МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАУКОВО-НАВЧАЛЬНИЙ ІНСТИТУТ
КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

Кафедра комп'ютерної фізики

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем бакалавр

«Забезпечення високого динамічного діапазону
детекторів рентгенівського зображення»

Виконав: студент 4 курсу, групи НФ-44
Ушахін Д.А.
спеціальність:
105 Прикладна фізика та наноматеріали
освітня програма: Комп'ютерна фізика
Керівник: д.ф.-м.н., проф. Нємченко К.Е.

Рецензент:

Харків – 2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра комп'ютерної фізики
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) бакалавр
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали
Освітня програма: Комп'ютерна фізика

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Костянтин НЄМЧЕНКО
підпис
"____"_____2022 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Ушахін Дмитро Анатолійович

1.Тема роботи «Забезпечення високого динамічного діапазону детекторів рентгенівського зображення» керівник роботи: Нємченко Костянтин Едуардович, доктор фізико-математичних наук. Затверджено наказом по університету від 27 квітня 2022 року № 4201–05/121.

2. Строк подання студентом роботи 10.06.2022

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

1) провести критичний аналіз літератури, та скласти огляд існуючих методів калібрування детекторів рентгенівського зображення з ціллю покращення діагностичних властивостей рентгенівських апаратів;

2) дослідити основні механізми формування високого динамічного діапазону та обґрунтувати необхідність цього процесу;

3) розробити алгоритм використання детекторів рентгенівського зображення з двома каналами детектування зображень;

4) розробити програмний комплекс калібрування детекторів з двома каналами формування рентгенівських зображень;

5) продемонструвати на реальних тестових зображеннях роботу розроблених програм та довести здобуття надвисокого динамічного діапазону завдяки застосуванню запропонованих алгоритмів.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми.
2	Затвердження теми на кафедрі
3	Робота над літературою та іншими джерелами
4	Написання вступу до роботи та першого розділу
5	Написання другого розділу
6	Написання третього розділу
7	Завершення написання дипломної роботи (висновки та література)
8	Подача науковому керівнику
9	Відгук, рецензія, підготовка до захисту
10	Попередній захист
11	Захист

5.Дата видачі завдання

Студент _____ Дмитро УШАХІН

підпис

Керівник роботи _____ Костянтин НЄМЧЕНКО

підпис

РЕФЕРАТ

Дмитро Ушахін «Забезпечення високого динамічного діапазону детекторів рентгенівського зображення» Кваліфікаційна робота бакалавра з прикладної фізики. – Х.: Харківській національний університет імені В. Н.Каразіна, 2022. – 41 с.

У цьому дипломі представлений підхід до розширення динамічного діапазону рентгенівських пласко-панельних детекторів шляхом поєднання двох отриманих даних однакової кількості, які здобути з двома різними рівнями аналого-цифрових перетворювачів. Для поєднання двох наборів даних був запропонований алгоритм формування двох функції відклику другого порядку. Придатність такої піксельної моделі для представлення сигналу детектора була перевірена за допомогою експериментальних даних зображень стандартних тестових об’єктів. Потенційне розширення динамічного діапазону, запропоноване цім методом, було досліджено для загальних плоских детекторів за допомогою аналітичних виразів та моделювання. Ефективність запропонованого підходу з подвійними рівнями АЦП в умовах реалістичного зображення порівнювали з ефективністю звичайної техніки однократної експозиції з використанням експериментальних даних з двох різних фантомів. Якість зображення оцінювалася з точки зору відношення сигнал/шум, контрасту і аналізу профілю зображень тестових об’єктів. Запропонований метод розширення динамічного діапазону детектора без збільшення дози особливо підходить для зображень, які містять як низькі, так і високі області інтенсивності.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ДИНАМІЧНИЙ ДІАПАЗОН, АНАЛОГО-ЦИФРОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ФУНКЦІЯ ВІДКЛИКУ, ПОРОГОВИЙ КОНТРАСТ.

РЕФЕРАТ

Дмитрий Ушахин. «Обеспечение высокого динамического диапазона детекторов рентгеновского изображения» Квалификационная работа бакалавра по прикладной физике. – Х.: Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 2022. – 41 с.

В этом дипломе представлен подход к расширению динамического диапазона рентгеновских плоско-панельных детекторов путем сочетания двух полученных данных одинакового количества, полученных с двумя разными уровнями аналого-цифровых преобразователей. Для сочетания двух наборов данных был предложен алгоритм формирования двух функций отзыва второго порядка. Пригодность такой пиксельной модели для представления детекторного сигнала была проверена с помощью экспериментальных данных изображений стандартных тестовых объектов. Потенциальное расширение динамического диапазона, предложенное этим методом, было исследовано для общих плоских детекторов с помощью аналитических выражений и моделирования. Эффективность предлагаемого подхода с двойными уровнями АЦП в условиях реалистического изображения сравнивали с эффективностью обычной техники однократной экспозиции с использованием экспериментальных данных из двух разных фантомов. Качество изображения оценивалось с точки зрения отношения сигнал/шум, контраста и анализа профиля изображений тестовых объектов. Предлагаемый метод расширения динамического диапазона детектора без увеличения дозы особенно подходит для изображений, содержащих как низкие, так и высокие области интенсивности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН, АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ФУНКЦИЯ ОТЗЫВА, ПОРОГОВЫЙ КОНТРАСТ.

ABSTRACT

Dmytro Ushakhin "Providing a high dynamic range of X-ray image detectors" Bachelor's thesis in applied physics. - H .: Kharkiv National University named after VN Karazin, 2022. - 41 p.

This diploma presents an approach to expanding the dynamic range of X-ray flat-panel detectors by combining two obtained data of the same amount, which can be obtained with two different levels of analog-to-digital converters. To combine the two data sets, an algorithm for generating two second-order response functions was proposed. The suitability of such a pixel model to represent the detector signal was tested using experimental image data from standard test objects. The potential dynamic range extension proposed by this method was investigated for general plane detectors using analytical expressions and simulations. The effectiveness of the proposed approach with double levels of ADC in a realistic image was compared with the effectiveness of conventional single exposure techniques using experimental data from two different phantoms. Image quality was evaluated in terms of signal-to-noise ratio, contrast, and image profile analysis of test items. The proposed method of expanding the dynamic range of the detector without increasing the dose is particularly suitable for images that contain both low and high intensity ranges.

KEY WORDS: DYNAMIC RANGE, ANALOG-DIGITAL CONVERTER, RESPONSE FUNCTION, THRESHOLD CONTRAST.

ЗМІСТ

ВСТУП 8
1. ПОНЯТТЯ ВИСОКОГО ДИНАМІЧНОГО ДІАПАЗОНУ І ЙОГО ДІАГНОСТИЧНА ВАЖЛИВІСТЬ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ) 10
1.1. Простіший метод здобуття ВДД 10
1.2. Опис алгоритму ВДД 13
1.3. Процедура тонування 15
1.4. Висновки розділу 17
2. ДИНАМІЧНИЙ ДІАПАЗОН РЕНТГЕНІВСЬКИХ ЗОБРАЖЕНЬ 18
2.1. Застосування поняття ВДД в рентгенографії 18
2.2.Огляд методів ВДД 19
2.3. Оператори тонального відображення 20
2.3.Концепція 21
2.4. Експерименти та отримання зображень 22
2.5. Обговорення результатів 25
2.6. Висновки розділу 26
3. СТРУКТУРА ОРИГІНАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ 27
3.1. Проблема вирівнювання інтенсивності рентгенівських зображень 27
3.2. Двоенергетичний алгоритм досягнення високого динамічного діапазону 29
3.3. Алгоритм дводіапазонного вирівнювання яскравості 33
3.4. Програмна реалізація запропонованого алгоритму 36
3.5. Обговорення результатів та висновки розділу 38
ВИСНОВКИ 59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 60

ВСТУП

Актуальність теми. Створення і використання зображень з високим динамічним діапазоном сьогодні є важливою задачею в дослідженнях та розробці зображень і фотографії, хоча її коріння сягають XIX століття. Сучасні методи досягнення високого динамічного діапазону – це зріла технологія, яка присутня в численних програмних та апаратних пристроях. Загальна ідея всіх цих методів полягає в тому, щоб привнести в програми здатність людини адаптувати розмір зіниці до умов перегляду. Ця мета зазвичай досягається шляхом об'єднання кількох зображень із низьким динамічним діапазоном, зроблених із різною експозиціє, які частково розкривають вміст сцени в тінях, середніх тонах та на ярких місцях зображення.

Основною ідеєю, що викладена в цієї роботі є підхід до розширення динамічного діапазону рентгенівських пласко-панельних детекторів шляхом поєднання двох отриманих даних однакової кількості, які здобути з двома різними рівнями аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Для поєднання двох наборів даних був запропонований алгоритм формування двох функції відклику другого порядку. Придатність такої піксельної моделі для представлення сигналу детектора буде перевірена за допомогою експериментальних даних зображень стандартних тестових об'єктів. Потенційне розширення динамічного діапазону, запропоноване цім методом, буде досліджуватися для загальних плоских детекторів за допомогою аналітичних виразів та моделювання. Ефективність запропонованого підходу з подвійними рівнями АЦП в умовах реалістичного зображення буде порівнюватися з ефективністю звичайної техніки однократної експозиції з використанням експериментальних даних з двох різних фантомів. Якість зображення буде оцінюватися з точки зору відношення сигнал/шум, контрасту і аналізу профілю зображень тестових об'єктів. В дипломі буде показано, що запропонований метод розширення динамічного діапазону детектора без

збільшення дози особливо підходить для зображень, які містять як низькі, так і високі області інтенсивності.

Основною метою дипломної роботи є дослідження основних алгоритмів формування високого динамічного та розроблення оригінального алгоритму використання детекторів рентгенівського зображення з двома каналами детектування зображень.

Об'єкт дослідження – обробка зображень та сигналів.

Предмет дослідження – методи обробки зображень з метою забезпечення надвисоких динамічних діапазонів.

Методи дослідження – математичні методи теорії обробки сигналів, які дають змогу розробити та застосувати на практиці алгоритми отримання зображень з надвисокими динамічними діапазонами .

Наукова новизна одержаних результатів – розроблення та застосування оригінального алгоритму використання вимірювальних пристроїв підвищеного динамічного діапазону вимірювань.

Практичне значення отриманих результатів:

– створено оригінальний алгоритм калібрування детекторів рентгенівського зображення з ціллю покращення діагностичних властивостей рентгенівських апаратів;

– розроблено програмний комплекс калібрування детекторів з двома каналами формування рентгенівських зображень;

– на реальних тестових зображеннях проведено демонстрацію роботу розроблених програм

– доведено на практиці здобуття надвисокого динамічного діапазону завдяки застосуванню запропонованих алгоритмів.

Структура і обсяг роботи. Дипломна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний об'єм роботи становить 41 сторінку, із них основного тексту 39 сторінок, 3 рисунки за текстом, 2 таблиці, список використаних джерел із 20 найменувань на 2 сторінках.

1. ПОНЯТТЯ ВИСОКОГО ДИНАМІЧНОГО ДІАПАЗОНУ І ЙОГО ДІАГНОСТИЧНА ВАЖЛИВІСТЬ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

Динамічний діапазон — це загальний термін, який використовується для опису співвідношення між найвищим і найменшим значенням змінної величини. У технології обробки зображень і відображення динамічний діапазон також відомий як коефіцієнт контрастності або просто контраст. Контрастність означає співвідношення між чорними і білими пікселями, які одночасно видно на екрані. Для природної сцени динамічний діапазон — це відношення між густиною сили світла найяскравішого сонячного променя та найтемнішої тіні [1]. Динамічний діапазон сцени реального життя може досягати 106:1, і звичайне людське око може вловити діапазон порядку 104:1, але доступний на даний момент пристрій захоплення НДД (низький динамічний діапазон) має динамічний діапазон порядку лише 102:1

1.1. Простіший метод здобуття ВДД

У той час як реальні сцени створюють широкий діапазон варіацій яскравості, сучасні камери використовують детектор зображення з низьким динамічним діапазоном, який зазвичай забезпечує 256 рівнів яскравості для кожного пікселя. Ми пропонуємо методи створення зображень високого динамічного діапазону (ВДД); метод розширення динамічного діапазону заснований на зйомці фотографій сцени з багаторазовою експозицією. Навіть якщо методів створення ВДД-зображень мало, технології відображення ВДД все одно відстають. Ми розглянемо один з алгоритмів тонального відображення для відображення ВДД-зображень на пристроях з низьким динамічним діапазоном. Ми також маємо справу з маніпуляціями з гістограмою для малярного ефекту на виході. Коротко обговорюється застосування зображень ВДД. Запропоновано та успішно реалізовано алгоритм створення ВДД -зображень для нерухомих.

Проблема зображення з високим динамічним діапазоном (ВДД) є подвійною (і) для захоплення справжньої яскравості ВДД -сцени, можливо за

допомогою пристрою захоплення з низьким динамічним діапазоном, і (ii) для повного представлення цієї інформації на низькому динамічному діапазоні. пристрій відображення, який здатний відтворювати фактичну яскравість ні найтемніших, ні найсвітліших плям, ні справжніх кольорів. Першу половину проблеми зазвичай називають відновленням або отриманням ВДД, а другу половину — тональним відображенням.

ВДД-зображення природних сцен можна отримати шляхом зйомки кількох зображень однієї і тієї ж сцени з різною експозицією [2], або шляхом просторової зміни експозиції в масиві кольорових фільтрів на одній фотографії [3]. Перший метод дає кращі результати, але вимагає статичної сцени та однакового освітлення для всіх зображень. Другий — хороший вибір для рухомих або динамічних сцен за ціною просторової роздільної здатності. Нещодавно представлені спеціальні високочутливі камери можуть записувати дані ВДД [4]. Такі ВДД -сенсори зосереджені на розширенні динамічного діапазону шляхом додавання максимальної кількості світла.

Блок-схема ВДД - зображення

Ми поділяємо процес отримання ВДД -зображення на наступні етапи:

(A) Зробіть кілька фотографій сцени з різною експозицією.

(B) Зареєструйте фотографії. (Це необов’язковий крок. Якщо фотографії зроблені за допомогою штатива і всі фотографії ідеально поєднуються, можна уникнути цього кроку.)

(C) Знайдіть функцію реакції камери.

(D) Побудуйте карту яскравості ВДД

A. Зробіть фотографії з багаторазовою експозицією:

На цьому кроці ми робимо фотографії сцени з кількома налаштуваннями експозиції. Сучасні дзеркальні камери мають затвори з електронним керуванням, які дають дуже точний і відтворений час експозиції. Звичайна цифрова ручна камера також надає можливість встановити час експозиції під час зйомки зображення. Камера може мати фактичний час витримки в двох ступенях, який може варіюватися від 1/4096 до 32 секунд.

B. Реєстрація зображення

Якщо фотографії, зроблені з багаторазовою експозицією, не ідеально вирівняні, то спочатку нам потрібно їх зареєструвати. Процес реєстрації, необхідний тут, є відносно простим, оскільки фотографії, зроблені тут, можуть бути трохи повернуті та перекладені відносно один одного. Ми можемо використовувати проективне перетворення, щоб отримати зображення, зареєстровані в цьому випадку [5]. У таблиці 1 показані властивості проективного перетворення

C. Відновлення реакції камери

На цифровій фотографії двовимірний масив значень яскравості не є істинними вимірюваннями відносного сяйва в сцені. Наприклад, якщо один піксель має половину значення іншого, малоймовірно, що він спостерігає половину сяйва. Натомість зазвичай існує невідоме, нелінійне відображення, що залежить від кількох факторів, яке визначає, як яскравість сцени перетворюється на значення пікселів у зображенні.

Це нелінійне відображення важко знати заздалегідь, оскільки воно насправді є складом кількох нелінійних відображень, які виникають у процесі фотографування.

Представлений алгоритм заснований на використанні фізичної властивості систем зображення, яка називається взаємністю. Нехай E – освітленість датчика, а Δt – час експозиції, тоді припущення взаємності кажуть, що тільки продукт $E\Delta t$ впливає на оптичну щільність обробленої плівки або цифрового датчика, а не окремі значення та E Δt.

Сенсорні експозиції X після процесів розробки, сканування та оцифрування перетворюються на цифрове число Z. Z є нелінійною функцією вихідної експозиції на пікселі. Позначимо цю нелінійну функцію або відображення через f, що є складом характеристичної кривої плівки, а також усіх нелінійностей, внесених на наступних етапах обробки. Відображення f залишається незмінним для тієї ж камери і його потрібно обчислювати лише один раз для камери. Отже, коли ми обчислимо f, ми зможемо обчислити

експозицію *X* для кожного пікселя, оскільки $X = f^{-1}(Z)$. Ми робимо розумне припущення, що функція *f* монотонно зростаюча, тому її обернена f^{-1} добре визначена. Знаючи експозицію *X* та час експозиції Δt, освітленість *E* відновлюється як $E = X/\Delta t$, що пропорційно яскравості *L* у сцені.

1.2. Опис алгоритму ВДД

Вхідними даними для нашого алгоритму є кількість оцифрованих фотографій, зроблених з однієї точки з різними відомими часами експозиції Δt, j, що позначає індекс фотографії. Будемо вважати, що сцена є статичною і що освітлення не змінюється. Тоді можна припустити, що значення опромінення плівки Ei для кожного пікселя і є постійними. Значення пікселів будемо позначати Zij, для розташування пікселя і на зображенні j для часу експозиції Δtj. Тепер ми можемо записати рівняння взаємності плівки у вигляді:

$$Z_{ij} = f(E_i \Delta t_j) \tag{1}$$

За припущенням, *f* є монотонним і, отже, оборотним. Отже, рівняння (1) можна переписати як:

$$f^{-1}(Z_{ij}) = E_i \Delta t_j$$

Взявши натуральний логарифм обох сторін, маємо:

$$\ln\left(f^{-1}(Z_{ij})\right) = \ln E_i + \ln \Delta t_j$$

Щоб спростити позначення, визначимо функцію $g = \ln\left(f^{-1}\right)$

Тоді маємо рівняння

$$g(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j \tag{2}$$

де *i* — розташування пікселя на *j*-му зображенні.

Невідомими є опроміненності E_i, а також функція *g*, хоча ми вважаємо, що g є гладкою і монотонною.

Ми хочемо відновити функцію g і опромінення *E*i, які найкраще задовольняють набір рівнянь, що випливають з рівняння (2) у сенсі помилки за методом найменших квадратів. Зауважимо, що відновлення g вимагає лише

відновлення кінцевої кількості значень, які може прийняти g(z), оскільки область Z, значення яскравості пікселя, є кінцевою.

Оскільки вона квадратична в E, а g(Z) мінімізація O є прямою лінійною задачею найменших квадратів. Наддетермінована система лінійних рівнянь надійно розв'язується за допомогою методу сингулярної декомпозиції [2].

Для завершення опису алгоритму є два додаткові моменти: по-перше, рішення можна зробити набагато краще, якщо передбачити основну форму функції відповіді

Оскільки g(Z) зазвичай має крутий схил поблизу Zmin та Zmax, ми можемо очікувати, що g(Z) буде менш гладким і буде гірше відповідати даним поблизу цих екстремумів. Щоб визнати це, ми можемо ввести зважувану функцію W(z), щоб підкреслити гладкість і підгонку членів до середини кривої. Це негативно впливає на недоекспоновані та переекспоновані пікселі як під час калібрування відгуку камери, так і у фазі композиції зображення HDR. Іншими словами, можна сказати, що пікселі з шумом не слід використовувати для калібрування камери, оскільки помилкова функція відгуку призведе до систематичної помилки в подальшій композиції HDR. Проста функція трикутного капелюха є хорошим вибором, як у [5]. Але ми використали складну, але асиметричну і потужну функцію форми

$$w(z) = \rho^{\alpha}(1-\rho)^{\beta} \tag{4}$$

де використовується $0 \le \rho \le 1$ і $1 \le \alpha < \beta$.

Після введення вагового коефіцієнта до рівняння (3) він стає

$$\sigma = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{P}\left\{w(Z_{ij})\left[g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j\right]\right\}^2 + \lambda \sum_{z=Z_{\min}+1}^{z=Z_{\max}-1}\left[w(Z)g''(Z)\right]^2 . \tag{5}$$

По-друге, нам не потрібно використовувати кожен доступний піксельний сайт у цій процедурі вирішення. Враховуючи виміри N пікселів на P

фотографіях, ми повинні знайти N значень ln(Ei) і (Zmin − Zmax) вибірок g. Щоб забезпечити достатньо перевизначену систему, ми хочемо (2−1) > (Zmin − Zmax).

Як тільки крива відгуку g буде відновлена і Δti відомий, ми можемо швидко перетворити значення пікселів у відносні значення яскравості. З рівняння (2) отримуємо:

$$\ln E_i = g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j \quad . \tag{6}$$

Для надійності та відновлення високих значень яскравості динамічного діапазону ми повинні використовувати всі доступні експозиції для конкретного пікселя для обчислення його яскравості. Для цього ми повторно використовуємо функцію зважування в рівнянні (4), щоб надати більшу вагу експозиціям, у яких значення пікселя ближче до середини функції відгуку, і покарати переекспоновані та недоекспоновані пікселі. Поєднання багаторазової експозиції зменшує шум у відновлених значеннях яскравості. Це також зменшує вплив артефактів зображення.

1.3. Процедура тонування

Динамічний діапазон зображення ВДД часто охоплює більше п'яти порядків (зазвичай він становить 2^{16} = 65536 і відомий як 65K). Але звичайний дисплей здатний візуалізувати максимум два порядки величини ((зазвичай це 2^8 = 256). Це створює проблему, оскільки ВДД-зображення стають все більш доступними, ВДД-дисплеї відстають. Тоді проблема полягає в тому, щоб вмістити більший динамічний діапазон ВДД-зображення в обмежену гаму пристроїв відображення. Проблема також відома як проблема тонального відображення. Найпростішим рішенням є лінійне масштабування даних, але просте лінійне масштабування дуже рідко дає прийнятні результати.Проблема відтворення тону по суті є проблемою стиснення зі збереженою видимістю. Отже, використання перцептивних моделей буде розумним підходом до проблеми відтворення тону.

1.3.1. Передісторія

Перш ніж розпочати роботу з алгоритмом відтворення тону, давайте спочатку визначимо деякі відповідні терміни [6].

1. Зона: Римська цифра, якій присвоєно приблизний діапазон яскравості в сцені, називається зоною. Zone також дає приблизний коефіцієнт відбиття відбитка. На рис. 2.6 є одинадцять зон друку, починаючи від чисто чорного (зона 0) до чисто білого (зона X), кожна з яких подвоюється за інтенсивністю, і потенційно набагато більша кількість зон сцени

2. Середній сірий: це суб'єктивна область середньої яскравості сцени, яка зазвичай припадає на зону друку V.

3. Ключ: Ключ сцени є індикатором її яскравості. Клавіша вказує, суб'єктивно темний, нормальний чи світлий. Фотографія, зроблена при сонячному світлі, буде високою, а при місячному — стриманою.

4. Ухилення та вигоряння: це техніка, яка використовується для друку, коли деяка кількість світла утримується від частини відбитка під час проявлення (ухилення), або до цієї області додається більше світла (випалювання). Це освітлює або затемнює цю область на остаточному відбитку відносно того, що було б, якби однакова розробка використовувалася для всіх частин відбитка. У традиційній фотографії фотограф спочатку вимірює яскравість поверхні, яку він сприймає як середньо-сіру. У типовій ситуації це буде відображено на зону V, що відповідає коефіцієнту відбиття відбитка 18%. Для сцен із високим ключем середній сірий буде однією з темніших областей, тоді як у темних або стриманих сценах це буде одна з світліших областей.

1.3.2. Алгоритм тонального відображення

Спочатку ми встановлюємо тональний діапазон вихідного зображення на основі ключового значення сцени. Ми обчислюємо середню логарифмічність яскравості LW, як корисне наближення до ключа сцени.

Зауважте, що висока яскравість масштабується приблизно на 1/L, тоді як низька яскравість масштабується на 1. Знаменник викликає витончене поєднання цих двох масштабів. Ця формула гарантовано приведе всі яскравості в діапазон, який можна відобразити.

У традиційному режимі ухилення та випалювання всі частини відбитка потенційно отримують різний час експозиції від негативу, підвищуючи вибрані темні ділянки або зменшуючи вибрані світлі ділянки, щоб уникнути втрати деталей. Подібним чином ухилення та випалювання зазвичай застосовуються для всієї області, обмеженої великими контрастами.

1.3.3. Вирівнювання гістограми

Після тонального відображення до зображення застосовується вирівнювання гістограми перед його відображенням. Вирівнювання гістограми — це простий та ефективний процес, який покращує якість цифрового зображення.

1.3.4. Обробка кольорових зображень

Кольорові зображення, що складаються з червоного, зеленого та синього каналів, можна обробляти шляхом відновлення кривої реакції системи зображення для кожного каналу незалежно.

1.4. Висновки розділу

У розділі було дано опис методів отримання та відображення кольорових ВДД – зображень. Зокрема, ми представили методи збору даних, які дозволяють створювати ВДД–зображення за допомогою пристроїв збору даних. Методи отримання включали реєстрацію зображення, відновлення реакції камери та створення карти яскравості ВДД. Було представлено ефективне відображення тонів для відображення ВДД–зображень на пристроях відображення НДД. Ми також включили вирівнювання гістограми та налаштування кольору та контрасту, щоб зробити вихідне зображення ВДД краще.

2. ДИНАМІЧНИЙ ДІАПАЗОН РЕНТГЕНІВСЬКИХ ЗОБРАЖЕНЬ

У розділі продемонстровано зручність використання методів високого динамічного діапазону (ВДД), застосованих до рентгенівських зображень. Він призначений для покращення діагностичних можливостей рентгенівського зображення шляхом злиття різних експозицій, отриманих з різними енергіями фотонів (kVp). Розділ містить базовий аналіз, підтвердження концепції з використанням загального злиття експозиції через піраміду Лапласа та широкий огляд технік тонального відображення.

2.1. Застосування поняття ВДД в рентгенографії

Зображення з високим динамічним діапазоном (ВДД) [7] сьогодні є важливою темою в дослідженнях та розробці зображень і фотографії, хоча її коріння сягають XIX століття. Сучасний ВДД – це зріла технологія, яка присутня в численних програмних та апаратних пристроях. Загальна ідея всіх методів ВДД полягає в тому, щоб привнести в машини здатність людини адаптувати розмір зіниці до умов перегляду. Ця мета зазвичай досягається шляхом об’єднання кількох зображень із низьким динамічним діапазоном (НДД), зроблених із брекетингом – різною експозицією (часи/діафрагми), які частково розкривають вміст сцени в тінях, середніх тонах та освітленні.

В цьому розділі, по-перше, ми представляємо доказ концепції, що демонструє, що навіть загальне злиття експозиції можна застосувати до рентгенівських зображень, щоб отримати покращену видимість анатомічних частин. Потім ми пропонуємо, як створити ВДД рентгенівських зображень. Нарешті, ми пропонуємо методологію та оцінюємо пул фактичних методів, перевіряючи доцільність використання операторів тонального відображення (ОТВ). Треба відмітити окремо, що ОТВ не потребують спеціального прийняття даних, розроблених для загальної фотографії, крім масштабування тонального діапазону.

2.2.Огляд методів ВДД

Техніки високого динамічного діапазону мають на меті розкрити спостерігачеві весь вміст сцени, незалежно від того, тьмяний він чи світлий. Ця мета просто досягається людиною за допомогою адаптації до візуальних умов або спостережуваного фрагмента сцени, на жаль, для більшості сучасних пристроїв отримання зображення це не так просто. Загальний конвеєр ВДД [8,7] складається з наступних етапів:

1. Зйомка – кілька зображень НДД – стопка – з різною експозицією (діафрагма, витримка або чутливість) об’єднуються в зображення з плаваючою точкою, що представляє яскравість. Це досягається наступними кроками:

(a) Якщо це необхідно, зображення слід обробити для виявлення спотворення руху, що виникають між знятими експозиціями – вирівнювання, що з’являється через камери, і відблиск, що скасовує рух у знятій сцені.

(b) Через нелінійність камер цей крок вимагає лінеаризації зображень LDR за допомогою функції відгуку камери (CRF) – існують різні методи, запропоновані для відновлення CRF із стеку зображень [9].

(c) значення компонентів підсумовуються з відповідними ваговими коефіцієнтами

2. Зберігання – у пам'яті потрібне представлення з плаваючою комою (12 байт на піксель), але також пропонуються ефективні уявлення файлів, такі як RGBE, XYZE, LogLuv або OpenEXR.

3. Візуалізація – через обмежену доступність рідних дисплеїв HDR, вихідна фаза вимагає прийняття вмісту HDR до зображення LDR за допомогою тонального відображення. Ця операція називається оператором тональної карти (TMO) і є важливим кроком для візуальної правдоподібності та вірності результатів. Дослідження тривають, і були запропоновані численні TMO.

2.3. Оператори тонального відображення

Оператори тонального відображення (ОТВ) є ключовим етапом обробки HDR у цьому дослідженні, ці алгоритми призначені для адаптації зображень HDR для наближення їх під час відображення на звичайних екранах LDR. Існує безліч пропозицій, заснованих на різних обґрунтуваннях, які призводять до різних результатів. Що важливо, ОТВ працюють переважно на ахроматичній складовій яскравості, залишаючи хроматичну інформацію недоторканою. Зазвичай ОТВ можна позначити як:

$$f(I): R^C \Rightarrow [0...255]^C, \quad (7)$$

де: f – позначає ОТВ, I – зображення, C – кількість колірних каналів. Окремі ОТВ відрізняються за загальним підходом і наміром їхнього дизайну. У системному підході першим критерієм таксономії є принцип обчислення, Бантерле [10] виділяв чотири типи обчислень (хоча деякі автори згадують лише перші два з них):

– глобальний (G) – точкові оператори, де до всіх пікселів зображення застосовується одна і та ж математична операція

– локальний (L) – де тональне перепризначення залежить від пікселя та його околиці

– частота (F) – на основі поділу зображення на діапазони низьких і високих (деталі), де тональне відображення застосовується до низьких діапазонів, а деталі залишаються неушкодженими

– сегментація (S) – на основі сегментації зображень на відносно великі області та індивідуального відображення кожного з них.

Інший, дуже важливий аспект - це задум ОТВ або його передбачувана область застосування, відповідно до Banterle можна відзначити два основних класи для статичних зображень і один додатковий для відео:

– перцептивний (P) – цей клас ОТВ заснований на моделюванні властивостей зорової системи людини (HVS) для досягнення мінімальної

різниці сприйняття (відповідно до цієї моделі) між реальною сценою та відтвореним зображенням.

– емпіричний (E) – коли певні евристики розглядаються на предмет схожості з оригінальним виглядом сцени як об’єктивний критерій, зазвичай вони використовують добре мотивовані об’єкти, такі як контраст, яскравість, кольори, шум або кількість деталей. Цей клас ОТВ далі поділяють інші автори [11],

– тимчасовий – підходить для HDR-відео та анімації – поза межами цієї роботи.

2.3.Концепція

Ідея слідує повсякденному досвіду читача, який цікавиться фотографією, що кілька зображень різної експозиції (час або кількість випромінювання) можна об’єднати в ВДД-зображення, а потім за допомогою ОТВ вони прийняті назад для відображення в НДД, приносячи більше візуальної інформації. Хоча ми пропонуємо дещо модифікований підхід – використовувати змінну довжину хвилі замість експозиції. Він відповідає навчальним рекомендаціям з радіології [12], де дію опромінення як струм, помножений на час (мАс), приймається до маси тіла, а напруга прискорення налаштовується для отримання видимості певних тканин.

Запропонований підхід можна порівняти з фотографуванням у видимому діапазоні з різними кольорами освітлення. Подібна ідея також стоїть за спектральною ВДД [13], хоча основна візуалізація зосереджена на тому, щоб показати, як будуть виглядати тканини при різних напругах [14]. У запропонованому підході ми намагаємося включити візуальну інформацію від усіх композиційних зображень. Отримання ВДД від компонування зображень у нашому випадку є дещо складним через відсутність формального фону. Конструкція ВДД вимагає знання значення експозиції (EV), яке не має значення, оскільки ми не використовуємо фактичну експозицію. Їх потрібно налаштувати штучно, щоб імітувати інтерпретацію тіней/середніх тонів/світла

Можливість відображати рентгенівські зображення за допомогою ОТВ є наслідком двох обґрунтувань:

– На рентгенівських знімках видимий вміст залежить від енергії фотона. Зображення, отримані з використанням різних енергій фотонів, демонструють різну видимість різних тканин. Ці зображення показують зображення, які доповнюють один одного – на одних краще видно кістки, на інших – м'які тканини.

– Загальний принцип ОТВ – передати в межах одного зображення якомога більше візуальної інформації з різних зображень однієї сцени.

2.4. Експерименти та отримання зображень

Експериментальна частина складається з двох етапів – підтвердження концепції та аналіз ТМО. Для тесту в якості моделі було використано куряче крильце з продуктового магазину. Три зображення були отримані з використанням різних пікових напруг фотонів. Далі було створено HDR-зображення, а потім тон відображено назад у LDR.

Джерелом знімків був досить старий рентгенівський апарат TDv 6545/016-15 з рамкою: 12x12 см з роздільною здатністю 768x776px, трубка: COMET Тип: DO 10-150, струм: 320mA/2mA (флюороскоп). Рентгенівський пристрій виводить флюороскопічні зображення, які надаються у вигляді аналогового відеосигналу, який потім перетворюється в цифрову форму за допомогою Matrix-II/Y/C FrameGrabber. Зображення знімалися з частотою 5 Гц протягом 16 секунд, загальна тривалість 80 кадрів, а потім усереднювалися. Знімки були зроблені при постійному струмі 2 мА і при трьох напругах прискорення: 37, 60 і 90 кеВ, з акриловою пластиною, яка використовувалася як опора для об'єкта, і додатковою мідною пластиною у випадку 90 кеВ. Для кожного з налаштувань візуальне посилення сигналу регулювався візуально досвідченим оператором.

Щоб перевірити можливість покращення видимості деталей об'єкта, ми використали найбільш загальний оператор, що використовується для цієї мети [15, 16] – злиття за пірамідою Лапласа [17]. Піраміда Лапласа (полосна

пропускання) розкладає вхідні зображення на представлення з багатою роздільною здатністю, що включає базовий і деталізований шари (смуги) шляхом послідовної низькочастотної фільтрації, підвибірки та отримання різниці суміжних шарів для всіх, крім останнього (базового) шару, що є просто представлення з низькою роздільною здатністю. Потім піраміди об'єднуються і вихідне зображення відновлюється в зворотному процесі – піраміда розширюється. Злиття пірамід Лапласа (L) N зображень на піраміді K-го рівня максимізує локальну (x, y) дисперсію зображення.

Отримане зображення з одним із вихідних зображень та їх відмінність представлено на малюнку 3. Візуальний огляд виявляє посилені контрасти в кістках, видимі контури м'яких тканин, розрив жирової тканини та збільшені тіні м'язів.

Жодне з вихідних зображень не містить усіх деталей. Це доводить, що можна отримати більше візуальної інформації від злиття експозиції, незважаючи на те, що оператор Лапласа є найбільш загальним. Ми можемо припустити, що більш досконалі оператори, що залучають моделі спостерігачів, можуть забезпечити значно кращу якість візуального зображення.

Мета наступного кроку в цьому дослідженні полягала в тому, щоб переглянути велику групу TMO на предмет їхньої ефективності в рентгенівському ВДД. На цьому етапі ми штучно створили ВДД-зображення трьох тестових вихідних зображень, а потім застосували численні TMO, щоб отримати зображення НДД назад. Нарешті, якість зображень була оцінена групою експертів за допомогою систематичної оцінки якості. Вся обробка ВДД-зображень, включаючи відносно великий пул TMO, була виконана в середовищі Matlab за допомогою HDR Toolbox, створеного Франческо Бантерле [8].

Побудова ВДД -зображення Ми припустили, що колірний простір sRGB для створення ВДД -зображення, оскільки вихідні зображення були налаштовані під час отримання для відображення на відносно поширеному

моніторі ЕПТ. Використання sRGB передбачає припущення функції 2,2 гамма як CRF для збірки ВДД. Це був розумний вибір, оскільки отримання оцінки CRF за допомогою Debevec і Malik [9] або інших алгоритмів не має великого сенсу і призводить до непередбачуваних результатів. Зображення HDR було створено з використанням значень штучної експозиції (EVi). Вони були отримані як рішення оптимізаційної задачі з пошуком значень EV, максимізуючи цільову функцію – узгодженість між HDR та найкращим (K) зображень LDR, виміряних як один мінус коефіцієнт кореляції рангу Спірмена (SROCC).

Проблема оцінки якості Отримані зображення досить численні і зазвичай схожі один на одного, тому ключовим аспектом цього дослідження є пропозиція надійної оцінки якості. Об’єктивні методи, такі як SSIM [18] або інші, зосереджені на подібності отриманого зображення до вихідного, тому всі модифікації зображення вимірюються як недосконаліть, включаючи також покращення, такі як підвищення контрастності або розмиття. Крім того, HDR-орієнтований варіант SSIM – TMQI [19] додатково використовує міру природності, яка є аспектом якості, який не стосується медичних зображень.

Тому ми пропонуємо суб’єктивну оцінку якості групою експертів, яка була підкріплена анкетною таблицею, що містить систематичні критерії оцінки для кожного із зображень – окремі частини та тканини виділяються в таблиці 3. Зображення були представлені експертам на NEC SpectraView. Монітор Reference 242, відкалібрований за допомогою спектрофотометра Xrite i1 Photo.

Результати представлені в таблиці. Для кожного з анатомічних сегментів (стовпців) у порівнянні з різними TMO (рядок) усереднені відповіді експертів зберігаються у відповідних клітинках масиву. Крім того, такі ж оцінки також надаються вихідними зображеннями. Крім того, для кожного рядка (зображення джерела або TMOs) у таблиці також наведено три середніх по рядках значення оцінки анатомічних сегментів – окремо для кісток, м’яких тканин і загального середнього. Середні оцінкові бали потім підсумовуються у

формі рейтингу, відсортованого відповідно до загальних середніх значень. Він показаний на рис. 5, він включає як тонові зображення, так і вихідні зображення. Такий рейтинг дозволяє порівняти, наскільки, на думку експертів, були покращені (або погіршені) вихідні зображення.

2.5. Обговорення результатів

Більшість отриманих зображень ТМО пропонують покращену якість у порівнянні з будь-яким із вихідних зображень. Враховуючи рейтинг, Kuang ТМО видається безперечним переможцем, пропонуючи хорошу або хорошу видимість усіх кісток і м'яких тканин.

Усі оператори з найкращим рейтингом збільшили контрасти країв, хоча діагностична якість спостережуваних вихідних зображень не залежить безпосередньо від точності зображення. Оператори з найкращим рейтингом покращили видимість вмісту (наприклад, м'язів, шкіри чи хрящів), який майже не видно на всіх вихідних зображеннях. Крім того, більшість операторів з найвищим рейтингом представили невеликі ореоли навколо кісток (особливо руки). Це покращує їх видимість, але у звичайній HDR-фотографії ореоли вважаються спотворюючим явищем, що погіршує якість зображення. Розглядаючи рейтинг, оператори на основі частоти перевершили інших. ми не змогли помітити жодних інших помітних дискримінантів – це стосується як намірів проектування, так і типу обчислень. Перцептивно та емпірично розроблені ТМО рівномірно розподілені в рейтинговому списку. Також ТМО, крім методів обчислення частоти, не демонструють помітної переваги.

Крім основної процедури оцінки, ми відзначили також безкоштовні коментарі експертів щодо конкретних зображень. Вони вказали на наступне:

– видимість головок хрящової кістки в найкращих ТМО,

– змінна видимість різних частин обумовлена їх неоднорідною товщиною, деякі ТМО дозволяють опустити цю проблему.

Отримані зображення найкращих ТМО були певною мірою незалежними від товщини тканини. Це означає, що дуже тонкі структури видно разом з

більш товстими, що вимагає налаштування експозиції в звичайних рентгенівських знімках.

У перспективі використання методів ВДД в рентгенівських знімках може дати більш чіткі сцени з кращою видимістю деталей, ніж стандартні проекції. Завдяки покращеним зображенням, зазвичай важко помітні зміни, такі як остеомаляція, остеоліз та остеосклероз, можуть мати хорошу видимість і покращити подальшу діагностику, хоча це вимагатиме подальшого тестування на фактичних патологічних зразках.

2.6. Висновки розділу

У розділі було перевірено, що методи ВДД можна ефективно використовувати для отримання зображень, які містять видимі різні тканини. Просте підтвердження концепції доводить, що навіть найпростіший поєднання експозиції ВДД за допомогою піраміди Лапласа може покращити видимість деталей на рентгенівських знімках. Далі систематичний огляд пропонує пропозицію створення штучного ВДД - зображення рентгенівських зображень і аналізує численні оператори тонального відображення на предмет їх ефективності в застосуванні ВДД на дисплеї. Останнє дозволило виявити пул ефективних ТМО, здатних разом візуалізувати тверді та м’які тканини.

Подальші роботи в цій галузі мають включати перевірку ефективності ТМО за допомогою різних об’єктів (переважно ссавців) та високоякісних рентгенівських пристроїв. Для формальностей слід також враховувати аспекти дозиметрії, хоча отримання кількох (або сотень на томографії) зображень за один сеанс не є чимось незвичайним, тому дози рентгенівського сеансу ВДД у живого пацієнта також повинні бути на прийнятному рівні.

3. СТРУКТУРА ОРИГІНАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ

3.1. Проблема вирівнювання інтенсивності рентгенівських зображень

Використання цифрових детекторів для отримання рентгенівських зображень стає звичним явищем у клінічній та доклінічній практиці. Плоскі детектори (FP) стають найпоширенішим вибором, як для двовимірного (2D) рентгенографічного цифрового зображення, так і для конусно-променевого КТ (CBCT). Рентгенівські системи на основі FP використовуються сьогодні в різних сценаріях, таких як цифрова рентгенографія, системи С-дуги, для інтервенційної флюороскопії або CBCT, скелетно-м'язова CBCT зображення, системи CBCT kVp у поєднанні з лінійними прискорювачами для променевої терапії, керованої зображенням, системи CBCT молочної залози або мікроКТ зображення дрібних тварин (CBμCT).

Однак обмежений динамічний діапазон (DR) детекторів FP може поставити під загрозу якість зображення, якщо в зразку є матеріали як з низькою, так і з високою щільністю. Значення DR зазвичай вимірюються як відношення заряду насичення до рівня шуму. Типові значення, як повідомляють виробники, можуть становити 2000 для Hamamatsu C7940DK-02 або 4000 для Shad-o-Box.

Наслідком цього обмеженого DR є те, що щільні ділянки можуть стати затемненими на 2D-зображенні, якщо експозицію відрегулювати для кращого спостереження за анатомією м'яких тканин. Ця проблема є більш важливою в CBCT, оскільки зазвичай використовувані алгоритми аналітичної реконструкції, такі як FDK, створюють серйозні артефакти в реконструйованих зрізах, коли поле зору (FOV), охоплене отриманими проекціями, скорочує досліджуваний об'єкт. Таким чином, FOV сканера має бути більше розміру вибірки. Якщо об'єкт має високу область загасання, неможливо отримати достатнє відношення сигнал/шум (SNR) всередині цієї області без насичення елементів детектора в області без об'єкта. Така проблема може виникнути в будь-якому КТ-сканері, коли DR обстежуваного перевищує таку детектора

Для вирішення цього питання було запропоновано кілька підходів. Більшість із них спочатку були розроблені для оптичних зображень (тобто фото та відео) і засновані на апаратній модифікації або спеціальних конструкціях детекторів. Деякі реалізації включають використання нетрадиційного піксельного дизайну, кількох датчиків всередині одного пікселя, просторово змінної чутливості пікселів або комбінації спеціальних сцинтиляторів і пікселів. На додаток до цих підходів було запропоновано невелику кількість програмних методів.

Деякі з найбільш широко використовуваних програмних методів для розширення DR детекторів оптичних зображень (наприклад, для фотографії та відео) засновані на отриманні кількох зображень, кожне з різним впливом падаючого випромінювання. Потім отримані дані об’єднуються, щоб отримати нове зображення HDR. Алгоритм комбінації для отримання значення пікселя зображення HDR може бути таким простим, як вибір найкращого зразка з двох вихідних наборів даних, або більш складним процесом, який використовує всю інформацію, що міститься в отримані дані.

Раніше повідомлялося про використання методів на основі багаторазового впливу для розширення DR детекторів FP в CBμCT. Було запропонувано підхід до збільшення DR прогнозованих даних шляхом поєднання двох наборів даних, отриманих з різною експозицією (mAs). Однак DR отриманих даних не порівнювався з тим, що досягається звичайними методами сканування, і в даних HDR були помітні розриви.

Ми представляємо нову техніку подвійної експозиції для розширення DR детекторів FP. Метод поєднує два набори проекційних даних з використанням оцінки максимальної правдоподібності на основі попередніх знань про реакцію детектора на вхідне випромінювання. Відповідь детектора описується за допомогою аналітичної моделі для середнього піксельного значення та дисперсії, яка була розширена, щоб включати ефект насичення. Нами були отримані параметри моделі реального детектора, достовірність цієї моделі оцінена за допомогою експериментальних даних. Ефективність нашого методу

для розширення DR та його потенційні межі були оцінені за допомогою змодельованих даних та реалістичних сценаріїв зображення з експериментальними 2D-проекційними зображеннями та даними CBCT з комерційного сканера CBμCT.

3.2. Двоенергетичний алгоритм досягнення високого динамічного діапазону

Розглянемо один зі стандартних підходів [20] досягнення ВДД при використанні рентгенівських пласкопанельних детекторів шляхом поєднання двох зборів одного зразка, взятого з двома різними рівнями рентгенівських фотонів і однаковою спектральною конфігурацією променя. Щоб поєднати обидва набори даних, відклик пікселів детектора було змодельовано в термінах середнього та дисперсії за допомогою лінійної моделі. Модель була розширена, щоб врахувати ефект насиченості пікселів. Придатність піксельної моделі для відображення сигналу детектора оцінювали за допомогою експериментальних даних конусно-променевого мікроКТ-сканера для дрібних тварин, оснащеного плоскопанельним детектором. Потенційне розширення динамічного діапазону, запропоноване цім методом, було досліджено для загальних плоских детекторів за допомогою аналітичних виразів та моделювання. Ефективність запропонованого підходу з подвійною експозицією в умовах реалістичного зображення порівнювали з ефективністю звичайної техніки однократної експозиції з використанням експериментальних даних з двох різних фантомів. Якість зображення оцінювалась з точки зору співвідношення сигнал/шум, контрасту та аналізу профілю, намальованого на зображеннях. Динамічний діапазон, виміряний як відношення між експозицією для насичення та експозицією, еквівалентною шуму приладів, був збільшений з 76,9 до 166,7 при використанні нашого методу. Результати подвійної експозиції показують вищий відношення контраст/шум і контрастну роздільну здатність, ніж отримання одноразової експозиції для тієї ж дози рентгенівського випромінювання. Крім того, в об’єднаному наборі даних було зменшено артефакти зображення. Цей метод розширення динамічного

діапазону детектора без збільшення дози особливо підходить для зразків зображень, які містять як низькі, так і великі області загасання.

Метод, представлений у цьому підрозділі, розширює DR рентгенівських детекторів FP, таких як ті, які зазвичай використовуються в CBCT. Це розширення досягається за допомогою процесу отримання модифікації та додаткового етапу обробки з використанням отриманих даних, що усуває необхідність модифікації апаратного забезпечення, яка може бути складною та дорогою для реалізації в комерційних пристроях.

Щоб отримати HDR-зображення, ми пропонуємо комбінацію двох наборів даних з використанням оцінки максимальної правдоподібності на основі раніше опублікованої теоретичної моделі для середнього та дисперсії піксельного сигналу. Модель була розширена для врахування ефекту насичення в дисперсії піксельного сигналу. Модель реакції детектора продемонструвала хорошу узгодженість з експериментальними даними, що підтвердило її придатність для реалістичного моделювання FP-детекторів.

Детектор показав лінійну реакцію, яка порушується в точці насичення, і зниження DR для більш тривалого часу інтеграції. Оскільки адитивний шум і нахил дисперсії були постійними протягом часу інтегрування, зменшення DR відбувалося виключно через збільшення темного сигналу з часом інтегрування.

Змодельовані дані показали, що метод HDR теоретично може розширити DR детектора до нескінченності за умови, що анодний струм джерела рентгенівського випромінювання може бути збільшений без обмежень. Більш тривалий час інтегрування зменшував DR детектора за рахунок збільшення темного сигналу. З цієї причини продуктивність методу HDR погіршувалася, коли експозиція детектора була збільшена за рахунок збільшення часу інтеграції зображення замість анодного струму.

Результати експерименту продемонстрували покращену якість зображення для проекційних та томографічних даних у зразках, що містять області високого загасання. Це посилення було наслідком збільшення DR

детектора, а не лише зменшенням шуму, наявного в даних, що підтверджують графіки SNR для тієї ж дози, що подається до зразка.

Результати для фантома мідних сходів показали, що сигнал всередині областей високого загасання був замаскований шумом у даних однократної експозиції через відсутність дійсного сигналу всередині області в будь-якому з отриманих кадрів. Цей недолік сигналу перешкоджав посиленню видимості фантомної структури за рахунок усереднення кадрів. Після застосування методики подвійної експозиції над-експонований знімок забезпечував дійсний сигнал у деяких із сильно ослаблених ділянок, виявляючи частину структури, яку не було видно з даними однократної експозиції, і, отже, розширюючи DR детектора.

Оскільки наш метод розширює DR виявленого сигналу, вигода більша для сильно ослаблених областей. Цей ефект відображається у формі кривих SNR для даних HDR, які демонструють асимптотичну поведінку для меншого загасання. Цей результат передбачає гомогенізацію властивостей шуму в областях з високим і низьким загасанням, що є бажаною властивістю для наступних етапів обробки даних.

Що стосується томографічних даних, то контраст і шум, досягнутий за допомогою представленого тут методу, були кращими, ніж ті, отримані за допомогою методів одноразової експозиції, при застосуванні до зразків, що містять матеріали з високим ослабленням, що перевищують DR детектора. Погану контрастну роздільну здатність у даних однократної експозиції можна пояснити відсутністю фотонів, які досягають детектора для сильно ослаблених ділянок. Через відсутність фотонів рівень сигналу був низьким і більш однорідним у сильно ослаблених областях. Для таких низьких значень сигналу незначні відхилення в точці калібрування посилення стають набагато помітнішими і є джерелом більшого впливу кільцевих артефактів. Більш міцні кільця приховують деталі всередині областей, оточених матеріалом із високим послабленням у реконструйованому об’ємі. Крім посилення кільцевих артефактів, низькі рівні сигналу призвели до зниження CNR через підвищення

відносного внеску адитивного шуму, що погіршує шумові властивості відновленого набору даних.

Оскільки всі отримані дані були використані в процесі комбінування, розривів у відновлених зрізах не спостерігалося. Розриви спостерігалися в попередніх пропозиціях, які використовували простіший підхід для комбінації отриманих наборів даних.

Наш метод можна застосувати до будь-якого детектора FP, незалежно від базового апаратного забезпечення, за умови, що затримка зображення досить низька і не забруднює наступні кадри даних, особливо коли піксель перемикається від насиченості до лінійної реакції від одного кадру до наступного. Якщо час, необхідний для відновлення після насичення, занадто великий, продуктивність методу буде знижена. Подальша робота, яка не входить в рамки цієї статті, була б необхідна для оцінки максимального рівня затримки зображення, прийнятного для отримання прийнятних результатів.

Ми не змогли порівняти продуктивність нашого методу з підходами на основі апаратних засобів, які, безумовно, були б більш ефективними, особливо з точки зору часу отримання даних, оскільки отримується лише один набір даних. Однак наш підхід набагато менш дорогий і може бути включений як незначна модифікація в ланцюжок обробки зображень будь-якої системи на основі детектора FP, незалежно від конкретної апаратної реалізації.

Інші підходи компенсують обмежений DR детектора шляхом попереднього вирівнювання поля випромінювання за умови попереднього знання структури зразка. Найпоширенішою технікою є фільтрація метеликом, яка модифікує просторові властивості променя до того, як він буде ослаблений зразко, щоб отримати більш рівномірний розподіл випромінювання на поверхні детектора. У порівнянні з методами розширення DR, такими як представлений тут, варто зазначити, що ефект фільтра-метелика зменшується, коли умови отримання відходять від очікуваного сценарію. Наприклад, якщо форма або розмір зразка значно відрізняються від очікуваних або є неочікувані об’єкти з високим ослабленням, DR ослабленого променя все ще може бути

занадто високим для детектора FP. З іншого боку, представлений метод HDR не накладає жодних попередніх умов на властивості зразка, пропонуючи той самий потенціал для розміщення суб’єкта з більшим DR незалежно від розподілу ослаблення зображуваного зразка.

Запропонована тут методика подвійної експозиції може бути додатково розширена до підходу з багатократною експозицією, заснованого на кількох рівнях експозиції, щоб отримати подібне SNR у всіх частинах проекційного зображення. Однак максимальний мА, досягнутий за допомогою рентгенівської трубки, обмежує максимальний DR, який можна отримати за допомогою методу багатократної експозиції.

Майбутні роботи передбачатимуть вивчення альтернатив представленому алгоритму комбінації. Також вивчаються нові моделі функцій щільності ймовірності.

Таким чином, стандартний двоенергетичний підхід ефективно розширює DR детектора та підвищує продуктивність по відношенню до звичайних протоколів, особливо коли в зразку є області високого загасання.

Однак недоліки цього методу змусили нас запропонувати свою оригінальну методику.

3.3. Алгоритм дводіапазонного вирівнювання яскравості.

В якості практичної реалізації розробленого алгоритму була проведена розробка програмно - апаратного комплексу проведення калібрування приймачів рентгенівського зображення, які використовують два АЦП. Налаштування цих АЦП проводилося таким чином, що одно з них «працювало» в нижній частині діапазону яскравості. У цьому АСР коефіцієнт використання вхідного сигналу (підсилення) підбирався таким чином, щоб зображення тестових об'єктів малого контрасту задовольняло максимальним вимогам, які наведені в стандартах для рентгенівських апаратів. Така настройка дозволяла отримувати якісні зображення тест-об'єктів, контраст яких показувався навіть нижче стандартних порогових значень.

При цьому, настільки високий коефіцієнт використання привів до того, що насичення сигналу при збільшенні експозиції наступало дуже швидко. Щоб був, динамічний діапазон, який забезпечував перший АЦП, був дуже низьким.

Другий АЦП настроювався в певному сенсі прямо протилежним чином. Коефіцієнт використання в них вибирався настільки малим, щоб можна було фіксувати сигнали в кілька перевищуючих те, які вимагаються відповідно до стандартів. При цьому, однак, при малих яскравості сигналу цього АЦП природно не міг використовуватися для виведення малих контрастів.

Основною задачею тепер був вибір алгоритму переходу від використання сигналу від першого АЦП при малих яскравостях до використання сигналу від другого АЦП при великих яскравості.

Незважаючи на те, що виявляється просто такою задачею при побудові алгоритму виявляються деякі труднощі, пов'язані з першою чергою з монотонністю відкликання детектора, а також із гладкістю переходу від передаточної кривої першого АЦП до кривого другого АЦП. Під терміном «гладкою» ми маємо на увазі неперервність самої функції та її виробничої.

У цій роботі запропонований алгоритм побудови єдиного кривого відкликання, який в певному сенсі визначає монотонний і гладкий перехід від однієї передатної кривої до іншої.

На першому етапі цього алгоритму будуються передаточні криві для кожного АСП окремо. Для цієї цілі проводиться так зване калібрування прийомного тракту. У процесі цього калібрування на готовому приймачі отримують серію зображень різної яскравості, які рівномірні розподіли за всім діапазоном кожного з приємних трактів. Тут треба помітити, що набір таких зображень є різними для різних АЦП через різні характеристики цих АЦП.

В якості прикладу приведені зображення, які використовувалися при калібруванні реального приладу.

В таблиці 3.1. наведені вихідні заряди, які проходили через рентгенівську трубку. Напруга при цьому рівнялось 70 кВ. У наступному стовпчику

(стовпчик № 3) наведені таблиці середньої яскравості в обраній заздалегідь центральної області зображення. У стовпчику № 4 наведено яскравість одного, вибраного для наглядної демонстрації пікселів з координатами (1000,1000) . У стовпчику № 5 наведено яскравість в цьому пікселі після проведення процедур вирівнювання яскравості для цього конкретного АЦП.

Таблиця 3.1. Приклад проведення калібрування та вирівнювання яскравості для одного пікселя з координатами (1000, 1000). АЦП №1.

1	2	3	4	5
№ з/п	Q, 10-3 К	Середній сигнал зображення	Сигнал у пікселі до вирівнювання	Сигнал у пікселі після вирівнювання
1	2,5	517	500	515
2	4	767	813	768
3	6	1116	1222	1110
4	10	1758	1699	1753
5	15	2545	2543	2547
6	25	4175	4-87	4170
7	40	6555	6455	6559
8	60	9660	9998	9655

Таблиця 3.2. Приклад проведення калібрування та вирівнювання яскравості для одного пікселя з координатами (1000, 1000). АЦП №2.

1	2	3	4	5
№ з/п	Q, 10-3 К	Середній сигнал зображення	Сигнал у пікселі до вирівнювання	Сигнал у пікселі після вирівнювання
1	2,5	9539	9444	9533

2	4	14115	14272	14100
3	10	29272	29294	29283
4	15	43944	44082	43953

Ми бачимо, що вирівнювання яскравості в обох діапазонах є досить якісним і, таким чином, оброблені дані окремо у двох діапазонах можуть бути використані для їх поєднання і створення єдиного зображення з високим динамічним діапазоном.

3.4. Програмна реалізація запропонованого алгоритму

Графічний інтерфейс також як і алгоритм, реалізований на мові програмування Java з використанням графічної бібліотеки Javafx.

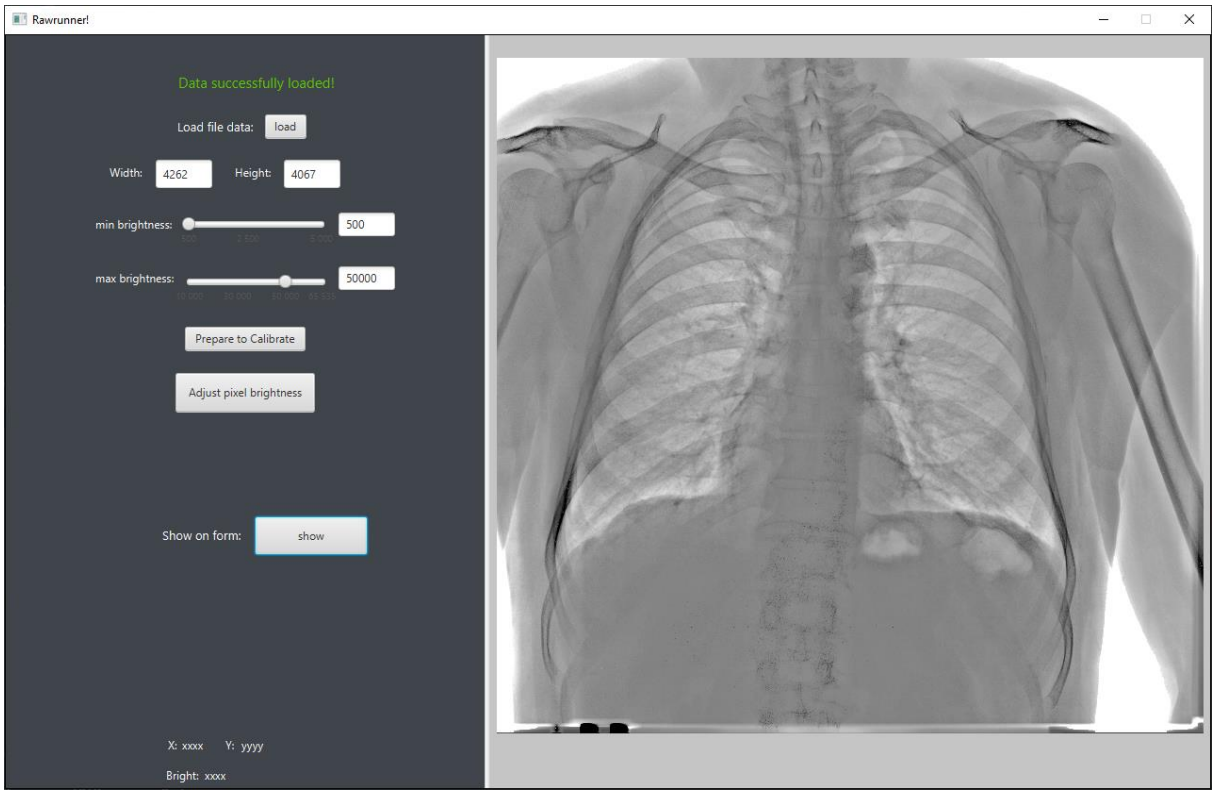


Рис. 1. Демонстрація основного графічного інтерфейсу програми, що реалізує запропонований алгоритм.

```
203         double Imin = 0, Imax = 1000;
204         Imin = minBrightness;
205         Imax = maxBrightness;
206         int[] LUT = new int[65536];
207         for (int c = 0; c < 65536; c++) {
208             if (c <= Imin) {
209                 LUT[c] = 0;
210             } else if (c >= Imax) {
211                 LUT[c] = 255;
212             } else {
213                 double temp = ((c - Imin) / (Imax - Imin)) * 255;
214                 int rTemp =  Math.toIntExact(round(temp));
215                 LUT[c] = Short.toUnsignedInt((short) rTemp);
216             }
217         }
```

Рис.2. Приклад реалізації операторів тонального відображення (ОТВ) є одним з ключових етапів обробки HDR у цьому дослідженні.

Оператори тонального відображення (ОТВ) є одним з ключових етапів обробки HDR у цьому дослідженні.

Вище наведено приклад реалізації ОТВ алгоритму призначені для адаптації зображень HDR для наближення їх під час відображення на звичайних екранах LDR.

```
505         /**     for calibration by one point*/
506         double Sum = 0; //sum of pixel brightness from rectangle of interest (ROI)
507         double averagePixBright = 0;  //average pixel brightness from ROI
508         for (int k = 0; k < size; k++) {
509             double vc = floor(k / W); // vertical coordinate or linenumber
510             double hc = k - W * vc;  // horizontal coordinate or line index
511             if ((hc > 1200) && (hc < 1400) && (vc > 1200) && (vc < 1400)) {
512                 Sum += imageData[k];
513             }
514             averagePixBright = Sum / (201 * 201);
515         }
516         callibrateCoef = new double[size];
517         for (int k = 0; k < W * H; k++) {
518             callibrateCoef[k] = averagePixBright / imageData[k];
519         }
520
```

Рис. 3. Приклад частини коду, який використовується для вирівнювання гістограми яскравості після алгоритму тонального відображення

3.5. Обговорення результатів та висновки розділу

У розділі проведено обговорення типового конкурентного методу збільшення динамічного діапазону. Наведено його недоліки та запропоновано свою оригінальну методику. Суть методики полягає в одночасно використанні даних двох АЦП, які обробляють сигнал від одного пікселя. Цей алгоритм було використано в розробленому програмному комплексі калібрування детекторів з двома каналами формування рентгенівських зображень. В підрозділі наведені результати реальних тестових досліджень, проведено демонстрацію роботу розроблених програм і доведено на практиці здобуття надвисокого динамічного діапазону завдяки застосуванню запропонованих алгоритмів.

ВИСНОВКИ

У дипломі досліджено оригінальний підхід для розширення динамічного діапазону рентгенівських пласко-панельних детекторів шляхом поєднання двох отриманих даних однакової кількості, які здобути з двома різними рівнями аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Для поєднання двох наборів даних було запропоновано алгоритм формування двох функції відклику другого порядку. Придатність такої піксельної моделі для представлення сигналу детектора було перевірено за допомогою експериментальних даних зображень стандартних тестових об'єктів. Потенційне розширення динамічного діапазону, запропоноване цім методом, було дослідження для загальних плоских детекторів за допомогою аналітичних виразів та моделювання. Ефективність запропонованого підходу з подвійними рівнями АЦП в умовах реалістичного зображення порівнювалось з ефективністю звичайної техніки однократної експозиції з використанням експериментальних даних з двох різних фантомів. Якість зображення оцінювалась з точки зору відношення сигнал/шум, контрасту і аналізу профілю зображень тестових об'єктів.

Таким чином треба відмітити, що було досягнуто основна мета роботи, а саме проведені дослідження основних алгоритмів формування високого динамічного та розроблено оригінального алгоритму використання детекторів рентгенівського зображення з двома каналами детектування зображень. Завдяки цьому було розроблено та застосовано оригінальний алгоритм використання вимірювальних пристроїв підвищеного динамічного діапазону вимірювань. Як практичний результат було розроблено програмний комплекс калібрування детекторів з двома каналами формування рентгенівських зображень; а також на реальних тестових зображеннях проведено демонстрацію роботу розроблених програм і доведено на практиці здобуття надвисокого динамічного діапазону завдяки застосуванню запропонованих алгоритмів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Rastislav Lukac, “Computational photography: Methods and applications”. *CRC Press, Taylor and Francis Group*, 6000 BS Parkway, NW, Boca Raton, FL 33487-2742. 2011.

2. P. Debevec and Jitendra Malik. “Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs”. *In Proc. of 24th conference on Compute Graphics and Interactive Techniques, (ACM)*, New York, USA, pp. 369–378. August 1997.

3. C. Cheng, C. Au. Oscar, N. Cheung, C. Liu, K. Yip. “High Dynamic Range image capturing by Spatial Varying Exposed Color Filter Array with specific Demosaicking Algorithm”. *IEEE, Communications, Computers and Signal Processing, 2009*, Victoria, BC, pp.- 648 – 653, 23-26 Aug. 2009.

4. E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik, and P. Debevec, “High Dynamic Range Imaging”. *Morgan Kaufman Publishers*, San Francisco, CA, USA. Nov. 2005

5. Stan Birchfield, “An Introduction to Projective Geometry (for computer vision)”. *A tech. Report*, 12 March 1998.

6. E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, J. Ferwerda, “Photographic Tone Reproduction for Digital Images”. *ACM Transections on Graphics, 21 (3).* New York, USA. July, 2002.

7. Mantiuk, R.K., Myszkowski, K., Seidel, H.P.: High Dynamic Range Imaging. In: Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Eng., pp. 1–42. Wiley (2015).

8. Banterle, F., et al.: Advanced High Dynamic Range Imaging: Theory and Practice. CRC Press, Natick, MA, USA (2011)

9. Debevec, P.E., Malik, J.: Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs. SIGGRAPH ’97, pp. 369–378. ACM (1997).

10. Banterle, F., et al.: Dynamic Range Compression by Differential Zone Mapping Based on Psychophysical Experiments. In: Proc. of the ACM Symp. on Appl. Perception, SAP ’12, pp. 39–46. ACM (2012).

11. Eilertsen, G., et al.: Evaluation of Tone Mapping Operators for HDR-Video. Computer Graphics Forum 32(7), 275–284 (2013)

12. Thrall, D.E. (ed.): Textbook of veterinary diagnostic radiology, sixth edition edn. Elsevier, St. Louis, Missouri (2013).

13. Zagoudis, J.: Spectral Imaging Brings New Light to CT. Imag. Techn. News (2015).

14. Rassouli, N., et al.: Detector-based spectral CT with a novel dual-layer technology: principles and applications. Insights into Imaging 8(6), 589–598 (2017)

15. Mertens, T., Kautz, J., Reeth, F.V.: Exposure Fusion. In: 15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, 2007. PG '07, pp. 382–390 (2007).

16. Zheng, Y.: Multi-scale fusion algorithm comparisons: Pyramid, DWT and iterative DWT. In: 2009 12th Int. Conf. on Inform. Fusion, pp. 1060–1067 (2009).

17. Burt, P., Adelson, E.: The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code. IEEE Transactions on Communications 31(4), 532–540 (1983).

18. Wang, Z., et al.: Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. IEEE Trans. on Image Proc. 13(4), 600–612 (2004).

19. Yeganeh, H., Wang, Z.: Objective Quality Assessment of Tone-Mapped Images. IEEE Transactions on Image Processing 22(2), 657–667 (2013).

20. A Sisniega, M Abella, M Desco and J J Vaquero, Dual-exposure technique for extending the dynamic range of x-ray flat panel detectors, *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 59, nº 2 (2014), pp. 421-439. DOI: http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/59/2/421