017	1,4013	0,566	0,405
$\sigma_{NC} / \sigma_N$	0.2823	0.2258	0.1881	0.1617	0.1413	0.0566	0.0405

Якщо всі коефіцієнти ядра w однакові і дорівнюють  $1/(M_w \times N_w)$ , формула (2.7) зводиться до класичного вигляду [132]

$$\sigma_{NC} = \sigma_N \sqrt{M_w \cdot N_w \cdot \frac{1}{(M_w \cdot N_w)^2}} = \frac{\sigma_N}{\sqrt{M_w \cdot N_w}}.$$
(2.8)

Гістограми h(z) цифрових зображень  $f_n$  (рис. 2.3, д,е) отримано як графіки статистичного розподілу елементів (пікселів) зображень з різною яскравістю z [26], [132, с.195-196]. Всі значення z поділено на  $Q_h$ напівінтервалів  $z_b \le z < z_{b+1}$ , де  $b = 1,..., Q_h$ . Таким чином, значення h(z) рівне відносній кількості пікселів, яскравість z яких належить напівінтервалу яскравості з номером b. Суму всіх значень гістограми h(z) нормовано до 1.

Для отриманої гістограми h обчислено центр ваги  $m_{hb}$  (за номерами b) та центр ваги  $m_h$  (за яскравістю z) (рис. 2.3, г). СКВ гістограми  $\sigma_{hb}$  (за номерами b) обчислено за формулою

$$\sigma_{hb} = \sqrt{\sum_{b=1}^{Qh} (b - m_{hb})^2 \cdot h(b)} .$$
 (2.9)

Значення  $\sigma_{hb}$  перетворено до масштабу *z* формулою

$$\sigma_h = \sigma_{hb} \cdot \frac{(z_{\max} - z_{\min})}{Q_h}, \qquad (2.10)$$

де *z<sub>min</sub>*, *z<sub>max</sub>* – мінімальне та максимальне значення яскравості *z*.

Гістограму h апроксимовано розподілом Гауса  $h_G$  з СКВ  $\sigma_h$ , а для оцінки її форми обчислено корінь СКП  $\Delta_h$  між значеннями h та розподілу

Гауса  $h_G$  (рис. 2.3, б). Отримана формула (2.7), яка описує залежність  $\sigma_{NC}$  від  $\sigma_N$ , вірна тільки для тих ділянок зображення, на яких переважає гаусовий шум, тому залежність  $\sigma_{NC}$  від  $\sigma_N$  використано для виділення ділянок ROI.

З метою усунення крайових ефектів при згортанні (які виникають за рахунок різкої зміни яскравості на межах зображення) замість зображення  $f_n$  потрібно виконувати згортання розширеного зображення  $f_e$ . Розширення зображення виконано в точках, симетричних до границі [17], [24]. Розширене зображення  $f_e$  обчислено на основі  $f_n$  шляхом його розширення вліво і вправо на  $M_{w2}$  пікселів, вгору і вниз на  $N_{w2}$  пікселів, де  $M_{w2}$ ,  $N_{w2}$  – половини розмірів ядра фільтра w за висотою і шириною відповідно. Завдяки цьому при згортанні зображення  $f_n$  з ядром w фільтра елементи w не виходять за межі зображення  $f_n$ .

$$M_e = M + 2 \cdot M_{w2}, N_e = N + 2 \cdot N_{w2}. \tag{2.11}$$

Таким чином, з врахуванням розробленої математичної моделі фільтрації гаусового шуму на цифрових зображеннях і процесу оцінки його статистичних характеристик (2.1) – (2.11), можливо виділити на зображеннях ділянки інтересу ROI, на яких переважає шум.

## 2.3 Метод визначення рівня шуму зображень з використанням їх низькочастотної фільтрації

Яскравість цифрових зображень  $f_n$ , отриманих у КОЕС за допомогою відеокамер, можна описати як суму яскравості корисного сигналу  $f_s$  і гаусового шуму  $f_N$  з теоретичним СКВ  $\sigma_N$  (див. розділ 1). Тому для оцінювання якості зображення, яка описується його ВСШ, потрібно точно визначити рівень шуму на зображенні  $f_n$  (рис. 2.4, а), тобто максимально зменшити корисний сигнал  $f_s$  і зберегти тільки шум  $f_N$  для подальшого аналізу. З цією метою удосконалено метод визначення рівня шуму на зображеннях з використанням низькочастотної фільтрації шумової складової та низькочастотної фільтрації при виділенні ділянки інтересу (LLROI – Low-pass & Low-pass filtration & Region Of Interest). Оскільки частоти корисного сигналу у більшості випадків нижчі за частоти шуму, тому згладжене зображення g (рис. 2.4, б), яке отримано при низькочастотній фільтрації зображення  $f_n$ , описує в основному корисний сигнал  $f_s$ . Фільтрацію зображення  $f_n$  виконано шляхом його згортання з ядром фільтра Гауса w з СКВ  $\sigma_w \approx 2$  [51] за формулою (2.1), в результаті чого обчислено згладжене зображення g [25]- [26].

Зображення шумової складової  $f_h$  (рис. 2.4, в) отримано відніманням згладженого зображення g від початкового  $f_n$  за формулою

$$f_h = f_n - g \,. \tag{2.12}$$

На зображенні шумової складової  $f_h$  контурам і текстурам відповідає локальне збільшення амплітуди  $f_h$ , тому такі локальні ділянки слід виключити із ділянки ROI для зменшення похибки при обчисленні СКВ шуму  $\sigma_{NE}$ .

Виявлення ділянок контурів і текстур передбачає просторове усереднення рівня шуму на зображенні  $f_h$ , для чого спочатку обчислено зображення  $f_d$  (рис. 2.4, г) як абсолютну величину  $f_h$ .

У результаті згортання зображення  $f_d$  з ядром фільтра Гауса з СКВ  $\sigma_w$  отримано усереднене зображення рівня шуму  $f_{dc}$  (рис. 2.5, а)

$$f_{dc} = f_d * w. (2.13)$$

Усереднення виконано саме для зображення  $f_d$  (абсолютної величини  $f_h$ ), оскільки елементи зображення  $f_h$  приймають як додатні, так і від'ємні значення. Піксель зображення  $f_h$  належить до ділянки ROI тільки тоді, якщо значення відповідного пікселя  $f_{dc}$  не перевищує встановлений поріг  $T_h$  (рис. 2.5, б – до ділянки ROI належать білі піксели).

Належність пікселів зображення  $f_h$  до ділянки ROI записано в матриці  $f_{ROI}$  і визначено з використанням порогу  $T_h$  ділянки ROI за таким правилом

$$f_{ROI}(i,k) = \begin{cases} 1, f_{dc}(i,k) \le T_h \\ 0, f_{dc}(i,k) > T_h \end{cases},$$
(2.14)

де i = 1,...,M; k = 1,...,N;  $f_{dc}$  – усереднене зображення рівня шуму.

Початкове значення СКВ  $\sigma_h$  шуму обчислено для всього зображення  $f_h$ .





Після обчислення ділянки ROI значення  $\sigma_h$  необхідно визначити тільки з врахуванням тих пікселів  $f_h$ , які належать ROI (рис. 2.5, б). Для зображення  $f_{ROI}$  обчислено також відносну площу  $A_{ROI}$  пікселів, які належать ROI (рис. 2.5, б); значення  $A_{ROI}$  не може бути меншим за мінімальну допустиму площу  $A_{ROI\_min}$ .

З врахуванням статистичних характеристик гаусового шуму та правила З $\sigma$  [127]-[128] поріг  $T_h$  (рис. 2.5), який визначає належність пікселя зображення до ROI (2.14), обчислено за отриманою формулою

$$T_h = z_C + k_{\sigma Th} \cdot \sigma_{fdc}, \qquad (2.15)$$

де  $z_C$  – математичне сподівання  $f_{dc}$ ;  $\sigma_{fdc}$  – СКВ  $f_{dc}$ ;  $k_{\sigma Th} = 3$  – коефіцієнт порогу.



Рисунок 2.5 – Обчислення ділянки інтересу ROI для зображення з гаусовим шумом (рис. 2.4, а): а) профіль усередненого зображення рівня шуму  $f_{dc}$ ,  $T_h = 0.0685 - поріг f_{dc}$ ,  $z_c = 0.0512 - математичне сподівання <math>f_{dc}$ ; б) зображення ділянки ROI,  $\sigma_h = 0.0502 - \text{CKB}$  зображення  $f_h$  з врахуванням ROI

Математичне сподівання  $z_C$  зображення  $f_{dc}$ , яке отримано в результаті згортання абсолютної величини зображення  $f_h$  з ядром w, обчислено як середнє арифметичне відхилення [133] для розподілу яскравості зображення  $f_h$ . Оскільки на зображенні  $f_h$  переважає гаусовий шум з СКВ  $\sigma_h$ , то

$$z_C = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \,\sigma_h = 0.798 \,\sigma_h. \tag{2.16}$$

Значення  $\sigma_{fdc}$  зображення  $f_{dc}$  у (2.15) обчислено за формулою (2.7), в якій невідоме значення СКВ шуму  $\sigma_N$  замінено на його наближення  $\sigma_h$ .

Коефіцієнт порогу  $k_{\sigma Th}$  необхідно вибрати так, щоб для зображення  $f_{dc}$  більшість значень гаусового шуму були меншими за поріг  $T_h$  (2.15). За правилом З $\sigma$  при  $k_{\sigma Th} = 3$  практично всі значення гаусового шуму (>99,7%) [132] будуть меншими за поріг  $T_h$ , тому початкове значення  $k_{\sigma Th} = 3$ . Проте, отримане значення  $k_{\sigma Th}$  потрібно уточнити з врахуванням результатів обчислення рівня гаусового шуму для тестових зображень [134]-[136].

СКВ шуму  $\sigma_{NE}$  визначено для зображення  $f_n$ , яскравість якого нормована в діапазоні від 0 до 1 (у відносних одиницях), тому  $\sigma_{NE}$  обчислено

у відносних одиницях (наприклад,  $\sigma_{NE} = 0.1$ ) [26], [34]. Оскільки СКВ шуму  $\sigma_{NE}$  пропорційне до СКВ  $\sigma_h$ , то в першому наближенні

$$\sigma_{NE} = \sigma_h. \tag{2.17}$$

З метою зменшення похибки обчислення рівня шуму  $\sigma_{NE}$  (2.18) проведено уточнення параметрів методу ( $\sigma_w > 0$ ,  $k_{\sigma Th} > 0$ ). Однопараметричну негладку оптимізацію  $\sigma_w$  виконано ітераційним методом координатного спуску [45], [137]-[138] з приростом 0.01 для значень  $\sigma_w$ . Як цільову функцію  $M_{SE}(\sigma_w)$ використано СКП обчислення експериментального СКВ шуму  $\sigma_{NE}$  для серії  $q_I = 6$  тестових зображень (див. додаток В1, рис. В1, рис. В2) [134]-[136], до кожного з яких програмно додано гаусовий шум з теоретичним СКВ  $\sigma_N$ 

$$M_{SE}(\sigma_w) = \frac{1}{q_N \cdot q_I} \sum_{n_n}^{q_N} \sum_{n_i}^{q_I} (\sigma_{NE}(n_i, n_n, \sigma_w) - \sigma_N(n_n))^2, \qquad (2.18)$$

де  $n_i$  – номер зображення;  $n_n$  – номер рівня шуму  $\sigma_N$ ;  $q_N = 20$  – кількість значень  $\sigma_N$ ; значення  $\sigma_N$  змінювалися від 0.01 до 0.20 з кроком 0.01.

Однопараметричну негладку оптимізацію  $k_{\sigma Th}$  виконано аналогічно, як й  $\sigma_w$ , з використанням цільової функції  $M_{SE}(k_{\sigma Th})$  для фіксованого  $\sigma_w$ .

Отримано такі оптимальні значення параметрів ( $\sigma_w$ ,  $k_{\sigma Th}$ ):

1. СКВ ядра фільтра Гауса  $\sigma_w = 1.75$ , яке використано при обчисленні згладженого зображення g (2.1) та згортанні зображення  $f_d$  (рис. 2.4); для вибраного значення  $\sigma_w$  на  $f_h$  в основному міститься шумова складова.

2. Коефіцієнт порогу  $k_{\sigma Th} = 1.22$ , який використано при обчисленні порогу  $T_h$  ділянки ROI формулою (2.15); для отриманих значень  $\sigma_w = 1.75$  та  $k_{\sigma Th} = 1.22$  формула (2.15) з врахуванням (2.16) зводиться до вигляду

$$T_h = 0.798 \,\sigma_h + 1.22 \cdot 0.162 \,\sigma_h = 0.995 \,\sigma_h. \tag{2.19}$$

Обчисленні на основі (2.17) значення експериментального рівня гаусового шуму  $\sigma_{NE}$  при великих рівнях шуму ( $\sigma_N > 0.05$ ) є меншими за теоретичні  $\sigma_N$ , тому виведено емпіричну формулу (2.20) шляхом модифікації (2.17) для обчислення експериментального рівня шуму  $\sigma_{NE}$ 

$$\sigma_{NE} = (\sigma_h)^{k_{\sigma h}}, \qquad (2.20)$$

де  $k_{\sigma h} = 1.018$  – коефіцієнт нелінійності  $\sigma_h$ .

Коефіцієнт  $k_{\sigma h}$  враховує той факт, що при вибраному СКВ ядра фільтра Гауса  $\sigma_w$  на зображенні  $f_h$  міститься не вся шумова складова, а це призводить до зменшення  $\sigma_h$ . Оптимальне значення  $k_{\sigma h} > 1$  обчислено методом координатного спуску [132]-[133] з цільовою функцією  $M_{SE}(k_{\sigma h})$  і приростом 0.001 (для фіксованих  $\sigma_w$  та  $k_{\sigma Th}$ ), аналогічно як параметру  $\sigma_w$  з цільовою функцією  $M_{SE}(\sigma_w)$  (2.18). З урахуванням оптимізованих параметрів ( $\sigma_w$ ,  $k_{\sigma Th}$ ) уточнено ділянку ROI та відповідні їй значення  $\sigma_h$  і  $\sigma_{NE}$  (табл. 2.2, рис. 2.6).

Таблиця 2.2 – Послідовність визначення експериментального рівня гаусового шуму  $\sigma_{NE}$  на зображенні (рис. 2.4, а);  $T_h$  – поріг ділянки ROI

Номер ітерації п <sub>т</sub>	$0$ (все зображення $f_h$ )	1	2	3
$\sigma_h$	0,0685	0,0502	0,0486	0,0479
$T_h$	-	0,0682	0,0499	0,0483
$\sigma_{NE}, 10^{-2}$	7.0914	5.1679	5.0003	4.9270



Рисунок 2.6 – Приклад визначення експериментального рівня гаусового шуму  $\sigma_{NE}$  на зображенні (рис. 2.4, а) з  $\sigma_N = 0.05$  (для останньої ітерації  $n_T = 3$ ): а) гістограма h(z) зображення шумової складової  $f_h$ (з врахуванням ROI),  $\sigma_h = 0,0479$ ,  $h_G$  – розподіл Гауса, який описує гістограму h(z); б) зображення ділянки ROI;  $\sigma_{NE} = 0.0493$ 

Обчислене на основі (2.20) значення експериментального рівня шуму  $\sigma_{NE}$  (рис. 2.6) близьке до теоретичного  $\sigma_N$  (різниця складає 0.0007), що свідчить при високу точність розробленого методу обчислення рівня шуму.

Розроблений метод забезпечує високу точність обчислення рівня шуму для більшості тестових зображень [134]-[136], проте для зображень з яскраво вираженими текстурами він дає занижені значення  $\sigma_{NE}$ . Тому для підвищення точності обчислення  $\sigma_{NE}$  модифіковано метод [51], у результаті чого СКВ  $\sigma_h$  зображення  $f_h$  обчислюється у два етапи. На першому етапі  $\sigma_h$  обчислюється у звичайному режимі, а на другому етапі – для зміненого значення мінімальної допустимої площі  $A_{ROI min}$  ділянки ROI, яке обчислюється за формулою

$$A_{ROI\_min} = \begin{cases} A_{R3}, \sigma_{h} > \sigma_{hs3} \\ A_{R2} + (\sigma_{h} - \sigma_{hs2}) \frac{A_{R3} - A_{2}}{\sigma_{hs3} - \sigma_{hs2}}, \sigma_{hs2} \le \sigma_{h} \le \sigma_{hs3} \\ A_{R1} + (\sigma_{h} - \sigma_{hs1}) \frac{A_{R2} - A_{R1}}{\sigma_{hs2} - \sigma_{hs1}}, \sigma_{hs1} \le \sigma_{h} < \sigma_{hs2} \\ A_{R1}, \sigma_{h} < \sigma_{hs1} \end{cases},$$
(2.21)

де  $A_{R1} = 0.010$ ,  $A_{R2} = 0.175$ ,  $A_{R3} = 0.300$ ,  $\sigma_{hs1} = 0.035$ ,  $\sigma_{hs2} = 0.045$ ,  $\sigma_{hs3} = 0.075$ .

Ha основі запропонованого методу LLROI (2.12)-(2.21), який призначений для обчислення рівня гаусового шуму  $\sigma_{NE}$  і використовує низькочастотну фільтрацію при виділенні шумової складової зображення, розроблено його алгоритм (рис. 2.7). Згідно із запропонованим алгоритмом послідовність обчислення рівня шуму наступна. Спочатку зчитується початкове зображення  $f_n$  і створюється ядро w фільтра Гауса з СКВ  $\sigma_w$ . На основі  $f_n$ отримується згладжене зображення д за формулою (2.1), обчислюються зображення шумової складової  $f_h$  та її модуля  $f_d$ . Усереднене зображення рівня шуму  $f_{dc}$  обчислюється шляхом згортання зображення  $f_d$  з ядром фільтра w (2.1). Для зображення  $f_h$  обчислюється СКВ  $\sigma_h$  його гістограми h(z). Далі в циклі з лічильником n<sub>T</sub> здійснюється процес уточнення ділянки ROI та відповідного їй СКВ о<sub>*h*</sub> зображення *f<sub>h</sub>*. Для кожної ітерації обчислюється поріг  $T_h$  (2.15), який залежить від  $\sigma_h$ . На основі порогу й усередненого зображення рівня шуму  $f_{dc}$  обчислюється зображення ділянки  $f_{ROI}$  за формулою (2.14). Значення СКВ  $\sigma_h$  обчислюється з врахуванням тільки тих пікселів  $f_h$ , які належать ROI. Якщо зміна  $\sigma_h$  для ітерації  $n_T$  відносно попереднього значення  $\sigma_h(n_T - 1)$  не перевищує константи  $C_{\sigma h}$  (наприклад,  $C_{\sigma h} = 0.0004$ ), то процес уточнення  $\sigma_h$  завершується і результатом є останнє значення  $\sigma_{hs} = \sigma_h(n_T)$ . Експериментальне значення СКВ шуму  $\sigma_{NE}$  обчислюється через уточнене СКВ  $\sigma_{hs}$  за формулою (2.20).



Рисунок 2.7 – Схема розробленого алгоритму обчислення рівня гаусового шуму на зображеннях за допомогою низькочастотної фільтрації

Розроблений метод обчислення рівня гаусового шуму  $\sigma_{NE}$  з використанням низькочастотної фільтрації для зображень з контурами і текстурами [139]-[143] забезпечує суттєву похибку  $\approx 0.005$ , тому існує потреба в подальшому вдосконаленні методу обчислення рівня шуму.

## 2.4 Метод визначення рівня шуму зображень з використанням їх високочастотної фільтрації

Якість зображень описується їх ВСШ і визначається значенням рівня шуму. Оскільки на експериментальних зображеннях, отриманих за відеокамер. міститься високочастотний шум допомогою (переважно гаусовий) (див. підрозділ 1.1), тому з метою підвищення точності обчислення рівня шуму доцільно виділяти шумову складову яскравості зображення за допомогою високочастотної фільтрації. Це реалізовано в удосконаленому методі обчислення рівня гаусового шуму, заснованому на високочастотній фільтрації при виділенні шумової складової та низькочастотній фільтрації при виділенні ділянки інтересу (HLROI – High-pass & Low-pass filtration & Region Of Interest). Метод HLROI подібний до методу LLROI з використанням низькочастотної фільтрації, а різниця полягає в способі виділення шумової складової та ділянки інтересу. Запропонований метод HLROI обчислення рівня шуму полягає в наступному.

На початковому зображенні  $f_n$  (рис. 2.8, а, рис. 2.8, б) міститься шум, тому для виділення шумової складової  $f_h$  (рис. 2.8, в) зображення потрібно виконувати високочастотну просторову фільтрацію [25]-[28] шляхом згортання  $f_n$  з високочастотним ядром фільтра  $w_H = (w_H(m, n))$  розміром  $M_w \times N_w$  елементів за формулою

$$f_h(i,k) = \sum_{m=1}^{M_w} \sum_{n=1}^{N_w} f_n(i - m + m_c, k - n + n_c) \cdot w_H(m,n), \qquad (2.22)$$

де f<sub>h</sub> = (f<sub>h</sub>(i, k)) – зображення шумової складової; i = 1,..., M, k = 1,..., N;
 m<sub>c</sub>, n<sub>c</sub> – центр ядра фільтра за висотою і шириною відповідно.
 Операцію згортання зображення f<sub>n</sub> з ядром w<sub>H</sub> спрощено запишемо у вигляді

$$f_h = f_n * w_H. \tag{2.23}$$

Як ядро високочастотного фільтра використано ядро Лапласа, значення елементів якого в загальному випадку обчислюються за формулою [144]-[145]
$$w_{Ha} = \frac{4}{(a+1)} \begin{pmatrix} \frac{a}{2} & \frac{1-a}{4} & \frac{a}{2} \\ \frac{1-a}{4} & -1 & \frac{1-a}{4} \\ \frac{a}{2} & \frac{1-a}{4} & \frac{a}{2} \end{pmatrix}, \qquad (2.24)$$

де a – параметр фільтра Лапласа,  $0 \le a \le 1$ .



Рисунок 2.8 – Приклад визначення рівня гаусового шуму методом
високочастотної фільтрації на зображенні, до якого програмно додано шум з СКВ σ<sub>N</sub> = 0.02: а) початкове зображення f<sub>n</sub>; б) профіль початкового зображення f<sub>n</sub>; в) профіль зображення шумової складової f<sub>h</sub>;
г) гістограма h(z) зображення f<sub>h</sub>, σ<sub>h</sub> = 0.0197, Q<sub>h</sub> = 256, h<sub>G</sub> – розподіл Гауса з СКВ σ<sub>h</sub>, який апроксимує гістограму h(z)

При a = 0 і a = 1 з (2.24) отримано ядра  $w_{H0}$  і  $w_{H1}$  фільтра Лапласа:

$$w_{H0} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \ w_{H1} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & -4 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$
 (2.25)

Високочастотний фільтр повинен виділяти перепади яскравості для всіх напрямів, тому значення елементів результуючого ядра *w<sub>H</sub>* високочастотного фільтра обчислено як різницю ядер *w<sub>H1</sub>* та *w<sub>H0</sub>* за формулою [53]-[54]

$$w_H = \frac{2}{6}(w_{H1} - w_{H0}) = \frac{1}{6} \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{pmatrix}.$$
 (2.26)

Отримане в результаті згортання  $f_n$  з ядром  $w_H$  (2.26) зображення шумової складової  $f_h$  практично не залежить від контурів (рис. 2.8, в). Для подальшої оцінки рівня шуму використано СКВ  $\sigma_h$  гістограми h(z)(рис. 2.8, г), обчисленої для зображення  $f_h$ . Яскравість z гістограми h(z)зображення поділена на  $Q_h$  напівінтервалів. СКВ гаусового шуму  $\sigma_{NH}$  для зображення  $f_h$  обчислено через його дисперсію (2.7) за формулою

$$\sigma_{NH} = \sqrt{D_{NH}} = \sigma_N \sqrt{\sum_{m=1}^{M_w} \sum_{n=1}^{N_w} w_H^2(m,n)} .$$
(2.27)

Коефіцієнти ядра  $w_H$  (2.26) підібрані таким чином, що згідно з (2.27)  $\sigma_{NH} = \sigma_N$ . Оскільки значення СКВ гаусового шуму  $\sigma_{NH}$  на зображенні  $f_h$ дорівнює СКВ  $\sigma_h$  його гістограми (рис. 2.8, г), тому з врахуванням (2.27) експериментальне значення СКВ шуму  $\sigma_{NE}$ , в першому наближенні, згідно формули (2.17) дорівнює  $\sigma_{NE} = \sigma_h$ . Вищенаведену послідовність обчислення рівня шуму  $\sigma_{NE}$  доцільно використовувати при обробленні ділянок ROI.

Контури та текстури спричиняють значну похибку при обчисленні рівня шуму на основі всього зображення, тому для підвищення точності метода потрібно їх видалити з ділянок ROI. Точне обчислення ділянок ROI передбачає просторове усереднення рівня шуму на зображенні  $f_h$ , для чого спочатку потрібно обчислити зображення  $f_d$  як абсолютну величину  $f_h$ 

$$f_d = \left| f_h \right|. \tag{2.28}$$

Після цього необхідно виконати згортання зображення  $f_d$  з ядром  $w_L$  низькочастотного фільтра Гауса з СКВ  $\sigma_{wL}$  для отримання усередненого зображення рівня шуму  $f_{dc}$  (аналогічно, як у методі з низькочастотною фільтрацією) (рис. 2.9, а) за формулою

$$f_{dc} = f_d * w_L. \tag{2.29}$$

Контурам і текстурам відповідає високий рівень  $f_d$ , а відповідно  $f_{dc}$ , тому згідно з (2.14) до ділянки ROI (рис. 2.9, б) належать тільки ті пікселі зображення  $f_h$ , для яких значення відповідних пікселів  $f_{dc}$  не перевищує встановлений поріг  $T_h$ (2.15) (рис. 2.9, в). Після обчислення ділянки ROI значення СКВ  $\sigma_h$  зображення  $f_h$ потрібно обчислити тільки для пікселів, які належать ROI. З врахуванням нових значень СКВ  $\sigma_h$  ділянку ROI ітеративно уточнено (рис. 2.9, г), а на основі останнього значення  $\sigma_h$  обчислено рівень шуму  $\sigma_{NE}$  (рис. 2.9, д).

З метою зменшення похибки обчислення рівня шуму  $\sigma_{NE}$  (2.17) оптимізовано значення СКВ  $\sigma_{wL}$  ядра фільтра Гауса  $w_L$  у формулі (2.29) та коефіцієнту порогу  $k_{\sigma Th}$  у формулі (2.15). Оптимізацію параметру  $\sigma_{wL} > 0$  виконано методом координатного спуску [137]-[138] з цільовою функцією  $M_{SE}(\sigma_{wL})$  і приростом 0.01 (для фіксованого  $k_{\sigma Th}$ ), аналогічно як параметру  $\sigma_w$  з цільовою функцією  $M_{SE}(\sigma_w)$  (2.18). Оптимізацію параметру  $k_{\sigma Th} > 0$  виконано аналогічно. У результаті отримано такі оптимальні значення параметрів:

1. СКВ  $\sigma_{wL} = 4.5$  (для ядра  $w_L$  (2.4) фільтра Гауса), яке застосовано при згортанні зображення  $f_d$  (2.29) (рис. 2.9, а).

2. Коефіцієнт порогу  $k_{\sigma Th} = 2.02$ , який використано при обчисленні порогу  $T_h$  ділянки ROI за формулою (2.15).

Для отриманих значень  $\sigma_{wL} = 4.5$  та  $k_{\sigma Th} = 2.02$  формула (2.15) з врахуванням (2.16) зводиться до вигляду

$$T_h = 0.798 \,\sigma_h + 2.02 \cdot 0.063 \,\sigma_h = 0.925 \,\sigma_h. \tag{2.30}$$



Рисунок 2.9 – Приклад визначення рівня гаусового шуму на зображенні (рис. 2.8, а) запропонованим методом: а) зображення  $f_{dc}$ ; б) зображення  $f_{ROI}$ ділянки ROI (до ділянки ROI належать білі пікселі) для ітерації t = 1,  $A_{ROI}$  – відносна площа ділянки ROI; в) профілі зображення  $f_d$  та усередненого зображення рівня шуму  $f_{dc}$  для t = 1, початкове (для всього зображення)  $\sigma_h = 0.0201$ ,  $\sigma_{fdc} = 0.0013$ ,  $z_C = 0.0160$  – математичне сподівання  $f_{dc}$ ,  $T_h = 0.0186$ – поріг  $f_{dc}$ , СКВ ядра низькочастотного фільтра Гауса  $\sigma_{wL} = 4.5$ ; г) зображення  $f_{ROI}$  ділянки ROI для ітерації t = 3; д) графік ітераційного уточнення  $\sigma_h$ залежно від номеру ітерації t, експериментальний рівень шуму  $\sigma_{NE} = 0.0191$  Обчисленні на основі (2.17) значення експериментального рівня гаусового шуму  $\sigma_{NE}$  при малих значеннях СКВ  $\sigma_h$  ( $\sigma_h < 0.05$ ) є більшими за теоретичні  $\sigma_N$ , при великих значеннях СКВ  $\sigma_h$  ( $\sigma_h > 0.15$ ) є меншими за теоретичні  $\sigma_N$ , тому шляхом модифікації (2.20) виведено емпіричну формулу для обчислення експериментального рівня шуму  $\sigma_{NE}$ 

$$\sigma_{NE} = (\sigma_h - 0.0003)^{k_{Gh}}$$
 (2.31)

У формулі (2.31) для точнішого обчислення  $\sigma_{NE}$  використано адаптивний коефіцієнт  $k_{\sigma h}$ , який обчислено як сигмоїдну функцію (яка у загальному вигляді записується як  $y = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$ ) [53]

$$k_{\sigma h} = k_{\sigma h0} + \frac{C_{\sigma h0}}{1 + \exp(-(\sigma_h - m_{\sigma h}))},$$
(2.32)

де  $k_{\sigma h0} = 1.0125 -$ постійна складова;  $C_{\sigma h0} = 0.008$ ,  $m_{\sigma h} = 0.18 -$ коефіцієнти.

Вираз (2.32) для адаптивного коефіцієнта  $k_{\sigma h}$  забезпечує збільшення  $\sigma_{NE}$  тільки для потрібного діапазону  $\sigma_h$ .

Ha основі запропонованого методу HLROI (2.22)-(2.32), який призначений для обчислення рівня гаусового шуму  $\sigma_{NE}$  і використовує високочастотну фільтрацію при виділенні шумової складової зображення, розроблено його алгоритм (рис. 2.10). Послідовність обчислення рівня шуму згідно із запропонованим алгоритмом така. Після зчитування зображення  $f_n$ створюються ядра w<sub>H</sub> (2.26) та w<sub>L</sub> (2.4) відповідно високочастотного та низькочастотного фільтрів. На основі f<sub>n</sub> обчислюються зображення шумової складової f<sub>h</sub> та її модуля f<sub>d</sub> за формулами (2.23) і (2.28) відповідно. Усереднене зображення рівня шуму f<sub>dc</sub> обчислюється як згортка зображення  $f_d$  з ядром низькочастотного фільтра Гауса  $w_L$  (2.29). Для зображення шумової складової  $f_h$  визначається СКВ  $\sigma_h$  його гістограми. Далі в циклі з лічильником t відбувається процес уточнення ділянки ROI та відповідного їй СКВ  $\sigma_h$  на зображенні  $f_h$ . Для кожної ітерації t обчислюється поріг  $T_h$  (2.30).



Рисунок 2.10 – Схема розробленого алгоритму обчислення рівня гаусового шуму на зображеннях за допомогою високочастотної фільтрації

На основі порогу та усередненого зображення рівня шуму  $f_{dc}$  обчислюється зображення ділянки ROI, де функція  $\psi_1$  описується формулою (2.14). Якщо зміна  $\sigma_h$  для ітерації t відносно попереднього значення  $\sigma_h(t-1)$  не перевищує константи  $C_{\sigma h}$  (наприклад,  $C_{\sigma h} = 0.004$ ), то процес уточнення  $\sigma_h$  завершується. На основі уточненого значення  $\sigma_{hs}$  обчислюється експериментальне значення СКВ шуму  $\sigma_{NE}$ , де функція  $\psi_2$  описується формулою (2.31).

Вищеописані методи визначення рівня гаусового шуму з використанням низькочастотної та високочастотної фільтрації відрізняються способом обчислення шумової складової  $f_h$ , тому потрібно дослідити точність запропонованих методів при оброблені тестових зображень.

## 2.5 Метод квазіоптимальної фільтрації вихідного сигналу відеокамер за допомогою фільтра Гауса

Експериментальні зображення, отримані в КОЕС 3a допомогою відеокамер, містять корисний сигнал і шум (переважно гаусовий) [20]. Корисний сигнал в основному описується середніми та низькими частотами, тому в результаті фільтрації шуму на зображеннях за допомогою фільтра Гауса корисний сигнал згладжується менше, ніж шумова складова. Проте, результат фільтрації залежить не тільки від рівня шуму, але й від частотних та амплітудних параметрів корисного сигналу. Крім цього, яскравість цифрових зображень на виході більшості відеокамер описуються 256-ми градаціями, що обмежує динамічний діапазон зображень та значення їх амплітудних параметрів. Тому потрібно визначити основні параметри корисного сигналу, які впливають на результат фільтрації, а також характер такого впливу. У роботі використано дві спрощені (ідеалізовані) моделі корисного сигналу  $f_s$ , яскравість якого описується однією або двома синусоїдами відповідно.

Залежність оптимального параметру фільтра Гауса (СКВ  $\sigma_w$ ) від параметрів шуму та корисного сигналу досліджено при фільтрації тестових зображень *f*, яскравості корисного сигналу *f*<sub>s</sub> яких описано синусоїдою в одному напрямі вздовж осі координат *k* (модель однієї синусоїди)

$$f_{S}(i,k) = \frac{A_{S}}{2} \sin\left(\frac{2\pi \cdot (k-1)}{T_{S}-1}\right),$$
(2.33)

або у двох взаємно перпендикулярних напрямах вздовж осей координат *i* та *k* (модель двох синусоїд)

$$f_{S}(i,k) = \frac{A_{S}}{4} \sin\left(\frac{2\pi \cdot (k-1)}{T_{S}-1}\right) + \frac{A_{S}}{4} \sin\left(\frac{2\pi \cdot (i-1)}{T_{S}-1}\right), \qquad (2.34)$$

де  $A_s$  – теоретичний діапазон яскравостей корисного сигналу;  $T_s$  – теоретичний період синусоїди; i = 1, ..., M, k = 1, ..., N.

Результати оптимальної фільтрації тестових зображень, яскравість яких описується синусоїдами, показали залежність оптимального СКВ ядра фільтра Гауса  $\sigma_{wT}$  від 4 параметрів зображення: рівня гаусового шуму  $\sigma_N$ , просторового періоду корисного сигналу  $T_S$ , діапазону яскравостей корисного сигналу  $A_S$  та від переважної орієнтації розподілу яскравості (див. додаток В2). Тому для опису яскравості корисного сигналу  $f_S$  на зображеннях, отриманих за допомогою відеокамер, використано дві математичні моделі сигналу:

- Яскравість корисного сигналу в певному напрямі описано синусоїдою з амплітудою A<sub>SE</sub>/2 і просторовим періодом T<sub>SE</sub> (модель однієї синусоїди, див. додаток B2, рис. В.6, а), де A<sub>SE</sub> – експериментальний діапазон яскравостей корисного сигналу; корисний сигнал f<sub>S</sub> описується формулою, аналогічною до (2.33); модель описує зображення, на якому існує чітка орієнтація деталей (квазіодномірне зображення).
- Корисний сигнал описано двома взаємно перпендикулярними синусоїдами з амплітудами A<sub>SE</sub>/4 і періодами T<sub>SE</sub> (модель двох синусоїд, див. додаток B2, рис. В.6, б); корисний сигнал f<sub>S</sub> описується формулою, аналогічною до (2.34); модель описує зображення, на якому відсутня переважна орієнтація деталей.

Запропоновані моделі корисного сигналу  $f_s$  (2.33), (2.34) застосовано для опису яскравості зображень, отриманих у КОЕС за допомогою відеокамер. Такі моделі є досить простими, але враховують обмежений динамічний діапазон вихідного сигналу цифрових відеокамер і спотворення корисного сигналу, які виникають при фільтрації зображень. Вищеописані моделі корисного сигналу дозволяють обчислювати його параметри на основі параметрів початкового зображення  $f_n$  (рис. 2.11, а), а саме на основі енергетичного спектра  $P_s$  (Б.2) (рис. 2.11, б) [128]-[131]. З метою спрощення аналізу спектра виконано розширення зображення  $f_n$  до квадратного [25]-[26].

Розроблений метод підвищення якості зображень шляхом зменшення їх рівня шуму полягає в наступному. На основі початкового зображення  $f_n$  обчислено частотні та просторові параметри експериментального корисного сигналу, а саме експериментальні середню просторову частоту  $v_{SE}$ , середній період  $T_{SE} = 1/v_{SE}$  та діапазон значень синусоїдального сигналу  $A_{SE}$ .



Рисунок 2.11 – Визначення параметрів корисного сигналу: а) початкове зображення  $f_n$  з шумом  $\sigma_N = 0.05$ ; б) фрагмент енергетичного спектра  $P_S$  зображення  $f_n$  в логарифмічному масштабі; в) радіальний розподіл  $P_R(v_r)$ 

Експериментальні амплітудні параметри корисного сигналу визначено через його СКВ. Для цього на основі енергетичного спектра  $P_S$  (Б.2) зображення  $f_n$  за теоремою Парсеваля [130]-[131] обчислено його СКВ  $\sigma_{S0}$  за формулою

$$\sigma_{S0} = \frac{1}{MN} \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} P_S(m,n)\right) - P_S(M_C, N_C)} .$$
(2.35)

Виконано корекцію отриманого СКВ  $\sigma_{S0}$  з урахуванням СКВ шуму  $\sigma_{NE}$ , у результаті чого обчислено СКВ  $\sigma_S$  корисного сигналу

$$\sigma_S = \sqrt{\sigma_{S0}^2 - \sigma_{NE}^2} \quad . \tag{2.36}$$

На основі отриманого енергетичного спектра  $P_S$  шляхом лінійної інтерполяції [146]-[147] обчислено його радіальний розподіл  $P_R$  (див. додаток Б1, Б.5) та нормований радіальний розподіл  $P_{RN}$  (Б.7) (рис. 2.11, в). Для радіального розподілу  $P_R$  обчислено його середню просторову частоту [148]- [151]

$$v_{CR0} = \frac{\sum_{d=N_{R\min}}^{d=N_{R\max}} (d) \cdot v_R(d)}{\sum_{d=N_{R\min}}^{d=N_{R\max}} (d)},$$
 (2.37)

де d – номер частоти;  $N_{RMin} = 2; N_{RMax} = [N_R \cdot 0.65];$ 

 $N_R$  – максимальна кількість значень розподілу  $P_R$ .

Аналогічно на основі розподілу  $P_{RN}$  обчислено його середню просторову частоту  $v_{CRN}$ . Середнім частотам  $v_{CR0}$  та  $v_{CRN}$  відповідають їх середні просторові періоди  $T_{CR0}$  та  $T_{CRN}$  відповідно (рис. 2.11, в).

Середні просторові частоти розподілів  $P_R$  та  $P_{RN}$  розраховано з урахуванням частот з номерами від  $N_{RMin} = 2$  (при  $d \ge 2$  усувається вплив постійної складової яскравості /d = 1/) до  $N_{RMax}$  (при  $d \le N_{RMax}$  усувається вплив високочастотного шуму).

Середня просторова частота  $v_{SE}$  для корисного сигналу вибрана такою, при якій середня квадратична похибка (СКП) між фільтрованим g і початковим корисним сигналом  $f_S$  (модельованим синусоїдами) була б максимально близькою до СКП між фільтрованим g і початковим реальним корисним сигналом f. Тобто, для просторової частоти  $v_{SE}$  спотворення корисного сигналу  $f_S$  (модельованого синусоїдами з частотами  $v_{SE}$ ), які виникають при фільтрації, повинні бути максимально близькими до спотворень фільтрації для реального корисного сигналу f. У випадку зображень з однією просторовою частотою значення  $v_{CR0}$  та  $v_{CRN}$  співпадають, тому середня частота  $v_{SE} \approx v_{CR0}$  (рис. 2.11, в). Проте, для зображень з багатьма просторовими частотами значення середньої просторової частоти  $v_{SE}$  можуть значно відрізнятися від  $v_{CR0}$  та  $v_{CRN}$ . Тому на основі аналізу результатів фільтрації зображень з малою, середньою та великою кількістю деталей [134]-[136] отримано емпіричну формулу для середньої просторової частота  $v_{SE}$ 

$$v_{SE} = v_{CRN} + (v_{CRN} - v_{CR0}).$$
(2.38)

Значення частоти  $v_{SE}$  (2.38), яка залежить від різниці  $v_{CRN}$  та  $v_{CR0}$ , враховує відмінність спектра реального зображення від спектра тестового зображення. Значення просторового періоду  $T_{SE} = 1/v_{SE}$ .

Чим більше орієнтований розподіл яскравості на зображенні  $f_n$ , тим в більшій мірі таке зображення відповідає моделі однієї синусоїди, а в меншій мірі — моделі двох синусоїд. Для кількісної оцінки такої міри визначено ексцентриситет зображення  $f_{nm}$ , яскравість якого обчислено за формулою

$$f_{nm} = \frac{1}{\sqrt{M \cdot N}} \sqrt{P_S} \quad . \tag{2.39}$$

За теоремою Парсеваля [125]-[126] значення елементів  $f_{nm}$  (2.39) дорівнюють СКВ розподілу яскравості зображення  $f_n$  для відповідних просторових частот. Якщо розподіл яскравості  $f_n$  має переважну орієнтацію, то розподіл значень  $f_{nm}$  теж має переважну орієнтацію, яка вимірюється через його центральні дискретні моменти [18, с. 395-440], [23]. Тому спочатку обчислено центри ваги зображення  $f_{nm}$  за формулами:

$$v_C = \frac{1}{S_f} \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_{nm}(m,n) \cdot \frac{n}{N}, \quad u_C = \frac{1}{S_f} \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_{nm}(m,n) \cdot \frac{m}{M}, \quad (2.40)$$

де  $v_C$  – центр ваги  $f_{nm}$  вздовж осі v;

 $u_{C}$  – центри ваги  $f_{nm}$  вздовж осі u;

$$S_f = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} f_{nm}(m,n)$$
 – сума значень  $f_{nm}$ .

Дискретні центральні моменти *f*<sub>nm</sub> обчислено за формулами:

$$\mu_{11} = \frac{1}{S_f} \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_{nm}(m,n) \cdot \left(\frac{n}{N} - v_C\right) \cdot \left(\frac{m}{M} - u_C\right),$$
(2.41)

$$\mu_{20} = \frac{1}{S_f} \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_{nm}(m,n) \cdot \left(\frac{n}{N} - v_C\right)^2, \qquad (2.42)$$

$$\mu_{02} = \frac{1}{S_f} \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_{nm}(m,n) \cdot \left(\frac{m}{M} - u_C\right)^2.$$
(2.43)

Ексцентриситет *E*<sub>CE</sub> [18, с. 395-440] зображення *f*<sub>nm</sub> визначено через дискретні центральні моменти (2.41)-(2.43) за формулою

$$E_{CE} = \frac{(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2}{(\mu_{20} + \mu_{02})^2} .$$
 (2.44)

Отриманий ексцентриситет  $E_{CE}$  описує степінь орієнтації для розподілу яскравості зображення  $f_n$ : якщо існує чітка орієнтація — то  $E_{CE} \approx 1$  (див. додаток В2, рис. В.6, а), якщо на зображенні немає однієї переважної орієнтації — то  $E_{CE} \approx 0$  (див. додаток В2, рис. В.6, б; рис. 2.11, а), в проміжних випадках  $E_{CE} \approx 0.5$ .

У випадку опису значення корисного сигналу на зображенні однією синусоїдою ( $E_{CE} \approx 1$ ) амплітуда синусоїди  $A_{S1} = \sqrt{2} \cdot \sigma_S$ , а діапазон значень синусоїдального сигналу  $A_{SE}$  дорівнює подвоєній амплітуді синусоїди

$$A_{SE} = 2\sqrt{2}\sigma_S, \qquad (2.45)$$

де  $\sigma_S$  – СКВ корисного сигналу (2.36).

У випадку опису корисного сигналу на зображенні сумою двох взаємно перпендикулярних синусоїд ( $E_{CE} \approx 0$ ) з амплітудами  $A_{S2}$  їх СКВ дорівнює

$$\sigma_{S2} = \frac{A_{S2}}{\sqrt{2}} = \frac{A_{S1}}{2\sqrt{2}}.$$
(2.46)

Оскільки дисперсія однаково розподілених взаємно незалежних величин дорівнює сумі їх дисперсій, тому СКВ зображення  $\sigma_s$  обчислено через СКВ  $\sigma_{s2}$  кожної синусоїди за формулою

$$\sigma_{S} = \sqrt{\sigma_{S2}^{2} + \sigma_{S2}^{2}} = \sqrt{\frac{A_{S1}^{2}}{8} + \frac{A_{S1}^{2}}{8}} = \sqrt{\frac{A_{S1}^{2}}{4}} = \frac{A_{S1}}{2}.$$
 (2.47)

У такому випадку діапазон значень синусоїдального сигналу А<sub>SE</sub>

$$A_{SE} = 2A_{S1} = 4\sigma_S \ . \tag{2.48}$$

Для довільного значення ексцентриситету  $E_{CE}$ , враховуючи (2.45) і (2.48), діапазон значень синусоїдального сигналу  $A_{SE}$  отримано лінійною інтерполяцією значень  $A_{SE}$  для  $E_{CE} \approx 0$  та  $E_{CE} \approx 1$ 

$$A_{SE} = 4\sigma_{S} \cdot (1 - E_{CE}) + 2\sqrt{2}\sigma_{S} \cdot E_{CE} . \qquad (2.49)$$

Таким чином, на основі початкового зображення  $f_n$  обчислено такі експериментальні параметри корисного сигналу: середній просторовий період  $T_{SE} = 1/v_{SE}$  (2.38), ексцентриситет  $E_{CE}$  (2.44), діапазон значень синусоїдального сигналу  $A_{SE}$  (2.49). Тому згідно із розробленим методом експериментальне значення СКВ ядра фільтра Гауса  $\sigma_{wE}$  залежить від 4 параметрів початкового зображення  $f_n$ , а саме від рівня шуму  $\sigma_{NE}$  і параметрів корисного сигналу  $T_{SE}$ ,  $E_{CE}$ ,  $A_{SE}$ .

Значення  $\sigma_{wE}$  обчислено як значення СКВ ядра фільтра Гауса  $\sigma_w$ , при якому фільтроване зображення g (2.1) мінімально спотворюється за рахунок шуму та спотворень корисного сигналу  $f_s$ , модельованого синусоїдами. Для знаходження  $\sigma_{wE}$  виконується перебір СКВ  $\sigma_w$  у діапазоні від  $\sigma_{wMin}$  до  $\sigma_{wMax}$ , у межах якого СКВ  $\sigma_w$  приймає ряд дискретних значень з номерами  $n_s = 1,..., Q_{ns}$  (див. додаток В2, В.4). Для кожного значення  $\sigma_w$  створюється ядро фільтра Гауса w розміром  $M_w \times N_w$  елементів ( $M_w = N_w = [6\sigma_w]$  згідно з правилом  $3\sigma$ ) і обчислюються КСКП для шуму та для корисного сигналу:

1. *R*<sub>*Nw*</sub> – КСКП шумової складової на фільтрованому зображенні *g*, який згідно з (2.7) обчислюється за формулою

$$R_{NW} = \sigma_{NE} \sqrt{\sum_{m=1}^{M_{w}} \sum_{n=1}^{N_{w}} w^{2}(m,n)} , \qquad (2.50)$$

яка враховує ослаблення шумової складової за рахунок згортання зображення.

2. *R<sub>Sw</sub>* – КСКП яскравості фільтрованого зображення корисного сигналу *g* відносно яскравості початкового корисного сигналу *f<sub>s</sub>*, модельованого синусоїдами (2.33), (2.34).

Оскільки при згортанні з ядром фільтра Гауса амплітуда корисного сигналу зменшується (див. додаток Б2), тому КСКП корисного сигналу на фільтрованому зображенні g, яскравість якого описана синусоїдою з амплітудою  $A_{SE}/2$  і періодом  $T_{SE}$  (2.33), відносно корисного сигналу на зображенні  $f_S$  дорівнює

$$R_{Swl} = \sqrt{\frac{1}{T_{SE}^2} \sum_{i=1}^{T_{SE}} \sum_{k=1}^{T_{SE}} \left[ \left( \frac{A_{SE}}{2} - A_{lg} \right) \cdot \sin\left( \frac{2\pi(k-1)}{T_{SE} - 1} \right) \right]^2} \quad .$$
(2.51)

У випадку опису корисного сигналу на зображенні  $f_n$  двома синусоїдами ( $E_{CE} \approx 0$ ) з частотами  $v_{SE}$  і амплітудами  $A_{SE}/4$  (2.34) згідно з теоремою про згортання та з врахуванням (див. додаток Б2, Б.14) отримано формулу для амплітуди  $A_{2g}$  кожної синусоїди після згортання

$$A_{2g} = \frac{A_{SE}}{4} \cdot \exp\left(\frac{-(v_{SE}^{2})}{2\sigma_{wF}^{2}}\right).$$
 (2.52)

КСКП корисного сигналу на зображенні g відносно сигналу на зображенні  $f_S$  дорівнює  $R_{Sw2}$  і обчислюється аналогічно до (2.51) за формулою

$$R_{Sw2} = \sqrt{\frac{1}{T_{SE}^2} \sum_{i=1}^{T_{SE}} \sum_{k=1}^{T_{SE}} \left[ \left( \frac{A_{SE}}{4} - A_{2g} \right) \cdot \sin\left( \frac{2\pi(i-1)}{T_{SE} - 1} \right) + \Delta_{A2} \cdot \sin\left( \frac{2\pi(k-1)}{T_{SE} - 1} \right) \right]^2, (2.53)$$

Похибку  $R_{Sw}$  для довільного значення ексцентриситету  $E_{CE}$  отримано лінійною інтерполяцією значень  $R_{Sw1}$  (2.51) і  $R_{Sw2}$  (2.53), обчислених для  $E_{CE} \approx 1$  та  $E_{CE} \approx 0$  відповідно, за формулою

$$R_{Sw} = R_{Sw1} \cdot E_{CE} + R_{Sw2} \cdot (1 - E_{CE}) . \qquad (2.54)$$

Оскільки спотворення яскравості фільтрованого зображення g є сумою похибок корисного сигналу  $R_{Sw}$  (2.54) та шуму  $R_{Nw}$  (2.50), тому критерієм оптимальності для запропонованого методу фільтрації вибрано сумарний КСКП корисного сигналу та шуму

$$R_{wE} = \sqrt{R_{Nw}^2 + R_{Sw}^2} \,. \tag{2.55}$$

З метою підвищення точності визначення значення СКВ  $\sigma_{wE}$  проведено інтерполяцію залежностей  $R_{Nw}(\sigma_w)$ ,  $R_{Sw}(\sigma_w)$  та  $R_{wE}(\sigma_w)$  за допомогою кубічних сплайнів (рис. 2.12, а). На основі мінімального значення інтерпольованої залежності  $R_{wE}(\sigma_w)$  (2.55) знайдено квазіоптимальне експериментальне значення СКВ фільтра  $\sigma_{wE}$ .



Рисунок 2.12 – Інтерпольовані залежності КСКП (а) для яскравості фільтрованого зображення *g* (б) відносно корисного сигналу на початковому зображенні *f<sub>n</sub>* (рис. 2.11, а): *R<sub>NwI</sub>* – КСКП шумової складової; *R<sub>SwI</sub>* – КСКП корисного сигналу; *R<sub>wEI</sub>* – КСКП зображення *g* (шумової складової та корисного сигналу); *σ<sub>w</sub>* – СКВ ядра фільтра Гауса

Встановлено, що в результаті фільтрації зображення КСКП шумової складової  $R_{Nw}$  зменшується (відбувається згладжування шуму), а КСКП корисного сигналу  $R_{Sw}$  поступово збільшується за рахунок розмиття корисного сигналу (рис. 2.12, а). При цьому існує мінімум КСКП корисного сигналу і шуму  $R_{wE}$  (2.55) при СКВ ядра фільтра  $\sigma_{wE}$ , для якого шум на зображенні буде майже повністю видалений, а спотворення корисного сигналу будуть незначними.

На основі експериментального значення СКВ  $\sigma_{wE}$  створено ядро фільтра Гауса *w*, у результаті згортання (2.1) з яким початкового зображення  $f_n$ отримано фільтроване зображення *g* (рис. 2.12, б). Для перевірки точності фільтрації використано тестовий режим, в якому на основі еталонного зображення *f* обчислено зображення  $f_n$  шляхом програмного додавання гаусового шуму з теоретичним СКВ  $\sigma_N$ .

У тестовому режимі для оцінки якості фільтрації обчислено КСКП  $R_{wg}$  (див. додаток В2, В.1) між зображеннями *g* та *f* (рис. 2.12, б), а також пікове співвідношення сигнал/шум (ПВСШ)  $P_{SNRg}$  (peak signal-to-noise ratio – PSNR) [25], [41]. ПВСШ (у децибелах, дБ) визначено за еквівалентними формулами:

$$P_{SNRg} = 10\log_{10} \left[ \frac{f_{\text{max}}^2}{\frac{1}{MN} \sum_{i=1k=1}^{M} \sum_{k=1}^{N} [f(i,k) - g(i,k)]^2} \right], \qquad (2.56)$$

$$P_{SNRg} = 20\log_{10} \left[ \frac{f_{\text{max}}}{R_{wg}} \right], \qquad (2.57)$$

де  $f_{max} = 1$  – максимальне значення яскравості зображення f.

Уточнення середньої просторової частоти *v*<sub>SE</sub> зображення виконано на основі аналізу результатів фільтрації тестових зображень (див. додаток БЗ).

При фільтрації зображень запропонованим методом всі параметри ядра фільтра визначаються тільки на основі яскравості початкового зображення, що забезпечує автоматичність оброблення зображень і квазіоптимальний результат фільтрації за критерієм ПВСШ (див. додаток ВЗ). Розроблений метод дозволяє виконувати фільтрацію шуму як на зображеннях у відтінках сірого, так і для кольорових зображень (у моделі RGB). При обробленні кольорових зображень початкове зображення записується у матрицю  $f_{RGB} = (f_{RGB}(i, k, c))$ , де i = 1, ..., M; k = 1, ..., N; c = 1, 2, 3; M, N – розміри зображення; c – канал кольору: c = 1 – червона складова (R – Red), c = 2 – зелена складова (G – Green), c = 3 – синя складова (B – Blue). Зображення у відтінках сірого  $f_n$  обчислюється як середнє значення для складових кольору зображення  $f_{RGB}$ . Кольорове фільтроване  $g_{RGB}$  зображення обчислюється на основі фільтрованого зображення g за формулою

$$g_{RGB}(i,k,c) = \frac{(g(i,k) - g_{\min})}{f_n(i,k)} \cdot f_{RGB}(i,k,c), \qquad (2.58)$$

де  $i = 1, ..., M; k = 1, ..., N; c = 1, 2, 3; g_{min}$  – мінімальне значення g.

З метою зменшення спотворень на фільтрованих зображеннях фільтрацію потрібно виконувати для кожного каналу кольору RGB окремо, але при цьому час оброблення збільшується в 3 рази.

На основі запропонованої математичної моделі та методу (2.33)-(2.58) розроблено алгоритм фільтрації гаусового шуму на зображеннях за допомогою фільтра Гауса (рис. 2.13). Послідовність фільтрації зображень згідно з розробленим алгоритмом така. Після зчитування початкового зображення  $f_n$  за допомогою запропонованих алгоритмів із використанням (рис. 2.7) або високочастотної низькочастотної фільтрації фільтрації (рис. 2.10) обчислюється експериментальний рівень шуму  $\sigma_{NE}$  на зображенні. Далі обчислюється енергетичний спектр P<sub>s</sub> (див. додаток Б1, Б.2) зображення  $f_n$  та його радіальний розподіл  $P_R$  (Б.5). На основі енергетичного спектра  $P_S$ обчислюється ексцентриситет  $E_{CE}$  (2.44) та діапазон значень синусоїдального сигналу  $A_{SE}$  (2.48). На базі радіального розподілу  $P_R$  обчислюється середня радіальна частота v<sub>SE</sub> (2.38) та період T<sub>SE</sub> корисного сигналу. Далі визначаються КСКП шумової складової *R*<sub>Nw</sub>, КСКП *R*<sub>Sw</sub> корисного сигналу та сумарна похибка  $R_{wE}$  (2.55) для дискретних значень СКВ  $\sigma_w$  ядра фільтра Гауса, які лежать у діапазоні від  $\sigma_{wMin}$  до  $\sigma_{wMax}$ .



Рисунок 2.13 – Схема алгоритму фільтрації гаусового шуму на зображеннях за допомогою фільтра Гауса

З метою підвищення роздільної здатності виконана інтерполяція отриманих залежностей  $R_{Nw}(\sigma_w)$ ,  $R_{Sw}(\sigma_w)$  та  $R_{wE}(\sigma_w)$  за допомогою кубічних сплайнів. Квазіоптимальне значення СКВ  $\sigma_{wE}$  ядра фільтра Гауса визначено за мінімумом  $R_{wEI}$  — інтерпольованої залежності  $R_{wE}$  (2.55). Фільтроване зображення g отримано в результаті згортання початкового зображення  $f_n$  з ядром w фільтра Гауса з СКВ  $\sigma_{wE}$ .

### Висновки до розділу 2

Запропоновано архітектуру комп'ютеризованої оптико-електронної системи для підвищення візуальної якості зображень, яка як джерело зображень використовує цифрові відеокамери. Згідно із запропонованою структурою КОЕС складається з підсистем визначення рівня шуму, фільтрації шуму та адаптивної зміни параметрів відеокамер.

Підвищено точність двох методів визначення рівня гаусового шуму  $\sigma_{NE}$  на зображеннях. Перший метод LLROI (Low-pass & Low-pass filtration & Region Of Interest) (2.12)-(2.21) засновано на низькочастотній фільтрації шумової складової та низькочастотній фільтрації при виділенні ділянки інтересу ROI. Другий метод HLROI (High-pass & Low-pass filtration & Region Of Interest) (2.22)-(2.32) засновано на високочастотній фільтрації при виділенні шумової складової та низькочастотній фільтрації при виділенні шумової складової та низькочастотній фільтрації при виділенні

Розроблено математичну модель і метод для автоматичного зменшення рівня гаусового шуму на зображеннях за допомогою фільтра Гауса з використанням енергетичного спектра зображення (2.33)-(2.58). Створено математичні моделі корисного сигналу, згідно з якими яскравість зображення описується однією або двома взаємно перпендикулярними синусоїдами. Оптимальне значення СКВ ядра фільтра Гауса отримано як значення, при якому мінімізується КСКП шумової складової та корисного сигналу на фільтрованому зображенні.

Новизна роботи полягає в отриманні емпіричних формул (2.15), (2.19) для обчислення порогу при виділенні ділянок інтересу ROI, емпіричної формули (2.21) для обчислення мінімальної площі ділянок ROI, емпіричних формул (2.20), (2.31) для обчислення експериментального рівня шуму, що забезпечує мінімальну похибку визначення рівня шуму  $\sigma_{NE}$ . Новизною роботи також є отримання емпіричних формул (2.38), (див. додаток Б3, Б.15) для обчислення середньої просторової частоти  $v_{SE}$ , формул (2.50, (2.51), (2.53) для обчислення КСКП шуму та корисного сигналу на фільтрованому зображенні, що забезпечує максимальне співвідношення сигнал/шум на зображеннірезультаті.

#### РОЗДІЛ З

# ПРОГРАМНО-АПАРАТНІ ЗАСОБИ ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ ШУМУ ЗОБРАЖЕНЬ У КОМП'ЮТЕРИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ

Для практичної реалізації комп'ютеризованої підсистеми для підвищення якості зображень шляхом зниження їх рівня шуму та на основі відповідної послідовності оброблення зображень (див. підрозділ 2.1) розроблено програмно-апаратні засоби підсистем визначення рівня та фільтрації шуму.

На основі запропонованих методів LLROI та HLROI та їх алгоритмів розроблено програмно-апаратні засоби, які використано для побудови підсистеми визначення рівня шуму. З використанням запропонованих алгоритмів створено програмне забезпечення в системі MATLAB, синтезовано структури KOEC та їх Simulink-моделі, а також розроблено структурні схеми блоків підсистеми визначення рівня шуму. Для підвищення швидкодії виконано апаратну реалізацію блоків фільтрації зображень у розроблених КОЕС засобами FPGA Artix-7 фірми Xilinx. Експериментальна перевірка запропонованих методів і засобів показала, що вони забезпечують високоточне обчислення рівня гаусового шуму  $\sigma_{NE}$  з КСКП  $\approx 0.002$  і дозволяють підвищити точність визначення рівня шуму на 30 %.

На основі запропонованого методу зниження рівня шуму на зображеннях, який використовує фільтр Гауса, розроблено програмно-апаратні засоби, які застосовано для побудови підсистеми фільтрації шуму. З використанням розробленого методу реалізовано програмні засоби в системі Matlab і синтезовано структуру КОЕС. Розроблено структурні схеми основних блоків підсистеми зниження рівня шуму. Точність розроблених методів і засобів фільтрації перевірено при зменшенні рівня гаусового шуму на тестових та експериментальних зображеннях. Показано, що розроблений метод € квазіоптимальним. оскільки обчислене середнє пікового значення співвідношення сигнал/шум менше за оптимальне на 0.14 дБ. Швидкодія розробленого методу більш ніж у 2 рази вища за швидкодію методів-аналогів, які володіють співрозмірною точністю.

#### 3.1 Програмно-апаратні засоби для визначення рівня шуму

На основі алгоритму (рис. 2.7) запропонованого методу LLROI (2.12)-(2.21), який призначений для обчислення рівня гаусового шуму  $\sigma_{NE}$  і використовує низькочастотну фільтрацію при виділенні шумової складової зображення, розроблено відповідні програмно-апаратні засоби, зокрема, програмне забезпечення "GaussNoise18" (див. додаток Д1) [66] в системі Matlab [150]-[152]. У випадку оброблення зображень  $f_n$  з програмно доданим шумом (зображення  $f_n$  обчислюються на основі тестових зображень f) поріг  $T_h$ виділення ділянки інтересу ROI обчислено за формулою (2.15), що дозволяє коректно обчислювати рівень шуму для зображень як з низькочастотним, так і високочастотним корисним сигналом.

Виконано модифікацію програми "GaussNoise18" для оброблення зображень, зчитаних з графічних файлів, до яких перед записом у файли програмно додано гаусовий шум. Оскільки при збереженні зображень у графічні файли відбувається квантування яскравості й обмеження її діапазону (від 0 до 255), то це призводить до певних спотворень яскравості зображень. Тому для точного визначення рівня шуму  $\sigma_{NE}$  на зображеннях, зчитаних з файлів, у розробленому методі LLROI проведено корекцію формули (2.15) для обчислення порогу  $T_h$ , а саме оптимізовано значення коефіцієнта порогу  $k_{\sigma Th}$ . Оптимізацію параметру  $k_{\sigma Th} > 0$  виконано методом координатного спуску [137]-[138] шляхом мінімізації СКП обчислення експериментального СКВ шуму  $\sigma_{NE}$  з цільовою функцією  $M_{SE}(k_{\sigma Th})$  і приростом 0.01, аналогічно як параметру  $\sigma_w$  з цільовою функцією  $M_{SE}(\sigma_w)$  (2.18); при обчисленні цільової функції  $M_{SE}(k_{\sigma Th})$  рівень шуму  $\sigma_{NE}$  визначався для зображень, зчитаних з графічних файлів. Отримано оптимальне значення коефіцієнта порогу  $k_{\sigma Th} = 1.68$ . Тому з врахуванням (2.15) та (2.19) поріг  $T_h$  виділення ділянки ROI для зчитаних з графічних файлів зображень (до яких перед цим програмно додано гаусовий шум) обчислюється за формулою

$$T_h = 0.798 \,\sigma_h + 1.68 \cdot 0.162 \,\sigma_h = 1.070 \,\sigma_h. \tag{3.1}$$

Також виконано модифікацію програми "GaussNoise18" для оброблення експериментальних зображень, зчитаних з відеокамер. Оскільки на експериментальних зображеннях присутній не тільки гаусовий шум, але й імпульсний та інші види шумів, тому для визначення рівня шуму  $\sigma_{NE}$  на таких зображеннях у розробленому методі LLROI проведено корекцію обчислення порогу  $T_h$  (2.15). Корекція полягала в збільшенні коефіцієнта порогу  $k_{\sigma Th}$  до значення 7.45. Тому з врахуванням (2.15) та (2.19) поріг  $T_h$  виділення ділянки інтересу ROI для експериментальних зображень обчислюється за формулою

$$T_h = 0.798 \,\sigma_h + 7.45 \cdot 0.162 \,\sigma_h = 2.000 \,\sigma_h. \tag{3.2}$$

Таким чином, запропонований метод обчислення рівня шуму забезпечує оброблення вхідних зображень трьох типів:

- 1. Зображень з програмно доданим гаусовим шумом (поріг *T<sub>h</sub>* обчислюється за формулою (2.15)).
- 2. Зображень з програмно доданим гаусовим шумом, які збережено в графічних файлах (поріг *T<sub>h</sub>* обчислюється за формулою (3.1)).
- 3. Експериментальних зображень, отриманих за допомогою цифрових фотоапаратів або відеокамер (поріг *T<sub>h</sub>* обчислюється за формулою (3.2)).

На базі розробленого алгоритму (рис. 2.7) та запропонованої послідовності оброблення зображень (рис. 2.1, а) синтезовано структуру підсистеми визначення рівня шуму в КОЕС [153], призначену для визначення рівня шуму на зображеннях з використанням низькочастотної фільтрації (рис. 3.1). Джерелом початкового зображення  $f_n$  для КОЕС є цифрова відеокамера, а на виході підсистеми отримується рівень шуму  $\sigma_{NE}$ .

Згідно з структурою підсистеми визначення рівня шуму в КОЕС блок фільтрації початкового зображення БФПЗ виконує згортання зображення  $f_n$  з ядром низькочастотного фільтра w, а блок визначення шумової складової БВШС обчислює  $f_h$  шляхом віднімання матриць  $f_n$  та g. У блоці визначення модуля шумової складової БВМШС елементи матриці  $f_d$  отримуються як модулі елементів матриці  $f_h$ . Блок фільтрації модуля шумової складової БФМШС виконує згортання зображення  $f_d$  з ядром низькочастотного фільтра w. У блоці визначення ділянок інтересу БВROI на основі матриці  $f_{dc}$ та порогу  $T_h(\sigma_h)$  отримується зображення ділянок інтересу  $f_{ROI}$ . Блок визначення СКВ шумової складової БВСШС обчислює значення СКВ  $\sigma_h$ шумової складової на основі  $f_h$  та з врахуванням області ROI. У блоці визначення рівня шуму БВРШ через СКВ  $\sigma_h$  обчислюється рівень шуму  $\sigma_{NE}$ . На основі структури підсистеми визначення рівня гаусового шуму в КОЕС (рис. 3.1) розроблено її Simulink-модель (рис. 3.2) у середовищі МАТLAB засобами Simulink та пакету Blockset /Video and Image Procesing/ [120]; така модель використана для перевірки коректності роботи КОЕС. У розробленій моделі початкове зображення зчитується в блоці «fn0», операції згортання реалізують блоки «2-D Conv», а операцію обчислення СКВ зображення – блоки «2D Standard Deviation». Початкове зображення fn0 зчитується з графічного файлу, однак при використанні як джерела сигналу блоку «From Multimedia File» зчитується серія зображень як кадрів відеопотоку.

Послідовність оброблення зображень у запропонованій моделі така. Блок «fn\_Norm» (з кодом MATLAB) призначений для нормалізації яскравості початкового зображення fn0 в межах від 0 до 1, у результаті чого отримується нормоване зображення fn. Ядро низькочастотного фільтра w обчислюється у блоці «w» (з кодом MATLAB) на основі СКВ фільтра «Sigma\_w». Операція згортання зображення fn з ядром фільтра w, у результаті чого отримується фільтроване зображення g, виконується в блоці «2-D Conv\_g» (який відповідає БФПЗ на рис. 3.1). Шумова складова fn обчислюється як різниця матриць g та fn у блоці «Substract\_fh» (який відповідає БВШС). У блоці «Abs\_fd» (аналог БВМШС) визначається модуль шумової складової fd. 3 метою візуалізації зображень у процесі моделювання до моделі можуть додаватися модулі «Viewer». Операція згортання зображення fd, у результаті чого отримується зображення fdc, виконується в блоці «2-D Conv\_fdc» (аналог БФМШС). Початкове значення СКВ Sigma\_h шумової складової fn обчислюється в блоці «2-D Standard Deviation\_sh» (аналог БВСШС).



Рисунок 3.1 – Структура підсистеми визначення рівня шуму на зображеннях у КОЕС з використанням низькочастотної фільтрації



Рисунок 3.2 – Simulink-модель підсистеми визначення рівня шуму на зображеннях у КОЕС з використанням низькочастотної фільтрації (рис. 3.1)

Поріг  $T_h$  ділянки ROI визначається у блоці «Th» з врахуванням Sigma\_h, а на основі порогу  $T_h$  і зображення  $f_{dc}$  у блоці «bROI» обчислюються значення ділянки ROI (блоки «Th» та «bROI» реалізують БВROI на рис. 3.1). CKB shROI шумової складової  $f_h$  з врахуванням ділянки інтересу ROI обчислюється в блоці «2-D Standard Deviation\_shROI» (аналог БВСШС). Отримане CKB shROI уточнюється в циклі за допомогою блоку «Th», в якому вихід sh0 означає CKB shROI для попередньої ітерації циклу. Початкові значення сигналів shROI (-1) та sh2 (1) встановлюються в блоках пам'яті «Memory\_shROI» та «Memory\_sh0» відповідно. Уточнення ROI завершується, якщо в блоці «Th» різниця між значеннями shROI (новим) та sh2 (попереднім) стає меншим за поріг (0.0004). Вихідний сигнал  $\sigma_{NE}$  обчислюється в блоці «SNE» (аналог БВРІІІ).

Результати моделювання (рівень гаусового шуму  $\sigma_{NE}$ ), отримані за допомогою розробленої Simulink-моделі (рис. 3.2), узгоджуються з даними оброблення зображень в MATLAB за допомогою програми "GaussNoise18".

Розроблено структурні схеми основних блоків КОЕС визначення рівня шуму (рис. 3.1). Структурна схема блоку фільтрації початкового зображення БФПЗ описує операцію згортання зображення  $f_n$  з ядром фільтра w (рис. 3.3). Значення кожного з  $M_w \times N_w$  елементів w записуються у відповідний регістр RG. Множення значень  $f_n$  зі значеннями відповідних елементів ядра w виконується в операційних блоках множення MUL. Додавання отриманих добутків виконується в комбінаційних суматорах SM, а на виході останнього суматора  $SM_Q1$ формується яскравість пікселя фільтрованого зображення g. Згідно з структурною схемою для згортання одного пікселя потрібно  $M_w \times N_w$  регістрів, блоків множення та комбінаційних суматорів, а для згортання всього зображення потрібно (З  $\times M \times N \times M_w \times N_w$ ) операційних блоків або 324  $\times M \times N$ вентилів (при  $M_w = N_w = 3$ ) [75], [154]. Згортання зображень апаратно можливо реалізовувати з використанням операцій «множення з додаванням» (multiplieradder, MADD), які характеризуються високою швидкодією [120].

Структурна схема блоку визначення шумової складової БВШС (рис. 3.4) описує операцію обчислення шумової складової  $f_h$  шляхом віднімання матриці g від матриці  $f_n$ .



Рисунок 3.3 – Структурна схема блоку фільтрації початкового зображення БФПЗ (рис. 3.1); *с* – сигнал синхронізації



Рисунок 3.4 – Структурна схема блоку визначення шумової складової БВШС

(рис. 3.1)

Структурна схема містить блоки інверторів  $BI1...BI_Q2$ , де  $Q2 = M \times N$ , і стільки ж комбінаційних суматорів SM, тому апаратні витрати на реалізацію блоку складають  $10 \times M \times N$  вентилів [75], [154]. На виходах блоків BI формуються інверсні значення яскравості відповідного пікселя зображення g, які надходять на другий інформаційний вхід суматорів SM, а на перший інформаційний вхід суматорів SM, а на перший інформаційний вхід суматорів SM, а на перший  $f_n$ . На виході суматорів SM, які працюють у режимі віднімання, формується значення  $f_h = (f_n - g)$ . Віднімання в суматорах  $SM1...SM_Q2$  відбувається в доповняльному коді, тому на його входи перенесення надходить рівень логічної «1».

Блок визначення модуля шумової складової БВМШС описує операцію визначення модуля  $f_d$  шумової складової  $f_h$  (рис. 3.4). БВМШС побудовано аналогічно до БВШС, але в БВМШС враховується знак  $f_h$ . Тому на виході суматорів *SM*, які працюють у режимі віднімання, формується значення  $f_d = f_h = (f_n - g)$  (якщо  $f_h \ge 0$ ) або значення  $f_d = |f_h| = |f_n - g|$  (якщо  $f_h < 0$ ). Знак  $f_h$ визначається рівнем сигналу на виході перенесення в суматорах *SM*.

Структурна схема блоку фільтрації модуля шумової складової БФМШС, який виконує згортання зображення  $f_d$  з ядром низькочастотного фільтра w, побудована аналогічно до структурної схеми БФПЗ (рис. 3.3).

Структурна схема блоку визначення ділянок інтересу БВROI (рис. 3.5) описує операцію обчислення матриці  $f_{ROI}$  на основі  $f_{dc}$  та з урахуванням порогу  $T_h(\sigma_h)$ . В операційному блоці множення *MUL*1 обчислюється поріг  $T_h = C_T \times \sigma_h$ (2.19). На виході інвертора *BI*1 формуються інверсні значення  $T_h$ , які надходять на другий інформаційний вхід суматорів *SM*, а на перший інформаційний вхід *SM* надходять значення  $f_{dc}$ . Структурна схема містить  $M \times N$  комбінаційних суматорів *SM*. На виході суматорів *SM*, які працюють у режимі віднімання, формується значення  $f_{ROI}$ , яке рівне 0 (якщо  $f_{dc} > T_h$ ) або 1 (якщо  $f_{dc} \le T_h$ ). Знак ( $f_{dc} - T_h$ ) визначається рівнем сигналу на виході перенесення в суматорах *SM*. Апаратна складність блоку складає  $\approx 9 \times M \times N$  вентилів [75], [154].

Структурна схема блоку визначення СКВ шумової складової БВСШС описує операцію обчислення значення СКВ  $\sigma_h$  шумової складової на основі  $f_h$  та з врахуванням зображення ділянки інтересу  $f_{ROI}$  (рис. 3.6).



Рисунок 3.5 – Структурна схема блоку визначення ділянок інтересу БВROI (рис. 3.1); коефіцієнт *C*<sub>T</sub> = 0.995; *с* – сигнал синхронізації



Рисунок 3.6 – Структурна схема блоку визначення СКВ шумової складової БВСШС (рис. 3.1); *с* – сигнал синхронізації

Значення елементів шумової складової *f<sub>h</sub>* (зчитані з регістрів *RG1-RG\_Q2*) підносяться до квадрату в блоках множення *MUL1 – MUL\_Q2*, після чого

множаться на відповідне значення  $f_{ROI}$ . Додавання отриманих добутків виконується в комбінаційних суматорах SM, де на виході суматора  $SM\_Q1$ формується сума  $\sum_{i=1k=1}^{M} f_{ROI}(i,k)$ , а на виході  $SM\_Q3 - \sum_{i=1k=1}^{M} f_h^2(i,k) \cdot f_{ROI}(i,k)$ . У дільнику DIV1 виконується ділення виходу суматора  $SM\_Q3$  на вихід  $SM\_Q1$ , а в блоці BRK розрахунку кореня квадратного обчислюється СКВ  $\sigma_h$ . Згідно зі структурною схемою для обчислення СКВ  $\sigma_h$  шумової складової зображення потрібно  $M \times N$  регістрів,  $(2 \times M \times N)$  блоків множення,  $(2 \times M \times N)$  суматорів, один блок ділення та один блок розрахунку кореня, тобто всього потрібно  $(5 \times M \times N + 2)$  операційних блоків або  $\approx 68 \times M \times N$  вентилів [75], [154].

У блоці визначення рівня шуму БВРШ рівень шуму  $\sigma_{NE}$  обчислюється на основі СКВ  $\sigma_h$  через степеневу функцію (2.20).

На основі запропонованого алгоритму (рис. 2.10) методу HLROI (2.22)-(2.32), який призначений для обчислення рівня шуму  $\sigma_{NE}$  і використовує високочастотну фільтрацію при виділенні шумової складової зображення, розроблено відповідні програмно-апаратні засоби, зокрема, розроблено програмне забезпечення "GaussNoise18H" в системі Matlab [150]-[152], яке відрізняється від програми "GaussNoise18" (див. додаток Д1) виділенням шумової складової за допомогою високочастотної, а не низькочастотної фільтрації.

На базі розробленого алгоритму (рис. 2.10) синтезовано структуру підсистеми визначення рівня гаусового шуму на зображеннях в КОЕС [153] з використанням високочастотної фільтрації (рис. 3.7). Початкове зображення  $f_n$  у КОЕС отримується за допомогою відеокамери, а обчислення рівня шуму  $\sigma_{NE}$  виконується блоками підсистеми. Синтезована структура підсистеми визначення рівня шуму (рис. 3.7) подібна до структури (рис. 3.1), а головна її відмінність полягає в обчисленні шумової складової  $f_h$  у блоці фільтрації початкового зображення БФПЗ з використанням ядра високочастотного фільтра  $w_H$ .

На основі структури підсистеми визначення рівня шуму в КОЕС (рис. 3.7) розроблено її Simulink-модель (рис. 3.8) у середовищі МАТLAB.



Рисунок 3.7 – Структура підсистеми визначення рівня гаусового шуму на зображеннях у КОЕС з використанням високочастотної фільтрації



Рисунок 3.8 – Simulink-модель підсистеми визначення рівня шуму на зображеннях у КОЕС з використанням високочастотної фільтрації (рис. 3.7)

Розроблена Simulink-модель (рис. 3.8) подібна до Simulink-моделі (рис. 3.2), а головна відмінність моделі (рис. 3.8) полягає в обчисленні шумової складової у блоці «2-D Conv-fh» (який відповідає БФПЗ). Рівень шуму  $\sigma_{NE}$ , отриманий за допомогою розробленої моделі (рис. 3.8), узгоджуються з даними оброблення зображень в MATLAB програмою "GaussNoise18H".

Апаратна реалізація основних блоків розроблених КОЕС (рис. 3.1, рис. 3.7) виконана засобами FPGA Artix-7 (XC7A200T-1SBG484C) фірми Xilinx, яка розрахована на оброблення зображень (рис. 3.9) [155], [156].



Рисунок 3.9 – Основні компоненти FPGA Artix-7 XC7A200T-1SBG484C фірми Xilinx [155]: 1 – FPGA, 2 – конектор живлення, 3 – конектор хоста USB, 4 – конектор Micro USB (UART), 5 – конектор Micro USB (JTAG), 6 – блок перемикачів, 7 – OLED дисплей, 8 – конектор вихідного порта дисплея, 9 – конектор Ethernet; 10, 11 – конектори виходу та входу HDMI На базі розроблених Simulink-моделей КОЕС (рис. 3.2, рис. 3.8) можлива генерація VHDL або Verilog коду для ПЛІС (при використанні блоків Simulink, що підтримуються HDL-кодувальником [157]). Проте, апаратна реалізація блоків КОЕС виконана не на основі Simulink-моделей, а з шляхом модифікації існуючого відкритого проекту «Gauss-filter-FPGA-for-video-processing» [158] оброблення зображень для FPGA Artix-7 на мові Verilog, оскільки такий проект враховує особливості FPGA при обробленні відеопотоку.

Програмування FPGA виконано засобами САПР Vivado Design Suite 2019.2 [155] через конектор Micro USB (JTAG) (рис.3.9, рис.3.10). Засобами FPGA реалізовано блок фільтрації початкового зображення БФПЗ (рис. 3.1) з використанням проекту «Gauss-filter-FPGA-for-video-processing» [158] (рис. 3.11) – (рис. 3.13). Вхідний сигнал з USB-відеокамери подавався через конектор хоста USB, в вихідний сигнал (фільтровані зображення) виводився через конектор виходу HDMI на монітор. При реалізації БФПЗ засобами FPGA власне фільтрація виконується тільки в модулі фільтрації зображення (рис. 3.11), а інші модулі забезпечують складну взаємодію з портами, оперативною пам'яттю, периферійними пристроями та ін. [158].

FPGA Artix-7 містить 33 650 логічних блоків (кожен з яких складається з чотирьох 6-входових таблиць перекодування LUT (look-up table), 8 тригерів та (рис. 3.13), 3 програмованих мультиплексорів (MUX)) 215 К логічних комірок, 740 блоків DSP (цифрових сигнальних процесорів). Для Artix-7 об'єм оперативної пам'яті (block RAM) складає близько 13 Мбіт, тактова частота – 450 MHz. Artix-7 також містить 3 USB-конектори. Такі параметри FPGA є достатніми для реалізації блоків КОЕС оброблення зображень, які були запропоновані у даній роботі. Для тестування системи застосовується стандарт IEEE P1149 JTAG (Joint Test Automation Group) - послідовний інтерфейс «Об'єднаної робочої групи по автоматизації тестування». Конектор Micro USB UART (universal asynchronous receiver/transmitter – універсальний асинхронний приймач/передавач) підтримує емуляцію послідовної передачі даних. Інтерфейс

HDMI (High Definition Multimedia Interface), призначений для високошвидкісної передачі цифрових відео та аудіо даних.



Рисунок 3.10 - FPGA Artix-7 XC7A200T-1SBG484C фірми Xilinx під час

програмування



Рисунок 3.11 – Функціональна схема БФПЗ, запрограмованого в FPGA Artix-7 з використанням проекту «Gauss-filter-FPGA-for-video-processing»



Рисунок 3.12 – Схема БФПЗ (рис. 3.2), запрограмованого в FPGA Artix-7 з використанням проекту «Gauss-filter-FPGA-for-video-processing» [158]: а) вся схема; б) в) її фрагменти; BUF – буферні регістри, FDRE – D-тригери



Рисунок 3.13 – Просторове розміщення елементів FPGA Artix-7 на кристалі для схеми (рис. 3.12): а) масштаб мінімальний; є) масштаб максимальний; на рис. б), в) г) д) е) масштаб збільшується від мінімального до максимального

Модифікація проекту «Gauss-filter-FPGA-for-video-processing» [158] в основному полягала в обчисленні параметрів ядра фільтра  $w(\sigma_w)$  згідно із запропонованим алгоритмом (рис. 2.7). Обчислене ядро фільтра (при  $\sigma_w = 1.75$ ) описувалося на мові Verilog, де як елементи *w* /GAUSS\_KERNEL/ використано цілі 24-бітні числа, при цьому сума значень *w* нормувалася до 2<sup>24</sup>:

GAUSS\_KERNEL <= {

24'd50347, 24'd113894, 24'd185873, 24'd218838, 24'd185873, 24'd113894, 24'd50347, 24'd113894, 24'd257649, 24'd420479, 24'd420479, 24'd420479, 24'd113894 24'd185873, 24'd420479, 24'd686214, 24'd686214, 24'd686214, 24'd420479, 24'd185873 24'd218838, 24'd495050, 24'd807914, 24'd951199, 24'd807914, 24'd495050, 24'd218838 24'd185873, 24'd420479, 24'd686214, 24'd686214, 24'd420479, 24'd185873 24'd113894, 24'd257649, 24'd420479, 24'd495050, 24'd420479, 24'd185873 24'd113894, 24'd257649, 24'd420479, 24'd495050, 24'd257649, 24'd113894 24'd50347, 24'd113894, 24'd185873, 24'd185873, 24'd113894, 24'd50347 };

При реалізації БФПЗ засобами FPGA Artix-7 (рис. 3.12) – (рис. 3.13) використовується тільки частина ресурсів FPGA (рис. 3.13, а), де використані комірки виділені бірюзовим кольором (у ділянці X0Y2). Швидкодія запрограмованого FPGA дозволяє виконувати фільтрацію кадрів відеопотоку (розміром 320 × 256 пікселів) з частотою 24 кадри в секунду, що на порядок перевищує швидкодію оброблення зображень засобами Matlab.

### 3.2 Програмно-апаратні засоби для фільтрації шуму

На основі запропонованих алгоритму (рис. 2.26) та методу (2.33)-(2.58) фільтрації гаусового шуму на зображеннях за допомогою фільтра Гауса розроблено відповідні апаратно-програмні засоби, зокрема, програмне забезпечення "GNoiseFilter18" (див. додаток Д2) [67] в системі Matlab [150]-[152].

З використанням розробленого алгоритму (рис. 2.13) та послідовності оброблення зображень у КОЕС (рис. 2.1, а) синтезовано структуру підсистеми фільтрації шуму на зображеннях у КОЕС за допомогою фільтра Гауса, яка використовується у комплексі з підсистемою визначення рівня шуму  $\sigma_{NE}$  (рис. 3.14).


Рисунок 3.14 – Структура підсистем визначення рівня та фільтрації гаусового шуму на зображеннях у КОЕС за допомогою фільтра Гауса

Після зчитування зображення  $f_n$  з відеокамери спочатку виконується його оброблення в підсистемі визначення рівня шуму. Далі в підсистемі фільтрації шуму в блоці визначення характеристик спектра зображення БВХС обчислюються енергетичний спектр  $P_s$  зображення (з використанням швидкого перетворення Фур'є) та його радіальний розподіл  $P_R$ , які використовуються для визначення параметрів корисного сигналу ( $A_{SE}$ ,  $E_{CE}$ ,  $T_{SE}$ ) у блоці БВПКС.

На основі параметрів корисного сигналу та рівня шуму в блоці визначення параметрів фільтра БВПФ отримується СКВ  $\sigma_{wE}$  та ядро *w* квазіоптимального фільтра Гауса, за допомогою згортання з яким у блоці фільтрації зображення-результату БФЗР обчислюється зображення *g* зі зменшеним рівнем шуму. Квазіоптимальний результат фільтрації зображення *g* забезпечується за рахунок використання високоточної підсистеми визначення рівня шуму. Перевагою розробленої КОЕС зменшення рівня шуму (рис. 3.14), порівняно з аналогом (рис. 1.11), є вибір параметру фільтра залежно від амплітудних і частотних параметрів зображення, в той час як в КОЕС аналога виконується оброблення при фіксованих параметрах фільтра.

Розроблено структурні схеми основних блоків КОЕС фільтрації шуму (рис. 3.14). Структурна схема блоку визначення характеристик спектра зображення БВХС описує операції обчислення енергетичного спектра  $P_S$  зображення (з використанням швидкого перетворення Фур'є) та його радіального розподілу  $P_R$  (рис. 3.15). Матриця комплексних коефіцієнтів Фур'є F (розміром  $M \times N$  елементів) обчислюється шляхом швидкого двовимірного перетворення Фур'є програмними засобами системи Matlab або апаратними засобами FPGA Artix-7 [155].

За допомогою блоків множення MUL1...  $MUL_Q2,...$   $MUL_Q4$ обчислюється квадрат дійсної частини  $Re_F$  коефіцієнтів F, а за допомогою блоків множення  $MUL_Q1...$   $MUL_Q3,...$   $MUL_Q5$  обчислюється квадрат уявної частини  $Im_F$  коефіцієнтів F. Значення елементів енергетичного спектра  $P_S$  обчислюються як сума квадратів їх дійсної та уявної частин в комбінаційних суматорах  $SM1 - SM_Q2$ . Значення радіального розподілу  $P_R$ обчислюються як сума Q відповідних елементів енергетичного спектра  $P_S$ (координати яких визначаються згідно з Б.5), поділена на Q. Всього обчислюється  $N_R = [N/2]$  значень  $P_R$ , при цьому  $P_R(1) = P_S(1,1)$ .

Згідно з структурною схемою для обчислення енергетичного спектра  $P_S$  потрібно  $2 \times M \times N$  блоків множення і  $M \times N$  комбінаційних суматорів, а для обчислення розподілу  $P_R$  потрібно  $M \times N$  - 3 комбінаційних суматорів. Апаратні витрати на реалізацію блоку складають  $\approx 64 \times M \times N$  вентилів [75], [154]. Для обчислення середньої просторової частоти  $v_{CR0}$  (2.37) на основі розподілу  $P_R$  потрібно  $\approx [N/2]$  блоків множення,  $\approx [2 \times N]$  суматорів і 1 блок ділення, а для обчислення  $v_{CR0}$  на основі енергетичного спектра  $P_S$  (Б.2) потрібно  $\approx [2 \times M \times N]$  блоків множення,  $\approx [2 \times M \times N]$  комбінаційних суматорів і 1 блок ділення [148]. Тобто, застосоване в роботі обчислення  $v_{CR0}$  на основі розподілу  $P_R$  потребує в  $\approx [4 \times M]$  менше блоків множення та  $\approx 2$  менше комбінаційних суматорів.



Рисунок 3.15 – Структурна схема блоку визначення характеристик спектра зображення БВХС (рис. 3.14)

Блок визначення параметрів корисного сигналу БВПКС ( $A_{SE}$ ,  $E_{CE}$ ,  $T_{SE}$ ) та блок визначення параметрів фільтра БВПФ (СКВ  $\sigma_{wE}$ ) реалізовані програмно в системі Matlab, проте можлива апаратна реалізація засобами засобами FPGA [155]. Блок фільтрації зображення-результату БФЗР апаратно реалізовано аналогічно, як блок БФПЗ (рис. 3.11)-(рис. 3.13), проте параметри ядра фільтра в такому випадку обчислюються у блоці БВПФ (рис. 3.14).

# **3.3** Експериментальні дослідження запропонованих методів та засобів визначення рівня шуму на зображеннях

З метою дослідження впливу контурів і текстур зображень на їх спектри, а відповідно й на точність обчислення рівня шуму, проведено спектральний аналіз тестових зображень (див. додаток В1) за допомогою розроблених програмних засобів у системі Matlab (див. додаток Б4). Аналіз спектрів показав, для зображень, які містять яскраво виражені текстури та контури, експериментальний рівень шуму значно спотворюється, оскільки контури та текстури за спектральною густиною потужності подібні до гаусового шуму. Тому для точного обчислення рівня шуму на зображенні доцільно виділяти ділянки з переважаючою шумовою складовою (ділянки інтересу ROI), на яких відсутні контури та текстури, і обчислювати рівень шуму саме на основі цих ділянок.

Розроблені методи обчислення експериментального СКВ  $\sigma_{NE}$  шуму, а саме метод LLROI (заснований на низькочастотній фільтрації шумової складової) та HLROI (заснований на високочастотній фільтрації шумової складової), апробовано при обробленні серії тестових зображень з програмно доданим гаусовим шумом і теоретичним СКВ  $\sigma_N$  (0.01 – 0.20). Обчислення рівня шуму виконано за допомогою розроблених програмних засобів у системі МАТLAB (див. додаток Д1).

Для кожного теоретичного рівня шуму  $\sigma_N$  отримано  $R_{MSE}$  – корінь середньої квадратичної похибки (RMSE – Root Mean Square Error), який обчислено між значеннями  $\sigma_{NE}$  та  $\sigma_N$  (для всіх зображень)

$$R_{MSE}(\sigma_N) = \sqrt{\frac{1}{q_I} \sum_{n_i}^{q_I} (\sigma_{NE}(n_i) - \sigma_N)^2}, \qquad (3.3)$$

де  $n_i$  – номер зображення;  $q_I$  – кількість зображень.

Значення  $R_{MSE}$  для всіх зображень і всіх  $q_N$  значень теоретичного рівня шуму  $\sigma_N$  обчислено за формулою

$$R_{MSES} = \sqrt{\frac{1}{q_N} \sum_{n_n=1}^{q_N} (R_{MSE}(n_n))^2},$$
 (3.4)

де  $n_n$  – номер теоретичного рівня шуму  $\sigma_N$ .

Для кожного теоретичного рівня шуму  $\sigma_N$  обчислено також  $\sigma_{NEA}$  ( $\sigma_N$ ) – середнє значення  $\sigma_{NE}$  для всіх тестових зображень.

Результати визначення експериментального СКВ  $\sigma_{NE}$  гаусового шуму запропонованими методами для зображень з малою (див. додаток В, рис. В.1, а), середньою (додаток В, рис. В.1, б) і великою (додаток В, рис. В.1, в) кількістю деталей в усіх випадках показали високу точність обчислення рівня шуму – похибка  $R_{MSES}$  знаходиться в межах 0.0015-0.0017 (рис. 3.16, табл. 3.1). При цьому метод високочастотної фільтрації забезпечує меншу похибку, ніж метод низькочастотної фільтрації (табл. 3.2). У порівнянні з результатами оброблення зображень (додаток В, рис. В.1), точність обчислення рівня шуму для зображень «sin2\_64g», «ch64g» і «mountain» (додаток В, рис. В.2) приблизно вдвічі нижча (табл. 3.1), що пояснюється присутністю на зображеннях контурів і текстур.



Рисунок 3.16 – Результати обчислення експериментального рівня σ<sub>NE</sub> гаусового шуму для зображень з малою (а) і великою (б) кількістю деталей (додаток В, рис. В.1) методом LLROI (низькочастотної фільтрації)

Проте, навіть для зображень з текстурами (див. додаток В, рис. В.2, в) похибка  $R_{MSES}$  (3.4) є незначною ( $R_{MSES} = 0.0026$ ). Це пояснюється тим, що рівень шуму обчислювався тільки для однорідних ділянок інтересу, на яких присутній в основному шум. При збільшенні рівня шуму зростає значення порогу ділянки інтересу, тому площа ділянки інтересу також збільшується. В усіх випадках СКВ гістограми  $\sigma_h$  швидко збігається до точного значення. Показано, що для низького теоретичного рівня шуму  $\sigma_N = 0.02$  (рис. 3.17, а) на ділянках інтересу виділяються практично тільки однорідні ділянки, на яких переважає гаусовий шум (рис. 3.17, в,г). Ділянки з текстурами не входять до ROI, що забезпечує низьку похибку обчислення рівня шуму  $\sigma_{NE}$  (0.0009). Розроблений метод має високу збіжність, завдяки чому ділянка ROI, а відповідно і значення рівня шуму  $\sigma_{NE}$ , уточнюються всього за 7 ітерацій (рис. 3.17, б).

Таблиця 3.1 – Результати обчислення експериментального рівня гаусового шуму σ<sub>NE</sub> для тестових зображень (додаток В, рис. В.1, рис. В.2) з теоретичним рівнем шуму σ<sub>N</sub> методом низькочастотної фільтрації LLROI

$\sigma_N, 10^{-2}$	$\sigma_{NE}, 10^{-2}$							
	face	cameraman	crowd	sin2_64g	ch64g	mountain		
1	1.0786	1.1385	1.0963	0.9626	0.9255	0.9872		
2	1.9840	2.0065	1.6361	1.9119	1.8822	1.9279		
3	2.9341	2.9209	2.9157	2.8556	2.8180	2.8826		
4	3.8830	3.8694	3.9256	3.8292	3.7386	3.7882		
5	4.8581	3.8694	4.9802	4.7805	4.6267	4.7213		
6	5.8391	5.8127	6.0489	5.7427	5.5906	5.7723		
7	6.8160	6.7728	7.0686	6.7381	6.5372	6.6827		
8	7.7786	6.7728	8.1548	7.7318	7.4367	7.5526		
9	8.7848	8.8142	9.1676	8.6429	8.4441	8.5650		
10	9.7928	9.7621	10.2235	9.7102	9.2096	9.7842		
$R_{MSES}, 10^{-2}$	0.1505	0.1694	0.1588	0.2189	0.4154	0.2618		



Рисунок 3.17 – Приклад визначення рівня гаусового шуму запропонованим методом HLROI на зображенні «Mountain» [135], [136] з текстурами, до якого програмно додано гаусовий шум з теоретичним СКВ σ<sub>N</sub> = 0.02:
а) початкове зображення f<sub>n</sub>; б) графік ітераційного уточнення σ<sub>h</sub> залежно від номеру ітерації t, експериментальний рівень шуму σ<sub>NE</sub> = 0.0190;
в) зображення ділянки ROI для ітерації t = 1;
г) зображення ділянки ROI для ітерації t = 7

Таблиця 3.2 – Результати обчислення експериментального рівня гаусового шуму σ<sub>NE</sub> для тестових зображень (додаток В, рис. В.1, рис. В.2) з

теоретичним рівнем шуму  $\sigma_N$  методом низькочастотної LLROI

	$R_{MSES}, 10^{-2}$					
	face	cameraman	crowd	sin2_64g	ch64g	mountain
LLROI	0.1505	0.1694	0.1588	0.2189	0.4154	0.2618
HLROI	0.1412	0.1639	0.1563	0.2120	0.4078	0.2531

і високочастотної фільтрації HLROI

Результати визначення експериментального рівня  $\sigma_{NE}$  шуму для тестової множини (100 зображень) бази BSDS300 [135], [136] (див. додаток В, рис. В.3 – рис. В.5) запропонованими методами (LLROI, HLROI) показують їх високу точність (рис. 3.18, табл. 3.3). Для більшості зображень, які не містять значної високочастотної складової корисного сигналу (чітких контурів та яскраво виражених текстур), обчислені запропонованими методами значення СКВ шуму  $\sigma_{NE}$  практично співпадають з теоретичними  $\sigma_N$  (рис. 3.18). Найбільша похибка обчислення  $\sigma_{NE}$  отримана для зображення з номером 28, оскільки майже всю його площу займають текстури, подібні до шуму (рис. 3.19).

Оцінку точності розроблених методів виконано з використанням похибки  $R_{MSE}$  (3.3), яка обчислювалася між значеннями  $\sigma_{NE}$  та  $\sigma_N$  для всіх тестових зображень. Результати визначення експериментального СКВ гаусового шуму для тестової множини зображень бази BSDS300 (табл. 3.3) показали, що похибка запропонованого методу HLROI ( $R_{MSE} = 0.00212$ ) на порядок менша за похибку статистичного методу ( $R_{MSE} = 0.01686$ ) і на 0.00065 (на 30%) менша за похибку методу РСАР ( $R_{MSE} = 0.00277$ ) (додаток Е). За правилом 2 $\sigma$  з надійністю  $\gamma = 0.955$  [132] нижній поріг рівня шуму, який вимірюється запропонованим методом HLROI, складає 0.004.

При визначенні рівня шуму для зображень бази BSDS300 [135], [136] запропоновані методи також показали високу збіжність — для виділення ділянки ROI потрібно в середньому  $Q_t \approx 6.4$  ітерацій.



Рисунок 3.18 – Результати визначення експериментального СКВ  $\sigma_{NE}$  гаусового шуму запропонованим методами LLROI (а) та HLROI (б) для тестової множини бази BSDS300 (100 зображень) [135], [136] (додаток В, рис. В.3 – рис. В.5), до яких програмно додано гаусовий шум з теоретичними СКВ  $\sigma_N$ ;  $n_i$  – номер зображення в базі,  $\sigma$ NE1,  $\sigma$ NE5,  $\sigma$ NE10,  $\sigma$ NE15,  $\sigma$ NE20 – експериментальні значення СКВ шуму для  $\sigma_N = 0.01, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$  відповідно; номеру зображення  $n_i = 28$  відповідає зображення «gravel»

Таблиця 3.3 – Результати визначення експериментального СКВ гаусового шуму статистичним методом [39], методом РСАР (методом головних компонент з селективними ділянками) [34] та розробленими методами для тестової множини (100 зображень) бази BSDS300 [135], [136], до яких програмно додано гаусовий шум з теоретичним СКВ σ<sub>N</sub>;

 $\sigma_{NEA}$  – середнє значення  $\sigma_{NE}$ ;  $R_{MSE}$  – корінь середньої квадратичної похибки між значеннями  $\sigma_{NE}$  та  $\sigma_N$ 

	Статист	ичний			Запропонований		Запропонований	
σ <sub>N</sub> ,	метод		PCAP		метод	LLROI	метод Н	ILROI
10-2	$\sigma_{NEA}$ ,	$R_{MSE}$ ,	$\sigma_{NEA},$	$R_{MSE}$ ,	$\sigma_{NEA}$ ,	$R_{MSE}$ ,	σ <sub>NEA</sub> ,	$R_{MSE}$ ,
	10-2	10-2	10-2	10-2	10-2	10-2	10-2	10-2
1	2.151	2.011	1.068	0.304	1.034	0.253	1.000	0.210
5	4.994	1.445	5.022	0.263	4.921	0.277	5.003	0.164
10	9.737	1.61	10.052	0.264	9.956	0.240	10.025	0.221
15	14.626	1.634	15.035	0.264			14.957	0.236
20	19.559	1.678	20.009	0.288			20.019	0.222
120		1.686		0.277		0.257		0.212



Рисунок 3.19 – Зображення «gravel» [135], [136] з текстурами

Отримана збіжність методів забезпечує їх високу швидкодію при програмній реалізації. Результати обчислення рівня гаусового шуму розроб-

леними методами показали, що кількість ітерацій  $Q_t$  практично не залежить від розміру зображення, а залежить від присутності на ньому контурів і текстур.

Згідно із розробленими алгоритмами обчислення рівня шуму (рис. 2.7, рис. 2.10) кожен піксель зображення обробляється однаково, тому часова оцінка алгоритмів (пропорційна до кількості пікселів зображення і кількості ітерацій) є поліноміальною, а саме  $O(N^2)$  [159], [160], де O – асимптотична верхня межа складності алгоритму, N – максимальний розмір зображення в пікселях. Це означає, що час обчислення рівня шуму розробленими методами пропорційний до кількості пікселів зображення, тому навіть для зображень великих розмірів час оброблення є допустимим (середній час оброблення на комп'ютері з процесором AMD Athlon 64 Processor, 1.81 ГГц зображення розміром 481 × 321 пікселів [135], [136] складає  $\approx$  7 с; середній час оброблення такого ж зображення на комп'ютері з процесором AMD A4-6300 Processor, 3.70 ГГц складає  $\approx$  3 с). Час оброблення зображень за допомогою методів LLROI та HLROI практично не відрізняється. Отриманий час оброблення і кількість ітерацій співрозмірні з кращими методами-аналогами (наприклад, PCAP [34]).

За допомогою розроблених методів LLROI та HLROI, програмно реалізованих у системі MATLAB, обчислено рівень гаусового шуму для серії зображень (зчитаних з графічних файлів), до яких перед записом у файли програмно додано гаусовий шум (в системі Matlab або в графічному редакторі AdobePhotoshop); використано графічні файли з 256 градаціями сірого або складових кольору (графічні файли форматів bmp, tiff, jpeg). У випадку використання графічних файлів формату јред встановлювалося мінімальне стиснення, завдяки чому мінімізовано спотворення яскравості зображення.

За рахунок використання уточненої формули (3.1) для порогу  $T_h$  похибка обчислення рівня шуму для тестових зображень, зчитаних з графічних файлів, є незначною (КСКП  $R_{MSE} = 0.0025$ ) (рис. 3.20), оскільки контури і текстури майже повністю видаляються із ділянки інтересу (рис. 3.20, в). Точність методу LLROI при обчисленні рівня шуму на зображеннях такого типу незначно поступається методу HLROI (для LLROI КСКП  $R_{MSE}$  на 0.0005 більший).





50

50

Рисунок 3.20 – Приклад визначення рівня гаусового шуму методом низькочастотної фільтрації (LLROI) на зображенні, зчитаному з графічного файлу: а) еталонне зображення без шуму;
б) зображення *f<sub>n</sub>*, обчислене на основі еталонного шляхом програмного додавання гаусового шуму з теоретичним СКВ σ<sub>N</sub> = 0.05;
в) ділянка інтересу ROI зображення *f<sub>n</sub>*; г) графік уточнення СКВ гістограми

для шумової складової зображення  $f_n$ ,  $\sigma_{NE} = 0.0505$ 

За допомогою розроблених методів LLROI та HLROI, програмно реалізованих у системі MATLAB (див. додаток Д1), також обчислено рівень

гаусового шуму для серії експериментальних зображень, отриманих за допомогою цифрових фотоапаратів або відеокамер (рис. 3.21, табл. 3.4). За рахунок використання уточненої формули (3.2) для порогу  $T_h$  результати обчислення рівня гаусового шуму на експериментальних зображеннях розробленими методами (рис. 3.21) узгоджуються з результатами аналогів [34].

Усереднену яскравість сцени *L*<sup>*B*</sup> (лк) для фотографій обчислено за формулою [161], [162] (табл. 3.4)

$$L_B = \frac{d_p^2 \cdot K_e}{t_e \cdot I_{SO}},\tag{3.5}$$

де  $d_p$  – діафрагменне число;  $t_e$  – витримка;  $I_{SO}$  – світлочутливість;

 $K_E$  – калібрувальний коефіцієнт експонометра ( $K_E = 250$ ).

Досліджувані зображення (рис. 3.21) отримано при низькому освітленні, тому згідно з [14] на них переважає гаусовий шум. Проте, такі експериментальні зображення можуть містити інші види шумів (наприклад, імпульсний шум). Тому при фільтрації реальних шумів результати методу LLROI краще узгоджуються з даними незалежних методів [14], [161], оскільки метод LLROI як шумову складову виділяє високочастотну складову зображення (яка може містити не тільки гаусовий шум), а метод HLROI використовує ядро фільтра Лапласа (2.26), яке розраховане на виділення саме гаусового шуму (значення рівня гаусового шуму, обчислені методом HLROI, виявилися заниженими на ≈50 %). Отримані результати (табл. 3.4) показують залежність рівня шуму від освітлення сцени (меншій яскравості сцени відповідає вищий рівень шуму), що узгоджується з даними [14], [161] та підтверджує коректність методів і розробленого програмного забезпечення для визначення рівня гаусового шуму.

Запропоновані методи визначення рівня шуму тестувалися на основі зображень з рівнем гаусового шуму  $\sigma_N \leq 0.2$ , а тому можуть використовуватися при обробленні зображень, для яких  $0 \leq \sigma_{NE} \leq 0.2$ .



Рисунок 3.21 – Приклади визначення рівня гаусового шуму запропонованим методом LLROI на фрагментах зображень листів паперу (а), (в) (д) розміром 400 × 400 пікселів, отриманих за допомогою фотокамери «NIKON D3100» (витримка  $t_e = 1/15$  с, діафрагменне число  $d_p = 3.5$ ), та графіки ітераційного уточнення  $\sigma_h$  (б), (г), (е): а) «Рарег1.15,3.5,800» ( $n_i = 1$ ); в) «Рарег1.15,3.5,1600» ( $n_i = 2$ );

 $\Gamma$ ) «Paper1.15,3.5,3200» ( $n_i = 3$ );  $n_i$  – номер зображення

n <sub>i</sub>	$L_B$ , лк	Світлочутливість	$\sigma_{NE}, 10^{-2}$
1	57.42	800	0.42
2	28.72	1600	0.61
3	14.36	3200	0.70

Таблиця 3.4 – Обчислені рівні гаусового шуму запропонованим методом LLROI на експериментальних зображеннях (рис. 3.21)

Завдяки вищеописаній модифікації формул (3.1), (3.2) для обчислення порогу *T<sub>h</sub>* забезпечується високоточне обчислення рівня гаусового шуму як для модельованих, так й для експериментальних зображень.

## 3.4 Експериментальні дослідження розробленого методу та засобів фільтрації зображень

Перевірка розробленого методу зменшення рівня шуму (2.33)-(2.58), який використовує фільтр Гауса, виконана при оброблені тестових зображень бази BSDS300 [135], [136] (див. додаток B1), до яких програмно додано гаусовий шум з теоретичним СКВ  $\sigma_N$ . Фільтрацію шуму виконано за допомогою розроблених програмних засобів у системі MATLAB. Значення КСКП  $R_{wg}$  (див. додаток B2, B.1) для яскравості фільтрованих зображень g, обчислених запропонованим методом, відносно яскравості еталонних зображень f перевищують оптимальні значення  $R_{wgC}$  у середньому на незначну величину 0.0008, що свідчить про ефективність розробленого методу (див. додаток B4, рис. B.15, табл. 3.5). Оптимальні значення КСКП  $R_{wgC}$  отримано шляхом фільтрації тестових зображень  $f_n$  при різних значеннях СКВ  $\sigma_w$  ядра фільтра Гауса та мінімізацією КСКП між яскравостями фільтрованих зображень g та еталонних f (див. додаток B2).

Оптимальні значення ПВСШ  $P_{SNRgC}$  (2.56) отримано шляхом фільтрації тестових зображень  $f_n$  при різних значеннях СКВ  $\sigma_w$  ядра фільтра Гауса та порівнянням фільтрованих зображень g з еталонними f.

Таблиця 3.5 – Результати фільтрації шуму на зображеннях запропонованим методом для тестової множини (100 зображень) бази BSDS300 [135], [136] (див. додаток В1), до яких додано гаусовий шум з теоретичним СКВ σ<sub>N</sub>; *R<sub>wg</sub>* – значення КСКП між зображеннями *g* та *f*, отримані запропонованим методом; *R<sub>wgC</sub>* – оптимальні значення КСКП між зображеннями *g* та *f*; *P<sub>SNRg</sub>* – ПВСШ, отримане розробленим методом; *P<sub>SNRgC</sub>* – оптимальне ПВСШ

$\sigma_N, 10^{-2}$	$R_{wg}$	$R_{wgC}$	<i>P<sub>SNRg</sub></i> , дБ	$P_{SNRgC}$ , дБ
1	0.00980	0.00959	40.233	40.373
5	0.03511	0.03382	29.385	29.651
10	0.05091	0.04963	26.291	26.450
15	0.06068	0.05981	24.822	24.905
20	0.06738	0.06690	23.942	23.982
120	0.04928	0.04848	28.934	29.072

З цієї причини швидкодія розробленого методу та вищеописаного методу оптимальної фільтрації (див. додаток В2) практично співпадають. Значення пікового ВСШ  $P_{SNRg}$ , обчислені запропонованим методом, менші за оптимальні значення  $P_{SNRgC}$  в середньому на незначну величину 0.138 дБ (див. додаток В4, рис. В.16, табл. 3.5), тому розроблений метод фільтрації є квазіоптимальним (див. додаток Е) (квазіоптимальними вважаються фільтри, для яких ПВСШ менше за оптимальне на кілька децибел) [130].

Аналіз серії тестових зображень з шумом розробленим методом показав, що значення їх експериментального середнього періоду корисного сигналу  $T_{SE}$ діапазоні  $T_{SE Min} = 5.035$  $T_{SE Max} = 51.847$  пікселів знаходиться В від ДО (див. додаток B4, рис. B.17, a). Тобто значення  $T_{SE}$  не виходять за межі діапазону від 4 до 256 пікселів для теоретичного періоду  $T_s$  (див. додаток B2, рис. B.10, рис. В.11), тому розроблена модель (2.33), (2.34) корисного сигналу є коректною при описі реальних зображень. Аналіз експериментальних СКВ  $\sigma_{wE}$ ядра фільтра Гауса, обчислених розробленим методом для серії тестових зображень, показав, що значення  $\sigma_{wE}$  знаходяться в межах від  $\sigma_{wE}$  міл = 0.308 до  $\sigma_{wE Max} = 3.441$  (див. додаток В4, рис. В.17, б). Значення  $\sigma_{wE}$  не перевищують

максимальне значення теоретичного СКВ  $\sigma_{wT} = 6$  (див. додаток В2, рис. В.10, рис. В.11), тому розроблена модель і метод (2.33)-(2.58) фільтрації шуму є коректними при обробленні реальних зображень.

Час фільтрації шуму на зображенні розробленим методом складає  $\approx 25\%$ від часу обчислення рівня гаусового шуму розробленими методами LLROI та HLROI, тому навіть для зображень великих розмірів час оброблення є допустимим (середній час фільтрації на комп'ютері з процесором AMD Athlon 64 Processor, 1.81 ГГц зображення розміром 481 × 321 пікселів [135], [136] складає  $\approx 2$  с; середній час фільтрації такого ж зображення на комп'ютері з процесором AMD A4-6300 Processor, 3.70 ГГц складає  $\approx 1$  с).

З метою дослідження можливостей розробленого методу фільтрації шуму також виконано оброблення 17-ти тестових зображень бази BSDS300 (Train) [135], [136] (див. додаток В4, рис. В.18), у результаті чого отримано високу точність для різних типів зображень згідно критерію ПВСШ (2.56) (див. додаток В4, табл. В.4, табл. В.5). Результати розрахунків показують, що запропонований метод фільтрації забезпечує значення пікового співвідношення сигнал/шум P<sub>SNRg</sub> (2.56), близькі до результатів нелінійних методів-аналогів та оптимального фільтру Гауса. В той же час, швидкодія запропонованого методу (основним етапом якого є лінійна фільтрація за допомогою одного фільтра Гауса) перевищує швидкодію нелінійних методіваналогів (для тестових зображень в  $\approx 2$  рази) (додаток Е), оскільки, наприклад, в методі-аналозі білатеральної фільтрації [48] застосовується два фільтри Гауса, які працюють в просторовій області та в області яскравості відповідно.

Проведено порівняння точності розробленого методу фільтрації шуму з сучасним методом-аналогом, реалізованим у вигляді онлайн-сервісу «IMGonline» [163]. Для цього на основі 5-ти еталонних тестових зображень f (без шуму) створено 25 тестових зображень  $f_n$  шляхом програмного додавання гаусового шуму з рівнями  $\sigma_N = 0.01$ , 0.05, 0.10, 0.15 та 0.20 відповідно (рис. 3.22). Результати фільтрації тестових зображень розробленим методом показали ПВСШ  $P_{SNR}$  в середньому на 0.65 дБ більше (рис. 3.23), порівняно з онлайн-сервісом «IMGonline» (рис.3.32), а КСКП  $R_{wg}$  (В.1) в середньому на 8% менший.



Рисунок 3.22 – Еталоне зображення *f* «67\_21077» бази BSDS300 [135], [136] (а) та зображення *f<sub>n</sub>* з теоретичним СКВ σ<sub>N</sub> = 0.10 (б); *P*<sub>SNR</sub> – значення ПВСШ (2.56) для *f<sub>n</sub>* 

9 :Fig 7v.TIF; RMSE=0.0559

k; N = 256; ming = 0.008; PSNR=25.049

Рисунок 3.23 – Зображення g, отримане фільтрацією зображення  $f_n$  (рис. 3.22, б) розробленим методом; СКВ ядра фільтра Гауса  $\sigma_{wE} = 0.741$ ;  $P_{SNR}$  – значення ПВСШ (2.56);  $R_{MSE}$  – значення КСКП  $R_{wg}$  (В.1)



Рисунок 3.24 – Зображення *g*, отримані фільтрацією зображення *f<sub>n</sub>* (рис. 3.22, б) за допомогою програми «IMGonline» [163] у режимі «Зменшення шуму»: а) мінімальне зниження шуму; б) помірне; в) нормальне

Крім цього, перевагою розробленого методу є повна автоматичність при виборі параметрів фільтрації, а в методі-аналозі користувач повинен вибрати один з 5-ти рівнів зниження шуму (мінімальний, помірний, нормальний, високий, максимальний) (рис. 3.24). Час оброблення зображень розробленим методом фільтрації та методом фільтрації шуму в онлайнсервісі «IMGonline» практично співпадають (див. додаток Е).

Для оцінки фільтрованих зображень використано суб'єктивні та об'єктивні критерії якості [116]-[118]. Об'єктивні критерії якості використано в основному при оцінці якості зображень в тестовому режимі, коли зображення  $f_n$  створюються шляхом програмного додавання шуму до еталонних зображень f. Суб'єктивні критерії використано в основному для оцінки якості експериментальних зображень, коли обчислення об'єктивних критерії є складним або неможливим. Використано такі об'єктивні критерії якості зображень, які не враховують особливості системи зору людини:

- 1.  $M_{SE}$  (mean square error) СКП між еталонним зображенням f і зразком g (1.9).
- 2.  $R_{MSE}$  (root mean square error) корінь СКП,  $R_{MSE} = \sqrt{M_{SE}}$  (B.1).
- 3. *S*<sub>NR</sub> (signal-to-noise ratio) співвідношення сигнал/шум (співвідношення потужності корисного сигналу до потужності шуму) (3.6) [25].
- 4.  $P_{SNR}$  (peak signal-to-noise ratio) пікове співвідношення сигнал/шум (2.56).

Співвідношення сигнал шум (ВСШ) (signal-to-noise ratio – *S<sub>NR</sub>*) [25] обчислено за формулою

$$S_{NR} = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = \frac{\sigma_S^2}{\sigma_{NE}^2},$$
(3.6)

де  $P_{signal}$  – потужність корисного сигналу;  $P_{noise}$  – потужність шуму;  $\sigma_S$  – СКВ корисного сигналу;  $\sigma_{NE}$  – СКВ шуму.

З урахуванням (3.6) співвідношення сигнал шум [14, с.129], [25] у логарифмічній децибельній шкалі обчислено за формулою

$$S_{NRdB} = 10\log_{10}\left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{\sigma_S^2}{\sigma_{NE}^2}\right).$$
(3.7)

Розглянемо результати перевірки розробленого методу фільтрації шуму при оброблені експериментальних зображень, отриманих за допомогою цифрових фото- або відеокамер. Оскільки на експериментальних зображеннях присутній не тільки гаусовий шум, але й імпульсний та інші види шумів, тому поріг  $T_h$  виділення ділянок ROI для таких зображень обчислюється за формулою (3.2). Завдяки цьому розроблений метод забезпечує збільшення BCШ ( $S_{NRdB}$ ) (3.7) і високу візуальну якість фільтрованих зображень (рис. 3.25). Експериментальне СКВ  $\sigma_{wE}$  ядра фільтра Гауса обчислюється на основі рівня шуму та параметрів енергетичного спектра зображення  $f_n$  (рис. 3.26).



Рисунок 3.25 – Приклад фільтрації експериментального зображення розробленим методом: а) фрагмент зображення  $f_n$ , отриманого за допомогою цифрового фотоапарату ( $S_{NRdB} = 19.667 \text{ дБ}$ ); б) фільтроване зображення g

 $(S_{NRdB} = 24.701 \text{ дБ})$ 



Продовження рисунку 3.25 – в) горизонтальний профіль розподілу яскравості зображення *f<sub>n</sub>* між точками (50, 126) –(130, 126); г) горизонтальний профіль розподілу яскравості зображення *g* між точками (50, 126) –(130, 126)



Рисунок 3.26 – Обчислення параметрів фільтрації зображення *f<sub>n</sub>* (рис. 3.25, а): а) радіальний розподіл *P<sub>R</sub>* енергетичного спектра;

б) обчислення експериментального СКВ  $\sigma_{wE}$  ядра фільтра Гауса

Завдяки точному вибору СКВ  $\sigma_{wE}$  ядра фільтра забезпечено значне зменшення шуму на зображенні при збереженні чіткості контурів (рис. 3.25, г).

Таким чином, розроблений метод фільтрації шуму дозволяє виконувати квазіоптимальну фільтрацію шумів у КОЕС як на модельованих, так і на експериментальних зображеннях.

### Висновки до розділу 3

Згідно із запропонованою послідовністю оброблення зображень у КОЕС при підвищенні їх якості реалізовано підсистеми визначення рівня та фільтрації шуму за допомогою програмно-апаратних засобів.

Підсистему визначення рівня шуму на зображеннях реалізовано на основі запропонованих методів LLROI та HLROI. Для цього створено програмне забезпечення в системі MATLAB, а також синтезовано структури КОЕС та їх Simulink-моделі. Розроблено структурні схеми блоків підсистеми визначення рівня шуму. Апаратна реалізація блоків фільтрації зображень у розроблених КОЕС виконана засобами FPGA Artix-7 фірми Xilinx, що дозволило на порядок підвищити швидкодію оброблення зображень. Точність методів перевірено при обробленні множини 100 тестових зображень, при цьому КСКП обчислення  $\sigma_{NE}$  дорівнює 0.00212, що на 0.00065 (на 30%) менше, ніж для найкращого методу-аналогу PCAP. Визначення рівня шуму для експериментальних зображень за допомогою розроблених методів дає результати, які узгоджуються з відомими даними про залежність рівня шуму на цифрових фотографіях від яскравості сцени.

Розроблено програмно-апаратні засоби підсистеми зменшення рівня шуму на цифрових зображеннях за допомогою фільтра Гауса. На основі запропонованого методу реалізовано відповідні програмні засоби в системі Matlab, синтезовано структуру КОЕС фільтрації гаусового шуму на зображеннях. Розроблено структурні схеми основних блоків підсистеми зниження рівня шуму. Точність розробленого методу фільтрації перевірено при зменшені рівня гаусового шуму на множині з 100 тестових зображень. Показано, що розроблений метод є квазіоптимальним, оскільки обчислені значення пікового співвідношення сигнал/шум менші за оптимальні на 0.14 дБ. Розроблений метод фільтрації шуму дозволяє виконувати квазіоптимальну фільтрацію шумів як на модельованих, так і на експериментальних зображеннях, тому може використовуватися в графічних редакторах і в системах відеоспостереження. Швидкодію фільтрації зображень підвищено шляхом її апаратної реалізації засобами FPGA Artix-7 фірми Xilinx.

#### **РОЗДІЛ 4**

## КОМП'ЮТЕРИЗОВАНІ СИСТЕМИ ДЛЯ АДАПТИВНОЇ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ЦИФРОВИХ ВІДЕОКАМЕР

Значення параметрів цифрових відеокамер за замовчуванням, у загальному випадку, не забезпечують максимальну візуальну якість для отриманих зображень, тому є потреба в адаптивній зміні параметрів відеокамер у комп'ютеризованих системах. З цією метою розроблено методи адаптивної зміни параметрів «Яскравість» і «Контраст» відеокамер, в яких результуючі значення параметрів відеокамер визначаються за максимальними значеннями критеріїв якості зображень. Критерії якості зображень  $K_V$  побудовано на основі співвідношення сигнал/шум з урахуванням насичення зображення (параметр  $R_A$ ) та ВСШ з обмеженнями на мінімальне та максимальне значення сигналу (параметр  $R_L$ ). Обчислення рівня шуму виконано за алгоритмами, які використано в запропонованих методах LLROI та HLROI (розділ 2).

На основі запропонованих методів розроблено алгоритми та програмноапаратні засоби, які використано для побудови підсистеми адаптивної зміни параметрів відеокамер. З використанням запропонованих алгоритмів створено програмне забезпечення в системі MATLAB, синтезовано структуру КОЕС та її Simulink-модель, а також розроблено структурні схеми блоків підсистеми.

Експериментальна перевірка розроблених програмно-апаратних засобів адаптивної зміни параметрів «Яскравість» і «Контраст» відеокамер показала, що комплексне використання критеріїв якості  $R_A$  і  $R_L$ , у порівнянні з використанням кожного критерію окремо, забезпечує краще узгодження отриманих результатів із даними суб'єктивного критерію візуальної якості зображень.

З метою підвищення швидкодії розроблено програмні засоби для визначення рівня шуму запропонованими методами LLROI та HLROI з використанням паралельних обчислень.

## 4.1 Комп'ютеризована система для адаптивної зміни параметру «Яскравість» відеокамери 4.1.1 Метод та програмно-апаратні засоби для адаптивної зміни параметру «Яскравість» відеокамери

З метою підвищення якості зображень, а також їх співвідношення сигнал/шум, розроблено метод для адаптивної зміни параметру «Яскравість» цифрової відеокамери. На основі запропонованого методу розроблено програмно-апаратні засоби КОЕС. Розроблення апаратних засобів полягало в синтезі структури та Simulink-моделі КОЕС зміни параметрів відеокамери. Розроблення програмних засобів КОЕС полягало у створенні прикладної програми в системі МАТLAB, призначеної для високоточного автоматичного визначення рівня шуму на зображеннях та адаптивній зміні параметру «Яскравість» відеокамер на основі рівня шуму. Зміну параметрів відеокамер виконано для пристроїв з USB-інтерфейсом [164], [165], але розроблені методи адаптивної зміни параметрів не обмежується тільки таким інтерфейсом.

Доступ до параметрів відеокамер забезпечується в основних сучасних системах розробки програм, наприклад, у системі МАТLAВ для цього застосовується пакет «Іmage Acquisition Tool» [28]. Засобами «Іmage Acquisition Tool» вибрано роздільну здатність відеокамери, встановлено значення параметрів «Яскравість» (Brightness –  $B_r$ ), «Контраст» (Contrast –  $C_t$ ), «Експозиція» (Ехроѕиге) та ін. У випадку застосування стандартних програмних засобів значення частини параметрів («Яскравість», «Контраст» та ін.) встановлюються в ручному режимі.

Важливим параметром відеокамери, який суттєво впливає на якість отриманих зображень, є «Яскравість». Значення параметру «Яскравість» вимірюються у відносних одиницях, а для різних моделей відеокамер значення такого параметру за замовчуванням є різними [164], [165]. Залежно від умов освітлення сцени для отримання високої якості зображень потрібно

відповідно змінювати і значення параметру «Яскравість». Аналогічно потрібно налаштовувати параметр «Контраст» відеокамери.

Комп'ютер з під'єднаними відеокамерами утворює КОЕС, в якій регулювання процесів оброблення відеосигналу на апаратному рівні у відеокамерах виконується за допомогою керуючих сигналів з комп'ютера (рис. 4.1). Значення параметрів відеокамери за замовчуванням, у загальному випадку, не забезпечують максимальне співвідношення сигнал/шум для отриманих зображень, тому якість експериментальних зображень необхідно підвищувати шляхом зміни параметрів відеокамери. Адаптивну зміну параметру *B<sub>r</sub>* «Яскравість» відеокамери виконано за допомогою прикладної програми та Simulink-моделі. Зв'язок між комп'ютером та відеокамерою здійснювався через USB-інтерфейс (USB 2.0), а операцію згортання зображень з ядром фільтра реалізовано програмно та засобами ПЛІС (рис. 3.9)-(рис. 3.13). Цифрове значення параметру  $B_r$  (у відносних одиницях) встановлювалося для відеокамери через USB-інтерфейс у режимі керуючого передавання (конфігурування) [85], аналогічно значення параметру  $B_r$ зчитувалося з відеокамери. На основі значень параметру Br «Яскравість» апаратно встановлювалася величина підсилення В<sub>гМ</sub> для відеосигналу згідно із структурною схемою ФМ (наприклад, КМОН-сенсора) [79, с.73-84] (рис. 1.5) та відеокамери [10, с.236-238] (рис. 1.6).

За допомогою параметру «Яскравість» відеокамери виконано регулювання підсилення для аналогового відеосигналу  $f_A$  та яскравості пікселів для отриманих зображень (рис. 4.1). Аналогічно за допомогою параметру «Контраст», який регулювався прикладною програмою, змінено контраст відеосигналу у відеокамері, а відповідно і контраст отриманих зображень. Таким чином, можлива зміна параметрів «Яскравість» і «Контраст» відеокамер на базі як КМОН-фотоприймачів, так і ПЗЗ. Кадри відеопотоку (цифрові зображення  $f_n$ ) зчитувалися з фоточутливої матриці в режимі ізохронного передавання [85]. Тому USB-інтерфейс використовувався як для конфігурування відеокамери (при встановленні значень її параметрів), так й для зчитування відеопотоку.



Рисунок 4.1 – Структурна схема комп'ютеризованої оптико-електронної системи, призначеної для адаптивної зміни параметру «Яскравість» цифрової відеокамери на базі КМОН-фотоприймача

З урахуванням схеми КОЕС (рис. 4.1) розроблено метод та алгоритм (рис. 4.2) для адаптивної зміни параметру  $B_r$  «Яскравість» відеокамери. Згідно з алгоритмом для відеокамери встановлюється  $Q_B$  значень параметру  $B_r$ , які змінюються в допустимих межах від  $B_{rMin}$  до  $B_{rMax}$  із заданим кроком. Для кожного значення параметру  $B_r$  обчислюється критерій якості зображення, за максимумом якого визначається результуюче значення  $B_r$  (методом повного перебору). Обчислення критерію якості зображень виконується на основі значень рівня шуму  $\sigma_{NE}$  для зображень, отриманих з відеокамери. Обчислення рівня шуму виконується за допомогою алгоритмів, які використані у

запропонованих методах LLROI (із застосуванням низькочастотної фільтрації при виділенні шумової складової) або HLROI (із застосуванням високочастотної фільтрації) (див. розділ 2).

На основі запропонованого алгоритму зміни параметру «Яскравість» відеокамери (рис. 4.2) в системі Matlab розроблено програму "VideoParameter18" [68] (див. додаток Д3), в якій керування параметрами відеокамери виконується за допомогою об'єкту oVidObj (origin Video Object)

oVidObj = videoinput(adaptorName, deviceID, vidFormat),

де adaptorName – назва відеоадаптера (наприклад, 'winvideo');

deviceID – номер пристрою (наприклад, 1);

vidFormat – формат відео (наприклад, 'YUY2\_320x240'), за допомогою кого вибирається роздільна здатність зчитаних зображень.

Для керування параметрами відеокамери на основі об'єкту oVidObj також створюється об'єкт sVidObj (select Video Object), який пов'язаний із виділеним джерелом відеосигналу і створюється командою:

sVidObj = getselectedsource(oVidObj),

а параметр «Яскравість» відеокамери встановлюється командою:

sVidObj.Brightness = Br,

де *B<sub>r</sub>* – значення яскравості у відносних одиницях.

Також програмно встановлено значення фільтру Байера, який відповідає використаній моделі фоточутливої матриці (рис. 1.4), за допомогою команди:

oVidObj.BayerSensorAlignment='grbg'.

Адаптивна зміна параметру  $B_r$  «Яскравість» передбачає, що інші параметри відеокамери (контраст «Contrast», експозиція «Exposure», насиченість «Saturation» та ін.) залишаються незмінними. У процесі зміни параметру «Яскравість» керуюча програма отримує за допомогою відеокамери серію зображень  $f_n$  одного об'єкта при однакових умовах освітлення, але при різних значеннях параметру  $B_r$  (рис. 4.1). Згідно із запропонованим алгоритмом (рис. 4.2) у циклі за номером  $n_b$  встановлюються значення параметру  $B_r$ «Яскравість» відеокамери у вибраному діапазоні.



Рисунок 4.2 – Схема алгоритму адаптивної зміни параметру «Яскравість» відеокамери

Для кожного значення яскравості  $B_r$  визначено експериментальний рівень шуму  $\sigma_{NE}$  на зображенні, а також співвідношення сигнал шум (ВСШ) [25], яке з врахуванням (3.6) обчислено за формулою

$$S_{NR} = \frac{\sigma_S^2}{\sigma_{NE}^2} = \frac{\sigma_{S0}^2 - \sigma_{NE}^2}{\sigma_{NE}^2},$$
 (4.1)

де  $\sigma_S$  – СКВ корисного сигналу;

 $\sigma_{NE}$  – СКВ шуму;  $\sigma_{S0}$  – СКВ початкового зображення  $f_n$ .

На експериментальних зображеннях, отриманих за допомогою відеокамери, при високих рівнях параметра «Яскравість» спостерігається насичення зображення, що негативно впливає на візуальну якість зображень. Дослідження експериментальних зображень, отриманих для різних значень параметру «Яскравість», показали, що як об'єктивний критерій  $K_V$  якості зображення доцільно використати параметр  $R_A$  [55], який враховує насичення зображення й обчислюється за емпіричною формулою

$$R_A = \sqrt{S_{NR}} \cdot A_{ST}, \qquad (4.2)$$

де  $A_{ST}$  – відносна кількість пікселів, для яких яскравість *z* знаходиться в діапазоні [0,  $T_{hA}$ ]; поріг  $T_{hA} = 0.95$  (для нормованої до 1 яскравості).

Використаний параметр  $R_A$  (4.2) дозволив врахувати ефект насичення тільки для світлих ділянок зображення, проте на експериментальних зображеннях відбувається відсікання (кліпірування, від англ. clipping) – вихід значень яскравості за межі допустимого діапазону [ $z_{LMin}$ ,  $z_{LMax}$ ]; при цьому для зображень, яскравість яких змінюється від 0 до 255, допустимим діапазоном вважаються значення від 30 до 225 [36].

Тому для зменшення ефекту кліпірування як критерій  $K_V$  якості зображення запропоновано використати параметр  $R_L$ , який обчислюється на основі (4.1) з врахуванням тільки для тих пікселів, яскравість яких знаходиться в межах допустимого діапазону [ $z_{LMin}$ ,  $z_{LMax}$ ] [36], за формулою

$$R_L = \sqrt{\frac{\sigma_{S0}^2(z_{LMin}, z_{LMax}) - \sigma_{NE}^2}{\sigma_{NE}^2}} = \frac{\sigma_{SL}}{\sigma_{NE}},$$
(4.3)

де  $\sigma_{NE}$  – СКВ шуму;

 $\sigma_{S0}(z_{LMin}, z_{LMax})$  – СКВ початкового зображення  $f_n$  з врахуванням тільки тих пікселів, яскравість *z* яких знаходиться в допустиму діапазоні [ $z_{LMin}, z_{LMax}$ ];  $\sigma_{SL}$  – СКВ корисного сигналу для пікселів з яскравістю  $z_{LMin} \le z \le z_{LMax}$ .

Результуюче значення параметру «Яскравість» відеокамери визначено за максимальним значенням критерію  $K_V$  якості зображення, де як критерій  $K_V$  використано параметр  $R_A$  (4.2) або  $R_L$  (4.3). На основі розробленого алгоритму (рис. 4.2), а також з врахуванням будови та принципів роботи цифрових відеокамер (рис. 1.5) [79, с.73-84] і (рис. 1.6) [10, с.236-238], синтезовано структуру підсистеми адаптивної зміни параметру «Яскравість» відеокамери в КОЕС, яка використовується у комплексі з підсистемою визначення рівня гаусового шуму  $\sigma_{NE}$  (рис. 4.3). Джерелом початкового відеосигналу  $f_M$  в КОЕС є ФМ (КМОН або ПЗЗ), а зміна параметру «Яскравість» виконується в блоках підсистеми (рис. 4.1). Аналогове оброблення відеосигналу  $f_A$  (зокрема, зміна його яскравості та контрасту) виконується у блоці аналогового оброблення (БАО) відеокамери. Перетворення в цифрову форму та додаткове оброблення відеосигналу виконується у блоці цифрового оброблення (БЦО) відеокамери, на виході якого отримується цифрове зображення  $f_n$ .



Рисунок 4.3 – Структура підсистем визначення рівня шуму та адаптивної зміни параметру *B<sub>r</sub>* «Яскравість» відеокамери в КС: *f<sub>M</sub>* – відеосигнал на виході фоточутливої матриці, *f<sub>A</sub>* – аналоговий відеосигнал на виході БАО

Для кожного значення параметру  $B_r$  «Яскравість» відеокамери отримується зображення  $f_n$ , обчислюються його рівень шуму  $\sigma_{NE}$  і СКВ сигналу  $\sigma_S$ , а також критерій якості зображення  $K_V$ . Тобто зміною параметру  $B_r$  «Яскравість» реалізується зворотний зв'язок між КОЕС і відеокамерою. Результуюче значення параметру «Яскравість» визначається за максимальним значенням критерію  $K_V$ , який обчислюється за формулами (4.2) або (4.3).

Обчислення СКВ  $\sigma_{NE}$  шуму виконується у блоках БФПЗ, БВШС, БВМШС, БФМШС, БВROI, БВСШС та БВРШ підсистеми визначення рівня шуму. У блоці визначення СКВ сигналу БВСС обчислюється СКВ  $\sigma_{S0}$ початкового зображення  $f_n$  (рис. 4.4), а у блоці визначення критерію якості БВК отримується критерій якості зображення  $K_V$  і формується значення параметру  $B_r$ «Яскравість» відеокамери (рис. 4.5).

Структурна схема блоку БВСС описує операцію обчислення СКВ  $\sigma_{s0}$  на основі початкового зображення  $f_n$  (рис. 4.4). За допомогою комбінаційних суматорів *SM1-SM\_Q1* обчислюється сума  $\sum_{i=1k=1}^{M} \sum_{i=1k=1}^{N} f_n(i,k)$  яскравостей зображення  $f_n$ , яка в операційному блоці ділення *DIV1* ділиться на кількість пікселів  $Q_{MN} = M \times N$  (зчитаних з регістру *RG1*), у результаті чого обчислюється середня яскравість зображення  $z_C$ . Отримане значення  $z_C$  інвертується в блоці інвертора *BI1* і віднімається від яскравостей  $f_n$  в комбінаційних суматорах *SM\_Q2- SM\_Q4*. Обчислені значення ( $f_n(i, k) - z_C$ ) підносяться до квадрату в блоках множення *MUL1 — MUL\_Q2*, а їх сума  $\sum_{i=1k=1}^{M} \sum_{i=1k=1}^{N} (f_n(i,k) - z_c)^2$  обчислюється за допомогою комбінаційних суматорів *SM\_Q5-SM\_Q6*. Шляхом ділення отриманої суми на кількість пікселів  $Q_{MN} = M \times N$  у блоці ділення *DIV2* та обчисления кореня у блоці розрахунку кореня квадратного *RPK1* 

та обчислення кореня у блоці розрахунку кореня квадратного *BRK*1 визначається СКВ сигналу  $\sigma_{S0}$ . Згідно зі структурною схемою БВСС потрібно  $(M \times N)$  блоків множення,  $(3 \times M \times N - 2)$  суматорів, два блоки ділення, один блок інвертора, один блок регістру й один блок розрахунку кореня, тобто всього  $(4 \times M \times N + 3)$  блоків. Апаратні витрати на реалізацію блоку складають  $\approx 50 \times M \times N$  вентилів [75], [154].



Рисунок 4.4 – Структурна схема блоку визначення СКВ сигналу БВСС

(рис. 4.3); с – сигнал синхронізації



Рисунок 4.5 – Структурна схема визначення критерію якості зображення *R<sub>A</sub>* у блоці БВК (рис. 4.3); *c*1, *c*2 – сигнали синхронізації

Розроблено структурну схему визначення критерію якості зображення, а саме параметру  $R_A$  (4.2) у БВК (рис. 4.5); структурна схема обчислення параметру R<sub>L</sub> реалізується аналогічно. Згідно зі схемою в блоці множення *MUL*1 обчислюється значення  $(\sigma_{S0})^2$ , а в блоці множення *MUL*2 –  $(\sigma_{NE})^2$ . Інвертоване у блоці інвертора *BI*1 значення  $(\sigma_{NF})^2$  віднімається від  $(\sigma_{S0})^2$  у блоці комбінаційного суматора SM1. Отримана в SM1 різниця ділиться на  $(\sigma_{NE})^2$  в операційному блоці дільника DIV1, у результаті чого обчислюється ВСШ S<sub>NR</sub> (4.1). У суматорах  $SM_Q1-SM_Q3$  від яскравості початкового зображення  $f_n$ віднімається значення порогу  $T_{hA}$ , інвертоване в блоці *ВІ*2. На виході суматорів  $SM_Q1$ - $SM_Q3$  формується значення, яке рівне 0 (якщо  $f_n > T_{hA}$ ) або 1 (якщо  $f_n \leq T_{hA}$ ). Знак ( $f_n - T_{hA}$ ) визначається рівнем сигналу на виході перенесення в суматорах. У комбінаційних суматорах SM\_Q4-SM\_Q5 обчислюється кількість пікселів, для яких  $f_n \leq T_{hA}$ , яка в блоці дільника DIV2 ділиться на повну кількість  $Q_{MN} = M \times N$  пікселів зображення. На виході DIV2 обчислюється відносна площа A<sub>ST</sub>, яка множиться корінь квадратний S<sub>NR</sub> (обчислений у блоці BRK1) у блоці множення MUL3, у результаті чого на виході MUL3 отримується значення параметру *R*<sub>A</sub>. Згідно зі структурною схемою БВК потрібно 3 блоків множення,  $(2 \times M \times N)$  суматорів, два блоки ділення, два блоки інверторів, два блоки регістрів та один блок розрахунку кореня, тобто всього потрібно  $(2 \times M \times N + 10)$  операційних блоків або  $\approx 18 \times M \times N$  вентилів [75], [154].

Блоки фільтрації зображень підсистеми (рис. 4.3) апаратно реалізовано засобами ПЛІС [155]-[158] (рис. 3.9) – (рис. 3.13), проте можлива їх реалізація за допомогою процесорів цифрового оброблення сигналів (ЦОС) [119], [120]. Процесори ЦОС є ефективними для реалізації згортання сигналів, оскільки підтримують операції «множення з накопиченням» (multiply-accumulate, MAC)

$$A = A + X \times B, \tag{4.4}$$

де А, Х, В – елементи масивів дійсних чисел.

При цьому операції МАС є частковим випадком операцій «множення з додаванням» (multiplier-adder, MADD). Операції згортання зображень (2.1) зводяться до операцій МАС (4.4), в яких вихідним масивом *A* є зображення

g після згортання, а масивами X та B є початкове зображення  $f_n$  та ядро фільтра w відповідно. Завдяки цьому в процесорах ЦОС для операцій МАС розрахунок адрес елементів масивів виконується автоматично, а така операція виконується за один машинний цикл. З метою підвищення швидкодії в процесорах ЦОС (наприклад, у процесорах ЦОС фірми Texas Instruments [166]) використовується кілька портів при зверненні до незалежних областей пам'яті: пам'яті даних та пам'яті програм.

На основі структури КОЕС (рис. 4.3) розроблено її Simulink-модель (рис. 4.6) [120]. У розробленій моделі початкове зображення зчитується в блоці «fn0», операції згортання реалізують блоки «2-D Conv», а операцію обчислення СКВ зображення – блоки «2D Standard Deviation». Початкове зображення fn0 зчитується з графічного файлу. Перед зчитуванням зображення у блоці «KV» встановлюється параметр  $B_r$  «Яскравість» відеокамери. Послідовність оброблення зображень у запропонованій моделі така.

Яскравість початкового зображення fn0 нормалізується в межах від 0 до 1 у блоці «fn\_Norm» (з кодом MATLAB). Ядро фільтру *w* обчислюється в блоці «w» (з кодом MATLAB) на основі СКВ фільтра «Sigma\_w». Згортання початкового зображення  $f_n$  з ядром фільтра *w*, у результаті чого отримується фільтроване зображення *g*, виконується в блоці «2-D Conv\_g» (якому відповідає БФПЗ на рис. 4.3). Зображення шумової складової  $f_h$  обчислюється в блоці «Substract\_fh» (аналог БВШС) як різниця *g* та  $f_n$ . Модуль шумової складової  $f_d$ обчислюється в блоці «Abs\_fd» (аналог БВМШС). Згортання зображення  $f_d$ виконується в блоці «2-D Conv\_fdc» (аналог БФМШС).

Початкове СКВ Sigma\_h шумової складової  $f_h$  обчислюється в блоці «2-D Standard Deviation\_sh» (аналог БВСШС). У блоці «Th» з врахуванням Sigma\_h обчислюється поріг  $T_h$  ділянки інтересу ROI, на основі якого та зображення  $f_{dc}$  у блоці «bROI» обчислюються значення ROI (блокам «Th» та «bROI» на рис. 4.3 відповідає БВROI). У блоці «2-D Standard Deviation\_shROI» (аналог БВСШС) обчислюється СКВ shROI шумової складової  $f_h$  з врахуванням ділянки ROI. СКВ shROI ітеративно уточнюється за допомогою блоку «Th», в якому вихід sh0 означає СКВ shROI для попередньої ітерації.



Рисунок 4.6 – Simulink-модель підсистеми адаптивної зміни параметру «Яскравість» відеокамери (рис. 4.3)

Для встановлення початкових значень сигналів shROI (-1) та sh2(1) використано блоки пам'яті «Memory\_shROI» та «Memory\_sh0» відповідно. Ітераційний процес у блоці «Th» завершується, якщо різниця між значеннями shROI (новим) та sh2 (попереднім) стає меншим за поріг (0.0004). Рівень шуму sNE / $\sigma_{NE}$ / обчислюється в блоці «sNE» (аналог БВРШ), СКВ ss0 зображення  $f_n$  обчислюється в блоці «2-D StDev\_ss0» (аналог БВСС), площа  $A_{ST}$  (4.2) обчислюється в блоці «AST»; на основі вище-описаних сигналів у блоці «KV» (аналог БВК) обчислюється критерій якості  $K_V$ .

Результати моделювання (зокрема, рівень шуму  $\sigma_{NE}$ , критерій якості зображення  $K_V$ ), отримані за допомогою розробленої Simulink-моделі (рис. 4.6), узгоджуються з результатами роботи програми "VideoParameter18".

## 4.1.2 Експериментальні дослідження розроблених засобів для адаптивної зміни параметру «Яскравість» відеокамери

Виконано експериментальні дослідження розроблених засобів адаптивної зміни параметру «Яскравість» відеокамери, а саме програми "VideoParameter18" та Simulink-моделі КОЕС (рис. 4.6). З цією метою отримано серію зображень за допомогою відеокамери «A4Tech PK-835MJ» з КМОН-матрицею для низької освітленості об'єкту. Значення параметру «Яскравість» (*B<sub>r</sub>*) у відносних одиницях для даної моделі камери змінювалися в діапазоні від -10 до 15 (рис. 4.7, див. додаток Г1, рис. Г.1).



Рисунок 4.7 – Серія зображень (розміром 320 × 240 пікселів), отриманих відеокамерою «А4Tech PK-835MJ»; значення параметру «Контраст» рівне 17

Для кожного зображення  $f_n$  серії (рис. 4.7) обчислено експериментальний рівень шуму  $\sigma_{NE}$ , критерії якості зображень  $R_A$  (4.2) та  $R_L$  (4.3) (табл. 4.1), а також гістограми зображень (див. додаток Г1, рис. Г.3). У результаті отримано, що результуюче значення параметру «Яскравість» згідно з критерієм  $R_L$  та з критерієм  $R_A$  дорівнює 5 (табл. 4.1, рис. 4.8). Згідно з суб'єктивним критерієм візуальної якості зображення [116]-[118], отриманим за порівняльною оцінкою якості (за рішенням 5-ти експертів), оптимальне значення параметру «Яскравість» дорівнює 5, що підтверджує коректність критеріїв  $R_A$  та  $R_L$ .
Запропоновані критерії  $R_A$  та  $R_L$  використовуються, якщо умови для яскравості *z* зображення у формулах (4.2) та (4.3) відповідно виконуються для більш ніж 25% пікселів зображення. В іншому випадку значення критерію приймається рівним 0, а відповідне значення параметру «Яскравість» ( $B_r$ ) згідно із використаним критерієм вважається недопустимим.

Показано, що збільшення значення параметру  $B_r$  «Яскравість» призводить до збільшення середньої яскравості зображення, але практично не змінює діапазон значень відеосигналу (див. додаток Г1, рис. Г.3).

З цієї причини СКВ корисного сигналу  $\sigma_s$  та СКВ шуму  $\sigma_{NE}$  для більшості значень  $B_r$  (-5  $\leq B_r \leq$  7) є практично постійними (табл. 4.1). Проте, для низьких та високих значень  $B_r$  спостерігаються ефекти відсікання яскравостей пікселів зображення, які виходять за допустимий діапазон [0...1], що призводить до зменшення  $\sigma_s$  та  $\sigma_{NE}$ . Таке відсікання особливо помітне на гістограмах зображень (додаток Г1, рис. Г.3), де при низьких значеннях  $B_r$  відбувається обмеження яскравостей знизу (рис. Г.3, а, б), а при високих  $B_r$  – зверху (рис. Г.3, е). У формулах (4.2) та (4.3) встановлені обмеження на яскравість пікселів *z*, що призводить до зменшення значень критеріїв  $R_A$  та  $R_L$  відповідно.

Для розрахованого результуючого значення параметру  $B_r = 5$  отримано не тільки найвищу візуальну якість зображення (див. додаток Г1, рис. Г.1, б), але й найбільшу ширину гістограми в межах допустимих значень (рис. Г.3, д), що додатково підтверджує коректність запропонованого методу налаштування параметру «Яскравість» відеокамери.

Середній час адаптивної зміни параметру «Яскравість» відеокамери при обробленні на комп'ютері з процесором AMD A4-6300 Processor, 3.70 ГГц серії з 10-ти зображень розміром 320 × 240 пікселів (рис. 4.7) складає ≈12 с, що на порядок менше у порівнянні з налаштуванням у ручному режимі.

Таблиця 4.1 – Параметри серії зображень, отримані за допомогою веб-камери «А4Tech PK-835MJ» (рис. 4.7); значення параметру «Яскравість» (*B<sub>r</sub>*) за замовчуванням дорівнює 1; результуючі значення параметру «Яскравість»

$n_b$	$B_r$	$\sigma_{NE}, 10^{-2}$	$\sigma_S$	$\sigma_{SL}$	$R_L$	$A_{ST}$	$R_A$
1	-10	1.80	0.1049	0.0559	3.1146	1.0000	5.8410
2	-5	1.99	0.1306	0.1019	5.1144	1.0000	6.5548
3	-2	2.15	0.1265	0.1021	4.7419	1.0000	5.8709
4	0	1.99	0.1346	0.1161	5.8463	1.0000	6.7789
5	1	1.99	0.1378	0.1222	6.1322	0.9994	6.9117
6	2	1.98	0.1385	0.1250	6.3136	0.9990	6.9891
7	5	1.97	0.1404	0.1293	6.5659	0.9955	7.0989
8	7	1.91	0.1289	0.1243	6.5079	0.9155	6.2283
9	10	1.69	0.1307	0	0	0.5027	3.8922
10	15	0.01	0.0720	0	0	0	0

дорівнюють 5 ( $R_L$ ,  $R_A$ );  $n_b$  – номер значення параметру  $B_r$ 



Рисунок 4.8 – Значення параметрів  $R_L$  (а) та  $R_A$  (б), обчислені при різних значеннях параметру «Яскравість» ( $B_r$ ) відеокамери (табл. 4.1)

Адаптивну зміну параметру  $B_r$  «Яскравість» відеокамери «Toshiba Satellite Pro» на основі критеріїв візуальної якості зображення  $R_A$  та  $R_L$ виконано при обробленні серії зображень одного об'єкта, отриманих при однакових умовах освітлення (рис. 4.9). Значення параметру  $B_r$  у відносних одиницях для даної моделі камери змінювалися від 0 до 100. Для кожного зображення  $f_n$  серії (рис. 4.9) обчислено експериментальний рівень шуму  $\sigma_{NE}$ , критерії візуальної якості R<sub>A</sub> (4.2) та R<sub>L</sub> (4.3) (табл. 4.2), а також гістограми зображень (додаток Г1, рис. Г.4). У результаті отримано, що результуюче значення параметру  $B_r$  згідно з критерієм  $R_L$  дорівнює 100, а згідно з критерієм  $R_A$  дорівнює 50 (табл. 4.2, рис. 4.10). Згідно з суб'єктивним критерієм візуальної якості зображення [116]-[118], отриманим за порівняльною оцінкою якості, оптимальне значення параметру «Яскравість» близьке до 80, що узгоджується з середнім значенням результатів критерію  $R_L$  і  $R_A$  (табл. 4.2). Для результуючого значення параметру «Яскравість»  $B_r = 80$  (див. додаток Г1, рис. Г.2, б, рис. Г.4, д) спостерігається насичення зображення. Однак таке насичення відбувається для ділянок фону зображення, а не об'єкта, тому візуальна якість зображення об'єкта не зменшується. Отримані за допомогою програми "VideoParameter18" параметри зображення (табл. 4.2,  $B_r = 80$ ) узгоджуються з результатами моделювання на основі Simulink-моделі КОЕС (рис. 4.6).



Рисунок 4.9 – Серія зображень (розміром 320 × 240 пікселів), отриманих відеокамерою «Toshiba Satellite Pro»; значення параметру «Контраст» рівне 50

Таблиця 4.2 – Параметри серії зображень, отримані за допомогою відеокамери «Toshiba Satellite Pro» (рис. 4.9); значення параметру «Яскравість» (*B<sub>r</sub>*) за замовчуванням дорівнює 50; результуючі значення

параметру «Яскравість» дорівнюють 100 ( $R_L$ ) та 50 ( $R_A$ );

$n_b$	$B_r$	$\sigma_{NE}, 10^{-2}$	$\sigma_S$	$\sigma_{SL}$	$R_L$	$A_{ST}$	$R_A$
1	0	0.68	0.2005	0.1417	20.8577	1.0000	29.5096
2	10	0.68	0.2177	0.1638	24.2419	1.0000	32.2296
3	20	0.71	0.2327	0.1765	24.8307	1.0000	32.7327
4	30	0.72	0.2454	0.1897	26.2333	1.0000	33.9397
5	40	0.75	0.2547	0.2044	27.3319	1.0000	34.0713
6	50	0.77	0.2638	0.1892	24.5705	1.0000	34.2653
7	60	0.76	0.2720	0.1794	23.5941	0.8461	30.2666
8	70	0.66	0.2698	0.1767	26.9448	0.7659	31.5157
9	80	0.63	0.2585	0.1783	28.2535	0.6916	28.3312
10	90	0.49	0.2420	0.1895	38.3607	0.5991	29.3558
11	100	0.38	0.2220	0.2086	55.2988	0.5143	30.2623

 $n_b$  – номер значення  $B_r$ 



Рисунок 4.10 – Значення критеріїв якості зображень  $R_L$  (а) та  $R_A$  (б) у залежності від значень параметру «Яскравість» ( $B_r$ ) відеокамери (табл. 4.2)

Аналогічно за допомогою розробленого методу проведено зміну параметру «Яскравість» відеокамери «Logitech C270» для зображень об'єкта, отриманих при однакових умовах освітлення (рис. 4.11). Значення параметру «Яскравість» ( $B_r$ ) у відносних одиницях для даної моделі камери змінювалися в діапазоні від 0 до 250. Для кожного зображення  $f_n$  серії (рис. 4.11) обчислено експериментальний рівень шуму  $\sigma_{NE}$ , критерії якості зображення  $R_A$  (4.2) та  $R_L$ (4.3) (табл. 4.3), а також їх гістограми (див. додаток Г1, рис. Г.5). У результаті отримано, що результуюче значення параметру  $B_r$  згідно з критерієм  $R_L$ дорівнює 140, а згідно з критерієм  $R_A$  дорівнює 100 (табл. 4.3).



Рисунок 4.11 – Серія зображень, отриманих за допомогою відеокамери «Logitech C270»; значення параметру «Контраст» рівне 127



Рисунок 4.12 – Значення параметрів *R*<sub>L</sub> (а) та *R*<sub>A</sub> (б), обчислені при різних значеннях параметру «Яскравість» (*B*<sub>r</sub>) відеокамери (табл. 4.3)

Таблиця 4.3 – Параметри серії зображень, отримані за допомогою відеокамери «Logitech C270» (рис. 4.11); значення параметру «Яскравість» (*B<sub>r</sub>*) за замовчуванням дорівнює 127; результуючі значення параметру «Яскравість» дорівнюють 140 (*R<sub>L</sub>*) та 100 (*R<sub>A</sub>*); *n<sub>b</sub>* – номер значення *B<sub>r</sub>* 

$n_b$	$B_r$	σ <sub>NE</sub> , %	$\sigma_S$	$\sigma_{SL}$	$R_L$	$A_{ST}$	$R_A$
10	90	0.01	0.1490	0	0	0	0
11	100	3.61	0.1673	0.1119	3.0968	0.9909	4.5862
12	110	5.04	0.1919	0.1279	2.5387	0.9775	3.7233
13	120	4.98	0.2063	0.1384	2.7792	0.9767	4.0449
14	130	4.85	0.2226	0.1271	2.6193	0.9632	4.4174
15	140	4.09	0.2105	0.1934	4.7247	0.8208	4.2216
16	150	4.50	0.2427	0.0996	2.2152	0.7946	4.2878
17	160	0.01	0.2248	0	0	0	0

Згідно з суб'єктивним критерієм візуальної якості зображення [116]-[118], отриманим за порівняльною оцінкою якості, оптимальне значення параметру «Яскравість» близьке до 120, що підтверджує коректність використання середнього значення результатів критеріїв  $R_L$  та  $R_A$  (табл. 4.3). Для отриманого результуючого значення параметру  $B_r = 120$  спостерігається також найбільша ширина гістограми в межах допустимих значень (див. додаток Г1, рис. Г.5, в).

Аналіз результатів адаптивної зміни параметру «Яскравість» відеокамер «A4Tech PK-835MJ», «Toshiba Satellite Pro» та «Logitech C270» (табл. 4.1 – табл. 4.3) показує, що таке налаштування практично не змінює ВСШ (4.1) на зображеннях у порівнянні зі значенням ВСШ для параметру «Яскравість» за замовчуванням (у більшості випадків це середнє значення діапазону допустимих параметру). В окремих випадках значень v результаті налаштування параметру «Яскравість» ВСШ збільшувався на величину ~6 дБ (табл. 4.2).

При адаптивній зміні параметрів відеокамер експериментальний рівень шуму  $\sigma_{NE} \approx 0.01$  (табл. 4.1-табл. 4.3), а СКВ  $\sigma_{S0}$  початкового зображення на порядок перевищує  $\sigma_{NE}$ . Тому на основі формул (4.1)-(4.3) для критеріїв  $K_V$  якості зображення (заснованих на ВСШ) отримано

$$K_V \approx \frac{1}{\sigma_{NE}}$$
 (4.5)

Згідно з (4.5) похибка обчислення критерію  $K_V$  пропорційна до похибки обчислення СКВ шуму  $\sigma_{NE}$ . Тому, враховуючи похибки (КСКП  $R_{MSE}$ ) обчислення рівня шуму запропонованим методом LLROI у порівнянні з аналогами для  $\sigma_N \approx 0.01$  (табл. 3.3), отримано, що КСКП обчислення  $K_V$ запропонованим методом менший на величину  $\delta_V = \left( (1 - \frac{0.253}{0.304}) \cdot 100\% \approx 15\% \right)$ (у порівнянні з найкращим методом-аналогом РСАР) (додаток Е). З

(у портвнянні з наикращим методом-аналогом РСАР) (додаток Е). врахуванням (3.7) зменшення похибки обчислення  $\sigma_{NE}$  на 15% призводить до підвищення ВСШ на 1.4 дБ.

Отримане результуюче значення параметру відеокамери *B<sub>r</sub>* «Яскравість» в подальшому використано як значення за замовчуванням. Значення параметру «Яскравість» коректується періодично або при зміні умов освітлення об'єкта. За рахунок вищеописаного уточнення параметру «Яскравість» відеокамери можливо частково підвищити співвідношення сигнал/шум для отриманих зображень. Подальше підвищення якості зображень виконано шляхом адаптивної зміни параметру «Контраст» відеокамери.

# 4.2 Комп'ютеризована система для адаптивної зміни параметру «Контраст» відеокамери

З метою підвищення співвідношення сигнал/шум і візуальної якості зображень розроблено метод для адаптивної зміни параметру «Контраст» цифрової відеокамери в КОЕС (аналогічно, як для зміни параметру «Яскравість»). Згідно з розробленим методом та його алгоритмом (рис. 4.13) вибір параметру  $C_t$  «Контраст» відеокамери виконується на основі обчислених значень рівня шуму для зображень, отриманих з відеокамери. Параметр  $C_t$  приймає  $Q_C$  дискретних значень, які змінюються в межах від  $C_{tMin}$  до  $C_{tMax}$  із заданим кроком

Адаптивна зміна параметру «Контраст» передбачає, що інші параметри відеокамери (контраст «Яскравість», експозиція «Exposure», насиченість «Saturation» та ін.) залишаються незмінними. У процесі налагодження параметру «Контраст» програма отримує за допомогою відеокамери серію зображень  $f_n$  одного об'єкта при однакових умовах освітлення, але при різних значеннях параметру  $C_t$  «Контраст». Згідно із запропонованим алгоритмом (рис. 4.13) в циклі за номером  $n_c$  встановлюються значення параметру  $C_t$  для відеокамери у вибраному діапазоні.

Для кожного значення параметру  $C_t$  відеокамери отримується цифрове зображення  $f_n$ , обчислюються його рівень шуму  $\sigma_{NE}$  і СКВ сигналу  $\sigma_S$ , а також критерії якості зображення  $K_V$ . Результуюче значення параметру  $C_t$ «Контраст» відеокамери визначається за максимальними значенням  $K_V$  (4.2), (4.3) методом повного перебору дискретних значень  $C_t$ .

На основі розробленого алгоритму (рис. 4.13), а також з врахуванням будови та принципів роботи цифрових відеокамер (рис. 1.5) [79, с.73-84] та (рис. 1.6) [10, с.236-238], синтезовано структуру КОЕС та її Simulink-модель. Така система є подібною до КОЕС, яка використовується для адаптивної зміни параметру «Яскравість» відеокамери (рис. 4.3), але в ній передбачено адаптивну зміну параметру  $C_t$  «Контраст».



Рисунок 4.13 – Схема алгоритму адаптивної зміни параметру «Контраст» відеокамери

Для перевірки розробленого методу адаптивної зміни параметру «Контраст» відеокамери отримано серію зображень за допомогою відеокамери «A4Tech PK-835MJ» для низької освітленості об'єктів. Значення параметру  $C_t$  у відносних одиницях для даної моделі камери змінювалися в діапазоні від 1 до 32 (рис. 4.14).

Для зчитаних з відеокамери зображень  $f_n$  (рис. 4.14, додаток Г2, рис. Г.6) обчислено експериментальний рівень шуму  $\sigma_{NE}$ , критерії якості зображення  $R_A$  (4.2) та  $R_L$  (4.3) (табл. 4.4), а також гістограми зображень (див. додаток Г2,

рис. Г.8). У результаті отримано, що результуюче значення параметру «Контраст» згідно з критерієм  $R_L$  дорівнює 18, а згідно з критерієм  $R_A$  також дорівнює 18 (табл. 4.4, рис. 4.15). Згідно з суб'єктивним критерієм візуальної якості зображення [116]-[118], отриманим за порівняльною оцінкою якості, оптимальне значення параметру «Контраст» дорівнює 18, що підтверджує коректність критеріїв  $R_L$  та  $R_A$ .

При збільшенні параметру  $C_t$  «Контраст» амплітуда та, відповідно, СКВ  $\sigma_s$  корисного сигналу зростають практично прямо пропорційно до параметру  $C_t$ (див. додаток Г2, рис. Г.8, табл. 4.4), а СКВ шуму  $\sigma_{NE}$  зростає повільніше.



Рисунок 4.14 – Серія зображень (розміром 320 × 240 пікселів), отриманих за допомогою відеокамери «А4Tech PK-835MJ»



Рисунок 4.15 – Значення критеріїв якості зображення  $R_L$  (а) та  $R_A$  (б), обчислені при різних значеннях параметру «Контраст» ( $C_t$ ) відеокамери

Таблиця 4.4 – Параметри серії зображень, отримані за допомогою веб-камери «А4Tech PK-835MJ» (рис. 4.14); значення параметру «Контраст» (*C<sub>t</sub>*) за замовчуванням дорівнює 18; результуючі значення параметру «Контраст»

$n_c$	$C_t$	$\sigma_{NE}, 10^{-2}$	$\sigma_S$	$\sigma_{SL}$	$R_L$	$A_{ST}$	$R_A$
1	1	0.11	0.0046	0.0046	4.2234	0	0
2	3	0.24	0.0146	0.0146	6.0432	1.0000	6.0432
3	6	0.41	0.0288	0.0288	7.0710	1.0000	7.0710
4	9	0.55	0.0435	0.0435	7.9448	1.0000	7.9448
5	12	0.68	0.0594	0.0594	8.7244	1.0000	8.7270
6	15	0.82	0.0753	0.0713	8.6969	1.0000	9.1805
7	18	0.99	0.0998	0.0898	9.0895	1.0000	10.1014
8	23	1.34	0.1115	0.0964	7.1960	1.0000	8.3258
9	27	1.69	0.1270	0.1081	6.3980	0.9999	7.5170
10	32	2.14	0.1442	0.1187	5.5467	0.9998	6.7325

дорівнюють 18 ( $R_L$ ) та 18 ( $R_A$ );  $n_c$  – номер значення параметру  $C_t$ 

Це пояснюється тим, що збільшення параметру «Контраст» призводить до збільшення діапазону значень аналогового відеосигналу  $f_A$  (рис. 4.1, рис. 4.3) і, відповідно, до збільшення кількості відтінків сірого  $q_f$  для яскравості пікселів цифрового зображення  $f_n$  (рис. Г.8). Тому, з врахуванням (1.8) [20, с.151-152], це призводить до зменшення СКВ шуму квантування  $\sigma_K$ , яке описується формулою

$$\sigma_K = \frac{1}{q_f} \sqrt{\frac{f_{\text{max}}^2}{12}} \quad , \tag{4.6}$$

де  $f_{max} = 1$  – максимальне значення яскравості зображення;

 $q_f$  – кількість відтінків сірого для зображення  $f_n$ .

Без врахування СКВ шуму квантування  $\sigma_K$  значення СКВ шуму  $\sigma_{NE}$  зростали б прямо пропорційно до параметру  $C_t$  (так само, як збільшуються значення  $\sigma_S$ ), тому, в такому випадку, зміна параметру  $C_t$  не приводила б зміни критеріїв якості зображення  $K_V$ . Однак, за рахунок зменшення СКВ шуму квантування  $\sigma_K$  зменшується рівень шуму  $\sigma_{NE}$ .

Крім цього, для низьких та високих значень  $C_t$  спостерігаються ефекти відсікання яскравостей пікселів зображення, які виходять за допустимий діапазон [0...1], що призводить до зменшення  $\sigma_S$  та  $\sigma_{NE}$ . Таке відсікання особливо помітне на гістограмах зображень (див. додаток Г2, рис. Г.8), на яких при високих значеннях  $C_t$  відбувається обмеження яскравостей (рис. Г.8, г-е). У формулах (4.2) та (4.3) встановлені обмеження на яскравість пікселів *z*, що призводить до зменшення значень критеріїв  $R_A$  та  $R_L$  відповідно.

Середній час адаптивної зміни параметру «Контраст» або «Яскравість» відеокамери при обробленні на комп'ютері з процесором AMD A4-6300, 3.70 ГГц серії з 10-ти зображень розміром 320 × 240 пікселів (рис. 4.14) складає ≈12 с, що на порядок менше у порівнянні з налаштуванням у ручному режимі.

Для перевірки розробленого методу адаптивної зміни параметру  $C_t$ «Контраст» відеокамери отримано також серію зображень за допомогою відеокамери «Toshiba Satellite Pro» для однакової освітленості об'єкту (рис. 4.16). Для зчитаних з відеокамери зображень  $f_n$  (рис. 4.16, додаток Г2, рис. Г.7) обчислено експериментальний рівень шуму  $\sigma_{NE}$ , критерії якості зображення  $R_A$  (4.2) та  $R_L$  (4.3) (табл. 4.5), а також гістограми зображень (див. додаток Г2, рис. Г.9). У результаті отримано, що результуюче значення параметру «Контраст» згідно з критеріями  $R_L$  та  $R_A$  дорівнює 30 (табл. 4.5, рис. 4.17). Згідно з суб'єктивним критерієм візуальної якості зображення [116]-[118] за порівняльною оцінкою якості оптимальне значення параметру «Контраст» дорівнює 30, що підтверджує коректність критеріїв  $R_L$  та  $R_A$ .



Рисунок 4.16 – Серія зображень (розміром 320 × 240 пікселів), отриманих за допомогою веб-камери «Toshiba Satellite Pro»; значення параметру *C*<sub>t</sub> «Контраст» змінюються в діапазоні від 0 до 100 (табл. 4.5)

Таблиця 4.5 – Параметри серії зображень, отримані за допомогою веб-камери «Toshiba Satellite Pro» (рис. 4.16); значення параметру «Контраст» (*C*<sub>t</sub>) за замовчуванням дорівнює 50; результуючі значення параметру «Контраст»

$n_c$	$C_t$	$\sigma_{NE}, 10^{-2}$	$\sigma_S$	$\sigma_{SL}$	$R_L$	$A_{ST}$	$R_A$
1	0	0.11	0.0013	0.0013	1.2129	0	0
2	10	0.19	0.0477	0.0477	24.7255	1.0000	24.7255
3	20	0.35	0.1132	0.1133	32.5802	1.0000	32.5802
4	30	0.44	0.1662	0.1513	34.1452	1.0000	37.5129
5	40	0.60	0.2215	0.1793	29.6402	1.0000	36.6163
6	50	0.75	0.2655	0.1902	25.2168	0.9999	35.1941
7	60	0.84	0.3046	0.1946	23.0725	0.8230	29.7291
8	70	0.86	0.3273	0.2005	23.3923	0.7592	28.9943
9	80	0.93	0.3431	0.1968	21.1597	0.7321	27.0077
10	90	0.98	0.3567	0.1945	19.8851	0.6861	25.0175
11	100	0.96	0.3675	0.1988	20.7181	0.6409	24.5488

дорівнюють 30 ( $R_L$ ,  $R_A$ );  $n_c$  – номер значення параметру  $C_t$ 



Рисунок 4.17 – Значення критеріїв якості зображень *R<sub>L</sub>* (а) та *R<sub>A</sub>* (б) у залежності від параметру «Контраст» (*C<sub>t</sub>*) відеокамери (табл. 4.5)

Експериментальну перевірку розробленого методу адаптивної зміни параметру  $C_t$ «Контраст» проведено при налаштуванні параметру відеокамери «Logitech C270», для чого з допомогою відеокамери отримано серію зображень об'єкту для однакової освітленості (рис. 4.18). Значення параметру C<sub>t</sub> у відносних одиницях для даної моделі камери змінювалися в діапазоні від 0 до 250. Для зчитаних з відеокамери зображень f<sub>n</sub> (рис. 4.18) обчислено експериментальний рівень шуму  $\sigma_{NE}$ , критерії якості  $R_A$  (4.2) та  $R_L(4.3)$  (табл. 4.5). У результаті отримано, що результуюче значення параметру «Контраст» згідно критерію  $R_L$  та критерію  $R_A$  дорівнює 30 (табл. 4.6, рис. 4.19), що підтверджується гістограмами зображень (додаток Г2, рис. Г.10). Згідно з суб'єктивним критерієм візуальної якості зображення [116]-[118], отриманим за порівняльною оцінкою якості, оптимальне значення параметру «Контраст» дорівнює 30, що підтверджує коректність критеріїв  $R_L$  та  $R_A$ .



Рисунок 4.18 – Серія зображень (розміром 320 × 240 пікселів), отриманих за допомогою веб-камери «Logitech C270»



Рисунок 4.19 – Значення критеріїв якості зображень *R<sub>L</sub>* (а) та *R<sub>A</sub>* (б), обчислені при різних значеннях параметру «Контраст» (*C<sub>t</sub>*) відеокамери (табл. 4.6)

Таблиця 4.6 – Параметри серії зображень, отримані за допомогою веб-камери «Logitech C270» (рис. 4.18); значення параметру «Контраст» (*C*<sub>t</sub>) за замовчуванням дорівнює 147; результуюче значення параметру «Контраст»

$n_c$	$C_t$	σ <sub>NE</sub> , %	$\sigma_S$	$\sigma_{SL}$	$R_L$	$A_{ST}$	$R_A$
2	10	0.32	0.0232	0.0232	7.3502	1.0000	7.3502
3	20	0.80	0.0618	0.0618	7.6777	1.0000	7.6777
4	30	1.12	0.0994	0.0874	7.7760	1.0000	8.8535
5	40	1.73	0.1343	0.0882	5.0992	0.9948	7.7243
6	50	2.19	0.1579	0.0952	4.3546	0.9782	7.0663
7	60	2.67	0.1749	0.1118	4.1881	0.9776	6.4104
8	70	3.30	0.1903	0.1220	3.7037	0.9766	5.6392
9	80	3.69	0.2055	0.1137	3.0918	0.9654	5.3781
10	90	4.05	0.2196	0.1043	2.5786	0.9460	5.1322
11	100	4.60	0.2321	0.1047	2.2765	0.8961	4.5232
12	110	4.94	0.2412	0.1058	2.1439	0.8315	4.0622
13	120	5.25	0.2478	0.1070	2.0363	0.7717	3.6403
14	130	5.29	0.2530	0.1068	2.0211	0.7271	3.4813
15	140	5.53	0.2580	0.1123	2.0309	0.6675	3.1136

дорівнює 30 ( $R_L$ ,  $R_A$ );  $n_c$  – номер значення параметру  $C_t$ 

Аналіз результатів адаптивної зміни параметру «Контраст» відеокамер «A4Tech PK-835MJ», «Toshiba Satellite Pro» та «Logitech C270» (табл. 4.4табл. 4.6) показує, що така зміну забезпечує збільшення співвідношення сигнал/шум (4.1) на зображеннях в середньому на величину ~14 дБ (для яскравості початкового зображення, нормованого в діапазоні від 0 до 1) у порівнянні зі значенням параметру «Контраст» за замовчуванням (у більшості випадків це середнє значення діапазону допустимих значень параметру).

Отримане результуюче значення параметру відеокамери *C<sub>t</sub>* «Контраст» у подальшому використовується як значення за замовчуванням. Значення параметру «Контраст» коректується періодично або при зміні умов освітлення об'єкта.

Розроблені методи та засоби адаптивної зміни параметрів «Яскравість» і «Контраст» відеокамер дозволяють як окреме застосування, так і в комплексі при ітераційній зміні параметрів відеокамер (результуюче значення параметру «Яскравість» використовується для налаштування параметру «Контраст» і т.д.).

У більшості випадків (табл. 4.1 – табл. 4.6) при адаптивній зміні параметрів «Яскравість» і «Контраст» відеокамер середнє значення результатів, отриманих за критеріями якості зображення  $R_A$  (4.2) та  $R_L$  (4.3), забезпечує краще узгодження із суб'єктивним критерієм візуальної якості зображення [116]-[118], ніж результати окремо критеріїв  $R_A$  та  $R_L$ . Це свідчить про доцільність комплексного використання критеріїв  $R_A$  та  $R_L$  при адаптивній зміні параметрів відеокамер.

Розроблені методи та засоби адаптивної зміни параметрів відеокамер можуть використовуватися в системах підтримки прийняття рішення при адаптивній зміні параметрів систем технічного зору та відеоспостереження [167]. При цьому за рахунок програмного оброблення зображень час адаптивної зміни параметрів відеокамер, у порівнянні з налаштуванням у ручному режимі, зменшено на порядок.

## 4.3 Метод і програмні засоби для визначення рівня шуму зображень за допомогою паралельних обчислень

Оскільки при адаптивній зміні параметрів відеокамер за запропонованими методами найбільше часу потребує процес обчислення рівня шуму на зображеннях (більш ніж 75% від загального часу), тому з метою підвищення швидкодії оброблення зображень розроблено метод і програмні засоби для визначення рівня шуму з використанням паралельних обчислень. Таке підвищення швидкодії особливо важливе при обробленні серій зображень з високою роздільною здатністю.

У процесі обчислення рівня шуму запропонованими методами (рис. 2.7, рис. 2.10) в основному виконуються такі операції (наприклад, згортання зображень з ядрами низькочастотного та високочастотного фільтрів, віднімання двох матриць, обчислення модуля елементів матриці та ін.), які дозволяють ефективне розпаралелювання. Паралельне визначення рівня шуму виконано за допомогою комп'ютерного кластера [168] – множини процесорних елементів (вузлів), які об'єднані в мережу з метою вирішувати спільну обчислювальну задачу. Як вузли кластера використано ядра центрального процесора. Обчислення рівня шуму за допомогою паралельних обчислень у такому випадку полягає в поділі початкового зображення на фрагменти (тайли) та обробленні кожного фрагменту за допомогою окремого вузла кластера з використанням запропонованих методів LLROI та HLROI.

Оскільки в запропонованих методах LLROI та HLROI різні фрагменти зображення обробляються за однаковим алгоритмом, тому реалізована на основі таких методів система обчислення рівня шуму з використанням паралельних обчислень за класифікацією Фліна є комп'ютерною системою з одиничним потоком команд і множинним потоком даних (Single Instruction, Multiple Data – SIMD) [91] (рис. 4.20). Згідно з класифікацією Шора така система є машиною IV, в якій відсутні прямі з'єднання між процесорними елементами [91].



Рисунок 4.20 – Структура комп'ютерної системи типу SIMD [91], призначеної для обчислення рівня шуму на цифрових зображеннях; ПКР – пристрій керування, ПР – процесорний елемент, ПД – пам'ять даних

Паралельне обчислення рівня шуму програмно реалізовано засобами МАТLAB, а саме засобами пакетів МАТLAB Distributed Computing Toolbox та МАТLAB Distributed Computing Engine [168]. У такому випадку як пристрій керування використовується будь-який процесор комп'ютера, який під'єднаний до мережі і має доступ до кластера; для планувальника паралельних обчислень (JobManager) виділяється один із вузлів кластера, при цьому на кожному вузлі запускається по одному робочому процесу (worker). Тобто, якщо кластер містить Q процесорних елементів (рис. 4.20), то можливо паралельно виконувати Q робочих процесів ( $W_1 - W_Q$ ).

Розроблений метод визначення рівня шуму з використанням паралельних обчислень полягає в наступному. Обчислювальну задача Job, яку повинен виконувати кластер, поділено на паралельні підзадачі Тask. Всі підзадачі виконуються робочими процесами  $W_1 - W_Q$  одночасно. Кожен вузол кластера при цьому виконує оброблення відповідного прямокутного фрагменту зображення. Наприклад, при використанні 2 вузлів кластера робочі процеси  $W_1$  і  $W_2$  виконують оброблення лівого та правого фрагменту зображення відповідно (рис. 4.21).

Новизна методу полягає в тому, що з метою усунення крайових ефектів виконано розширення зображень перед їх згортанням. У результаті симетричного розширення зображення  $f_n$  розміром  $M \times N$  пікселів (рис. 4.21) отримано розширене зображення  $f_e$  розміром  $M_e \times N_e$  пікселів.



При обробленні фрагментів зображення fe за допомогою робочих процесів  $W_1$  і  $W_2$  кожен процес отримує фрагмент, розширений на величину *М*<sub>w2</sub>, тобто на половину розміру ядра фільтра відносно середини зображення N<sub>2e</sub>, завдяки чому усуваються крайові ефекти на зображенні. Згідно з такою схемою (рис. 4.21) перший робочий процес обробляє фрагмент  $AE_1F_1C$ , а другий робочий процес – фрагмент E<sub>2</sub>BDF<sub>2</sub>. Фрагменти початкового зображення та результати їх оброблення для кожного процесорного елемента (ПР 1 – ПР Q) зберігаються у відповідній пам'яті даних (ПД 1 – ПД Q) (рис. 4.20). З врахуванням вищеописаного просторового поділу зображення та на основі послідовної форми алгоритму обчислення рівня шуму з використанням низькочастотної фільтрації (рис. 2.7) розроблено паралельну форму алгоритму та реалізовано її в системі МАТLAB. У розробленому паралельному алгоритмі обчислення рівня шуму найбільш тривалою операцією є згортання зображення, тому розглянемо детальніше паралельну форму алгоритму згортання початкового зображення  $f_n$  з ядром w фільтра, у результаті чого обчислюється згладжене зображення g (рис. 4.22). Згідно зі схемою алгоритму після зчитування початкового зображення f<sub>n</sub> запускається на виконання планувальник паралельних обчислень *Jm*, який керує робочими процесами  $W_1$  та  $W_2$ .



Рисунок 4.22 – Схема алгоритму згортання зображення з використанням паралельних обчислень за допомогою робочих процесів *W*<sub>1</sub> та *W*<sub>2</sub>

3 метою програмного керування паралельними обчисленнями створюються посилання на планувальник (*pJm*) та на обчислювальну задачу (*pJob*). Далі встановлюється кількість робочих процесів (Q = 2) і створюється двовимірне ядро фільтра w. Посилання на підзадачу *pTask* використовується для керування підзадачами, які виконуються окремими робочими процесами. 3 метою усунення крайових ефектів при згортанні початкове зображення  $f_n$ розширюється до f<sub>e</sub>. Після цього виконується паралельне оброблення фрагментів зображення за допомогою робочих процесів  $W_1$  та  $W_2$ . Кожен робочий процес на основі зображення fe формує відповідний йому фрагмент зображення  $f_1$  (рис. 4.21), виконує його згортання з ядром фільтра w та отримує фільтрований фрагмент без розширення g<sub>w1</sub>. Як результати оброблення робочі процеси  $W_1$  та  $W_2$  повертають фрагменти зображення після згортання  $g_{w1}$ , які записуються в масиви  $g_1$  та  $g_2$  відповідно. Фільтровані фрагменти  $g_1$  та  $g_2$  застосовуються для отримання зображення-результату  $g_1$ .

На основі структурної схеми комп'ютерної системи (рис. 4.20) та запропонованого алгоритму обчислення рівня шуму розроблене програмне забезпечення в системі МАТLAB з використанням паралельних обчислень. У випадку використання двоядерного процесора (AMD A4-6300, 3.7 ГГц) швидкодія паралельної реалізації обчислення рівня шуму (у порівнянні з послідовною) зростає у 1.5 разів. Використання процесорів з більшою кількістю ядер потенційно дозволяє ще більше підвищити швидкодію методу.

Іншим перспективним напрямом розпаралелювання обчислень є застосування апаратно-програмної архітектури CUDA (англ. Compute Unified Device Architecture – уніфікована обчислювальна архітектура пристроїв) [169]-[172], яка дозволяє виконувати на графічному процесорі відеокарти (GPU – Graphics Processing Units) неграфічні обчислення. Перевагою GPU (порівняно з центральним процесором CPU) є на порядки більша кількість ядер (наприклад, GPU NVidia Tesla C1060 містить 240 ядра CUDA /потокових процесора/, GPU NVidia Tesla K20 містить 2880 ядра CUDA). Розпаралелювання обчислень за допомогою ядер CUDA забезпечується тим, що на кожному ядрі виконується окремий потік команд. Тому з метою

підвищення швидкодії фільтрації зображень запропоновано застосувати відеокарту NVidia Tesla K20 з архітектурою Kepler [169]-[171] і розроблено рекомендації по використанню GPU для оброблення зображень.

Паралельне оброблення зображень за допомогою GPU полягає в поділі початкового зображення  $f_n$  на фрагменти та в обробленні кожного фрагменту за допомогою окремого ядра відеокарти. Оскільки при згортанні зображення  $f_n$  для всіх його пікселів застосовується одне ядро фільтра w, тому GPU, яке виконує таке згортання зображення, за класифікацією Фліна є комп'ютерною системою з одиничним потоком команд і множинним потоком даних (Single Instruction, Multiple Data – SIMD) [91]. Згортання цифрових зображень із використанням архітектури Kepler відеопроцесора виконується у такій послідовності (рис. 4.23). Спочатку в спільну пам'ять, доступну для GPU і CPU, записується початкове зображення  $f_n$  та ядро фільтра w. Після згортання зображення отриманий результат g також зчитується з спільної пам'яті.



Рисунок 4.23 – Використання архітектури Kepler відеопроцесора Tesla K20 для згортання цифрових зображень

Кожне ядро  $C_1 - C_{QG}$  відеопроцесора (для NVidia Tesla K20 кількість ядер  $Q_G = 2880$ ) виконує оброблення відповідного прямокутного фрагменту зображення  $f_n$  розміром  $M_G \times N_G$  пікселів. Ядра відеопроцесора поділені на модулі SMX0-SMX14, які також називаються потоковими мультипроцесорами (Streaming multiprocessor). Відеопроцесор Tesla K20 складається з 15-ти модулів SMX, кожен з яких містить 192 ядра CUDA. Дані модулів SMX зберігаються у кешах L1, а спільні дані для всіх модулів зберігаються у кеші L2.

Для паралельного оброблення зображення  $f_n$  потрібно виконати його поділ на фрагменти (локальні вікна) W розміром  $M_G \times N_G$  пікселів (рис. 4.24, а). Як ядро фільтра w використано квадратну матрицю з розмірами  $M_w \times M_w$  елементів, тому з метою усунення крайових ефектів (які виникають при згортанні) виконано розширення зображень  $f_n$  на величину  $M_{w2} = [M_w/2]$ . У результаті симетричного розширення зображення  $f_n$  розміром  $M \times N$ пікселів отримано розширене зображення  $f_e$  розміром  $M_e \times N_e$  пікселів.



Рисунок 4.24 – Паралельне оброблення цифрового зображення *f<sub>n</sub>* (a) за допомогою ядер відеопроцесора (б)

Оскільки при згортанні фрагментів W зображення  $f_n$  між ними існує локальна взаємодія (на відстань до  $M_{w2}$  пікселів), тому на вхід відповідно ядра C відеопроцесора потрібно подавати не тільки сам фрагмент зображення (наприклад, фрагмент  $W_{11}$  на ядро  $C_1$  GPU), а розширений фрагмент з розмірами  $M_{Ge} \times N_{Ge}$  пікселів, де  $M_{Ge} = M_G + 2 M_{w2}$ ,  $N_{Ge} = N_G + 2 M_{w2}$  (рис. 4.24); наприклад, для фрагмента  $W_{11}$  розширений фрагмент містить ділянку ABCD зображення  $f_e$ . Тому повна кількість пікселів розширеного фрагмента складає  $M_{Ge} \times N_{Ge}$ , а корисна кількість пікселів фрагменту (результат згортання яких використовується в подальшому) складає  $M_G \times N_G$ . Відповідно, розмір фрагменту  $M_G \times N_G$  доцільно зменшувати до тих пір, поки

$$(M_G \cdot N_G) \ge \frac{1}{2} (M_{Ge} \cdot N_{Ge}),$$
 (4.7)

тобто поки корисна площа фрагменту не менша за половину повної (рис. 4.24).

Для квадратних фрагментів зображень ( $M_G = N_G$ ) на основі (4.7) отримано, що мінімальний розмір фрагменту зображення, при якому оброблення зображень засобами відеокарти є доцільним, дорівнює

$$M_G = [2(\sqrt{2}+1)M_{w2}] + 1. \tag{4.8}$$

Наприклад, згідно з (4.8) для  $M_{w2} = 2$  значення  $M_G = 10$ ; для  $M_{w2} = 3$ значення  $M_G = 15$ ; для  $M_{w2} = 4$  значення  $M_G = 20$ . Тому при згортанні зображення розміром  $M \times N = 640 \times 640$  пікселів для  $M_{w2} = 3$  доцільним є поділ зображення на 1849 фрагментів, кожен з яких обробляється відповідним ядром відеопроцесора. За рахунок цього можливе підвищення швидкодії оброблення зображень, порівняно з СРU, більш ніж на порядок [171].

Таким чином, існуючі апаратно-програмні засоби для виконання паралельних обчислень дозволяють підвищити швидкодію запропонованих методів обчислення рівня та фільтрації шуму на зображеннях.

### Висновки до розділу 4

Розроблено методи адаптивної зміни параметрів «Яскравість» і «Контраст» відеокамер V комп'ютеризованій системі. Ha основі запропонованих методів розроблено програмні та апаратні засоби для підсистеми адаптивної зміни параметрів відеокамер, синтезовано структуру КОЕС та її Simulink-моделі, а також розроблено структурні схеми блоків підсистеми. Для підвищення швидкодії виконано апаратну реалізацію блоків системи засобами ПЛІС. Розроблено програму в системі MATLAB, призначену для адаптивної зміни параметрів відеокамери на основі критеріїв якості зображень  $K_V$ . Критерії якості  $K_V$  побудовано на основі ВСШ з врахуванням насичення зображення (параметр  $R_A$ ) та ВСШ з обмеженнями на мінімальне та максимальне значення сигналу (параметр  $R_L$ ).

Новизна роботи полягає в отриманні емпіричної формули (4.2) для обчислення критерію  $R_A$  якості зображення, комплексному використанні критеріїв  $R_A$  та  $R_L$  при обчисленні результуючих параметрів відеокамер та в застосуванні алгоритмів визначення рівня шуму, які використовуються в запропонованих методах LLROI та HLROI.

Точність методів перевірено при адаптивній зміні параметрів трьох моделей відеокамер, при цьому комплексне використання критеріїв якості зображення  $R_A$  та  $R_L$  забезпечує добре узгодження отриманих результатів із даними суб'єктивного критерію візуальної якості зображень. Запропоновані методи забезпечують збільшення співвідношення сигнал/шум до 1.4 дБ і високу якість для отриманих зображень.

Розроблено метод і програмні засоби для визначення рівня шуму методами LLROI та HLROI з використанням паралельних обчислень на основі комп'ютерного кластера. Новизна методу полягає у розширенні зображень перед їх паралельним згортанням на величину половини від розміру ядра фільтра, що забезпечує усунення крайових ефектів при фільтрації зображень. Застосування розроблених програмних засобів для двохядерних процесорів забезпечує збільшення швидкодії оброблення зображень до 1.5 разів.

#### ВИСНОВКИ

У роботі виконано розроблення математичних моделей, методів і програмно-апаратних засобів підвищення візуальної якості зображень, що забезпечує вирішення актуального завдання підвищення точності та швидкодії оброблення зображень, отриманих за допомогою відеокамер. У ході досліджень отримано такі основні наукові та практичні результати:

1. Розроблено архітектуру КОЕС для підвищення якості формування зображень, отриманих за допомогою відеокамер. Згідно із запропонованою архітектурою КОЕС складається з підсистем визначення рівня шуму, фільтрації шуму та адаптивної зміни параметрів відеокамер. Розроблена структура КОЕС передбачає спільне застосування високоточної підсистеми визначення рівня шуму як при його фільтрації, так і при зміні параметрів відеокамер, що дозволяє уникнути дублювання блоків КОЕС, а також збільшити ВСШ на зображеннях.

2. Підсистему визначення рівня шуму  $\sigma_{NE}$  на зображеннях реалізовано на основі запропонованих методів LLROI та HLROI, які використовують при виділенні шумової складової низькочастотну та високочастотну фільтрації відповідно. На основі запропонованих методів створено програми в системі МАТLAB, синтезовано структури КОЕС та їх Simulink-моделі, розроблено структурні схеми блоків підсистеми. Апаратна реалізація блоків фільтрації зображень у КОЕС виконана засобами FPGA Artix-7, що дозволило на порядок підвищити швидкодію оброблення зображень. Точність методів перевірено при обробленні множини 100 тестових зображень, при цьому КСКП обчислення  $\sigma_{NE}$  дорівнює  $\approx 0.002$ , що на 30% менше, ніж для найкращого методу-аналогу РСАР. Показано, що за точністю метод HLROI незначно переважає метод LLROI.

3. Розроблено програмно-апаратні засоби підсистеми зменшення рівня шуму на цифрових зображеннях. Розроблено математичну модель і метод автоматичної фільтрації шуму на зображеннях за допомогою фільтра Гауса, особливістю якого є обчислення усереднених амплітудних і частотних параметрів корисного сигналу на основі енергетичного спектра зображення. На основі запропонованого методу реалізовано програмні засоби в системі Matlab, синтезовано структуру КОЕС фільтрації шуму на зображеннях, розроблено структурні схеми основних блоків КОЕС. Точність розробленого методу фільтрації перевірено при зменшені рівня шуму на множині з 100 тестових зображень. Показано, що розроблений метод є квазіоптимальним, оскільки обчислені значення пікового ВСШ у середньому менші за оптимальні 0.14 дБ. Розроблений метод фільтрації шуму дозволяє виконувати на квазіоптимальну фільтрацію шумів як модельованих, i на так на експериментальних зображеннях, тому може використовуватися в графічних редакторах і в системах відеоспостереження. Швидкодія розробленого методу більш ніж у 2 рази вища за швидкодію методів-аналогів, які володіють співрозмірною точністю.

4. Розроблено методи адаптивної зміни параметрів «Яскравість» і «Контраст» відеокамер у КОЕС. На основі запропонованих методів розроблено програмні й апаратні засоби для підсистеми адаптивної зміни параметрів відеокамер, синтезовано структуру КОЕС та її Simulink-моделі, а також розроблено структурні схеми блоків підсистеми. Розроблено програму в системі МАТLAB, призначену для адаптивної зміни параметрів відеокамери на основі критеріїв якості зображення  $K_V$ . Критерії якості  $K_V$  побудовано на основі ВСШ з врахуванням насичення зображення (параметр  $R_A$ ) та ВСШ з обмеженнями на екстремальні значення сигналу (параметр  $R_L$ ). Точність розроблених методів перевірено при адаптивній зміні трьох моделей відеокамер, при цьому отримано збільшення ВСШ до 1.4 дБ. Показано, що комплексне використання критеріїв якості зображення  $R_A$  та  $R_L$  забезпечує вищу точність налаштування параметрів відеокамер, порівняно з використанням окремих критеріїв.

5. Розроблено метод і програмні засоби для визначення рівня шуму зображень з використанням паралельних обчислень, що у випадку двохядерних процесорів забезпечує збільшення швидкодії до 1.5 разів.

6. Результати дисертаційної роботи впроваджено в ІТ-компанії, а також у навчальному процесі в Чернівецькому національному університеті.

Апробація розроблених програмно-апаратних засобів підтверджує коректність запропонованих наукових положень, моделей і методів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1]Й.Й. Білинський, Методи обробки зображень в комп'ютеризованих оптико-електронних системах: монографія. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2010.
- [2] И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых, Г.И. Перетягин, и А.А. Спектор, Цифровая обработка изображений в информационных системах: учебное пособие. Новосибирск, Россия: Изд-во НГТУ, 2000.
- [3]О.В. Дробик та ін., Цифрова обробка аудіо- та відеоінформації у мультимедійних системах: навчальний посібник. Київ, Україна: Наукова думка, 2008.
- [4]О. М. Березький, О. Й. Піцун, А. Р. Боднар, та Т. М. Долинюк, "Класифікація гістологічних та цитологічних зображень на основі згорткових нейронних мереж", Штучний інтелект, № 1, с. 33-42, 2017.
- [5] А. М. Пєтух, О. М. Рейда, В. П. Майданюк, та В. П. Кожем'яко, Інформаційно-вимірювальні системи відновлення і ущільнення зображень: монографія. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2011.
- [6] I. H. Bankman, *Handbook of Medical Image Processing and Analysis*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc., 2009.
- [7] С. В. Павлов, Д. В. Вовкотруб, Р. Ю. Довгалюк, та А.-З. Хані, "Інформаційні технології підвищення якості біомедичних зображень", *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, т. 2, № 21, с. 41-48, 2011.
- [8] А.А. Яровий, І.Р. Арсенюк, та Д.Г. Пасічник, "Проектування системи цифрової корекції та підвищення якості растрових зображень у сфері рентгенографії", *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, т.1, № 38, с. 72–77, 2017.
- [9] В. Г. Пантелеев, О. В. Егорова, и Е. И. Клыкова, *Компьютерная микроскопия*. Москва, Россия: Техносфера, 2005.

- [10] В. В. Березин, А. А. Умбиталиев, Ш. С. Фахми, А. К. Цыцулин, и Н. Н. Шипилов, Твердотельная революция в телевидении: Телевизионные системы на основе приборов с зарядовой связью, систем на кристалле и видеосистем на кристалле. Москва, Россия: Радио и связь, 2006.
- [11] В. П. Боюн, "Сприйняття і обробка зображень в системах реального часу", Штучний інтелект, № 3, с. 114-125, 2013.
- [12] Technology white paper reveals top trends impacting the video surveillance market in 2020. [Online]. Available: https://www.telecomtv.com/content/videotechnology/ihs-markit-technology-white-paper-reveals-top-trends-impacting-thevideo-surveillance-market-in-2020-37354. Accessed on: Jan 12, 2020.
- [13] В.В. Старовойтов, и Ю.И. Голуб, *Цифровые изображения: от получения до обработки*. Минск, Беларусь: ОИПИ НАН Беларуси, 2014.
- [14] A.L. Bovik, *The Essential Guide to Image Processing*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc., 2009.
- [15] W. Burger and M.J. Burge, Principles of Digital Image Processing. Fundamental Techniques. London, UK: Springer-Verlag, 2009.
- [16] S.G. Hoggar, *Mathematics of digital images. Creation, Compression, Restoration, Recognition.* Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006.
- [17] W. Pratt, *Digital Image Processing*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2007.
- [18] J.C. Russ, *The Image Processing. Handbook.* Abingdon-on-Thames, UK: Taylor & Francis Group, 2011.
- [19] В.П. Бабак, В.С. Хандецький, та Е. Шрюфер, *Обробка сигналів: Підручник*. Київ, Україна: Либідь, 1996.
- [20] Н. Н. Красильников, Цифровая обработка 2D и 3D изображений. Санкт-Петербург, Россия: БХВ-Петербург, 2011.
- [21] А. Л. Приоров, И. В. Апальков, и В. В.Хрящев, *Цифровая обработка* изображений: учебное пособие. Ярославль, Россия: ЯрГУ, 2007.
- [22] А.Б. Сергиенко, Цифровая обработка сигналов: Учеб. пособие для вузов. Санкт-Петербург, Россия: Питер, 2002.

- [23] Б. Яне, Цифровая обработка изображений. Москва, Россия: 2007.
- [24] Л. П. Ярославский, *Введение в цифровую обработку изображений*. Москва, СССР: Сов. радио, 1979.
- [25] R. Gonzalez, and R. Woods. *Digital image processing*. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2002.
- [26] Р. Гонсалес, и Р. Вудс, *Цифровая обработка изображений*. Москва, Россия: Техносфера, 2005.
- [27] R. Gonzalez, R. Woods, and L. Eddins. *Digital Image Processing using MATLAB*. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2004.
- [28] Р. Гонсалес, Р. Вудс, и С. Эддинс, *Цифровая обработка изображений в среде МАТLAB*. Москва, Россия: Техносфера, 2006.
- [29] E. R. Davies. Computer and Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2012.
- [30] S. Krigg. Computer Vision Metrics. Survey, Taxonomy, and Analysis. Basel, Switzerland, Springer, 2014.
- [31] L.G. Shapiro, G. Stockman. *Computer vision*. New Jersey, USA: Prentice-Hall, 2001.
- [32] Д. Форсайт, и Ж. Понс, *Компьютерное зрение. Современный подход.* Москва, Россия: Вильямс, 2004.
- [33] Л. Шапиро, и Дж. Стокман. *Компьютерное зрение*. Москва, Россия: Бином. Лаборатория знаний, 2013.
- [34] X. Liu, M. Tanaka, and M. Okutomi, "Single-Image Noise Level Estimation for Blind Denoising", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 22, No. 12, pp. 5226- 5237, 2013.
- [35] В.В. Абрамова, С.К. Абрамов, В.В. Лукин, и Г.А. Проскура, "Исследование возможности повышения быстродействия метода оценивания дисперсии помех на цифровых изображениях", *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, № 2 (82), С.4-9, 2017.
- [36] В.В. Абрамова, С.К. Абрамов, и В.В. Лукин, "Многоэтапный автоматический метод оценивания дисперсии аддитивного шума с

использованием детектора однородных участков на основе момента четвертого порядка", *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, № 4 (63), С.15-24, 2013.

- [37] D. D. Muresan, and T. W. Parks, "Adaptive principal components and image denoising", in *IEEE Int. Conf. on Image Processing*, Barcelona, Spain, 2003, pp. 101-104.
- [38] S. Pyatykh, J. Hesser, and L. Zheng, "Image noise level estimation by principal component analysis", *IEEE Transaction on Image Processing*, vol. 22, no.2, pp.687-699, 2013.
- [39] D. Zoran, and Y. Weiss, "Scale invariance and noise in natural images", in Proc. IEEE 12th Int. Conf. Comput. Vis., 2009, pp. 2209-2216.
- [40] B. R. Corner, R. M. Narayanan, and S. E. Reichenbach, "Noise estimation in remove sensing imagery using data masking", *Int. J. Remote Sensing*, vol. 24, no. 4, pp. 689-702, 2003.
- [41] G. Ilango, and R. Marudhachalam, "New Hybrid Filtering Techniques for Removal of Gaussian Noise from Medical Images", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 6, no. 2, pp. 8-12, 2011.
- [42] Chatterjee, and P. Milanfar, "Is denoising dead?", *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 19, no. 4, pp. 895-911, 2010.
- [43] В. В. Лукин, Н. Н. Пономаренко, С. К. Абрамов, и А. А. Зеленский, "Потенциальная эффективность фильтрации изображений: есть ли предел и близок ли он?", *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, № 3 (44), с. 38-43, 2010.
- [44] Р. Н. Квєтний, І. В. Богач, О. Р. Бойко, О. Ю. Софина, та О.М. Шушура; за заг. ред. Р.Н. Квєтного, Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Частина 1: навчальний посібник. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2012.
- [45] Р. Н. Квєтний, І. В. Богач, О. Р. Бойко, О. Ю.Софина, та О.М. Шушура; за заг. ред. Р.Н. Квєтного, *Комп'ютерне моделювання систем та процесів*.

*Методи обчислень. Частина 2: навчальний посібник.* Вінниця, Україна: ВНТУ, 2012.

- [46] В.П. Майданюк, та І.Р. Арсенюк, "Поліпшення якості зображень", Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології (OEIET), т. 30, № 2, с.19-32. 2015.
- [47] А.Я. Кулик, та Я.А. Кулик, "Використання медіанного фільтра у проблемно-орієнтованих розподілених комп'ютерних системах", Науковий вісник Чернівецького університету. Комп'ютерні системи та компоненти, т. 1, № 1, с. 51-54, 2010.
- [48] В.В. Гармаш, В.В. Калашніков, та А.Я. Кулик, "Фільтрація зображень з використанням кратномасштабного білатерального фільтру", *Вісник Хмельницького національного університету*, т. 4, с. 170-175, 2013.
- [49] A. Buades, B. Coll, and J.M. Morel, "A review of image denoising algorithms, with a new one", SIAM Journal on Multiscale Modeling and Simulation, vol. 4, pp. 490-530, 2005.
- [50] D. Baleanu, Advances in wavelet theory and their applications in engineering, physics and technology. London, UK: InTech, 2012.
- [51] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Автоматичне визначення рівня гаусового шуму на цифрових зображеннях методом виділених областей", *Кибернетика и вычислительная техника*, т. 189, № 3, с. 44-60, 2017. doi: 10.15407/kvt189.03.044.
- [52] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Автоматичне видалення гаусового шуму на цифрових зображеннях за допомогою квазіоптимального фільтра Гауса", *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, № 3 (83), с. 26-35, 2017.
- [53] S. V. Balovsyak, and Kh. S. Odaiska, "Automatic Highly Accurate Estimation of Gaussian Noise Level in Digital Images Using Filtration and Edges Detection Methods", *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing (IJIGSP)*, vol. 9, no. 12, pp. 1-11, 2017. doi: 10.5815/ijigsp.2017.12.01.
- [54] S. V. Balovsyak, and Kh. S. Odaiska, "Automatic Determination of the Gaussian Noise Level on Digital Images by High-Pass Filtering for Regions of

Interest", *Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 54, no. 4, pp. 662-670, 2018. https://doi.org/10.1007/s10559-018-0067-3.

- [55] S.V. Balovsyak, and Kh.S. Odaiska, "Hardware and Software Complex for Automatic Level Estimation and Removal of Gaussian Noise in Images", Advances in Computer Science for Engineering and Education, ICCSEEA 2018, Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 754, pp.144-154, 2019. doi: 10.1007/978-3-319-91008-6\_15.
- [56] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Оцінка рівня Гаусового шуму на цифрових зображеннях за допомогою виділення області інтересу методом сегментації", *Науковий вісник Чернівецького національного університету. Комп'ютерні системи та компоненти*, т. 7, № 1, с. 92-99, 2016.
- [57] С. В. Баловсяк, Х. С. Одайська, та Н. В. Рощупкіна, "Визначення рівня гаусового шуму на цифрових зображеннях методом фільтрації", Науковий вісник Чернівецького національного університету. Комп'ютерні системи та компоненти, т. 7, № 2, с. 75-82, 2016.
- [58] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Реконструкція зображень символів за допомогою штучних нейронних мереж на основі аналізу локальних областей", на ІІІ Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» "ПІКТ – 2014", Чернівці, 2014, с. 99-101.
- [59] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Метод автоматичної просторовооднорідної фільтрації зображень з Гаусовим шумом", на IV Міжнар. наук.практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» "ПІКТ – 2015", Чернівці, 2015, с. 151-153.
- [60] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Визначення оптимальної дисперсії ядра фільтра Гауса при фільтрації Гаусового шуму на зображеннях з однією просторовою частотою корисного сигналу", на V Міжнар. наук.практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» "ПІКТ – 2016", Чернівці, 2016, с. 133-135.
- [61] S. V. Balovsyak, and Kh. S. Odaiska, "Automatic estimation of Gaussian noise level in digital images by methods of low-pass and high-pass filtrations", in VI International Scientific Practical Conference (I International Symposium)

"Practical Application of Nonlinear Dynamic Systems for Infocommunication", Chernivtsi, Ukraine, 2017, pp. 79-80.

- [62] С. В. Баловсяк, Х. С. Одайська, та О. С. Чуб, "Обчислення рівня гаусового шуму для фотосенсорів веб-камер методами низькочастотної фільтрації зображень", на ІІ Всеукр. наук.-практ. конф. «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем» MEICS-2017, Дніпро, 2017, с. 104-105.
- [63] С. В. Баловсяк, Х. С. Одайська, та О. В. Фочук, "Розпаралелювання обчислень при визначенні рівня гаусового шуму на цифрових зображеннях", на VII Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» "ПІКТ – 2018", Чернівці, 2018, с. 76-78.
- [64] С. В. Баловсяк, С. Л. Воропаєва, С. О. Летучий, та Х. С. Одайська, "Апаратно-програмний комплекс для автоматичного вибору параметрів відеокамер з використанням паралельних обчислень", на VII Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» "ПІКТ – 2018", Чернівці, 2018, с. 116-118.
- [65] S. V. Balovsyak, O. V. Derevyanchuk, I. M. Fodchuk, O. P. Kroitor, Kh. S. Odaiska, and O. O. Pshenychnyi, "Adaptive oriented filtration of digital images in the spatial domain", *in Intern. Scientific and Technical Internet Conf. "Computer Graphics and Image Recognition"*, Vinnytsya, Ukraine, 2018, vol. 2, pp. 5-10.
- [66] Х.С. Одайська, та С.В. Баловсяк, Комп'ютерна програма "Визначення рівня гаусового шуму на зображеннях", ("GaussNoise18"), *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, № 91159*, 31.07.2019.
- [67] Х.С. Одайська, та С.В. Баловсяк, Комп'ютерна програма "Видалення гаусового шуму на зображеннях фільтром Гауса", ("GNoiseFilter18"), *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, № 91158*, 31.07.2019.

- [68] Х.С. Одайська, та С.В. Баловсяк, Комп'ютерна програма "Налаштування параметру "Яскравість" цифрової відеокамери", ("VideoParameter18"), Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, № 91160, 31.07.2019.
- [69] S. V. Balovsyak, and Kh. S. Odaiska, "Hardware and Software Complex for Automatic Level Estimation and Removal of Gaussian Noise in Images", in *The First Intern. Conf. on Computer Science, Engineering and Education Applications (ICCSEEA2018)*, Kiev, Ukraine, 2018, pp. 4-6.
- [70] Р.А. Кожемякин, А.Н. Земляченко, Н.Н. Пономаренко, и В.В. Лукин, "Автоматическое сжатие гиперспектральных изображений с использованием вариационно-стабилизирующего преобразования", *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, № 1 (60), с. 58-65, 2013.
- [71] Y. Tsin, V. Ramesh, and T. Kanade, "Statistical Calibration of CCD Imaging Process", in *Proc. IEEE Intern. Conf. Computer Vision*, 2001, pp. 480-487.
- [72] C. Liu, R. Szeliski, S. B. Kang, C. L. Zitnick, and W. T. Freeman, "Automatic Estimation and Removal of Noise from a Single Image", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 30, no. 2, pp. 299-314, 2008.
- [73] М.Г. Князев, А.В. Бондаренко, и И.В. Докучаев, "Расчет пороговых значений потока излучения и освещенности для ПЗС матриц КОДАК КАІ-1003М, КОДАК КАІ-1020 и PHILIPS FTF3020М", Цифровая обработка сигналов, № 3, с. 49-56, 2006.
- [74] М.М. Гуревич, *Фотометрия. Теория, методы и приборы*. Ленинград, СССР: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1983.
- [75] М.П. Бабич, та І.А. Жуков, Комп'ютерна схемотехніка: Навчальний посібник. Київ, Україна: МК-Пресс, 2004.
- [76] Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, та Б. І. Стадник, Засоби та методи вимірювань неелектричних величин. Підручник для вищих навч. закл., Львів, Україна: Бескид Біт, 2008.
- [77] Р.Г. Джексон, Новейшие датчики. Москва, Россия: Техносфера, 2007.

- [78] С. Добрусенко, "ССD&CMOS матрицы и модули фирмы PixelPlus Co. Ltd. совмещенные с видеопроцессором на одном кристалле", *Радиокомпоненты*, № 6, с. 30-32, 2005.
- [79] С. А. Молодяков, Фотоприемники в системах потоковой обработки сигналов и изображений. Санкт-Петербург, Россия: Изд-во Политехн. унта, 2014.
- [80] А. А. Горбачев, В. В. Коротаев, и С. Н. Ярышев, *Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе*. Санкт-Петербург, Россия: НИУ ИТМО, 2013.
- [81] В.С. Титов, В.С. Яковлева, и В.С. Панищев, Адаптивные видеодатчики на базе КМОП приемников излучения с активными пикселями. – Курск, Россия: КурскГТУ, 2008.
- [82] Cypress. CMOS Image Sensor. [Online]. Available: http://www.cypress.com. Accessed on: May 15, 2018.
- [83] Micron Technology. CMOS Image Sensor. [Online]. Available: http://www.micron.com. Accessed on: May 15, 2018.
- [84] OmniVision. Image Sensor. [Online]. Available: http://www.ovt.com. Accessed on: May 15, 2018.
- [85] П. В. Агуров. Интерфейсы USB. Практика использования и программирования. Санкт-Петербург, Россия: БХВ-Петербург, 2004.
- [86] А.А. Лапин. *Интерфейсы. Выбор и реализация*. Москва, Россия: Техносфера, 2005.
- [87] OV5610 Color CMOS QSXGA (5.17 MPixel) CameraChip with OmniPixel Technology Data Sheet. Omni Vision. [Online]. Available: https://wenku.baidu.com/view/597c8e53ad02de80d4d8403c.html?re=view. Accessed on: May 15, 2018.
- [88] Цветная мегапиксельная телевизионная камера высокого разрешения в корпусе внутреннего исполнения. Модель VEC-545-USB. [Электронный ресурс]. Доступно: http://evs.ru/d\_sheet/VEC-545-USB.pdf. Дата обращения: Май, 15, 2018.
- [89] B.P. Rusyn, A.A. Lutsyk, and R.Ya. Kosarevych, "Modified architecture of lossless image compression based on FPGA for on-Board devices with linear CCD", *Journal of Automation and Information Sciences*, vol. 50, no. 2, pp.41-49, 2019.
- [90] В.Ю. Зотов, Проектирование встраиваемых микропроцессорных систем на основе ПЛИС фирмы XILINX®. Москва, Россия: Горячая линия – Телеком, 2006.
- [91] А.О. Мельник, *Архітектура комп'ютера*. Луцьк, Україна: Волинська обласна друкарня, 2008.
- [92] Analysts: Smartphone Market 'In Freefall'. [Online]. Available: https://www.pcmag.com/news/368095/analysts-smartphone-market-in-freefall. Accessed on: May 3, 2019.
- [93] Программа «Интеллект». Настройка параметров яркости, контраста, цветности, формата цветопередачи. [Электронный ресурс]. Доступно: https://doc.axxonsoft.com/confluence/pages/viewpage.action?pageId=83494493. Дата обращения: Май, 15, 2018.
- [94] H. Daniel, Introduction to Smart Video Technologies from Intel. [Online]. Available: https://software.intel.com/en-us/articles/introduction-to-smart-videotechnologies-from-intel. Accessed on: June 19, 2017.
- [95] Дзеркальний фотоапарат: Canon EOS 5D Mark III. [Online]. Available: https://www.canon.ua.
- [96] Н.Н. Пономаренко, "Подавление шума на изображениях с использованием больших кодовых книг участков изображений", *Системи обробки інформації,* № 2(100), с. 86-91, 2012.
- [97] A. K. Boyat, and B. K. Joshi, "A Review Paper: Noise Model in Digital Image", *Processing, Signal & Image Processing: An International Journal* (SIPIJ), vol. 6, No. 2, pp. 63-75, 2015.
- [98] A.B. Lozynskyy, I.M. Romanyshyn, and B.P. Rusyn, "Intensity estimation of noise-like signal in presence of uncorrelated pulse interferences", *Radioelectronics* and Communigations Systems, vol. 62, no. 5, pp. 214-222, 2019.

- [99] П.Е. Ельцов, С.К. Абрамов, М.Л. Усс, и В.В. Лукин, "Обнаружение однородных участков изображений на основе тестов на гауссовость", *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, № 1 (49), с. 38-45, 2011.
- [100] Обзор и сравнение IP-видеокамер наблюдения формата 4К. Модель Samsung PNO-9080R. [Электронный ресурс]. Доступно: https://worldvision.com.ua/articles/obzor-i-sravnenie-ip-videokamernablyudeniya-formata-4k. Дата обращения: Май, 15, 2018.
- [101] Research at Microsoft, research areas Computer Vision, Graphics and Multimedia. [Online]. Available: http://research.microsoft.com/en-us/. Accessed on: May 15, 2018.
- [102] Н.Н. Бондина, А.С. Калмычков, и В.Э. Кривенцов, "Сравнительный анализ алгоритмов фильтрации медицинских изображений", *Вестник НТУ «ХПИ»*, № 38, с.14-25, 2012.
- [103] Н.Н. Бондина, и Р.Ю. Муратов, "Адаптивные алгоритмы фильтрации и изменения контраста изображения", *Вестник НТУ «ХПИ»*, № 35, с.35-42, 2014.
- [104] C. Kervrann, and J. Boulanger, "Optimal spatial adaptation for patch-based image denoising", *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 15, no. 10, pp. 2866-2878, 2006.
- [105] L. Zhang, W. Dong, D. Zhang, and G. Shi, "Two-stage image denoising by principal component analysis with local pixel grouping", *Pattern Recognition*, vol. 43, no. 8, pp. 1531-1549, 2010.
- [106] A. Foi, V. Katkovnik, and K. Egiazarian, "Pointwise shape-adaptive DCT for high-quality denoising and deblocking of grayscale and color images", *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 16, no. 5, pp. 1395-1411, 2007.
- [107] Р. А. Кожемякин, В. В. Абрамова, и С. К. Абрамов, "Фильтрация изображений, искаженных смесью сигнально-зависимых и сигнальнонезависимых помех", *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, № 2 (54), с. 58-65, 2012.

- [108] Ю.Е. Воскобойников, и А.Б. Колкер. Фильтрация сигналов и изображений (с примерами в MathCad): монография. Новосибирск, Россия: НГАСУ (Сибстрин), 2010.
- [109] С. В. Баловсяк, Я. Д. Гарабажив, и И. М. Фодчук, "Ориентированная фильтрация цифровых электронно-дифракционных изображений", *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, № 3 (77), с. 4-13, 2016.
- [110] R. V. Meera Devi, and B. S. Sathish Kumar, "Gaussian Noise Reduction on Image Automatically", *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 4, pp. 61-64, 2015.
- [111] В.П. Дьяконов, *Вейвлеты. От теории к практике*. Москва, Россия: СОЛОН-Пресс, 2010.
- [112] О. В. Капшій, О. І. Коваль, та Б. П. Русин, Вейвлет-перетворення у компресії та попередній обробці зображень. Львів, Україна: Сполом, 2008.
- [113] L.I. Rudin, S. Osher, and E. Fatemi, "Nonlinear total variation based noise removal algorithms", *Physica D*, vol. 60, pp. 259-268, 1992.
- [114] X. Li, and T. Chen, "Nonlinear diffusion with multiple edginess thresholds", *Pattern Recognition*, no. 27, pp. 1029-1037, 1994.
- [115] G. Gilboa, N. Sochen, and Y. Zeevi, "Image Enhancement and Denoising by Complex Diffusion Processes", *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, no. 26, pp. 1020-1036, 2004.
- [116] D. Suresha, and H. N. Prakash, "Data Content Weighing for Subjective versus Objective Picture Quality Assessment of Natural Pictures", *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing (IJIGSP)*, vol. 9, no. 2, pp. 27-36, 2017.
- [117] О.И. Еремеев, Д.В. Февралев, Н.Н. Пономаренко, и В.В.Лукин, "Визуальное качество изображений при различных типах помех", *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, № 2 (54), с. 49-57, 2012.
- [118] С. К. Абрамов, А. А. Зеленский, В. В. Лукин, и Н. Н. Пономаренко, "Использование базы TID2008 при разработке метрик визуального

качества и методов обработки изображений", *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, № 4(56), с. 99-109, 2012.

- [119] А. Солонина, Д. Улахович, и Л. Яковлев, Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов. Санкт-Петербург, Россия: БХВ-Петербург, 2002.
- [120] А.И. Солонина, Д.А. Улахович, С.М. Арбузов, и Е.Б. Соловьева. Основы цифровой обработки сигналов. Санкт-Петербург, Россия: БХВ-Петербург, 2005.
- [121] С. Пономаренко, *Adobe Photoshop 7 в подлиннике*, Санкт-Петербург, Россия: БХВ-Петербург, 2003.
- [122] PhotoScape. Photo editing software. [Online]. Available: http://www.photoscape.org. Accessed on: June 19, 2017.
- [123] L. Kabbai, A. Sghaier, A. Douik, and M. Machhout, "FPGA implementation of filtered image using 2D Gaussian filter", *International Journal of Computer Science and Applications (IJACSA)*, vol. 7, no. 7, pp. 514-520, 2016.
- [124] H. Zhang, M. Xia, and G. Hu, "A Multiwindow partial buffering scheme for FPGA based 2-D convolvers", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 54, no. 2, pp. 200-204, 2007.
- [125] Д.В. Сальников, и О.Г. Васильченков, "Модифицированный медианный фильтр с пост фильтрационным принятием решения", *Системи управління, навігації та зв'язку*, № 1(53), с. 158-161, 2019.
- [126] R. Brarath, V. Akkala, P. Pajalakshmi, and P. Kumar, "FPGA Based Implementation of Low Complex Adaptive Speckle Suppression Filter for Bmode Medical Ultrasound Images", *IEEE Conference on Biomedical Engineering and Sciences*, 8-10 December, Miri, Sarawak, Malaysia, 2014, pp. 545-550.
- [127] Y. Said, T. Saidani, F. Smach, M. Atri, and H. Snoussi, "Smart Camera Based on FPGA Oriented to Embedded Image Processing", *International Review on Computer and Software (IRECOS)*, vol. 8, no. 2, pp. 1-6, 2013.

- [128] E. C. Ifeachor, and B. W. Jervis, *Digital signal processing: a practical approach*. New York, USA: Prentice Hall, 2002.
- [129] L. Roger, and Jr. Easton, *Fourier methods in imaging. Series in Imaging Science and Technology.* Springfield, USA: Wiley-IS&T, 2010.
- [130] К. К. Васильев, В. А. Глушков, А. В. Дормидонтов, и А. Г. Нестеренко, *Теория электрической связи: учебное пособие*. Ульяновск, Россия: УлГТУ, 2008.
- [131] Э.С. Айчифер, и Б.У. Джервис, Цифровая обработка сигналов: практический подход. Москва, Россия: Вильямс, 2004.
- [132] В. Е. Гмурман, *Теория вероятностей и математическая статистика*, Москва, Россия: Высш. шк., 2003.
- [133] Г. Корн, и Т. Корн. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. Москва, СССР: Наука, 1974.
- [134] Image Processing Place. Image Databases. [Online]. Available: http://www.imageprocessingplace.com/root\_files\_V3/image\_databases.htm. Accessed on: May 4, 2018.
- [135] C. Fowlkes, D. Martin, and J. Malik, "Local Figure/ Ground Cues are Valid for Natural Images", *Journal of Vision*, vol. 7(8), no. 2, pp. 1-9, 2007.
- [136] The Berkeley Segmentation Dataset and Benchmark. BSDS300. [Online].
   Available: https://www.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/bsds.
   Accessed on: May 20, 2018.
- [137] В.М. Глушков, Основы безбумажной информатики. Москва, СССР: Наука, 1987.
- [138] Ф. Гилл, У. Мюррей, и М. Райт, *Практическая оптимизация*. Москва, СССР: Мир, 1985.
- [139] R. Paredes, and M. Villegas, "Image-Text Dataset Generation for Image Annotation and Retrieval", in *II Congreso Espanol de Recuperacion de Information, CERI* 2012, Valencia, Spain, 2012, pp. 115-120.
- [140] M. Srinivasa Rao, V. Vijaya Kumar, and Mhm. Krishna Prasad, "Texture Classification based on First Order Local Ternary Direction Patterns",

International Journal of Image, Graphics and Signal Processing (IJIGSP), vol. 9, no. 2, pp. 46-54, 2017.

- [141] M.L. Uss, B. Vozel, V.V. Lukin, and K. Chehdi, "Image informative maps for component-wise estimating parameters of signal-dependent noise", *Journal of Electronic Imaging*, vol. 22, no. 1, pp. 013019-1 – 013019-17, 2013.
- [142] B. Rusyn, R. Kosarevych, O. Lutsyk, and V. Korniy, "Segmentation of atmospheric clouds images obtained by remote sensing", in 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Science Engineering (TCSET), 2018, Ukraine, pp. 213-216.
- [143] Р.Н. Квєтний, та О.Ю. Софина, Методи фільтрації текстурованих зображень у задачах розпізнавання та класифікації: монографія. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2010.
- [144] J. Immerkaer, "Fast Noise Variance Estimation", Computer Vision and Image Understanding, vol. 64, No. 2, pp. 300-302, 1996.
- [145] S.-C. Tai, and S.-M. Yang, "A fast method for image noise estimation using Laplacian operator and adaptive edge detection", in *Proc. 3rd Int. Symp. Commun. Control Signal Process (ISCCSP)*, 2008, Malta, pp. 1077-1081.
- [146] В. С. Сизиков, Устойчивые методы обработки результатов измерений. Санкт-Петербург, Россия: Специальная Литература, 1999.
- [147] Л. П. Фельдман, І. А. Петренко, та О. А. Дмитрієва, *Чисельні методи в інформатиці*. Київ, Україна: Видавнича група BHV, 2006.
- [148] S. Thonhpanja, A. Phinyomark, P. Phukpattaranont, and C. Limsakul. "Mean and Median Frequency of EMG Signal to Determine Muscle Force based on Time-dependent Power Spectrum", Electronika IR Elektrotechnika, vol. 19, no. 3, pp. 51-56, 2013.
- [149] А. Й. Наконечний, Р. А. Наконечний, В. А. Павлиш. Цифрова обробка сигналів: навчальний посібник. Львів, Україна: Видавництво Львівської політехніки, 2010.
- [150] А. Ф. Дащенко, В. Х. Кириллов, Л.В. Коломиец, и В.Ф. Оробей. *Matlab* в инженерных и научных расчетах. Одеса, Україна: Астропринт, 2003.

- [151] И. М. Журавель, Обработка сигналов и изображений. Image Processing Toolbox. [Електронний ресурс]. Доступно: http://matlab.exponenta.ru/ imageprocess/ book2/22.php. Дата звернення: 17.04.2018.
- [152] Ю.Л. Кетков, А.Ю. Кетков, и М.М. Шульц, *Matlab 7:* программирование, численные методы. Санкт-Петербург, Россия: БХВ-Петербург, 2005.
- [153] В. С. Моисеев. Системное проектирование преобразователей информации. Ленинград, СССР: Машиностроение, 1982.
- [154] К.Г. Самофалов, В.И. Корнейчук, и В.П. Тарасенко, *Цифровые ЭВМ: теория и проектирование*. Київ, СССР: Вища шк., 1989.
- [155] Nexys Video Artix-7 FPGA: Trainer Board for Multimedia Applications.
  [Online]. Available: https://store.digilentinc.com/nexys-video-artix-7-fpgatrainer-board-for-multimedia-applications. Accessed on: May 20, 2018.
- [156] Xilinx. Artix-7 Product Advantage. [Online]. Available: https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/artix-7.html. Accessed on: May 20, 2018.
- [157] Simulation and Model-Based Design. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/products/simulink.html. Accessed on: May 19, 2018.
- [158] Gauss-filter-FPGA-for-video-processing. Pipeline-architecture-gauss-filter. [Online]. Available: https://github.com/Wirilila/gauss-filter-FPGA-for-videoprocessing. Accessed on: May 21, 2018.
- [159] М. М. Глибовець, та О. В. Олецький, Штучний інтелект. Київ, Україна: КМ Академія, 2002.
- [160] Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест и К. Штайн, *Алгоритмы: построение и анализ*. Москва, Россия: Вильямс, 2005.
- [161] ISO 2720:1974. Photography. General purpose photographic exposure meters (photoelectric type). Guide to product specification. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/7690.html. Accessed on: May 4, 2018.

- [162] М. Я. Шульман, и Т. Г. Филатова. *Фотоаппараты*. Ленинград, СССР: Машиностроение, 1984.
- [163] ImgOnline. Обработка фото онлайн. [Электронный ресурс]. Доступно: https://www.imgonline.com.ua/gif-animation-result.php. Дата обращения: Май, 15, 2018.
- [164] A4tech. WEBCAM. [Online]. Available: http://www.a4tech.com/product. aspx?id=199. Accessed on: May 15, 2018.
- [165] Logitech HD Webcam C270. [Online]. Available: https://www.logitech.com/ru-ru/product/hd-webcam-c270. Accessed on: May 15, 2018.
- [166] Texas Instruments. Digital Signal Processor. [Online]. Available: http://www.ti.com. Accessed on: May 16, 2018.
- [167] Б. М. Герасимов, В. М. Локазюк, О. Г. Оксіюк, та О. В. Поморова. *Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень : навч. посібник.* Київ, Україна: Вид-во Європ. ун-ту, 2007.
- [168] Н.Н. Оленёв, Р.В. Печёнкин, и А.М. Чернецов, Параллельное программирование в MATLAB. Москва, Россия: Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН, 2007.
- [169] А.В. Боресков и др., Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA: учеб. пособие. Москва, Россия: Изд. Моск. ун-та, 2012.
- [170] С.И. Вяткин, А.Н. Романюк, Л.А. Савицкая, и Т.И. Трояновская, "Метод излучательности с использованием графических ускорителей", *Вісник ХНТУ*, т. 1, № 3 (66), с. 352-357, 2018.
- [171] Т.Б. Мартинюк, А.В. Кожем'яко, та Л.М. Куперштейн, "Аналіз тенденцій розвитку сучасних комп'ютерних систем", Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології, № 2, с. 5-13, 2016. (паралельні обчислення, графічні процесори, CUDA)
- [172] CUDA Toolkit Documentation. [Online]. Available: https://docs.nvidia.com/cuda. Accessed on: May 16, 2018.

додатки

#### Додаток А

# Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

- [1] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Автоматичне визначення рівня гаусового шуму на цифрових зображеннях методом виділених областей", *Кибернетика и вычислительная техника*, т. 189, № 3, с. 44-60, 2017. doi: 10.15407/kvt189.03.044.
- [2] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Автоматичне видалення гаусового шуму на цифрових зображеннях за допомогою квазіоптимального фільтра Гауса", *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, № 3 (83), с. 26-35, 2017.
- [3] S. V. Balovsyak, and Kh. S. Odaiska, "Automatic Highly Accurate Estimation of Gaussian Noise Level in Digital Images Using Filtration and Edges Detection Methods", *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing (IJIGSP)*, vol. 9, no. 12, pp. 1-11, 2017. doi: 10.5815/ijigsp.2017.12.01.
- [4] S. V. Balovsyak, and Kh. S. Odaiska, "Automatic Determination of the Gaussian Noise Level on Digital Images by High-Pass Filtering for Regions of Interest", *Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 54, no. 4, pp. 662-670, 2018. https://doi.org/10.1007/s10559-018-0067-3.
- [5]S.V. Balovsyak, and Kh.S. Odaiska, "Hardware and Software Complex for Automatic Level Estimation and Removal of Gaussian Noise in Images", Advances in Computer Science for Engineering and Education, ICCSEEA 2018, Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 754, pp.144-154, 2019. doi: 10.1007/978-3-319-91008-6\_15.
- [6] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Оцінка рівня Гаусового шуму на цифрових зображеннях за допомогою виділення області інтересу методом сегментації", *Науковий вісник Чернівецького національного університету. Комп'ютерні системи та компоненти*, т. 7, № 1, с. 92-99, 2016.

- [7] С. В. Баловсяк, Х. С. Одайська, та Н. В. Рощупкіна, "Визначення рівня гаусового шуму на цифрових зображеннях методом фільтрації", *Науковий вісник Чернівецького національного університету. Комп'ютерні системи та компоненти*, т. 7, № 2, с. 75-82, 2016.
- [8] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Реконструкція зображень символів за допомогою штучних нейронних мереж на основі аналізу локальних областей", на ІІІ Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» "ПІКТ 2014", Чернівці, 2014, с. 99-101.
- [9] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Метод автоматичної просторовооднорідної фільтрації зображень з Гаусовим шумом", на *IV Міжнар. наук.практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» "ПІКТ* – 2015", Чернівці, 2015, с. 151-153.
- [10] С. В. Баловсяк, та Х. С. Одайська, "Визначення оптимальної дисперсії ядра фільтра Гауса при фільтрації Гаусового шуму на зображеннях з однією просторовою частотою корисного сигналу", на V Міжнар. наук.практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» "ПІКТ – 2016", Чернівці, 2016, с. 133-135.
- [11] S. V. Balovsyak, and Kh. S. Odaiska, "Automatic estimation of Gaussian noise level in digital images by methods of low-pass and high-pass filtrations", in *VI International Scientific Practical Conference (I International Symposium)* "Practical Application of Nonlinear Dynamic Systems for Infocommunication", Chernivtsi, Ukraine, 2017, pp. 79-80.
- [12] С. В. Баловсяк, Х. С. Одайська, та О. С. Чуб, "Обчислення рівня гаусового шуму для фотосенсорів веб-камер методами низькочастотної фільтрації зображень", на *II Всеукр. наук.-практ. конф. «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем» MEICS-2017*, Дніпро, 2017, с. 104-105.

- [13] С.В. Баловсяк, Х. С. Одайська, та О.В. Фочук, "Розпаралелювання при визначенні рівня гаусового цифрових обчислень шуму на зображеннях", VII Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми на інформатики та комп'ютерної техніки» "ПІКТ – 2018", Чернівці, 2018, c. 76-78.
- [14] С. В. Баловсяк, С. Л. Воропаєва, С. О. Летучий, та Х. С. Одайська, "Апаратно-програмний комплекс для автоматичного вибору параметрів відеокамер з використанням паралельних обчислень", на VII Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» "ПІКТ – 2018", Чернівці, 2018, с. 116-118.
- [15] S. V. Balovsyak, O. V. Derevyanchuk, I. M. Fodchuk, O. P. Kroitor, Kh. S. Odaiska, and O. O. Pshenychnyi, "Adaptive oriented filtration of digital images in the spatial domain", *in Intern. Scientific and Technical Internet Conf. "Computer Graphics and Image Recognition"*, Vinnytsya, Ukraine, 2018, vol. 2, pp. 5-10.
- [16] Х.С. Одайська, та С.В. Баловсяк, Комп'ютерна програма "Визначення рівня гаусового шуму на зображеннях", ("GaussNoise18"), *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, № 91159*, 31.07.2019.
- [17] Х.С. Одайська, та С.В. Баловсяк, Комп'ютерна програма "Видалення гаусового шуму на зображеннях фільтром Гауса", ("GNoiseFilter18"), *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, № 91158*, 31.07.2019.
- [18] Х.С. Одайська, та С.В. Баловсяк, Комп'ютерна програма "Налаштування параметру "Яскравість" цифрової відеокамери", ("VideoParameter18"), Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, № 91160, 31.07.2019.

#### Додаток Б

## Оброблення цифрових зображень у частотній області Б1. Обчислення енергетичного спектра та його радіального розподілу

Спектр (коефіцієнти) Фур'є *F* зображення *f<sub>n</sub>* отримано в результаті двомірного прямого дискретного швидкого перетворення Фур'є [128]-[130] за формулою

$$F(m_1, n_1) = \sum_{i=1}^{M} \sum_{k=1}^{N} f_n(i, k) \times \exp\left(-j \cdot 2\pi \left(\frac{m_1 \cdot (i-1)}{M} + \frac{n_1 \cdot (k-1)}{N}\right)\right), \quad (5.1)$$

де  $m_1$ ,  $n_1$  – номери частот за висотою та за шириною;

 $m_1 = 1, 2, ..., M; n_1 = 1, 2, ..., N; j - уявна одиниця.$ 

Аналіз спектра Фур'є *F* спрощується, якщо перемістити його початок координат у центр частотного прямокутника. У результаті такого зміщення на основі *F* обчислено центровану матрицю коефіцієнтів Фур'є  $F_C = (F_C(m, n))$  (розміром  $M \times N$  елементів), де центру частотного прямокутника  $F_C$  відповідають нульові частоти (m = 0, n = 0) (рис. Б.1).

Енергетичний спектр (або «Спектральна щільність», «Спектральна густина потужності») [25]-[28] дорівнює квадрату модуля *F*<sub>C</sub>

$$P_S = \left| F_C \right|^2 = F_C^* \cdot F_C, \tag{5.2}$$

де  $F_C^*$  – комплексне спряження  $F_C$ .

З іншої сторони, енергетичний спектр  $P_S$  рівний  $F_C^* \cdot F_C$  – перетворенню Фур'є для автокореляційної функції зображення  $f_n$  [25]-[28].

Для кращої візуалізації енергетичний спектр *P*<sub>S</sub> потрібно перетворити до логарифмічного масштабу за формулою

$$P_{SL} = \ln(C_L + P_S), \qquad (5.3)$$

де  $C_L$  – константа (наприклад,  $C_L$  = 1).



Рисунок Б.1 – Принцип формування радіального розподілу  $P_R(d)$  для енергетичного спектру  $P_S$  в системі координат *mn*;  $M_2 = [M/2], N_2 = [N/2]$ 

Центральний елемент енергетичного спектра  $P_S$  з координатами  $(M_C, N_C)$  відповідає постійній складовій енергетичного спектра. Номерам частот (m, n) відповідають значення просторових частот (u, v) на енергетичному спектрі  $P_S$  за висотою та шириною відповідно, які обчислено за формулами:

$$u = \frac{m}{M}, \ v = \frac{n}{N}.$$
 (Б.4)

На основі енергетичного спектра  $P_S$  шляхом лінійної інтерполяції потрібно обчислити його радіальний розподіл  $P_R(d)$ , де  $d = 1, 2, ..., N_R$ ,  $N_R = [N/2], d$  – цілочисельні значення відстані від елемента спектра (m, n) до його центру  $(M_C, N_C)$ , тобто  $d = \left[\sqrt{m^2 + n^2}\right] + 1$ . Значення  $P_R(d)$  дорівнює середньому арифметичному Q елементів  $P_S(m_q, n_q)$ , тобто

$$P_R(d) = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^{Q} P_S(m_q, n_q).$$
(5.5)

де  $(m_q, n_q)$  – координати елементів  $P_s$ , відстань яких від центра  $P_s$  рівна d,  $d_1 < d \le d_2$ ,  $d_1 = d - 0.5$ ,  $d_2 = d + 0.5$ , тобто координати  $(m_q, n_q)$  лежать у межах кільця з радіусами  $d_1$  і  $d_2$  (рис. Б.1). Кожній відстані d відповідає значення радіальної просторової частоти

$$v_r(d) = \frac{d}{N}.$$
 (Б.6)

На основі радіального розподілу  $P_R(d)$ , де  $d = 1, 2, ..., N_R$ , необхідно обчислити нормований радіальний розподіл  $P_{RN}(d)$  за формулою

$$P_{RN}(d) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sqrt{P_R(d)} . \tag{E.7}$$

З врахуванням теореми Парсеваля [130, с.150], [131, с.190], яка встановлює зв'язок між енергією дискретного сигналу в просторовій (або часовій) і частотній областях, для зображення *f<sub>n</sub>* на основі (Б.1) отримано

$$\sum_{i=1}^{M} \sum_{k=1}^{N} f_n^2(i,k) = \frac{1}{MN} \sum_{m_1=1}^{M} \sum_{n_1=1}^{N} \left| F(m_1,n_1) \right|^2,$$
(5.8)

де  $f_n$  та F – амплітуда сигналу в просторовій і часовій областях відповідно. Формулу (Б.8) запишемо для спектру  $P_s$  з врахуванням (Б.2) у вигляді

$$\sum_{i=1}^{M} \sum_{k=1}^{N} f_n^2(i,k) = \frac{1}{MN} \sum_{m_1=1}^{M} \sum_{n_1=1}^{N} P_S(m_1,n_1), \qquad (5.9)$$

На основі (Б.9) СКВ яскравості зображення  $f_n$  дорівнює

$$\sigma_{S} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^{M} \sum_{k=1}^{N} f^{2}(i,k)} = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{m_{1}=1}^{M} \sum_{n_{1}=1}^{N} P_{S}(m_{1},n_{1})} .$$
(5.10)

Таким чином, отримано, що з урахуванням (Б.5) та (Б.10) значення нормованого радіального розподілу  $P_{RN}(d)$  (Б.7) дорівнюють СКВ яскравості зображення  $f_n$  (відносно середнього значення) для частоти  $v_r$  з номером d.

#### Б2. Фільтрація зображень у частотній області

При обчисленні КСКП корисного сигналу  $R_{Sw}$  враховано, що ядру фільтра Гауса w (2.4) (з СКВ  $\sigma_w$ ) в просторовій області відповідає ядро фільтра Гауса W (з СКВ  $\sigma_{wF}$ ) в частотній області, яке описано формулою

$$W(u,v) = \exp\left(\frac{-(u^2 + v^2)}{2\sigma_{wF}^2}\right),$$
 (5.11)

де *и*, *v* – просторові частоти (Б.4) ядра фільтра *W* за висотою і шириною.

Тому СКВ σ<sub>w</sub> (піксели) ядра фільтра в просторовій області відповідає СКВ σ<sub>wF</sub> (піксели<sup>-1</sup>) того ж ядра фільтра в частотній області [26, с.253-256]

$$\sigma_{wF} = \frac{1}{2\pi\sigma_w} . \tag{5.12}$$

Наприклад, ядру фільтра Гауса *w* з СКВ  $\sigma_w = 1.495$  (рис. Б.2, а,б) в просторовій області відповідає ядро фільтра Гауса *W* з СКВ  $\sigma_{wF} = 0.1065$  (рис. Б.2, в, г) у частотній області. Згідно з теоремою про згортку [26, с.250-252], згортання  $f_n * w$  в просторовій області еквівалентне множенню Фур'є-образів *F* початкового зображення та ядра фільтра *W*. Тому, якщо значення корисного сигналу на зображенні  $f_n$  описано однією синусоїдою ( $E_{CE} \approx 1$ ) з частотою  $v_{SE}$ , то з врахуванням (Б.11) та (Б.12) амплітуда синусоїди з частотою  $v_{SE}$  зменшується у *W*(0,  $v_{SE}$ ) разів за формулою

$$W(0, v_{SE}) = \exp\left(\frac{-v_{SE}^2}{2\sigma_{wF}^2}\right).$$
 (5.13)

У випадку опису яскравості зображення однією синусоїдою з амплітудою  $A_{S1} = A_{SE}/2$  і частотою  $v_{SE}$ , амплітуда синусоїди згідно (Б.13) зменшується в  $W(0, v_{SE})$  разів (рис. Б.2, г, рис. Б.3).



Рисунок Б.2 – Ядро фільтра Гауса у просторовій і частотній областях: а) ядро фільтра *w* у просторовій області; б) профіль ядра *w*, який проходить через його центр; в) ядро *W* у частотній області; г) профіль ядра *W*, який проходить через його центр; *v*<sub>SE</sub> = 0.03125; *W*(0, *v*<sub>SE</sub>) = 0.9578



Рисунок Б.3 – Зміна амплітуди синусоїдального сигналу при згортанні

Відповідно з врахуванням (Б.13) отримано формулу для амплітуди  $A_{1g}$  такої синусоїди на зображенні *g* після згортання

$$A_{1g} = \frac{A_{SE}}{2} \cdot \exp\left(\frac{-(v_{SE}^2)}{2\sigma_{wF}^2}\right).$$
(5.14)

Тобто, внаслідок згладжування амплітуда синусоїди зменшена від  $A_{S1} = A_{SE}/2$  до  $A_{1g}$  (Б.14) (рис. Б.3).

#### БЗ. Уточнення середньої просторової частоти зображення

На основі аналізу результатів фільтрації тестових зображень з довільними спектрами [134]-[135] уточнено емпіричну формулу (2.38) для середньої просторової частоти *v*<sub>SE</sub>

$$v_{SE} = v_{CRN} + (v_{CRN} - v_{CR0}) \cdot (k_{NE1} + k_{NE2}), \qquad (5.15)$$

де  $k_{NE1}$  – коефіцієнт, що описує нелінійну залежність  $v_{SE}$  від  $\sigma_{NE}$ ;  $k_{NE2}$  – коефіцієнт, що описує нелінійну залежність  $v_{SE}$  від  $\sigma_{NE}$  та від середнього початкового радіального періоду зображення  $T_{SE1}$ :

$$T_{SE1} = \frac{1}{2v_{CRN} - v_{CR0}}.$$
 (Б.16)

Оскільки нормований радіальний розподіл  $P_{RN}$  (Б.7) обчислено як корінь квадратний співвідношення сигнал/шум від радіального розподілу  $P_R$  (Б.5), тому значення просторової частоти  $v_{CRN} \ge v_{CR0}$ . Відповідно значення періоду  $T_{SE1}$  (Б.16) будуть тим меншими, чим більш рівномірний розподіл амплітуд просторових частот спостерігається для досліджуваного зображення. Таким чином, значення періоду  $T_{SE1}$  кількісно враховують відмінність спектра реального зображення від спектра зображення, яскравість якого моделюється синусоїдами (2.33), (2.34). Коефіцієнти *k*<sub>NE1</sub>, *k*<sub>NE2</sub> обчислено за емпіричними формулами:

$$k_{NE1} = c_{11} \cdot \left(\frac{\sigma_{NE}}{c_{12}}\right)^{C13},$$
 (Б.17)

де  $c_{11} = 2.5$ ;  $c_{12} = 0.08$ ;  $c_{13} = 0.12$ ;

$$k_{NE2} = \frac{1}{1 + \exp(-(\sigma_{NE} - c_{21}) \cdot c_{22})} \cdot \frac{c_{23}}{T_{SE1}^2},$$
 (5.18)

де  $c_{21} = 0.17$ ;  $c_{22} = 100$ ;  $c_{23} = 1000$ .

Коефіцієнт  $k_{NE2}$  (Б.18) обчислено як добуток сигмоїдної функції (виду  $y = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$ ) на множник  $\frac{c_{23}}{T_{SE1}^2}$ . У формулі (Б.18) значення  $T_{SE1}^2$  знаходиться у знаменнику, оскільки за результатами комп'ютерного моделювання в системі Matlab (отриманими при фільтрації зображень) значення частоти  $v_{SE}$  для малих  $T_{SE1}$  повинно перевищувати частоту  $v_{CRN}$ . Використання сигмоїдної функції враховує результати комп'ютерного моделювання, згідно з якими значення частоти  $v_{SE}$  найбільше залежить від періоду  $T_{SE1}$  для великих значень експериментального рівня шуму  $\sigma_{NE}$ .

Числові значення коефіцієнтів у емпіричних формулах (Б.15)-(Б.18) отримано при фільтрації серії зображень  $f_n$ , обчислених на основі тестових зображень f [134]-[136] шляхом програмного додавання гаусового шуму ( $\sigma_N = 0.01...0.20$ ). У результаті фільтрації зображень  $f_n$  з ядром фільтра Гауса отримано зображення g. Значення коефіцієнтів у формулах (Б.15)-(Б.18) обчислено методом координатного спуску [132]-[133] шляхом мінімізації кореня середньої квадратичної похибки  $R_{wg}$  (В.1) для яскравості фільтрованого зображень та всіх рівнів шуму). Завдяки уточненій формулі (Б.15) розроблений метод фільтрації шуму виявився ефективним також при обробці зображень, енергетичний спектр яких є суцільним і не містить однієї переважної просторової частоти (що характерно для більшості зображень, отриманих за допомогою фото- і відеокамер) [134]-[135].

#### Б.4 Аналіз спектрів тестових зображень

Спектральний аналіз тестових зображень (додаток В1) виконано за допомогою розроблених програмних засобів у системі Matlab з врахуванням відношень (Б.1)-(Б.10). Для зображення  $f_n$  без шуму та майже без текстур і контурів (рис. Б.4, а) характерними є плавні зміни яскравості, що особливо помітно на профілі  $z_{fn}(r)$  зображення (рис. Б.4, б). Відповідно на енергетичному спектрі  $P_s$  такого зображення (рис. Б.4, в, рис. Б.4, д), а також на його нормованому радіальному розподілі  $P_{RN}$  (рис. Б.4, г), переважають низькі (НЧ) (0...0.17 пікселів<sup>-1</sup>) і середні (СЧ) (0.17...0.33 пікселів<sup>-1</sup>) просторові частоти у порівнянні з високими частотами (ВЧ).

Після програмного додавання гаусового шуму з рівнем  $\sigma_N = 0.1$  до зображення *f<sub>n</sub>* (рис. Б.4, а) отримано зображення (рис. Б.5, а), для якого € характерними різкі (шумоподібні) зміни яскравості, що особливо помітно на профілі  $z_{fn}(r)$  зображення (рис. Б.5, б). Відповідно на енергетичному спектрі  $P_{S}$  такого зображення (рис. Б.5, в, рис. Б.5, д), а також на його радіальному розподілі  $P_{RN}$  (рис. Б.5, г), на високих частотах (0.33...0.5 пікселів<sup>-1</sup>) переважає шумова складова з рівнем  $\sigma_{NE} \approx 0.1$ . Таким чином, для зображень, які не містять яскраво виражених текстур і контурів (рис. Б.4, рис. Б.5), можливо рівень гаусового досить точно обчислити ШУМУ шляхом аналізу високочастотної складової для розподілу яскравості зображення.

Проте, на багатьох зображеннях присутні текстури і чіткі контури [140]-[143]. Для такого зображення  $f_n$  (рис. Б.6, а) є характерними різкі (шумоподібні) зміни яскравості, що особливо помітно на профілі зображення (рис. Б.6, б), хоча на зображенні  $f_n$  шум відсутній. Відповідно на енергетичному спектрі  $P_S$  такого зображення (рис. Б.6, в, рис. Б.6, д), а також на його радіальному розподілі  $P_{RN}$  (рис. Б.6, г), на високих частотах (0.33...0.5 пікселів<sup>-1</sup>) переважає шумова складова. Таким чином, для зображень, які містять яскраво виражені текстури та контури (рис. Б.6), експериментальний рівень шуму значно спотворюється, оскільки контури і текстури за спектральною густиною потужності подібні до гаусового шуму (рис. Б.5, г, рис. Б.5, г).



Рисунок Б.4 – Аналіз спектра зображення «Face» без шуму: а) початкове зображення f<sub>n</sub>; б) профіль z<sub>fn</sub>(r) зображення f<sub>n</sub>, обчислений у Q<sub>p</sub> точках (початкова і кінцева точка профілю показані на рис. Б.4, а маркерами);
в) д) енергетичний спектр P<sub>s</sub> зображення f<sub>n</sub> в логарифмічному масштабі у 2D та 3D вигляді відповідно; г) нормований радіальний розподіл P<sub>RN</sub> спектра P<sub>s</sub>



Рисунок Б.5 – Аналіз спектра зображення «Face» з гаусовим шумом з σ<sub>N</sub> = 0.1: а) початкове зображення f<sub>n</sub>; б) профіль z<sub>fn</sub>(r) зображення f<sub>n</sub>;
в) д) енергетичний спектр P<sub>S</sub> зображення f<sub>n</sub> в логарифмічному масштабі у 2D та 3D вигляді відповідно; г) нормований радіальний розподіл P<sub>RN</sub> спектра P<sub>S</sub>





Рисунок Б.6 – Аналіз спектра зображення з текстурами: а) початкове зображення *f<sub>n</sub>*; б) профіль *z<sub>fn</sub>(r)* зображення *f<sub>n</sub>*; в) д) енергетичний спектр *P<sub>s</sub>* зображення *f<sub>n</sub>* в логарифмічному масштабі у 2D та 3D вигляді відповідно; г) нормований радіальний розподіл *P<sub>RN</sub>* спектра *P<sub>s</sub>* 

### Додаток В

## Тестові цифрові зображення та приклади їх фільтрації В1. Множина тестових зображень



Рисунок В.1 – Тестові зображення f: а) зображення «face» з малою кількістю деталей (розмір 300 × 300 пікселів); б) зображення «cameraman» з середньою кількістю деталей (розмір 256 × 256 пікселів); в) зображення «crowd» з великою кількістю деталей (розмір 512 × 512 пікселів) [134]



Рисунок В.2 – Тестові зображення f: a) зображення «sin2\_64g» з плавною зміною яскравості (розмір 256 × 256 пікселів); б) зображення «ch64g» з чіткими контурами (розмір 256 × 256 пікселів); в) зображення «mountain» з текстурами (розмір 321 × 481 пікселів) [135]-[136]



Рисунок В.3 – Тестові зображення бази BSDS300 [135], [136] розміром 481 × 321 пікселів, показано зображення №1 - №30 (з 100 зображень)



Рисунок В.4 – Тестові зображення бази BSDS300 [135], [136] розміром 481 × 321 пікселів, показано зображення №31 - №65



Рисунок В.5 – Тестові зображення бази BSDS300 [135], [136] розміром 481 × 321 пікселів, показано зображення №66 - №100

#### В2. Оптимальна фільтрація тестових зображень

Використано тестові зображення f з періодами  $T_S$  від 4 до 256 пікселів (рис. В.6), оскільки такий діапазон періодів характерний для більшості експериментальних зображень, отриманих за допомогою відеокамер у КОЕС [135], [136]. На основі тестових зображень f обчислено зображення  $f_n$  шляхом програмного додавання гаусового шуму з теоретичним СКВ  $\sigma_N$ . Значення СКВ шуму  $\sigma_N$  змінювалося в діапазоні від 0 до 0.1, оскільки на більшості експериментальних зображень СКВ шуму не перевищує 0.1 (для зображень, яскравість яких нормується до 1) [49].

Згортання зображення  $f_n$  з ядром фільтра Гауса w (2.4) з СКВ  $\sigma_w$ , у результаті чого отримано фільтроване зображення g, виконано за формулою (2.1). Оптимальне значення СКВ ядра фільтра Гауса  $\sigma_{wT}$  обчислено як значення СКВ ядра фільтра  $\sigma_w$ , якому відповідає мінімум кореня середньої квадратичної похибки (КСКП)  $R_{wg}$  яскравості фільтрованого зображення g (2.1) відносно яскравості еталонного зображення f

$$R_{wg} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=k}^{M} \sum_{k=1}^{N} \left[ f(i,k) - g(i,k) \right]^2},$$
 (B.1)



де i = 1, ..., M; k = 1, ..., N.



СКВ  $\sigma_{wT}$  обчислено шляхом перебору  $\sigma_w$  у діапазоні від  $\sigma_{wMin}$  до  $\sigma_{wMax}$ , у межах якого  $\sigma_w$  приймає ряд дискретних значень з номерами  $n_s = 1,..., Q_{ns}$ . Оскільки при малих значеннях  $\sigma_w$  навіть незначна їх зміна суттєво впливає на результат фільтрації зображень, а при великих значеннях  $\sigma_w$  така ж зміна менше впливає на результат, тому значення  $\sigma_w$  змінювалися з постійним кроком у логарифмічному масштабі (з основою 2). Тобто логарифм  $L_{\sigma w} = \log_2(\sigma_w + 1)$  зростає у діапазоні від  $L_{\sigma wMin}$  до  $L_{\sigma wMax}$  з кроком  $L_{\sigma wS}$ , де:

$$L_{\sigma wMin} = \log_2(\sigma_{wMin} + 1), \ L_{\sigma wMax} = \log_2(\sigma_{wMax} + 1).$$
(B.2)

Початкове значення  $\sigma_w = \sigma_{wMin}$  (для  $n_s = 1$ ), а наступні значення  $\sigma_w$  обчислено за формулою

$$\sigma_w = 2^{L_{\sigma w}} - 1, \tag{B.3}$$

де

$$L_{\sigma W} = \begin{cases} L_{\sigma WMin} & , n_s = 1 \\ (n_s - 1) \cdot L_{\sigma WS} & , n_s > 1 \end{cases}, \ n_s = 1, ..., Q_{ns}.$$

Наприклад, при  $\sigma_{wMin} = 0.01$ ,  $\sigma_{wMax} = 8$  та  $L_{\sigma wS} = 0.1$  отримано наступний ряд дискретних значень  $\sigma_w$  (табл. В.1).

Кількість дискретних значень  $\sigma_w$  обчислено за формулою

$$Q_{ns} = \left[\frac{L_{\sigma wMax} - L_{\sigma wMin}}{L_{\sigma wS}}\right] + 1.$$
(B.4)

Таблиця В.1 – Ряд значень СКВ ядра фільтра Гауса о<sub>w</sub> у діапазоні від 0.01 до 8

n <sub>s</sub>	$L_{\sigma w}$	$\sigma_w$		
1	0.014355	0.010000		
2	0.1	0.071773		
3	0.2	0.148698		
31	3	7.000000		
32	3.1	7.574188		

За мінімумом отриманих залежностей  $R_{wg}(\sigma_w)$  (В.1) отримано оптимальне значення СКВ ядра фільтра Гауса  $\sigma_{wT}$  (рис. В.7). Для підвищення точності визначення  $\sigma_{wT}$  проведено інтерполяцію залежності  $R_{wg}(\sigma_w)$  за допомогою кубічних сплайнів [146]-[147] (рис. В.7). Значення  $\sigma_{wT}$  отримано як  $\sigma_w$ , яке відповідає мінімуму інтерпольованої залежності  $R_{wg_{-}}(\sigma_w)$ . При зміні  $\sigma_w$  з кроком  $L_{\sigma_{wS}} = 0.2$  (В.3) виникають осциляції між вузлами  $R_{wg}$  (наприклад, осциляція між вузлами 2 і 3 показана суцільною стрілкою, рис. В.7, а), що зменшує точність визначення  $\sigma_{wT}$ . Отримано уточнене значення кроку  $L_{\sigma_{wS}} = 0.1$ як максимального кроку, при якому відсутні осциляції між вузлами інтерполяції для залежності  $R_{wg}(\sigma_w)$  (рис. В.7, б).

Вищеописане знаходження оптимального значення  $\sigma_{wT}$  описано наступною схемою (рис. В.8). На основі тестового зображення без шуму fобчислюється зображення  $f_n$  з теоретичним рівнем шуму  $\sigma_N$ . Далі створюється множина ядер w фільтра Гауса з дискретними значеннями СКВ  $\sigma_w$ , а шляхом згортання з якими обчислюються фільтровані зображення g. На основі мінімуму КСКП  $R_{wg}(\sigma_w)$  між зображеннями f та g отримується оптимальне значення СКВ ядра фільтра Гауса  $\sigma_{wT}$ , при якому результат фільтрації gнайбільш близький до тестового зображення f згідно критерію  $R_{wg}$  (В.1).



Рисунок В.7 – Інтерполяція залежності  $R_{wg}(\sigma_w)$ : а)  $L_{\sigma wS} = 0.2$ ; б)  $L_{\sigma wS} = 0.1$ ;  $R_{wg}$  – початкові значення  $R_{wg}(\sigma_w)$ ,  $R_{wg_I}$  – результати інтерполяції; яскравість тестового зображення f описано однією синусоїдою ( $A_S = 0.5$ ,  $T_S = 64$ )



Рисунок В.8 – Схема обчислення оптимального СКВ  $\sigma_{wT}$  ядра фільтра Гауса:  $R_{wg}$  – початкові значення  $R_{wg}(\sigma_w)$ ;  $R_{wg_I}$  – результат інтерполяції; f – тестове зображення без шуму;  $f_n$  – зображення з шумом, w – ядра фільтрів; g – фільтровані зображення

Показано, що форма отриманих залежностей  $R_{wg}(\sigma_w)$  та оптимальні значення СКВ  $\sigma_{wT}$  ядра фільтра Гауса закономірно змінюються як при збільшенні рівня шуму  $\sigma_N$  (при збільшенні  $\sigma_N$  значення  $\sigma_{wT}$  зростає), так і при збільшенні просторового періоду  $T_S$  корисного сигналу (при збільшенні  $T_S$ значення  $\sigma_{wT}$  також зростає) (рис. В.9). Крім цього, значення  $\sigma_{wT}$  залежать від того, чи описано яскравість зображення однією або двома синусоїдами. Якщо яскравість зображення описано однією синусоїдою (рис. Б.6, а), тобто розподіл яскравості зображення має одну орієнтацію, то отримано менші значення  $\sigma_{wT}$ (рис. Б.10, а), ніж для випадку, коли яскравість зображення описано двома взаємно перпендикулярними синусоїдами (рис. Б.6, б) і отримано більші значення  $\sigma_{wT}$  (рис. Б.10, б). Таким чином, існує залежність значень  $\sigma_{wT}$  від орієнтації розподілу яскравості зображення.



Рисунок В.9 – Залежності  $R_{wg}$  ( $\sigma_{w}, \sigma_{N}$ ) для зображень, яскравість яких описано однією синусоїдою з періодом  $T_{S}$  та з програмно доданим гаусовим шумом з  $\sigma_{N} = 0.0, 0.02$  та 0.10: а)  $T_{S} = 16$ ; б)  $T_{S} = 64$ ; в)  $T_{S} = 128$ ; г)  $T_{S} = 256$ 



Рисунок В.10 – Залежності  $\sigma_{wT}$  ( $T_{S}, \sigma_{N}$ ) для зображень, яскравість яких описано: а) однією синусоїдою; б) двома синусоїдами; діапазон яскравостей корисного сигналу  $A_{S} = 0.5$ 

Аналіз отриманих залежностей  $\sigma_{wT}(T_S, \sigma_N)$ , візуалізованих у вигляді поверхонь (рис. Б.11), показав, що залежності  $\sigma_{wT}(T_S)$  та  $\sigma_{wT}(\sigma_N)$  є монотонними.



Рисунок В.11 – Тривимірна візуалізація залежності  $\sigma_{wT}$  ( $T_S, \sigma_N$ ) для зображень, яскравість яких описано: а) однією синусоїдою; б) двома синусоїдами; діапазон яскравостей корисного сигналу  $A_S = 0.5$ 

Аналіз залежностей  $\sigma_{wT}(T_S, \sigma_N)$ , обчислених у вигляді матриць (табл. В.2, табл. В.3) при різних значеннях діапазону яскравостей корисного сигналу  $A_S$ , показав, що при зменшенні  $A_S$  значення  $\sigma_{wT}$  зростає.

 $\sigma_N$ 0 0.001 0.005 0.01 0.015 0.02  $T_{S}$ 4 0.16931 0.26428 0.28085 0.29189 0.32543 0.36094 0.16931 0.27533 0.34318 0.41421 0.47131 0.51572 8 12 0.16931 0.28637 0.42056 0.52931 0.59051 0.64637 0.16931 0.30294 0.50303 0.61771 0.69738 0.75672 16 0.17446 0.39054 0.63179 0.78015 0.88281 0.97488 24 32 0.17446 0.43959 0.72653 0.90792 1.06280 1.15316 48 0.17446 0.52932 0.93303 1.20124 1.39015 1.51752

Таблиця В.2 – Залежність  $\sigma_{wT}(T_S, \sigma_N)$  для зображень, яскравість яких описано

двома синусоїдами,  $A_S = 0.5$ 

Таблиця В.3 – Залежність  $\sigma_{wT}(T_S, \sigma_N)$  для зображень, яскравість яких описано двома синусоїдами,  $A_S = 0.25$ 

$T_S$ $\sigma_N$	0	0.001	0.005	0.01	0.015	0.02
4	0.16931	0.26980	0.29189	0.36094	0.40237	0.43325
8	0.16931	0.28637	0.41421	0.51572	0.57691	0.63179
12	0.16931	0.31951	0.52931	0.64637	0.72653	0.79577
16	0.16931	0.38462	0.61770	0.75672	0.85826	0.94978
24	0.17446	0.47765	0.77234	0.98326	1.12560	1.23009
32	0.17446	0.54971	0.90792	1.15316	1.35923	1.47333
48	0.17446	0.67552	1.18201	1.53961	1.76924	1.95531

Таким чином, досліджено залежність оптимального СКВ ядра фільтра Гауса  $\sigma_{wT}$  від: рівня гаусового шуму  $\sigma_N$  на зображенні ( $\sigma_N \leq 0.1$ ), просторового періоду корисного сигналу  $T_S$  ( $4 \leq T_S \leq 256$ ), діапазону яскравостей корисного сигналу  $A_S$  ( $A_S \leq 0.5$ , оскільки при більших  $A_S$  і при додаванні шуму з СКВ  $\sigma_N$ можливий вихід яскравості отриманого зображення за межі допустимого діапазону) та від переважної орієнтації розподілу яскравості зображення (яскравість зображення описано однією або двома синусоїдами).

#### ВЗ. Фільтрація тестового зображення запропонованим методом

Таким чином, послідовність фільтрації шуму на зображеннях у запропонованому методі полягає в наступному. Спочатку для початкового зображення  $f_n$  (рис. Б.12, а) обчислюється експериментальний рівень шуму  $\sigma_{NE}$ . Далі на основі зображення  $f_n$  обчислюється його енергетичний спектр  $P_S$  і радіальний розподіл  $P_R$  для енергетичного спектру (рис. Б.12, б); для радіального розподілу  $P_R$  обчислюється середня просторова частота  $v_{SE}$  та відповідний їй середній просторовий період  $T_{SE}$ .

На основі енергетичного спектра  $P_S$  також обчислюється ексцентриситет  $E_{CE}$  і діапазон значень синусоїдального сигналу  $A_{SE}$ (рис. Б.13, а). Потім з врахуванням діапазону частот і просторового періоду обчислюється зображення корисного сигналу в моделі однієї синусоїди (рис. Б.13, а) та двох синусоїд (рис. Б.13, б).



Рисунок В.12 – Визначення експериментальних параметрів корисного сигналу: а) початкове зображення  $f_n$  з шумом  $\sigma_N = 0.05$ , обчислене на основі еталонного f (рис. В.1, а); б) радіальний розподіл  $P_R(v_r)$  для енергетичного спектру  $P_S$  зображення  $f_n$ ;  $\sigma_{NE} = 0.0481$ 



Рисунок В.13 – Зображення корисного сигналу для зображення (рис. Б.12, а), яскравість яких описується: а) однією синусоїдою (*E*<sub>CE</sub>≈ 1); б) двома синусоїдами (*E*<sub>CE</sub>≈ 0)

Оскільки ексцентриситет  $E_{CE} = 0.384$ , тому зображення  $f_n$  точніше описується моделлю двох синусоїд. Далі обчислюється КСКП шуму та корисного сигналу (рис. Б.13) для дискретних значень СКВ ядра фільтра Гауса  $\sigma_w$  (рис. Б.14, а). Квазіоптимальне значення СКВ  $\sigma_{wE}$  ядра фільтра обчислено за мінімумом КСКП  $R_{wE}$  (2.55) для шумової складової та корисного сигналу. Фільтроване зображення (рис. Б.14, б) обчислено в результаті згортання зображення  $f_n$  та ядра фільтра Гауса з СКВ  $\sigma_{wE}$ .


Рисунок В.14 – Визначення квазіоптимального значення СКВ σ<sub>wE</sub> ядра фільтра Гауса: а) інтерпольовані залежності кореню середньої квадратичної похибки (КСКП) для яскравості фільтрованого зображення *g* та його складових відносно корисного сигналу на початковому зображенні *f<sub>n</sub>* (рис. Б.12, а); б) фільтроване зображення *g*; *R<sub>NwI</sub>* – КСКП шумової складової; *R<sub>SwI</sub>* – КСКП корисного сигналу; *R<sub>wEI</sub>* – КСКП зображення *g* (шумової складової та корисного сигналу); σ<sub>w</sub> – СКВ ядра фільтра Гауса

# В4. Результати фільтрація тестових зображень запропонованим методом

У результаті фільтрації тестових зображень запропонованим методом отримано значення КСКП  $R_{wg}$  (В.1), які перевищують оптимальні значення  $R_{wgC}$  у середньому на незначну величину 0.0008 (рис. В.15).



Рисунок В.15 – Значення КСКП між зображеннями *g* та *f* для 100 зображень бази BSDS300 [135], [136] (див. додаток В1); зображення *g* отримані фільтрацією *f<sub>n</sub>* за допомогою розробленого методу; зображення *f<sub>n</sub>* обчислено шляхом програмного додавання гаусового шуму з теоретичними СКВ σ<sub>N</sub>:
а) σ<sub>N</sub> = 0.01; б) σ<sub>N</sub> = 0.05; *n<sub>i</sub>* – номер зображення в базі, *R<sub>wg</sub>* – значення КСКП, отримані запропонованим методом; *R<sub>wgC</sub>* – оптимальні значення КСКП



Продовження рисунку В.15 – в)  $\sigma_N = 0.10$ ; г)  $\sigma_N = 0.15$ ; д)  $\sigma_N = 0.20$ 

Найбільше перевищення похибки  $R_{wg}$  (В.1) порівняно з  $R_{wgC}$  отримано для зображень з чіткими контурами та текстурами (наприклад, для зображення №28 — рис. В.3), особливо для низьких рівнів шуму (рис. В.15, а,б), що пояснюється похибкою при обчисленні рівня шуму для таких зображень. Значення КСКП  $R_{wg}$  для більшості тестових зображень (рис. В.15) практично співпадають з оптимальними  $R_{wgC}$ .

У результаті фільтрації тестових зображень запропонованим методом отримано значення пікового ВСШ  $P_{SNRg}$ , які менші за оптимальні значення  $P_{SNRgC}$  у середньому на незначну величину 0.138 дБ (рис. В.16).



Рисунок В.16 – Значення ПВСШ між зображеннями *g* та *f* для 100 зображень бази BSDS300 [135], [136] (див. додаток В1) з теоретичними СКВ σ<sub>N</sub> шуму: а) σ<sub>N</sub> = 0.01; б) σ<sub>N</sub> = 0.05; *P*<sub>SNRg</sub> – значення ПВСШ, отримані запропонованим методом; *P*<sub>SNRgC</sub> – оптимальні ПВСШ; *n<sub>i</sub>* – номер зображення



Продовження рисунку В.16 – в)  $\sigma_N = 0.10$ ; г)  $\sigma_N = 0.15$ ; д)  $\sigma_N = 0.20$ 

При обчисленні ПВСШ  $P_{SNRg}$ , як й при обчисленні КСКП  $R_{wg}$  (рис. В.15), найбільшу похибку отримано для зображень з чіткими контурами та текстурами, особливо для низьких рівнів шуму (рис. В.16, а,б), що пояснюється похибкою при обчисленні рівня шуму для таких зображень. Значення ПВСШ  $P_{SNRg}$ , для більшості тестових зображень (рис. В.16) практично співпадають з оптимальними  $P_{SNRgC}$ .

Для серії тестових зображень за допомогою запропонованого методу визначено значення середніх періодів  $T_{SE}$  (рис. В.17, а) та СКВ  $\sigma_{wE}$  ядра фільтра (рис. В.17, б).



Рисунок В.17 – Значення середніх періодів  $T_{SE}$  (а) та експериментальних СКВ  $\sigma_{wE}$  ядра фільтра Гауса (б) для 100 зображень бази BSDS300 [135], [136] (див. додаток В1), які обчислені при різних значеннях теоретичного СКВ шуму  $\sigma_N$  (0.01, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20);  $n_i$  – номер зображення в базі

На отриманих залежностях  $T_{SE}(n_i, \sigma_N)$  (рис. В.17, а) спостерігається збільшення  $T_{SE}$  при зростанні  $\sigma_N$ , аналогічно на отриманих залежностях  $\sigma_{wE}(n_i, \sigma_N)$  (рис. В.17, б) спостерігається збільшення  $\sigma_{wE}$  при зростанні  $\sigma_N$ , що пояснюється зменшенням чіткості контурів і текстур при збільшенні рівня шуму на зображенні.

Запропонованим методом фільтрації виконано оброблення 17-ти тестових зображень бази BSDS300 (Train) [135], [136] (рис. В.18), а якість отриманих зображень оцінено за критерієм ПВСШ (2.56) (табл. В.4, табл. В.5). У таблиці В.4 та таблиці В.5 наведені значення пікового співвідношення фільтрованих зображень, оброблених різними сигнал/шум  $P_{SNRg}$ для методами: методами-аналогами, запропонованим методом та оптимальним фільтром Гауса. Як методи-аналоги використано такі нелінійні методи, як Bilat (метод білатеральної фільтрації) [48] та PDE (Partial Differential Equations, метод диференціальних рівнянь з частинними похідними) [113]-[115]. Оптимальна фільтрація з ядром фільтра Гауса (додаток В2) реалізується тільки в тестовому режимі шляхом перебору різних значень СКВ ядра фільтра Гауса у заданому діапазоні та знаходженням мінімальної СКП між фільтрованим зображенням і еталонним.



Рисунок В.18 – Тестові зображення бази BSDS300 (Train) [135], [136]

N⁰	Методи-аналоги		Розроблений	Оптимальний	
зображення	Bilat	PDE	метод	фільтр Гауса	
1	28.61	28.24	28.69	28.71	
2	29.55	29.19	29.34	29.41	
3	29.92	29.50	29.21	29.38	
4	28.76	27.93	26.91	26.91	
5	32.57	32.46	31.05	31.42	
6	34.47	34.29	33.01	33.17	
7	30.73	30.72	31.06	31.11	
8	31.29	30.93	31.06	31.06	
9	30.31	29.76	28.09	28.60	
10	33.28	33.40	32.58	32.64	
11	29.62	29.46	28.37	28.90	
12	29.32	29.76	30.53	30.72	
13	32.33	32.54	32.84	32.86	
14	29.98	29.84	29.04	29.18	
15	30.02	30.03	30.08	30.14	
16	29.51	29.12	28.47	28.50	
17	28.43	29.26	29.81	29.94	
PSNR_A	30.51	30.38	30.01	30.16	

PSNR\_А – середнє значення ПВСШ для всіх фільтрованих зображень

Таблиця В.5 – Значення пікового співвідношення сигнал/шум *P*<sub>SNRg</sub> (дБ) для множини тестових зображень (рис. В.18) з СКВ гаусового шуму  $\sigma_N = 0.10$ після фільтрації різними методами; PSNR\_A – середнє значення ПВСШ

N₂	Методи-аналоги		Розроблений	Оптимальний	
зображення	Bilat	PDE	метод	фільтр Гауса	
1	23.38	24.77	25.27	25.28	
2	25.02	26.64	25.96	26.04	
3	25.09	26.42	26.01	26.07	
4	21.58	22.97	22.17	22.46	
5	28.33	29.78	28.96	29.07	
6	30.94	31.58	30.70	30.73	
7	27.38	27.80	28.07	28.08	
8	26.85	27.43	27.77	27.83	
9	24.63	26.34	24.64	25.06	
10	29.25	30.85	29.92	29.97	
11	25.20	26.45	25.31	25.73	
12	26.47	27.72	27.74	27.88	
13	30.05	30.56	30.39	30.39	
14	25.61	26.98	25.82	25.87	
15	25.71	27.38	26.84	26.93	
16	23.84	25.83	24.90	24.94	
17	25.00	26.93	26.62	26.71	
PSNR_A	26.14	27.44	26.89	27.00	

## Додаток Г

Приклади оброблення зображень при адаптивній зміні параметрів

### відеокамери

## Г1. Приклади оброблення зображень при адаптивній зміні

параметру «Яскравість» відеокамери



Рисунок Г1 – Фрагмент серії зображень (рис. 4.7),

отриманих за допомогою відеокамери «А4Tech PK-835MJ»:

а) значення параметру «Яскравість»  $B_r = -10$ ; б)  $B_r = 5$ ; в)  $B_r = 7$ ; г)  $B_r = 15$ 







Рисунок Г.3 – Гістограми серії зображень (рис. 4.7), обчислені для *Q<sub>h</sub>* напівінтервалів: а) значення параметру «Яскравість» *B<sub>r</sub>* = -10;
б) *B<sub>r</sub>* = -5; в) *B<sub>r</sub>* = 0; г) *B<sub>r</sub>* = 2; д) *B<sub>r</sub>* = 5; г) *B<sub>r</sub>* = 7



Рисунок Г.4 – Гістограми серії зображень (рис. 4.9), обчислені для *Q<sub>h</sub>* напівінтервалів: а) значення параметру «Яскравість» *B<sub>r</sub>* = 0;
б) *B<sub>r</sub>* = 50; в) *B<sub>r</sub>* = 60; г) *B<sub>r</sub>* = 70; д) *B<sub>r</sub>* = 80; г) *B<sub>r</sub>* = 100



Рисунок Г.5 – Гістограми серії зображень (рис. 4.11), обчислені для *Q<sub>h</sub>* напівінтервалів: а) значення параметру «Яскравість» *B<sub>r</sub>* = 100;
б) *B<sub>r</sub>* = 110; в) *B<sub>r</sub>* = 120; г) *B<sub>r</sub>* = 130; д) *B<sub>r</sub>* = 140; г) *B<sub>r</sub>* = 150

Г2. Приклади оброблення зображень при адаптивній зміні параметру «Контраст» відеокамери



Рисунок Г.6 – Фрагмент серії зображень (рис. 4.14), отриманих при значеннях параметру *C<sub>t</sub>* «Контраст»: а) 6; б) 18; в) 23; г) 32



Рисунок Г.7 – Фрагмент серії зображень (рис. 4.16), отриманих при значеннях параметру *C<sub>t</sub>* «Контраст»: а) 10; б) 40



Рисунок Г.8 – Гістограми серії зображень (рис. 4.14), обчислені для *Q<sub>h</sub>* напівінтервалів: а) значення параметру «Контраст» *C<sub>t</sub>* = 9; б) *C<sub>t</sub>* = 15; в) *C<sub>t</sub>* = **18**; г) *C<sub>t</sub>* = 23; д) *C<sub>t</sub>* = 27; г) *C<sub>t</sub>* = 32



Рисунок Г.9 – Гістограми серії зображень (рис. 4.16), обчислені для *Q<sub>h</sub>* напівінтервалів: а) значення параметру «Контраст» *C<sub>t</sub>* = 10; б) *C<sub>t</sub>* = 20; в) *C<sub>t</sub>* = **30**; г) *C<sub>t</sub>* = 40; д) *C<sub>t</sub>* = 50; г) *C<sub>t</sub>* = 100



Рисунок Г.10 – Гістограми серії зображень (рис. 4.18), обчислені для *Q<sub>h</sub>* напівінтервалів: а) значення параметру «Контраст» *C<sub>t</sub>* = 10; б) *C<sub>t</sub>* = 20; в) *C<sub>t</sub>* = **30**; г) *C<sub>t</sub>* = 40; д) *C<sub>t</sub>* = 50; г) *C<sub>t</sub>* = 100

## Додаток Д

## Фрагменти лістингів комп'ютерних програм

# Д1. Фрагмент лістингу комп'ютерної програми "Визначення рівня гаусового шуму на зображеннях" ("GaussNoise18") [66]

```
% Середовище розроблення програми – Matlab
     % Main Module «GaussNoise18»
p2_2_Image_FileName_1; % Read Image FileName
p2_Image_Read;
                   % Read Image fn (M,N)
p4_Noise_CalcL;
                   % Calculation Noise Level (Sigma_NE)
     % Module «p4_2_ConvL»; fc= fn * w (Sigma_w); w - Gauss Kernel
Mw2=round(Sigma_w*3); Nw2=Mw2; % Size of Half Filter Kernel
Mw=Mw2*2+1; Nw=Mw; % Size of Filter Kernel
     w=fspecial('Gaussian',Mw,Sigma w); % Filter Kernel
     p2_1_Image_Offset; % Offset fne(M,N) to fe(Me,Ne)
     fce=filter2(w,fe,'same'); % Convolution
fc=zeros(M,N);
iv=1:1:M;
            kv=1:1:N;
fc(iv,kv)=fce(iv+Mw2,kv+Nw2);
     % Module «p4_Noise_CalcL»
Sigma_w=1.75;
QTh1=20;
Delta Sigma h1=0.0004;
kTh=0.995;
     fne=fn;
           p4_2_ConvL; % Convolution, fc= fne * w (Sigma_w)
     gc=fc;
     fh=fn-gc;
     fd=abs(fh);
     fne=fd;
           p4_2_ConvL; % Convolution, fc= fne * w (Sigma_w)
     fdc=fc;
```

```
mTh=zeros(0);
mSigma_h=zeros(0);
     Rq1=fh.*fh;
     Rq_fh=sum(sum(Rq1));
     Sigma_h=sqrt(Rq_fh/(M*N));
for nTh=1:1:QTh1
     Th=Sigma_h*kTh;
     if nTh>1
           Th=mSigma_h(nTh-1)*kTh;
     end:
     fROI=zeros(M,N);
for i=1:1:M
 for k=1:1:N
  if (fdc(i,k))<Th
    fROI(i,k)=1; % ROI (Region Of Interest)
  end;
 end; % k
end; % i
     A_ROIa=sum(sum(fROI));
     A_ROI=A_ROIa/(M*N);
     Rq1=fh.*fh;
     Rq1=Rq1.*fROI;
     Rq_fh=sum(sum(Rq1));
     Sigma_h=sqrt(Rq_fh/A_ROIa);
if nTh>1
 if abs(Sigma_h-mSigma_h(nTh-1))<Delta_Sigma_h1
     break;
 end:
end; % nTh>1
     mTh(nTh)=Th;
     mSigma_h(nTh)=Sigma_h;
end; % nTh
     OTh=nTh;
     Sigma_hs=mSigma_h(nTh);
kSigma_h=1.018;
```

Sigma\_NE=((Sigma\_hs)^kSigma\_h); % Noise Level

# Д2. Фрагмент лістингу комп'ютерної програми "Видалення гаусового шуму на зображеннях фільтром Гауса" ("GNoiseFilter18") [67]

% Середовище розроблення програми – Matlab

% Main Module « GNoiseFilter18»

p2\_1\_Image\_Read; % Read Image fn (M,N)

p2\_2\_Noise\_Calc; % Calculation Noise Level (Sigma\_NE)

p6\_1\_Create\_FFT; % Fast Fourier Transform; F=FFT(fn); Ps=|F|^2

p6\_2\_Create\_PR; % Calculation vSE, TSE

p6\_3\_Moment; % Calculation ECE, ASE

p6\_4\_Sigma\_wR; % Calculation Sigma\_wRE (Sigma\_NE, TSE, ECE, ASE)

% Module «p6\_2\_Create\_PR» NR\_min=2; NR= round(N/2)+1; PR=zeros(0); PRP=zeros(0); for d=1:1:NR PR(d)=0; PRP(d)=0; end;

```
for m=1:1:M
 for n=1:1:N
  d_mnr=sqrt((m-MC).^{2}+(n-NC).^{2}+1; % distance
   d_mn=round(d_mnr);
  if (d_mn<=NR) & (d_mn>0)
   PR(d_mn)=PR(d_mn)+Ps(m,n); % Radial distribution of Ps
   PRP(d_mn) = PRP(dm_n) + 1;
  end:
end; % n
end; % m
for d=1:1:NR
 if PRP(d) > 0
   PR(d)=double(PR(d)./PRP(d));
 end:
end: % d
    PRN=zeros(0);
```

```
for d=1:1:NR
     PRN(d)=double(sqrt(PR(d))./sqrt(M.*N));
 end; % d
     vCR=0; sum_PR=0;
for d=NR_min:1:NR_max
  vCR=vCR+PR(d).*(d-1);
  sum PR=sum PR+abs(PR(d));
end; % d
if sum_PR>0
  vCR=vCR./sum_PR;
 end:
     vCR=vCR./N; % Mean Radial Frequency
     TCR=1./vCR; % Mean Radial Period
     vCRN=0;
     sum PRN=0;
for d=NR_min:1:NR_max
  vCRN=vCRN+PRN(d).*(d-1);
  sum_PRN=sum_PRN+abs(PRN(d));
end: % d
if sum PRN>0
  vCRN=vCRN./sum_PRN;
 end:
 vCRN=vCRN./N; % Mean Radial Frequency of PRN
 TCRN=1./vCRN: % Mean Radial Period of PRN
vSE1=vCRN+(vCRN-vCR0);
TSE1=1./vSE1;
 kNE1=(2.5.*((Sigma_NE/0.08).^0.12));
 kNE0=0; DeltaNE=1.0; mkNE=0.17; kCNE=100;
kNE2=kNE0+(DeltaNE/(1+exp(-(Sigma_NE-mkNE).*kCNE)));
kNE2=kNE2.*1000./(TSE1.^2);
  vSE=vCRN+(vCRN-vCR0)*(kNE1+kNE2);
  TSE=1./vSE; % TSE - Mean Period (signal)
     % Module «p6_3_Moment»
Mwm=M; Nwm=N; % Image Size
fnm=Ps; fnm=sqrt(fnm)./sqrt(M.*N); sum_fnm=sum(sum(fnm));
     ic=0;
```

```
for i=1:1:Mwm
 for k=1:1:Nwm
  ic=ic+fnm(i,k).*i;
end; % k
end; % i
if sum_fnm>0
  ic=ic./sum_fnm; % center (i)
end;
     kc=0;
for i=1:1:Mwm
 for k=1:1:Nwm
  kc=kc+fnm(i,k).*k;
end; % k
end; % i
if sum_fnm>0
  kc=kc./sum_fnm; % center (k)
end;
     mu11=0;
for i=1:1:Mwm
 for k=1:1:Nwm
  mu11=mu11+fnm(i,k).*(i-ic).*(k-kc);
end; % k
end; % i
if sum fnm>0
  mu11=mu11./sum_fnm; % Moment 11
end;
     mu20=0;
for i=1:1:Mwm
 for k=1:1:Nwm
  mu20=mu20+fnm(i,k).*(k-kc).*(k-kc);
 end; % k
end; % i
if sum fnm>0
  mu20=mu20./sum_fnm;
end;
     mu02=0;
```

```
for i=1:1:Mwm

for k=1:1:Nwm

mu02=mu02+fnm(i,k).*(i-ic).*(i-ic);

end; % k

end; % i

if sum_fnm>0

mu02=mu02./sum_fnm;

end;

ECE=((mu20-mu02).^2)+4.*((mu11).^2);

EC2=(mu20+mu02).^2;

if EC2>0

ECE=ECE./EC2; % Eccentricity

end;

ASE=Sigma_S*4*(1-ECE)+Sigma_S*2*sqrt(2)*ECE; % Signal (sin) Amplitude
```

```
% Module «p6_4_Sigma_wR»
Sigma_w_Min=0.0; Sigma_w_Max=8.0;
LSigma_w_Min=log2(Sigma_w_Min+1);
LSigma_w_Max=log2(Sigma_w_Max+1); LSigma_w_Step=0.1;
Qns=round((LSigma_w_Max-LSigma_w_Min)/LSigma_w_Step)+1;
mSigma_w=zeros(0);
mkNw=zeros(0);
```

```
for ns=1:1:Qns
```

```
LSigma_w=LSigma_w_Min+LSigma_w_Step*(ns-1);

Sigma_w=pow2(LSigma_w)-1;

Mw2=round(Sigma_w*3); Mw=(Mw2*2+1);

w=fspecial('Gaussian',Mw,Sigma_w); % Filter Kernel

kNw=sqrt(sum(sum(w.*w))); mkNw(ns)=kNw;

end; % ns

mRNw=mkNw.*Sigma_NE;

% Calculation mRSw - RMSE for signal (Sigma_w)

mRwE=sqrt(mRNw.^2+mRSw.^2);
```

```
% Calculate optimal Sigma_wRE - min (mRwE)
```

# ДЗ. Фрагмент лістингу комп'ютерної програми "Налаштування параметру "Яскравість" цифрової відеокамери" ("VideoParameter18") [68]

```
% Середовище розроблення програми – Matlab
     % Main Module «VideoParameter18»
p7 Cam Series;
                  % Fit VideoCam Parameter
p7_4_VideoMax; % Set VideoCam Parameter (Max RSNRA or RSNRL)
     % Module «p7 Cam Series»
for ni=1:1:qImage
           p7_3_VideoP; % Set Brightness (ni), read Image fn(M,N) from
     VideoCam
         p7_4_Noise_Calc; % Calculation Noise Level (Sigma_NE)
     sum_fn=sum(sum(fn));
     a fn=sum fn./(M.*N);
     fn1=fn-a_fn;
     fn1=fn1.*fn1;
     sum_fn1=sum(sum(fn1));
     Sigma_S0=sqrt(sum_fn1/(M.*N)); % Standard Deviation (signal +
noise)
     Sigma_S=sqrt(Sigma_S0.^2-Sigma_NE.^2); % Standard Deviation (signal)
     SNR=(Sigma_S.^2)/(Sigma_NE1.^2); % signal-to-noise ratio
           Th SH=0.95; % threshold of brightness
           Asg=0;
for i=1:1:M
 for k=1:1:N
  if (fn(i,k))<Th_SH
   Asg=Asg+1;
  end;
 end; % k
end; % i
     Asg=Asg/(M.*N);
     RSNR=sqrt(SNR);
   RSNRA=RSNR.*Asg;
           Th_Min=30/255;
           Th_Max=225/255;
```

```
sum_fn1=0;
for i=1:1:M
 for k=1:1:N
  if (fn(i,k)>Th_Min)
   if (fn(i,k)<Th_Max)
    r1=(fn(i,k)-a_fn); sum_fn1=sum_fn1+r1.^2;
   end;
  end;
 end; % k
end; % i
 Sigma_S0L=0;
if QP>0
Sigma_SOL=sqrt(sum_fn1/(QP));
end;
Sigma_SL=sqrt(Sigma_S0L.^2-Sigma_NE.^2); % Standard Deviation of signal
(with Limit)
  SNRL=(Sigma_SL.^2)/(Sigma_NE1.^2); % signal-to-noise ratio
  RSNRL=sqrt(SNRL);
end; % ni
```

# Додаток Е

# Характеристики запропонованих методів

Таблиця Е.1 – Задачі та характеристики запропонованих методів, призначених для підвищення візуальної якості зображень у КОЕС

		Запропоновані методи (ЗМ)	Методи- аналоги (МА)	Характеристики ЗМ	
N⁰	Задача			порівняно з МА	
п/п				Точність	Швид-
					кодія
1		LLROI		КСКП $\sigma_{NE} \downarrow$	$\approx$
		(заснований на	ICAI	на 8 %	
	Обчислення	низькочастотній	Статистичний	КСКП $\sigma_{NE} \downarrow$	$\approx$
	рівня	фільтрації)	метод	в 5.6 разів	
	гаусового	HLROI	ΡΟΑΡ	КСКП $\sigma_{NE} \downarrow$	$\approx$
	шуму (σ <sub>NE</sub> )	(заснований на	ICAI	на 30 %	
		високочастотній	Статистичний	КСКП $\sigma_{NE} \downarrow$	$\approx$
		фільтрації)	метод	в 7.0 разів	
2			Оптимальна		$\approx$
			фільтрація з	ПВСШ ↓ на	
		Автоматична	ядром фільтра	0.14 дБ	
	Зменшення	фільтрація з	Гауса		
	рівня шуму	ядром фільтра	Онлайн-сервіс	ПВСШ ↑ на	$\approx$
		Гауса	«IMGonline»	0.65 дБ	
			Білатеральна	N	↑ y
			фільтрація		2 рази
	Оптимізація	Адаптивна зміна параметрів «Яскравість» та «Контраст»	За	ВСШ ↑на	
3			замовчуванням	~6-14 дБ	
			У ручному	11	↑ на
	параметрів		режимі	.~	порядок
	відеокамер		На основі $\sigma_{NE}$ ,	BCIII ↑ ня	$\approx$
			обчисленим		
			методом РСАР	т.т др	

#### Додаток Ж

#### Акти впровадження результатів дисертації

Україна, ТОВ «Юкон-Софтваре» 58000, м. Чернівці, завулок Б. Хмельницького, 3-а Тел./факс: +38 0372-559719 E-mail: inform@yukon.cv.ua http://www.yukon.cv.ua

"ЗАТВЕРДЖУЮ" Директор юкон-ТОВ «Юкон-Софтваре» АРЕ Uluel М. Р. Шкурей 2018 p.

#### АКТ

## впровадження результатів дисертаційної роботи Одайської Христини Савеліївни "Методи видалення гаусового шуму на зображеннях у комп'ютеризованих оптико-електронних системах", що представлена до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Комісія у складі : Шкурея Михайла Радувича, Мазурка Сергія Васильовича, Бартківа Андрія Ярославовича склала акт про те, що результати дисертаційної роботи асистента кафедри комп'ютерних систем та мереж Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича Одайської Х.С. впроваджені для автоматичної фільтрації зображень і підвищення їх візуальної якості в системах відеоспостереження, які використовуються в ТОВ «Юкон-Софтваре».

Розроблені Одайською Х.С. методи та програмні засоби дозволили автоматично налаштувати параметри «Яскравість» і «Контраст» цифрових відеокамер, а також виконувати квазіоптимальну автоматичну фільтрацію гаусового шуму на цифрових зображеннях. Це дозволило підвищити візуальну яскравість зображень, отриманих в системах відеоспостереження, а також зменшити трудомісткість фільтрації шуму на зображеннях.

Даний акт не є підставою для отримання будь-якої винагороди й складений для представлення в спеціалізовану вчену раду в зв'язку із захистом дисертації Одайською Х.С.

Директор ТОВ «Юкон-Софтваре»

Шкурей М.Р.

Головний інженер

Керівник проектів

Мазурок С.В.

Бартків А.Я.

"ЗАТВЕРДЖУЮ" Ректор Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, доктор фіз.-мат. наук, професор *Пощу* Р. І. Петришин "<u>3</u>" <u>березня</u> 2020 р.

#### АКТ

# про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи Одайської Христини Савеліївни, що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Комісія Чернівецького національного університету в складі директора інституту фізико-технічних та комп'ютерних Чернівецького наук національного університету імені Юрія Федьковича, академіка АН ВШ України, доктора фіз.-мат. наук, професора Ангельського О. В., завідувача відділу комп'ютерних технологій, канд. фіз.-мат. наук, доцента Бесаги Р.М., завідувача кафедри комп'ютерних систем та мереж, канд. фіз.-мат. наук, доцента Воробця Г. I. склали цей акт в тому, що результати дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня кандидата технічних наук Одайської Х.С., яка присвячена методам та програмно-апаратним засобам підвищення якості зображень у комп'ютерних системах на базі відеокамер, впроваджені в навчальний процес на кафедрі комп'ютерних систем та мереж, зокрема, в дисциплінах «Пристрої зв'язку з об'єктом» і «Комп'ютерні системи».

При викладанні дисципліни «Пристрої зв'язку з об'єктом» використано такі результати досліджень автора: 1) метод визначення рівня шуму на зображеннях (описаний у розділі «2 Теоретичні основи для побудови комп'ютерних систем підвищення якості зображень») застосовується при вивченні способів обчислення рівня шуму для сигналів, отриманих за допомогою фоточутливих сенсорів; 2) засоби фільтрації шуму на зображеннях (описані в розділі «З Практична реалізація методів і засобів зниження рівня шуму зображень у комп'ютерній системі») застосовуються для фільтрації шуму на сигналах фоточутливих сенсорів.

При викладанні дисципліни «Комп'ютерні системи» використано такі результати досліджень автора: 1) розроблення апаратно-програмних засобів комп'ютерних оптико-електронних систем (описаний у розділі «4 Комп'ютерні системи для оптимізації параметрів цифрових відеокамер») використовується при вивчені методів синтезу комп'ютерних та комп'ютеризованих систем.

Використання зазначених результатів дозволило підвищити якість навчального процесу із згаданих дисциплін.

Запропоновані в дисертаційній роботі методи та засоби використані при виконанні бакалаврських і магістерських робіт зі спеціальності «Комп'ютерна інженерія».

Акт складений для представлення в спеціалізовану вчену раду в зв'язку із захистом дисертації Одайською Х.С.

Г.І. Воробець Р.М. Бесага О.В. Ангельський