

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ОДАЙСЬКА ХРИСТИНА САВЕЛІВНА

УДК 004.921; 004.932.4; 621.391.8; 621.397.42

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

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2020

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.
Робота виконана на кафедрі комп'ютерних систем та мереж у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича МОН України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Баловсяк Сергій Васильович,
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича,
доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Березький Олег Миколайович,
Тернопільський національний економічний
університет,
завідувач кафедри комп'ютерної інженерії

доктор технічних наук, професор
Мартинюк Тетяна Борисівна,
Вінницький національний технічний університет,
професор кафедри обчислювальної техніки

Захист відбудеться ” 16 ” жовтня 2020 р. о 12:30 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ауд. 210 ГНК.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий « 10 » вересня _____ 2020 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

С. М. Захарченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Комп'ютеризовані оптико-електронні системи (КОЕС) широко використовуються для формування та оброблення цифрових зображень у різних галузях науки, техніки та медицини. Джерелом початкових зображень для таких КОЕС у більшості випадків є цифрові відеокамери. Висока якість формування зображень необхідна для їх коректного оброблення в комп'ютерних системах (КС), наприклад, у КС медичної та технічної діагностики, КС розпізнавання облич. Тому важливим етапом оброблення зображень у КОЕС є підвищення їх візуальної якості, яка кількісно описується, зокрема, співвідношенням сигнал/шум (ВСШ). Підвищення якості зображень виконується, наприклад, шляхом зниження рівня шуму та налаштування параметрів відеокамер.

Завдання підвищення якості зображень шляхом фільтрації шуму є важливим для практики. Проте, існуючі методи та апаратно-програмні засоби визначення рівня шуму мають обмежену точність і швидкодію, які є недостатніми для багатьох практичних задач цифрового оброблення зображень у КОЕС (особливо в режимі реального часу). Крім цього, сучасні методи фільтрації зображень у КОЕС у загальному випадку забезпечують ВСШ, яке менше за теоретично можливе. З цієї причини завдання вдосконалення методів і засобів зниження рівня шуму на зображеннях є актуальним. Процес апаратного оброблення зображень у КОЕС регулюється такими параметрами відеокамер, як «Яскравість», «Контраст» та ін., які в значній мірі впливають на якість отриманих зображень. Проте, параметри відеокамер, які встановлюються за замовчуванням, звичайно не забезпечують максимальну якість зображень.

Отже, розроблення високоточних і швидкодійних програмно-апаратних засобів КОЕС, призначених для підвищення візуальної якості зображень шляхом зниження їх рівня шуму й адаптивної зміни параметрів відеокамер, є актуальним завданням із 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 з планом 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).

У вищевказаних темах дисертант брала участь як виконавець. 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 Еразмус Мундус EUROEAST (Erasmus Mundus EUROEAST).

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.
2. 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.
3. Розробити математичну модель, методи та програмно-апаратні засоби комп'ютеризованих систем для оцінки якості зображень з урахуванням їх рівня шуму, виконати дослідження запропонованих методів.
4. 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.

Наукова новизна отриманих результатів роботи полягає в наступному.

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 врахуванням 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:

- програмне забезпечення в системі Matlab для визначення рівня шуму, яке забезпечує вищу точність оцінки якості зображень, ніж для програм-аналогів;
- програмні засоби в системі Matlab 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, тощо;
- апаратні засоби на основі ПЛІС для цифрової фільтрації зображень, отриманих за допомогою відеокамер, що забезпечило на порядок вищу швидкодію оброблення зображень;
- 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 відеокамер в ІТ-компанії.

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. У роботах, які опубліковані у співавторстві, здобувачу належить: [2], [8] – аналіз методів фільтрації шуму на цифрових зображеннях; [1], [3], [4], [6], [7], [13] – розроблення та програмна реалізація методів обчислення рівня шуму; [2], [5], [9], [10], [15] – розроблення методу обчислення параметрів фільтра Гауса та створення на його основі програмного забезпечення для фільтрації шуму на зображеннях, [5], [12], [14] – створення апаратно-програмних засобів для адаптивної зміни параметрів відеокамер, [2], [3], [11] – тестування розроблених засобів при підвищенні якості зображень, [16], [17], [18] – програмна реалізація методів обчислення рівня та фільтрації шуму, метода 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:

1. 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 «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.

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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми досліджень, сформульовані мета й основні завдання досліджень, вказані наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, наведені дані про апробацію та структуру роботи, особистий внесок автора та публікації.

У першому розділі проведено аналіз методів і засобів підвищення візуальної якості формування зображень у комп'ютеризованих системах, які як джерело початкових зображень використовують відеокамери. Кількісно якість зображень описується, зокрема, їх ВСШ. Окреслено місце етапу підвищення якості зображень у загальному процесі оброблення зображень у КОЕС.

Формування цифрових зображень у КОЕС виконується за допомогою оптичного вузла та фоточутливої матриці, також виконується апаратне оброблення в аналоговому та цифровому блоках і програмне оброблення в комп'ютері. Сумарний вплив шумів зображення відповідає моделі гаусового шуму, рівень якого описується середнім квадратичним відхиленням (СКВ) σ_N . Як фоточутливі матриці звичайно використовуються прилади із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) або матриці комплементарних приймачів метал-оксид-напівпровідник (КМОН). Показано, що підвищення якості зображень доцільно виконувати за рахунок адаптивної зміни параметрів відеокамер (зокрема, параметрів «Яскравість» і «Контраст»), а також шляхом фільтрації зображень.

Проаналізовано існуючі методи обчислення рівня шуму на зображеннях і показано, що їх точність і швидкодія є недостатніми для багатьох практичних задач цифрового оброблення зображень. 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 ROI (Region Of Interest), а швидкодію доцільно підвищити шляхом апаратної реалізації методу засобами ПЛІС.

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.

На основі проведеного аналізу сформульовано мету та завдання досліджень.

У другому розділі розглянуто теоретичні основи для побудови комп'ютеризованих систем підвищення візуальної якості зображень. Запропоновано архітектуру КОЕС для підвищення якості формування 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.

Розроблено математичну модель процесу фільтрації зображень, сформованих у фоточутливих матрицях відеокамер. Шум таких зображень досить точно описується моделлю гаусового шуму. Фільтрація зображення $f_n = (f_n(i, k))$, де $i = 1, \dots, M$, $k = 1, \dots, N$, виконується шляхом його згортання з ядром w фільтра Гауса, яке описується СКВ σ_w . Отримано, що СКВ гаусового шуму σ_{NC} на фільтрованому зображенні $g = f_n * w$ обчислюється за формулою

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

де σ_N – СКВ гаусового шуму на початковому зображенні f_n .

Залежність (1) вірна тільки для тих ділянок зображення, на яких переважає шум, тому вона використана для виділення ділянок інтересу ROI.

Розроблено метод визначення рівня гаусового шуму на цифрових зображеннях, а саме метод LLROI (Low-pass & Low-pass filtration & Region Of Interest), який засновано на низькочастотній фільтрації шумової складової та низькочастотній фільтрації при виділенні ділянки ROI. Згідно з розробленим алгоритмом спочатку зчитується зображення f_n і створюється ядро w фільтра Гауса з СКВ σ_w ($\sigma_w = 1.75$). На основі f_n отримується згладжене зображення g , 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 . Для зображення f_h обчислюється СКВ σ_h його гістограми $h(z)$. Далі виконується ітеративне уточнення ROI та відповідного їй СКВ σ_h зображення f_h . Поріг T_h ділянки ROI обчислюється за отриманою формулою

$$T_h = z_C + k_{\sigma Th} \cdot \sigma_{f_{dc}}, \quad (2)$$

де $z_C = \sqrt{2/\pi} \sigma_h$ – математичне сподівання f_{dc} ; $\sigma_{f_{dc}}$ – СКВ f_{dc} ; $k_{\sigma Th} = 1.22$ – коефіцієнт порогу.

Належність пікселів зображення f_h до ділянки ROI записується в матриці f_{ROI} і визначається за таким правилом:

$$f_{ROI}(i, k) = \begin{cases} 1, & f_{dc}(i, k) \leq T_h \\ 0, & f_{dc}(i, k) > T_h \end{cases}, \quad (3)$$

де $i = 1, \dots, M$, $k = 1, \dots, N$.

Значення СКВ σ_h обчислюється з урахуванням тільки тих пікселів f_h , які належать ROI. Експериментальне значення СКВ шуму σ_{NE} обчислюється через уточнене СКВ σ_h шумової складової за формулою:

$$\sigma_{NE} = (\sigma_h)^{1.018}. \quad (4)$$

Розроблено метод визначення рівня гаусового шуму на зображеннях, а саме метод HLROI (High-pass & Low-pass filtration & Region Of Interest), який засновано на високочастотній фільтрації при виділенні шумової складової та низькочастотній фільтрації при виділенні ділянки інтересу. Основна різниця методів визначення рівня шуму полягає в тому, що метод LLROI для виділення шумової складової використовує низькочастотну фільтрацію, а метод HLROI – високочастотну шляхом згортання зображення f_n з ядром w_H фільтра Лапласа.

Розроблено метод зменшення рівня шуму зображень за допомогою фільтра Гауса, в якому використано дві спрощені моделі корисного сигналу f_S :

1. Яскравість корисного сигналу в певному напрямі описується синусоїдою з амплітудою $A_{SE}/2$ і просторовим періодом T_{SE} (модель однієї синусоїди), де A_{SE} –діапазон яскравостей корисного сигналу.
2. Яскравість корисного сигналу описується двома взаємно перпендикулярними синусоїдами з амплітудами $A_{SE}/4$ і періодами T_{SE} (модель двох синусоїд).

На основі початкового зображення f_n обчислюються частотні та просторові параметри експериментального корисного сигналу, а саме експериментальні середня просторова частота ν_{SE} , період $T_{SE} = 1/\nu_{SE}$ і діапазон значень синусоїдального сигналу A_{SE} . Спектр Фур'є F зображення f_n отримується в результаті двовірного прямого дискретного швидкого перетворення Фур'є. Енергетичний спектр P_S обчислюється як квадрат модуля центрованого спектра F . На основі P_S шляхом лінійної інтерполяції обчислюється його радіальний розподіл P_R та нормований радіальний розподіл P_{RN} за формулою:

$$P_{RN}(d) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sqrt{P_R(d)}, \quad (5)$$

де d – номер радіальної частоти; $d = 1, 2, \dots, N_R$, $N_R = [N/2]$.

На основі радіального розподілу P_R обчислюється його середня частота:

$$\nu_{CR0} = \frac{\sum_{d=N_{Rmin}}^{d=N_{Rmax}} P_R(d) \cdot \nu_R(d)}{\sum_{d=N_{Rmin}}^{d=N_{Rmax}} P_R(d)}, \quad (6)$$

де $N_{Rmin} = 2$; $N_{Rmax} = [N_R \cdot 0.65]$; $\nu_r(d) = d/N$ – радіальна просторова частота.

Аналогічно на основі розподілу P_{RN} обчислюється його середня частота ν_{CRN} . Середня просторова частота ν_{SE} корисного сигналу обчислюється за емпіричною формулою на основі ν_{CRN} та ν_{CR0} (6).

Ексцентриситет E_{CE} початкового зображення обчислюється через дискретні центральні моменти μ енергетичного спектру P_S за формулою:

$$E_{CE} = \frac{(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2}{(\mu_{20} + \mu_{02})^2}. \quad (7)$$

Отриманий ексцентриситет E_{CE} описує степінь орієнтації для розподілу яскравості зображення f_n : якщо існує чітка орієнтація – то $E_{CE} \approx 1$, якщо відсутня переважна орієнтація – то $E_{CE} \approx 0$, у проміжних випадках $E_{CE} \approx 0.5$. Тоді для довільного значення ексцентриситету E_{CE} діапазон значень синусоїдального сигналу на зображенні обчислюється за формулою:

$$A_{SE} = 4\sigma_S \cdot (1 - E_{CE}) + 2\sqrt{2}\sigma_S \cdot E_{CE}. \quad (8)$$

Експериментальне значення СКВ ядра фільтра Гауса σ_{wE} обчислюється на основі параметрів початкового зображення f_n , а саме на основі рівня шуму σ_{NE} і параметрів корисного сигналу T_{SE} , E_{CE} , A_{SE} . СКВ σ_w приймає ряд дискретних значень у діапазоні від σ_{wMin} до σ_{wMax} . Для кожного значення σ_w створюється ядро фільтра Гауса w розміром $M_w \times N_w$ елементів та обчислюються два корені середньої квадратичної похибки (КСКП):

1. R_{Nw} – КСКП шумової складової на фільтрованому зображенні g , який обчислюється за формулою:

$$R_{Nw} = \sigma_{NE} \sqrt{\sum_{m=1}^{M_w} \sum_{n=1}^{N_w} w^2(m, n)}. \quad (9)$$

2. R_{Sw} – КСКП яскравості фільтрованого зображення корисного сигналу відносно яскравості початкового корисного сигналу, який дорівнює:

$$R_{Sw} = R_{Sw1} \cdot E_{CE} + R_{Sw2} \cdot (1 - E_{CE}) . \quad (10)$$

де R_{Sw1}, R_{Sw2} – КСКП у випадку, якщо яскравість корисного сигналу описується однією або двома синусоїдами відповідно.
Сумарний КСКП корисного сигналу та шуму дорівнює:

$$R_{wE} = \sqrt{R_{Nw}^2 + R_{Sw}^2} . \quad (11)$$

На основі мінімального значення інтерпольованої залежності $R_{wE}(\sigma_w)$ знаходиться експериментальне значення СКВ σ_{wE} ядра w , шляхом згортання з яким обчислюється фільтроване зображення g .

У третьому розділі виконано практичну реалізацію методів і засобів зниження рівня шуму зображень у комп'ютеризованій системі.

На основі алгоритму запропонованого методу LLROI синтезовано структуру підсистеми визначення рівня шуму на зображеннях в КОЕС (рис. 1), а також розроблено відповідні програмно-апаратні засоби, зокрема, програмне забезпечення в системі Matlab. Згідно з структурою підсистеми визначення рівня шуму 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 модуль 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 БВРОІ 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 σ_h шумової складової на основі f_h та з врахуванням області ROI. У блоці визначення рівня шуму БВРШ через СКВ σ_h обчислюється рівень шуму σ_{NE} .

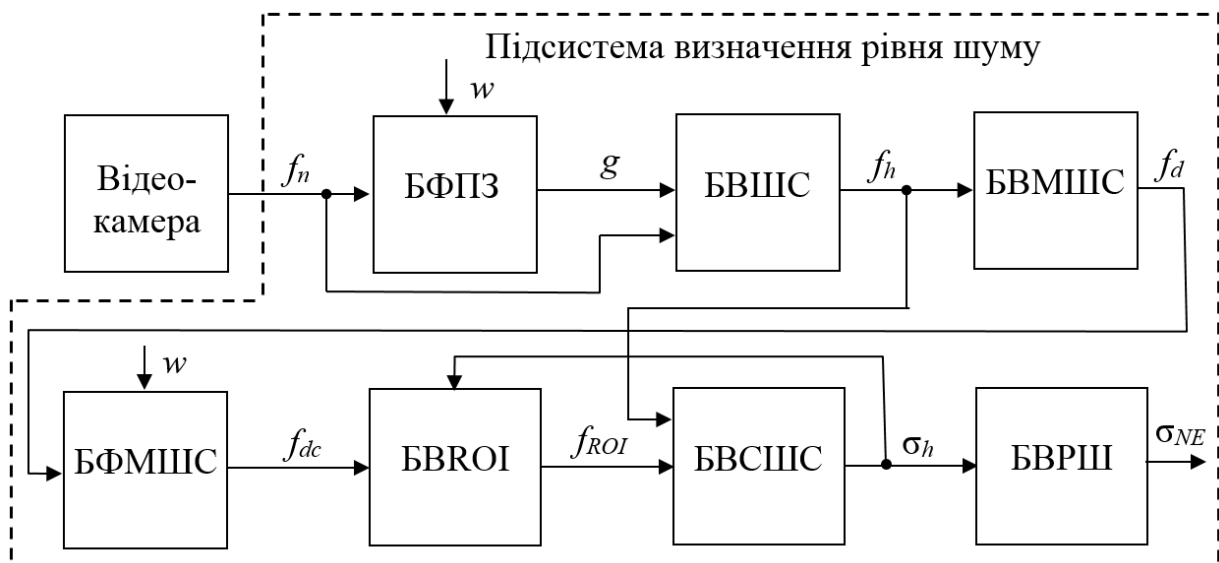


Рисунок 1 – Структура підсистеми визначення рівня шуму на зображеннях у КОЕС з використанням низькочастотної фільтрації

На основі структури підсистеми визначення рівня шуму в КОЕС (рис. 1) розроблено її Simulink-модель. Результати моделювання підтвердили коректність розробленої Simulink-моделі.

Розроблено структурні схеми блоків КОЕС визначення рівня шуму (рис. 1). Структурна схема блоку фільтрації початкового зображення БФПЗ описує операцію згортання зображення f_n з ядром фільтра w (рис. 2). Значення кожного з $M_w \times N_w$ елементів w записуються у відповідний регістр RG . Множення яскравості пікселів зображення 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 . Аналогічно розроблено структурні схеми інших блоків КОЕС.

На базі алгоритму запропонованого методу HLROI також синтезовано структуру підсистеми визначення рівня шуму на зображеннях в КОЕС, яка відрізняється від структури (рис. 1) обчисленням шумової складової з використанням ядра високочастотного фільтра w_H .

Апаратна реалізація основних блоків розроблених КОЕС виконана засобами FPGA Artix-7 фірми Xilinx (рис. 3) шляхом модифікації існуючого відкритого проекту «Gauss-filter-FPGA-for-video-processing» оброблення зображень (на мові Verilog). Програмування FPGA виконано засобами САПР Vivado Design Suite 2019.2. За допомогою FPGA реалізовано блок фільтрації початкового зображення БФПЗ (рис. 1).

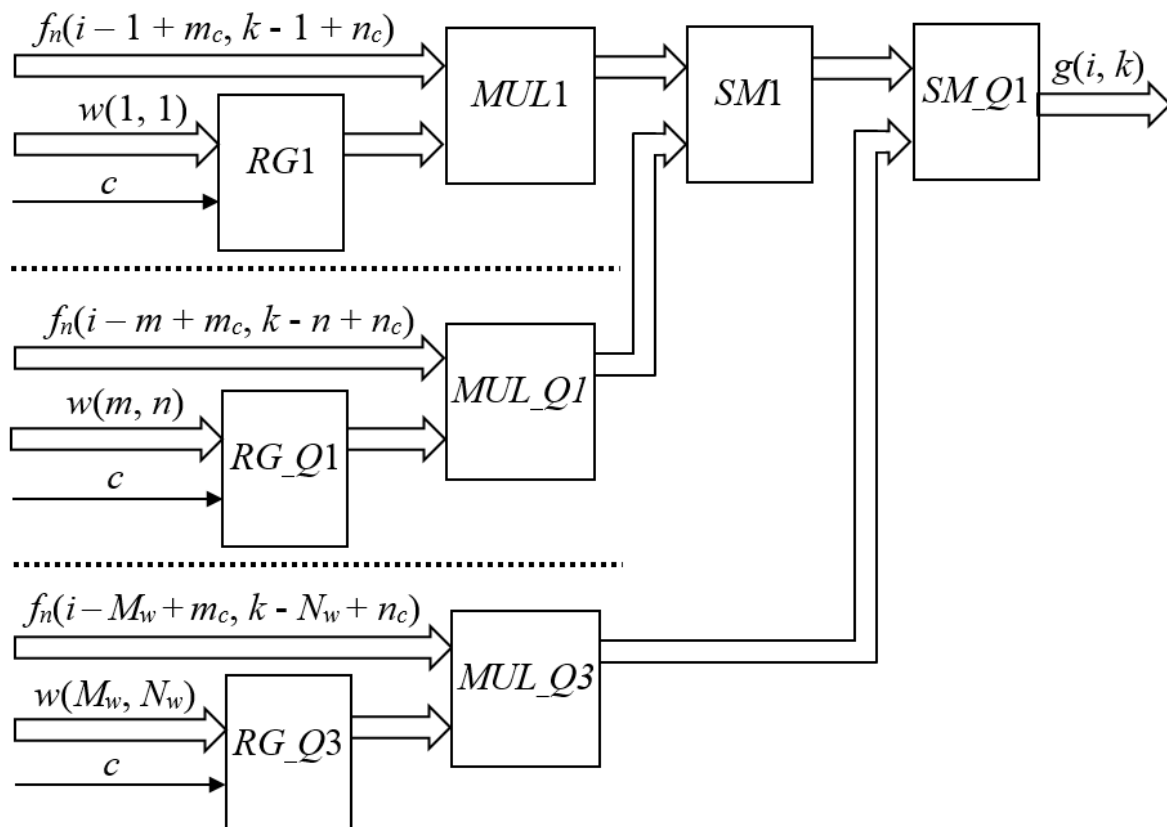


Рисунок 2 – Структурна схема блоку фільтрації початкового зображення БФПЗ (рис. 1); c – сигнал синхронізації

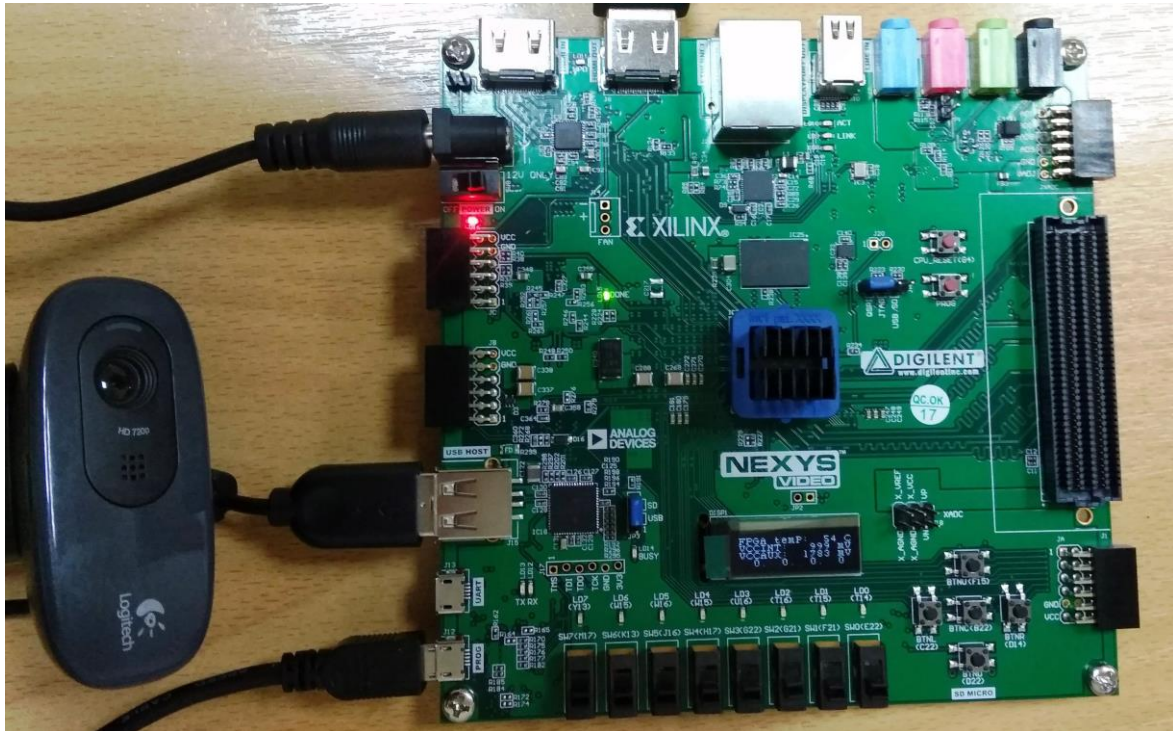


Рисунок 3 – FPGA Artix-7 фірми Xilinx під час програмування

Модифікація проекту «Gauss-filter-FPGA-for-video-processing» в основному полягала в обчисленні параметрів ядра фільтра $w(\sigma_w)$ згідно із запропонованим алгоритмом. 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.

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 (рис. 4). Згідно з структурою КОЕС після зчитування зображення f_n з відеокамери виконується його оброблення в підсистемі визначення рівня шуму. Далі в підсистемі фільтрації шуму в блоці визначення характеристик спектру зображення БВХС обчислюються енергетичний спектр P_S зображення 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 σ_{wE} та ядро w фільтра Гауса, за допомогою згортання з яким у блоці фільтрації зображення-результату БФЗР обчислюється зображення g зі зменшеним рівнем шуму. Перевагою розробленої КОЕС зменшення рівня шуму, порівняно з аналогами, є вибір параметру фільтра залежно від амплітудних і частотних параметрів зображення, в той час як у КОЕС аналога виконується оброблення при фіксованих параметрах фільтра. Розроблено також структурні схеми основних блоків КОЕС фільтрації шуму. Експериментальні дослідження розроблених методів і засобів визначення рівня шуму показали їх високу точність навіть для зображень з текстурами (рис. 5).

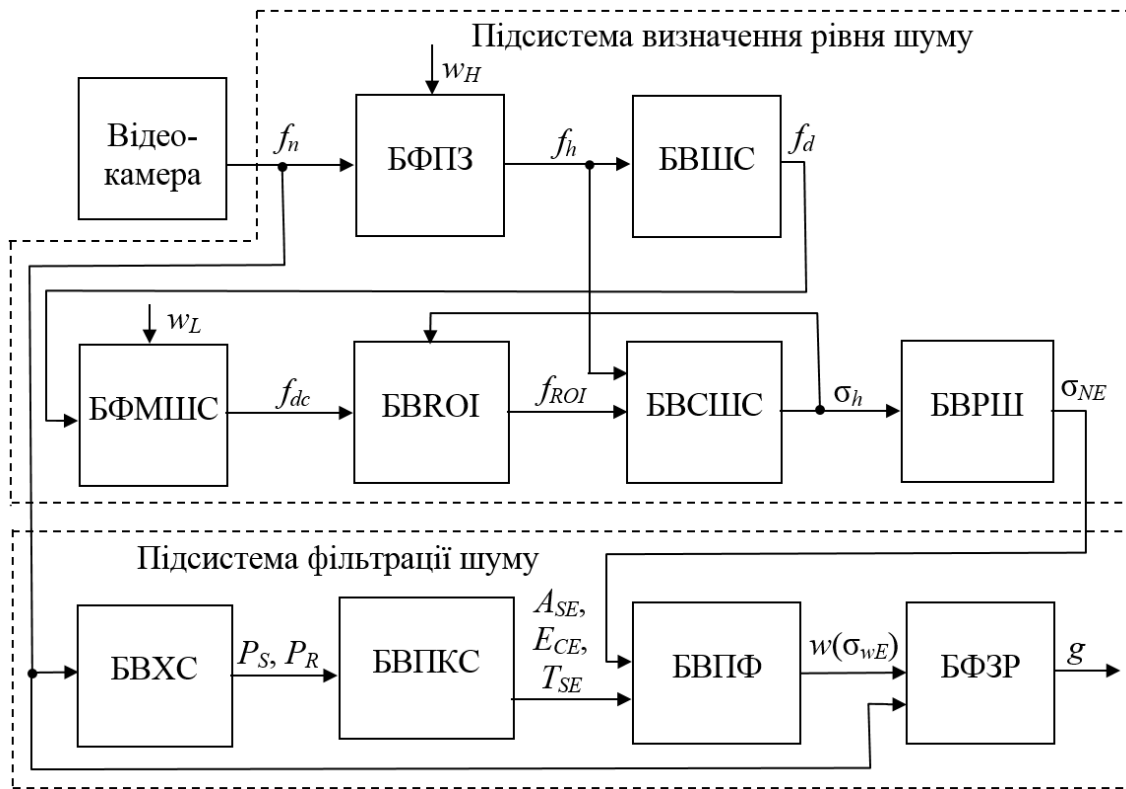


Рисунок 4 – Структура підсистем визначення рівня та фільтрації шуму на зображеннях у КОЕС за допомогою фільтра Гауса

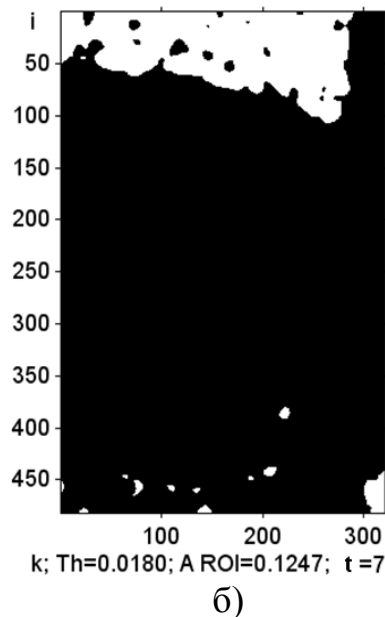
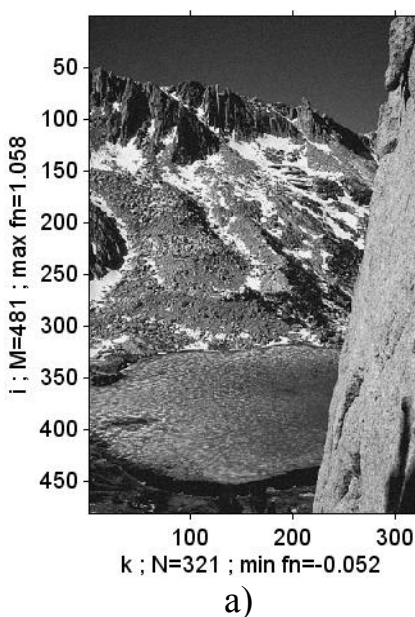


Рисунок 5 – Визначення рівня шуму методом HLROI на зображенні, до якого програмно додано гаусовий шум з теоретичним СКВ $\sigma_N = 0.02$: а) початкове зображення f_n ; б) зображення ділянки ROI для ітерації $t = 7$; експериментальний рівень шуму $\sigma_{NE} = 0.019$; A_{ROI} – відносна площа ділянки ROI

Результати визначення експериментального рівня σ_{NE} гаусового шуму для тестової множини (100 зображень) бази BSDS300 запропонованими методами (LLROI, HLROI) показують їх високу точність (табл. 1). При цьому похибка запропонованого методу HLROI (RMSE = 0.00212) на порядок менша за похибку статистичного методу (RMSE = 0.01686) і на 30 % менша за похибку методу PCAP (RMSE = 0.00277). За точністю метод HLROI незначно переважає метод LLROI.

Таблиця 1

Результати визначення експериментального СКВ σ_{NE} гаусового шуму статистичним методом, методом PCAP (методом головних компонент із селективними ділянками) та розробленими методами для тестової множини (100 зображень) бази BSDS300, до яких програмно додано гаусовий шум з теоретичним СКВ σ_N ; σ_{NEA} – середнє значення σ_{NE} ; RMSE – корінь середньої квадратичної похибки між значеннями σ_{NE} та σ_N

σ_N , 10^{-2}	Статистичний метод		PCAP		Розроблений метод LLROI		Розроблений метод HLROI	
	σ_{NEA} , 10^{-2}	R_{MSE} , 10^{-2}	σ_{NEA} , 10^{-2}	R_{MSE} , 10^{-2}	σ_{NEA} , 10^{-2}	R_{MSE} , 10^{-2}	σ_{NEA} , 10^{-2}	R_{MSE} , 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	1.610	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
1..20		1.686		0.277		0.257		0.212

Час обчислення рівня шуму розробленими методами є співрозмірним з методами-аналогами; для зображення розміром 481×321 пікселів час оброблення на комп'ютері з процесором AMD A4-6300, 3.70 ГГц складає ≈ 3 с.

Експериментальні дослідження розробленого методу та засобів фільтрації шуму на тестових зображеннях підтвердило їх високу точність (табл. 2).

Таблиця 2

Результати зменшення рівня шуму на зображеннях запропонованим методом для тестової множини (100 зображень) бази BSDS300, до яких додано гаусовий шум з теоретичним СКВ σ_N ; R_{wg} – значення КСКП між зображеннями g та f , отримані запропонованим методом; R_{wgC} – оптимальні значення КСКП між зображеннями g та f ; P_{SNRg} – ПВСШ, отримане розробленим методом;

P_{SNRgC} – оптимальне ПВСШ

σ_N , 10^{-2}	R_{wg}	R_{wgC}	P_{SNRg} , 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
1..20	0.04928	0.04848	28.934	29.072

Значення пікового співвідношення сигнал/шум (ПВСШ) P_{SNRg} , обчислені розробленим методом, менші за оптимальні значення P_{SNRgC} у середньому на незначну величину 0.138 дБ (табл. 2), тому розроблений метод фільтрації є квазіоптимальним. Швидкодія розробленого методу в середньому в 2 рази вища за швидкодію методу-аналога білатеральної фільтрації, який володіє співрозмірною точністю.

У четвертому розділі розглянуто комп'ютеризовані системи для адаптивної зміни параметрів «Яскравість» і «Контраст» цифрових відеокамер.

З метою підвищення якості зображень розроблено метод адаптивної зміни параметру «Яскравість» відеокамери, в якій результуючі значення параметрів визначаються за максимальними значеннями критеріїв якості зображень. На основі запропонованого методу розроблено алгоритм і програмно-апаратні засоби, створено програмне забезпечення в системі Matlab, синтезовано структуру підсистеми адаптивної зміни параметру «Яскравість» відеокамери (рис. 6) та її Simulink-модель, а також розроблено структурні схеми блоків підсистеми.

Підсистема адаптивної зміни параметру «Яскравість» відеокамери в КОЕС використовується в комплексі з підсистемою визначення рівня шуму (рис. 6). Джерелом початкового відеосигналу f_M у КОЕС є фоточутлива матриця, а адаптивна зміна параметру «Яскравість» виконується у блоках підсистеми. Аналогове оброблення відеосигналу f_A (зокрема, зміна його яскравості) 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 . Для кожного значення параметру B_r «Яскравість» відеокамери отримується зображення f_n , обчислюються його рівень шуму σ_{NE} і СКВ сигналу σ_s , а також ВСШ та критерій якості зображення K_V .

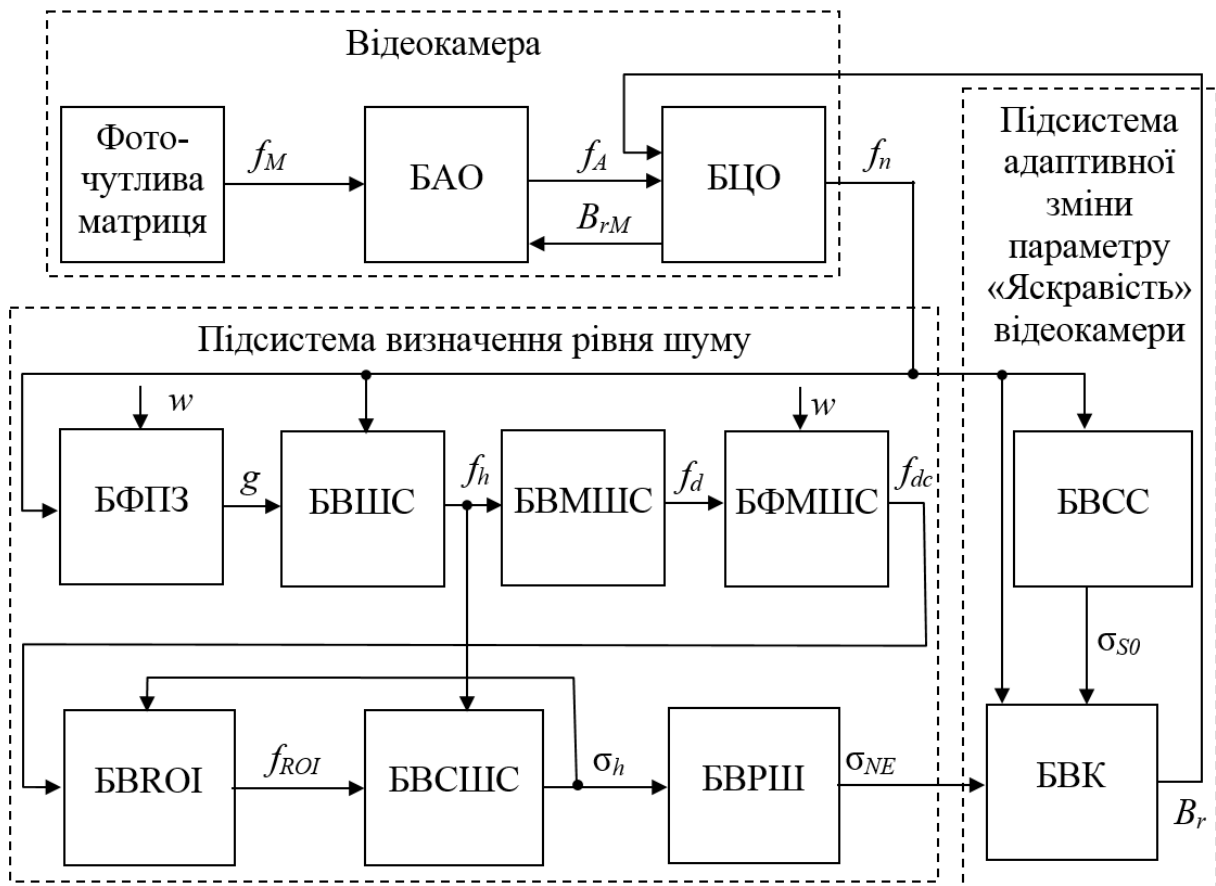


Рисунок 6 – Структура підсистем визначення рівня шуму та адаптивної зміни параметру B_r «Яскравість» відеокамери в КОЕС: f_M – відеосигнал на виході фоточутливої матриці, f_A – аналоговий відеосигнал на виході БАО

Адаптивна зміна параметру B_r «Яскравість» передбачає, що інші параметри відеокамери (контраст «Contrast», експозиція «Exposure», насиченість «Saturation» та ін.) залишаються незмінними. У процесі налагодження 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. 6). Згідно із запропонованим алгоритмом значення параметру B_r «Яскравість» відеокамери змінюються в допустимому діапазоні з певним кроком. Для кожного значення яскравості B_r визначається експериментальний рівень шуму σ_{NE} на зображенні f_n , а також співвідношення сигнал шум, яке обчислюється за формулою

$$S_{NR} = \frac{\sigma_S^2}{\sigma_{NE}^2} = \frac{\sigma_{S0}^2 - \sigma_{NE}^2}{\sigma_{NE}^2}, \quad (12)$$

де σ_{S0} – СКВ початкового зображення f_n ;
 σ_S – СКВ корисного сигналу; σ_{NE} – СКВ шуму.

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

$$R_A = \sqrt{S_{NR} \cdot A_{ST}}, \quad (13)$$

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).

Параметр R_A (13) 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. Тому для зменшення ефекту кліпірування як критерій K_V якості зображення використано параметр R_L , який обчислюється на основі (12) з урахуванням тільки для тих пікселів, яскравість яких знаходиться в межах допустимого діапазону $[z_{LMin}, z_{LMax}]$, за формулою

$$R_L = \sqrt{\frac{\sigma_{S0}^2(z_{LMin}, z_{LMax}) - \sigma_{NE}^2}{\sigma_{NE}^2}} = \frac{\sigma_{SL}}{\sigma_{NE}}, \quad (14)$$

де σ_{NE} – СКВ шуму;
 $\sigma_{S0}(z_{LMin}, z_{LMax})$ – СКВ початкового зображення f_n з урахуванням тільки тих пікселів, яскравість z яких знаходиться в допустимому діапазоні $[z_{LMin}, z_{LMax}]$;
 σ_{SL} – СКВ корисного сигналу для пікселів з яскравістю $z_{LMin} \leq z \leq z_{LMax}$.

Зміною параметру B_r «Яскравість» реалізується зворотний зв'язок між КОЕС і відеокамерою (рис. 6), тому результуюче значення параметру «Яскравість» визначається за максимальним значенням критерію K_V .

Обчислення СКВ σ_{NE} шуму виконується у блоках підсистеми визначення рівня шуму (рис. 6). У блоці визначення СКВ сигналу БВСС обчислюється СКВ σ_{S0} початкового зображення f_n , а у блоці визначення критерію якості БВК отримується критерій якості зображення K_V і формується значення параметру B_r «Яскравість» відеокамери. Структурна схема блоку БВСС описує операцію обчислення СКВ σ_{S0} на основі початкового зображення f_n (рис. 7). За допомогою

комбінаційних суматорів $SM1$ - SM_{Q1} обчислюється сума $\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N f_n(i, k)$

яскравостей зображення f_n , яка в операційному блоці $DIV1$ ділення 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 у 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 обчислюється за допомогою комбінаційних суматорів SM_{Q5} - SM_{Q6} . Шляхом ділення отриманої суми на кількість пікселів $Q_{MN}=M \times N$ в блоці ділення $DIV2$ та обчислення кореня у блоці розрахунку кореня квадратного $BRK1$ визначається СКВ сигналу σ_{S0} .

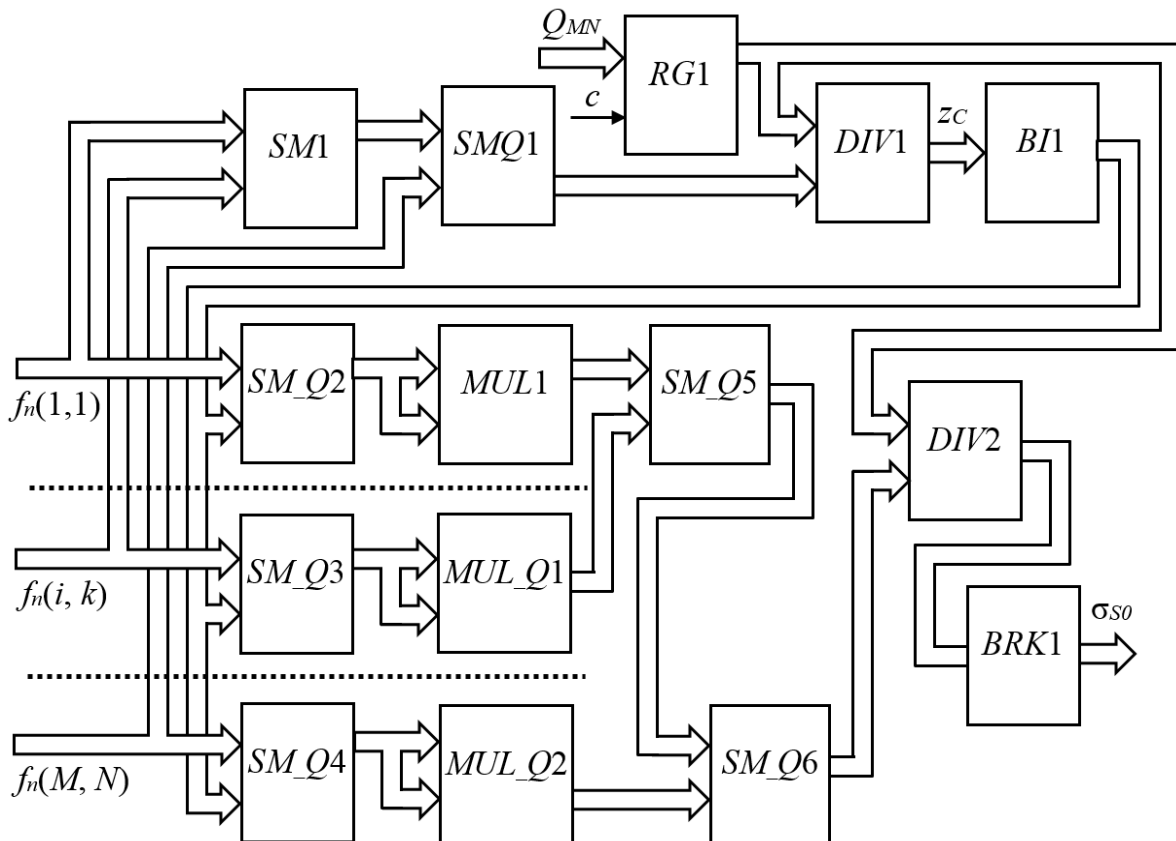


Рисунок 7 – Структурна схема блоку визначення СКВ сигналу БВСС (рис. 6);
 c – сигнал синхронізації

З метою підвищення якості зображень розроблено метод для адаптивної зміни параметру C_t «Контраст» цифрової відеокамери в КОЕС (аналогічно, як для адаптивної зміни параметру «Яскравість»). 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». Параметр C_t приймає Q_C дискретних значень, які змінюються в межах від C_{tMin} до C_{tMax} із заданим кроком (рис. 8). Результуюче значення значення параметру «Контраст» визначається за максимальним значенням критерію K_V .

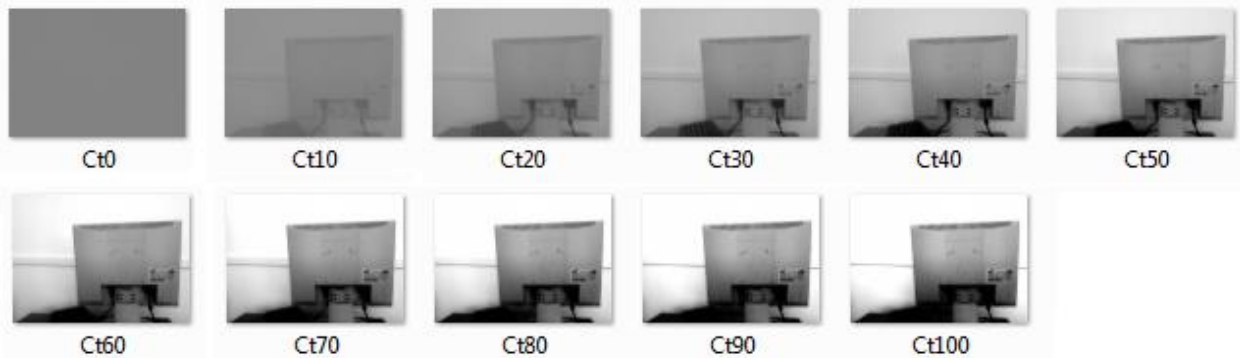


Рисунок 8 – Серія зображень (розміром 320×240 пікселів), отриманих за допомогою веб-камери «Toshiba Satellite Pro»; результуюче значення параметру C_t «Контраст» згідно з критеріями R_L та R_A , а також із суб'єктивним критерієм візуальної якості зображення, дорівнює 30

Точність методів перевірено при налаштуванні трьох моделей відеокамер. При цьому значення результатів, отриманих за критеріями якості зображення R_A та R_L , у більшості випадків збігаються (табл. 3, рис. 9).

Таблиця 3

Параметри серії зображень, отримані за допомогою веб-камери «Toshiba Satellite Pro» (рис. 8); значення параметру «Контраст» (C_t) за замовчуванням дорівнює 50; результуючі значення параметру «Контраст» дорівнюють 30; n_c – номер значення параметру C_t

n_c	C_t	$\sigma_{NE}, 10^{-2}$	σ_S	σ_{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

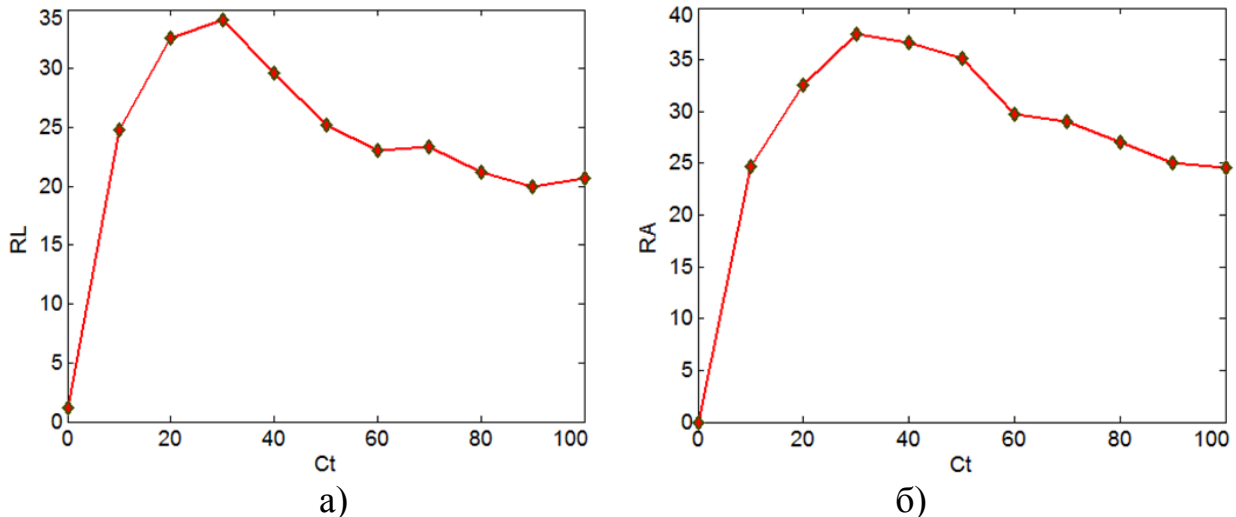


Рисунок 9 – Значення критеріїв якості зображень R_L (а) та R_A (б) у залежності від параметру «Контраст» (C_t) відеокамери (табл. 3)

Дослідження показали, що якщо значення результатів запропонованих методів (значення параметрів «Яскравість» або «Контраст» відеокамери, отриманих за максимумами критеріїв якості зображення R_A та R_L) відрізняються, то середнє значення результатів забезпечує краще узгодження з суб'єктивним критерієм візуальної якості зображення, 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.

Середній час адаптивної зміни параметрів «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 складає ≈ 12 с, що на порядок менше у порівнянні з налаштуванням у ручному режимі.

Для підвищення швидкодії оброблення зображень розроблено метод та програмні засоби для визначення рівня шуму з використанням паралельних обчислень. Паралельне визначення рівня шуму виконано за допомогою комп'ютерного кластера, як вузли якого використано ядра центрального процесора. Обчислення рівня шуму полягало в поділі початкового зображення на фрагменти й обробленні кожного фрагменту (тайлу) за допомогою окремого вузла кластера. Оброблення фрагментів зображення виконано запропонованими методами LLROI та HLROI, призначеними для визначення рівня шуму. Реалізована комп'ютерна система обчислення рівня шуму за класифікацією Фліна є комп'ютерною системою з одиничним потоком команд і множинним потоком даних (Single Instruction, Multiple Data – SIMD).

Паралельне обчислення рівня шуму програмно реалізовано засобами Matlab. Новизна методу полягає в тому, що для зменшення крайових ефектів виконано розширення зображень перед їх згортанням.

З метою підвищення швидкодії фільтрації зображень запропоновано застосувати відеокарту Nvidia Tesla K20 з архітектурою Kepler і розроблено рекомендації по використанню GPU для оброблення зображень.

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 комп'ютеризованих систем 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 оброблених зображеннях.

2. Підсистему визначення рівня шуму σ_{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 MATLAB, 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 σ_{NE} дорівнює ≈ 0.002 , що на 30% менше, ніж для найкращого методу-аналогу PCAP. 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 фільтрації шуму на зображеннях за допомогою фільтра Гауса, особливістю якого є обчислення усереднених амплітудних і частотних параметрів корисного сигналу з використанням енергетичного спектру 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 зменшенні 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. Розроблений метод фільтрації шуму 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 MATLAB, призначену для адаптивної зміни параметрів відеокамери з використанням критеріїв якості зображення K_V . Критерії якості K_V побудовано на основі ВСШ з урахуванням насичення зображення (параметр R_A) і ВСШ з обмеженнями на екстремальні значення сигналу (параметр R_L). Точність розроблених методів перевірено при адаптивній зміні параметрів для 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 двоядерних процесорів забезпечує збільшення швидкодії до 1.5 разів.

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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ 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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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. Рошупкіна, "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 *III 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 просторово-однорідної 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 Intern. Scientific Practical Conf. (I Intern. 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.

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". – 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.

Підвищення якості зображень виконано шляхом зниження рівня шуму та адаптивної зміни параметрів відеокамер. Розроблено математичну модель та метод зменшення рівня шуму на цифрових зображеннях, які враховують усереднені характеристики корисного сигналу та шуму, що забезпечує підвищення точності та швидкодії оброблення зображень у КОЕС. Показано, що розроблений метод є квазіоптимальним. Розроблено методи адаптивної зміни параметрів «Яскравість» і «Контраст» відеокамер у КОЕС. Розроблено метод визначення рівня шуму зображень з використанням паралельних обчислень, що забезпечує збільшення швидкодії оброблення зображень.

На основі одержаних математичних моделей і методів розроблено високоточні та швидкодіючі апаратно-програмні засоби для КОЕС. Комп'ютерне моделювання, експериментальні дослідження та впровадження розроблених засобів у КОЕС підтвердили адекватність розроблених математичних моделей і ефективність запропонованих методів.

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.

АННОТАЦИЯ

Одайская К. С. Методы и средства повышения визуального качества изображений в компьютеризированных оптико-электронных системах. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 "Компьютерные системы и компоненты". – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2020.

Диссертационная работа посвящена разработке математических моделей, методов и программно-аппаратных средств повышения визуального качества формирования изображений, что позволило получить новое решение важной научно-технической задачи повышения точности и быстродействия обработки изображений в компьютеризированных оптико-электронных системах (КОЭС), которые как источник изображений используют видеокамеры.

Повышение качества изображений выполнено путем снижения уровня шума и адаптивного изменения параметров видеокамер. Предложено архитектуру компьютеризированной системы для повышения качества формирования изображений, которая состоит из подсистем определения уровня шума, фильтрации шума и адаптивного изменения параметров видеокамер.

Подсистему определения уровня шума на изображениях реализовано на основе предложенных методов LLROI и HLROI, которые используют при выделении шумовой составляющей низкочастотную и высокочастотную фильтрации соответственно. На основе предложенных методов созданы программы в системе Matlab, синтезированы структуры КОЭС и их Simulink-модели, разработаны структурные схемы блоков подсистемы. Аппаратная реализация блоков фильтрации изображений в КОЭС выполнена средствами FPGA Artix-7, что позволило на порядок повысить быстродействие обработки изображений. Точность методов проверено при обработке множества 100 тестовых изображений, при этом КСКП вычисления уровня шума равен ≈ 0.002 , что на 30% меньше, чем для лучшего метода-аналога PCAP. Показано, что по точности метод HLROI незначительно преобладает над методом LLROI.

Разработано программно-аппаратные средства подсистемы уменьшения уровня шума на цифровых изображениях. Разработана математическая модель и метод автоматической фильтрации шума на изображениях с помощью фильтра Гаусса, особенностью которого является вычисление усредненных амплитудных и частотных параметров полезного сигнала на основе энергетического спектра изображения. На основе предложенного метода реализовано программные средства в системе Matlab, синтезировано структуру КОЭС фильтрации шума на изображениях, разработаны структурные схемы основных блоков КОЭС. Точность разработанного метода фильтрации проверено при уменьшении уровня шума на множестве из 100 тестовых изображений. Показано, что разработанный метод является квазиоптимальным, поскольку вычисленные значения пикового отношения сигнал/шум в среднем меньше оптимальных на 0.14 дБ. Быстродействие разработанного метода более чем в 2 раза выше быстродействия методов-аналогов, обладающих соразмерной точностью.

Разработано методы адаптивного изменения параметров «Яркость» и «Контраст» видеокамер в КОЭС. На основе предложенных методов разработаны программные и аппаратные средства для подсистемы адаптивного изменения параметров видеокамер, синтезирована структура КОЭС и ее Simulink-модели, а также разработаны структурные схемы блоков подсистемы. Разработана программа в системе Matlab, предназначенная для выбора параметров видеокамеры на основе критериев качества изображения. Критерии качества построены на основе отношения сигнал/шум с учетом насыщения изображения и отношения сигнал/шум с ограничениями на экстремальные значения сигнала. Точность разработанных методов проверено при изменении параметров трех моделей видеокамер, при этом получено увеличение отношения сигнал/шум до 1.4 дБ. Показано, что комплексное использование критериев качества изображения обеспечивает высшую точность адаптивного изменения параметров видеокамер по сравнению с использованием отдельных критериев.

Разработано метод и программные средства для определения уровня шума изображений с использованием параллельных вычислений, что в случае двухядерных процессоров обеспечивает увеличение быстродействия до 1.5 раз.

На основе полученных математических моделей и методов разработано высокоточные и быстродействующие аппаратно-программные средства для КОЭС. Компьютерное моделирование, экспериментальные исследования и внедрение разработанных средств в КОЭС подтвердили адекватность разработанных математических моделей и эффективность предложенных методов.

Ключевые слова: компьютеризированные оптико-электронные системы, цифровая обработка изображений, цифровая видеокамера, качество изображения, отношение сигнал/шум, фильтрация гауссова шума, энергетический спектр, адаптивное изменение параметров видеокамеры, ПЛИС, параллельные вычисления.

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". – 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.

Improved image quality is achieved by reducing noise level and adaptive change of the video cameras settings. A mathematical model and a method of noise reduction on digital images have been developed, which take into account the average

characteristics of the useful signal and noise, which provides increased accuracy and speed of image processing in the COES. It is shown that the developed method is quasi-optimal. Methods for automatic optimization of «Brightness» and «Contrast» parameters of video cameras in the COES have been developed. A technique for determining the noise level of images using parallel computations has been developed, which increases the image processing speed.

Based on the obtained mathematical models and methods, high precision and high-speed hardware and software tools for the COES have been developed. Computer modeling, experimental research and implementation of the developed tools in the COES confirmed the adequacy of the mathematical models and the effectiveness of the suggested methods.

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.

Підписано до друку 07.09.2020. Формат 60 x 84/16.
Папір офсетний. Друк різнографічний. Ум.-друк. арк. 0,9.
Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100. Зам. А-004.
Видавництво та друкарня Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича
58002, м. Чернівці, вул. Коцюбинського, 2
e-mail: ruta@chnu.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 891 від 09.04.2002 р.