

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

САЛЬНИКОВ ДМИТРО ВАЛЕНТИНОВИЧ

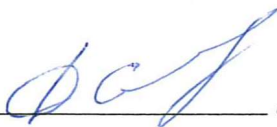
УДК. 004.932.4

ДИСЕРТАЦІЯ
АПАРАТНІ І ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ АДАПТИВНОЇ НЕЛІНІЙНОЇ
ЦИФРОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ НА ОСНОВІ ДЕТЕКТОРІВ ШУМУ

05.13.05 – Комп’ютерні системи та компоненти
12 – Інформаційні технології

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.

 Д.В. Сальніков

Науковий керівник
Качанов Петро Олексійович
Доктор технічних наук, професор



АНОТАЦІЯ

Сальніков Д.В. Апаратні і програмні засоби адаптивної нелінійної цифрової фільтрації на основі детекторів шуму. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти (12 – Інформаційні технології). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки України, Харків, 2021

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-технічної задачі, яка полягає в розробці методів та засобів адаптивної нелінійної цифрової фільтрації зображень.

Об'єкт дослідження – процеси та принципи цифрової фільтрації зображень.

Предмет дослідження – цифрові фільтри, що поліпшують якість зображень, уражених імпульсним шумом, апаратна та програмна реалізація адаптивних нелінійних цифрових фільтрів на основі детекторів шуму.

У першому розділі «Системи комп'ютерного зору» проаналізовано загальну структуру сучасних систем комп'ютерного зору. Показано основні етапи обробки даних в системі. Визначено основні тенденції розвитку та існуючі потреби забезпечення якості та швидкості систем такого роду. Розглянуто сучасні світлочутливі датчики та основні види впливів на данні зображень в типовій системі, а також розповсюджені математичні моделі шумів, що погіршують якість вихідних показників систем управління та обробки даних. Проаналізовано наявні методи придушення шумів, зокрема лінійні та нелінійні просторові фільтри, адаптивні фільтри, фільтри з детекторами шуму. Проведено аналіз та класифікація популярних методів детектування шуму, зокрема алгоритму адаптивного нелінійного зваженого

медіанного фільтру, та виявлено недоліки, що заважають реалізації фільтра на більшості апаратних платформ.

У другому розділі «Оптимізація і моделювання роботи ASWM фільтра» розглянуто методи апаратної реалізації адаптивного нелінійного зваженого фільтру. Проведено аналіз алгоритму та виділені складові під-модулі фільтру. Реалізовані під-модулі фільтру із розрахунками з фіксованою точкою, зокрема: модуль поділу чисел з фіксованою точкою, модуль знаходження квадратного кореня, модуль знаходження медіани за допомогою сортуючої мережі, модуль знаходження зваженого середнього, модуль розрахунку вагів, модуль знаходження середньоквадратичного відхилення. Отримано кількісні характеристики апаратних витрат на реалізацію. Виконано дослідження програмної моделі фільтру на мові Python задля усунення одного з найбільших недоліків – циклу оцінки вагів недетермінованої довжини. Запропоновано поліпшений з точки зору співвідношення «продуктивність фільтру/апаратні витрати на реалізацію» алгоритм адаптивного нелінійного зваженого фільтра з урахуванням апаратних особливостей ПЛІС та вузьких місць фільтра що були виявлені раніше. Виконано оцінку апаратних ресурсів ПЛІС та продуктивності фільтра у різних конфігураціях, що впливають на необхідну кількість логічних вентилів ПЛІС та якість роботи системи. Наведено розрахунок кількості фреймів на секунду при обробці монохромного зображення FullHD для тактових частот системи 50, 100 та 200 МГц.

У третьому розділі «Модифікований медіанний фільтр з пост фільтраційним прийняттям рішення» проведено дослідження статистичних характеристик детектору шуму ASWM фільтра. За допомогою програмної моделі ASWM фільтра виконано аналіз роботи фільтру на предмет значень порогів і зашумлених пікселів, а також дослідження залежності медіанного значення, значень вхідного пікселя та шуму одне від одного. Таким чином, були промодельовані ситуації вірного детектування пікселя як шуму, а також помилкового детектування, в разі якого, згідно з алгоритмом ASWM

фільтрації виконується зайва операція знаходження медіани і як наслідок розмиття/згладжування деталей вихідного зображення. Отримано розподіл абсолютного відхилення шуму від медіанного значення вікна фільтра для різної щільності зашумлюючого впливу. Запропоновано алгоритм адаптивного нелінійного фільтра цифрових зображень з пост-фільтраційним прийняттям рішення про зашумлення, який дозволяє зменшити ефекти пов'язані з втратою частини даних внаслідок фільтрації пікселів, що не були піддані впливу шуму та має структуру придатну до паралельної реалізації на більшості сучасних архітектур процесорів з векторним розширенням та ПЛІС.

У четвертому розділі «Моделювання фільтра з пост-фільтраційним прийняттям рішення» розглянуто переваги і недоліки використання мов проектування цифрових схем VHDL та Verilog у порівнянні з сучасними мовами проектування високого рівня. Сформульовано перелік переваг програмного пакету MyHDL, який використовувався у даній роботі та дозволив суттєво знизити складність тестування запропонованої архітектури системи. За допомогою пакету MyHDL реалізовано програмний продукт мовою Python, що дозволяє згенерувати VHDL чи Verilog опис фільтру з пост-фільтраційним прийняттям рішення для подальшого синтезу на ПЛІС. Виконано верифікацію та синтез фільтру на ПЛІС Intel MAX 10, Cyclone V, Cyclone IV E, Cyclone IV GX та Cyclone 10. Отримано часові діаграми роботи кожного з блоків ASWM фільтра та фільтра з пост-фільтраційним прийняттям рішення. Представлено синтезовані логічні схеми блоків та фільтрів загалом, що доводять повністю конвеєрну реалізацію фільтру, не високу довжину фільтруючої системи фільтра з пост-фільтраційним прийняттям рішення в тактах, а також суттєво нижчі апаратні витрати на реалізацію фільтра з пост-фільтраційним прийняттям рішення у порівнянні із ASWM фільтром. Проведено аналіз продуктивності у порівнянні з ASWM фільтром, що вважається одним з лідерів з точки зору якості роботи. Представлено метод реалізації запропонованого фільтру на процесорній архітектурі з векторним

розширенням ARM NEON. Зокрема розглянуто метод реалізації загрузки та збереження даних в пам'ять та реалізацію сортуючої мережі за допомогою векторних інструкцій. Проведено дослідження шумопригнічуючих можливостей запропонованого фільтра за допомогою метрик PSRN та SSIM для щільності імпульсного шуму від 5 до 90%, що доводять високу якість роботи запропонованого алгоритму.

Отримані результати дають змогу побудови ефективної з точки зору співвідношення продуктивність фільтру/апаратні витрати на реалізацію системи видалення імпульсного шуму з зображення, що може працювати в реальному часі, на сучасних процесорних архітектурах з векторними інструкціями та ПЛІС.

У якості напрямів подальшого розвитку потрібно зазначити дослідження методів розпаралелювання запропонованого алгоритму адаптивної нелінійної фільтрації шляхом побудови декількох обчислювальних конвеєрів, а також пошук методів розрахунку порогового значення абсолютного відхилення яркості пікселя від медіанного значення вікна, що можуть бути ефективно реалізовані на сучасних апаратних платформах.

Ключові слова: автоматизовані комп'ютерні системи, системи комп'ютерного зору, обробка зображень, покращення зображень, адаптивний фільтр, нелінійний фільтр, імпульсний шум, ПЛІС, процесори з векторним розширенням.

Список публікацій здобувача:

1. Сальников Д. В. Современные методы оценки качества цифровой фильтрации изображений / Ю. И. Дорошенко, Д. В. Сальников // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD–2016) : наук. вид. : тези доп. 24-ї міжнар. наук.-практ. конф., [18-20 травня 2016 р.] : у 4 ч. Ч. 2 / ред. Є. І. Сокол. – Харків : НТУ "ХПІ", 2016. – С. 55.
2. Сальников Д. В. Исследование методов оптимизации ASWM алгоритма фильтрации изображений / Ю. И. Дорошенко, Д. В. Сальников // Актуальні проблеми автоматики та приладобудування : матеріали 3-ї

- Всеукр. наук.-техн. конф., 8-9 грудня 2016 р. / ред. кол. П. О. Качанов [та ін.]. – Харків : НТУ "ХПІ", 2016. – С. 13-14.
3. Сальников Д. В. Метод оптимизации операции нахождения медианы на процессорах с расширенным набором команд SIMD / О. Г. Васильченко, Д. В. Сальников // Актуальні проблеми автоматики та приладобудування : матеріали 1-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 07-08 грудня 2017 р. / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.]. – Харків : НТУ "ХПІ", 2017. – С. 13-14.
 4. Сальников Д. В. Современные методы детектирования шума в цифровой обработке изображений / П. А. Качанов, Ю. И. Дорошенко, Д. В. Сальников // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : наук. вид. : тези доп. 25-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2017, [17-19 травня 2017 р.] : у 4 ч. Ч. 2 / ред. Є. І. Сокол. – Харків : НТУ "ХПІ", 2017. – С. 134.
 5. Сальников Д. В. Исследование нейросетевых детекторов импульсного шума / О. Г. Васильченко, Д. В. Сальников // Актуальні проблеми автоматики та приладобудування : матеріали 2-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 06-07 грудня 2018 р. – Харків : Панов А. М., 2018. – С. 14-15.
 6. Сальников Д. В. Модифицированный медианный фильтр с пост фильтрационным принятием решения / Д. В. Сальников, О. Г. Васильченко // Системи управління, навігації та зв'язку : зб. наук. пр. / гол. ред. С. В. Козелков. – Полтава : ПНТУ, 2019. – Вип. 1 (53). – С. 158-161.
 7. Сальников Д. В. Применение нейросетей с residual архитектурой для фильтрации шумов изображений / О. Г. Васильченко, Д. В. Сальников // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : наук. вид. : тези доп. 27-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2019, [15-17 травня 2019 р.] : у 4 ч. Ч. 2 / ред. Є. І. Сокол. – Харків : НТУ "ХПІ", 2019. – С. 12
 8. Сальников Д. В. Проектирование цифровых систем с применением высокоуровневых языков программирования / О. Г. Васильченко, Д. В. Сальников // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : наук. вид. : тези доп. 28-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2020, [28-30 жовтня 2020 р.] : у 5 ч. Ч. 2 / ред. Є. І. Сокол. – Харків : Планета-Прінт, 2020. – С. 9.

9. Сальников Д. В. Моделювання цифрового фільтру з постфільтраційним прийняттям рішення / О. Г. Васильченко, Д. В. Сальников // Актуальні проблеми автоматики та приладобудування : матеріали 3-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 3-4 грудня 2020 р. / ред. кол.: П. О. Качанов [та ін.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.]. – Харків : ФОП Панов А. М., 2020. – С. 9-10.
10. Сальников Д. В. Применения нейросетей с residual архитектурой для фильтрации импульсных шумов изображений / Д. В. Сальников, О. Г. Васильченко // Вестник государственного университета имени Шакарима / гл. ред. М.Г. Ескендиров. – Казахстан, Семей, 2020. – Вып. 1 (89). – С. 53-56.
11. Salnikov D. Conveyorized implementation of aswm image filter on PLD / Vasylchenkov O., Liberg I., Mozhaiev M., Salnikov D.// TECHNOLOGY AUDIT AND PRODUCTION RESERVES, No 1/2(57), 2020
12. Сальников Д. В. Реализация фильтра с пост-фильтрационным принятием решения на микропроцессорных архитектурах с векторным расширением для обеспечения показателей эффективности судебной экспертизы / О. Г. Васильченко, Н. А. Евсина, Д. В. Сальников, П. В. Буслов // Вісник Черкаського державного технологічного університету №4() 2020 С. 93-102 DOI: 10.24025/2306-4412.4.2020.223572

ABSTRACT

Salnikov D.V. Hardware and software means of adaptive nonlinear digital filtering based on noise detectors. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree candidate of technical sciences (philosophy doctor) in the specialty of 05.13.05 – Computer systems and components (12 – Information technologies). – National technical university «Kharkiv Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of an important scientific and technical problem, which lies in the development of methods and tools of adaptive nonlinear digital image filtering.

The research object – the processes and principles of digital image filtering.

The research subject – digital filters that improve the quality of images affected by impulse noise, hardware and software implementation of adaptive nonlinear digital filters based on noise detectors.

In the first chapter, "Computer Vision Systems" the general structure of modern computer vision systems was analyzed. The main stages of data processing in the system are shown. The main development trends and existing needs to ensure the quality and speed of systems of this kind are identified. Modern light-sensitive sensors and the main types of influences on image data in a typical system are considered, as well as common mathematical models of noise that degrade the quality of the output of control and data processing systems. The available methods of noise suppression are analyzed, in particular linear and nonlinear spatial filters, adaptive filters, filters with noise detectors. The analysis and classification of popular methods of noise detection, in particular the algorithm of adaptive nonlinear weighted median filter, is carried out, and the shortcomings interfering with the implementation of the filter on most hardware platforms are revealed.

In the second section "Optimization and modeling of the ASWM filter" the methods of the hardware implementation of the adaptive nonlinear weighted filter

are discussed. The analysis of the algorithm is performed and the components of the filter sub-modules are selected. Implemented sub-modules of the filter with calculations with a fixed point, in particular: module for dividing numbers with a fixed point, the square root computation module, the module for finding the median using a sorting network, the module for finding the weighted average, the module for calculating weights, the module for finding the standard deviation. Quantitative characteristics of hardware implementation costs are obtained. A study of the software model of the filter in Python was performed to eliminate one of the biggest bottlenecks - the cycle of estimation of scales of indeterminate length. Suggested an improvement from the point of view of the ratio "filter performance/hardware implementation costs" algorithm of adaptive nonlinear weighted filter, taking into account the hardware features of FPGA and filter bottlenecks that were previously identified. The evaluation of FPGA hardware resources and filter performance in different configurations, which affect the required number of FPGA logic cells and the quality of system operation, is performed. The estimation of the number of frames per second when processing a monochrome FullHD image for system clock speeds of 50, 100 and 200 MHz is given.

In the third section "Modified median filter with post-filtration decision-making" a study of the statistical characteristics of the noise detector ASWM filter is given. Using the ASWM filter software model, the filter operation was analyzed for threshold values and noisy pixels, as well as the dependence of the median value, input pixel values and noise from each other. Thus, situations of correct detection of a pixel as noise, and also erroneous detection in which case, according to ASWM filtering algorithm the superfluous operation of the finding of a median and as a result of blurring/smoothing of details of the initial image were modeled. The distribution of the absolute deviation of the noise from the median value of the filter window for different noise densities is obtained. An algorithm for adaptive nonlinear digital image filter with post-filtering noise decision, which reduces the effects associated with the loss of data due to filtering of pixels that have not been exposed

to noise and has a structure suitable for parallel implementation on most modern processors architectures with vector extension and FPGA's is proposed.

The fourth section "Modeling a filter with post-filter decision-making" discusses the advantages and disadvantages of using digital design languages VHDL and Verilog in comparison with modern high-level design languages. The list of advantages of the MyHDL software package, which was used in this work and allowed to significantly reduce the complexity of testing the proposed system architecture, is formulated. The MyHDL package implements a software product in Python, which allows generating a VHDL or Verilog design of the filter with post-filtration decision making for further synthesis on FPGA. Verification and synthesis of the filter on FPGA Intel MAX 10, Cyclone V, Cyclone IV E, Cyclone IV GX and Cyclone 10 were performed. The synthesized logic circuits of blocks and filters in general are presented, which prove the completely pipelined implementation of the filter, short filtering length in cycles of the filter with post-filtration decision-making, and also significantly lower hardware costs for implementation of the filter with post-filtration decision-making in comparison with ASWM. filter. The analysis of the performance in comparison with the ASWM filter which is considered as one of the leaders from the point of view of the quality of work is carried out. The method of realization of the offered filter on processor architecture with vector extension ARM NEON is presented. In particular, the method of loading and storing data in memory and implementing a sorting network using vector instructions is considered. The study of noise-suppressing capabilities of the proposed filter using PSRN and SSIM metrics for impulse noise density from 5 to 90% was performed and proves the high quality of the proposed algorithm.

The obtained results make it possible to build an efficient in terms of the ratio of filter performance/hardware costs for the implementation of a system for removing pulsed noise from the image, which can work in real-time, on modern processor architectures with vector instructions and FPGA.

As possible directions for further development, it is necessary to indicate the research of methods of parallelization of the offered algorithm of adaptive nonlinear filtering by the construction of several computing pipelines, and also search of methods of calculation of threshold value of the absolute deviation of the brightness of a pixel from the median value of a window which can be effectively implemented on modern hardware platforms.

Keywords: automated computer systems, computer vision systems, image processing, image enhancement, adaptive filter, nonlinear filter, impulse noise, FPGA, processors with vector expansion.

List of references:

1. Salnikov D. Modern methods for assessing the quality of digital image filtering / Doroshenko Y., Salnikov D. // Information technology: science, technology, technology, education, health (MicroCAD–2016) : these extra. 24th International scientific-practical conf., [18-20 May 2016]: at 4 p.m. Part 2 / ed. EI Sokol. - Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. - P. 55.

2. Salnikov D. Investigation of ASWM Optimization Methods for Image Filtering Algorithm / Doroshenko Y., Salnikov D. // Actual problems of automation and adjustment : materials of the 3rd All-Ukrainian. scientific and technical Conf., December 8-9, 2016 / ed. count PA Kachanov [etc.]. - Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. - P. 13-14.

3. Salnikov D. Optimization method for finding the median on processors with extended SIMD instruction set / Vasylichenkov O., Salnikov D. // Actual problems of automation and adjustment : materials of the 1st International. scientific and technical Conf., December 07-08, 2017 / Nat. tech. University "Kharkiv Polytechnic Institute" [etc.]. - Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. - P. 13-14.

4. Salnikov D. Modern methods for detecting noise in digital image processing / Kachanov P., Doroshenko Y., Salnikov D. // Information technologies: science, engineering, technology, education, health : these extra. 25th International scientific-

practical conf. MicroCAD – 2017, [May 17-19, 2017]: at 4 p.m. Part 2 / ed. EI Sokol. - Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. - P. 134.

5. Salnikov D. Research of neural network impulse noise detectors / Vasylchenkov O., Salnikov D. // Actual problems of automation and adjustment : materials of the 2nd International. scientific and technical conf., December 06-07, 2018 - Kharkiv: Panov AM, 2018. - P. 14-15.

6. Salnikov D. Modified median filter with post filtration decision making / Salnikov D., Vasylchenkov O. // Control systems, navigation and communication: coll. sci. man./ed. SV Kozelkov. - Poltava: PNTU, 2019. - Vip. 1 (53). - P. 158-161.

7. Salnikov D. Applying residual neural networks to filter image noise / Vasylchenkov O., Salnikov D. // Information technologies: science, engineering, technology, education, health : these extra. 27th International scientific-practical conf. MicroCAD – 2019, [15-17 May 2019]: at 4 p.m. Part 2 / ed. EI Sokol. - Kharkiv: NTU "KhPI", 2019. - P. 12

8. Salnikov D. Design of digital systems using high-level programming languages / Vasylchenkov O., Salnikov D. // Information technologies: science, engineering, technology, education, health : these extra. 28th International scientific-practical conf. MicroCAD – 2020, [28-30 October 2020]: at 5 p.m. Part 2 / ed. EI Sokol. - Kharkiv: Planeta-Print, 2020. - P. 9.

9. Salnikov D. Digital filter modeling with post-filter solution acceptance / Vasylchenkov O., Salnikov D. // Actual problems of automation and adjustment : materials of the 3rd International .. scientific-technical. Conf., December 3-4, 2020 / ed. Col .: P. O. Kachanov [etc.]; Nat. tech. University "Kharkiv Polytechnic Institute" [etc.]. - Kharkiv: FOP Panov AM, 2020. - P. 9-10.

10. Salnikov D. Applying residual neural networks for filtering impulse noise in images / Salnikov D., Vasylchenkov O. // Shakarim State University Bulletin / ch. ed. M.G. Eskendirov. - Kazakhstan, Semey, 2020. - Issue. 1 (89). - P. 53-56.

11. Salnikov D. Conveyorized implementation of aswm image filter on PLD / Vasylchenkov O., Liberg I., Mozhaiev M., Salnikov D.// TECHNOLOGY AUDIT AND PRODUCTION RESERVES, No 1/2(57), 2020

12. Salnikov D. Implementation of a filter with post-filtration decision making on microprocessor architectures with vector expansion to ensure forensic efficiency indicators / O. G. Vasilchenkov, N. A. Evsina, D. V. Salnikov, P. V. Buslov // Visnik of the Cherkasy State Technological University No. 4 () 2020 pp. 93-102 DOI: 10.24025 / 2306-4412.4.2020.223572

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 СИСТЕМИ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ	13
1.1 Структура систем комп'ютерного зору.....	13
1.2 Структура програмної частини системи.....	17
1.2.1 Захоплення зображення.....	17
1.2.2 Методи перетворення фізичного сигналу в цифровий	18
1.2.3 Різновиди фізичного шуму.....	19
1.2.4 Фотонний шум.....	19
1.2.5 Тепловий шум.....	20
1.2.6 Електронний шум чіпа.....	21
1.2.7 кТС шум	21
1.2.8 Шум підсилювача.....	23
1.2.9 Шум квантування	23
1.3 Математичні моделі шуму	23
1.4 Фільтрація	27
1.5 Різновиди цифрових фільтрів зображень	28
1.5.1 Лінійні цифрові фільтри.....	28
1.5.2 Нелінійні цифрові фільтри	31
1.5.3 Адаптивні нелінійні цифрові фільтри.....	32
1.6 Методи детектування шуму	33
1.7 Детектори шуму на основі порядкових статистик.....	34
1.8 Детектори шуму на основі нечіткої логіки.....	35
1.9 Детектори шуму на основі нейромережових методів.....	38
1.9.1 Детектори шуму на основі детекторів границь.....	40
1.9.2 Детектори шуму на основі деревоподібних структур.....	42
1.9.3 Комбіновані методи	45

1.10	Корекція зображення	46
1.11	Розпізнавання.....	46
1.12	Методи дослідження цифрових фільтрів.....	46
1.13	Алгоритм роботи ASWM фільтра	49
1.14	Алгоритм фільтру з пост фільтраційним прийняттям рішення	52
1.15	Висновки до розділу	56
РОЗДІЛ 2 ОПТИМІЗАЦІЯ І МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ASWM ФІЛЬТРА		58
2.1	Постановка завдання дослідження	58
2.2	Дослідження можливості обмеження ітерацій циклу оцінки ваг	59
2.3	Опис зміни алгоритму для реалізації на ПЛІС.....	61
2.4	Математичні операції необхідні для реалізації.....	62
2.4.1	Операція ділення	62
2.4.2	Операція знаходження кореня	63
2.4.3	Операція сортування.....	65
2.5	Конвеєризація структурних блоків ASWM фільтра.....	66
2.5.1	Блок знаходження зваженого середнього.....	66
2.5.2	Блок розрахунку ваг	68
2.5.3	Блок знаходження СКВ	69
2.5.4	Оптимізація циклу оцінки ваг по швидкості.....	71
2.5.5	Оцінка апаратних ресурсів і продуктивності фільтра.....	79
2.6	Висновки до розділу	85
РОЗДІЛ 3 МОДИФІКОВАНИЙ МЕДІАННИЙ ФІЛЬТР З ПОСТ		
ФІЛЬТРАЦІЙНИМ ПРИЙНЯТТЯМ РІШЕННЯ		86
3.1	Дослідження статистичних характеристик детектора шуму ASWM фільтра	86
3.2	Структура фільтра з пост фільтраційним прийняттям рішення.....	90
3.3	Висновки до розділу:	92
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ФІЛЬТРА З ПОСТ ФІЛЬТРАЦІЙНИМ		
ПРИЙНЯТТЯМ РІШЕННЯ.....		93

4.1 Використання мов програмування високого рівня для проектування апаратури.....	93
4.2 Моделювання цифрового фільтра зображень	95
4.3 Моделювання оптимізованої моделі ASWM фільтра	97
4.4 Моделювання запропонованого фільтра	102
4.4.1 Реалізація на ARM NEON	105
4.5 Дослідження шумопригнічуючих можливостей запропонованого фільтра	110
4.6 Висновки до розділу	113
ВИСНОВКИ.....	115
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	116
ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА	122
ДОДАТОК Б ПРОГРАМНИЙ КОД МОДЕЛІ АДАПТИВНОГО ЗВАЖЕНОГО МЕДІАННОГО ЦИФРОВОГО ФІЛЬТРУ ЗОБРАЖЕНЬ З ФІКСОВАНОЇ ТОЧКОЮ.....	124
ДОДАТОК В ПРОГРАМНИЙ КОД ПОВНІСТЮ КОНВЕЕРІЗОВАНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ АДАПТИВНОГО ЗВАЖЕНОГО МЕДІАННОГО ЦИФРОВОГО ФІЛЬТРУ ЗОБРАЖЕНЬ	127
ДОДАТОК Г ПРОГРАМНИЙ КОД АДАПТИВНОГО ЦИФРОВОГО ФІЛЬТРУ З ПОСТ-ФІЛЬТРАЦІЙНИМ ПРИЙНЯТТЯМ РІШЕННЯ ДЛЯ ПЛІС	151
ДОДАТОК Д ПРОГРАМНИЙ КОД АДАПТИВНОГО ЦИФРОВОГО ФІЛЬТРУ З ПОСТ-ФІЛЬТРАЦІЙНИМ ПРИЙНЯТТЯМ РІШЕННЯ ДЛЯ ARM NEON.....	154
ДОДАТОК Г АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ	157