

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Кібербезпеки _____
(повна назва)

Кафедра _____ Інформаційно-мережної інженерії _____
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____
Аналіз методів стиснення зображень з високим динамічним діапазоном _____

(тема)

Виконав:
здобувач _____ 4 _____ року навчання,
групи _____ ТРІМІ-22-1 _____
_____ Олександр Кошель _____
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність _____ 172 Телекомунікації та _____
_____ радіотехніка _____
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми _____ освітньо-професійна _____
Освітня програма _____ Інформаційно-мережна _____
_____ інженерія _____
(повна назва освітньої програми)

Керівник _____ ст. викл. Олексій Федоров _____
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

В. о. зав. кафедри _____ ІМІ _____

(підпис)

_____ Дарія Чеботарьова _____
(власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Не містить відомостей, заборонених до відкритого публікування

Студент _____ / Кошель О.О. /
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник _____ / Федоров О.В. /
(підпис) (прізвище та ініціали)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Кібербезпеки _____
Кафедра _____ Інформаційно мережної інженерії _____
Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____
Спеціальність _____ 172 Телекомунікації та Радіотехніка _____
(код і повна назва)
Тип програми _____ освітньо-професійна _____
Освітня програма _____ Інформаційно-мережна інженерія _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Кошелю Олександр Олександровичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз методів стиснення зображень з високим динамічним діапазоном

затверджена наказом університету від 02 червня 2026 р. № 466Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 17 липня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Виконати аналіз методів стиснення зображень з високим динамічним діапазоном. Під стисненням HDR зображень розуміти процес відображення тонів (tone mapping), який забезпечує стиснення динамічного діапазону HDR зображення із забезпеченням видимості. В якості вхідних зображень використовувати зображення, отримані з різною витримкою (експозицією). Окрему увагу приділити таким методам стиснення динамічного діапазону, як стиснення на основі прив'язки (anchoring) та гістограмний метод стиснення.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
Вступ

1 Поняття про HDR зображення

2 Колірні простори

3 Отримання HDR зображень

4 Алгоритми композиції HDR зображень

5 Алгоритми для HDR відображення

6 Результати експериментальних досліджень

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.	08.06.2026	вик.
2.	Підбір літератури за темою роботи	08.06 – 03.07.2026	вик.
3.	Виконання розділу 1	10.06 – 15.06.2026	вик.
4.	Виконання розділу 2	15.06 – 25.06.2026	вик.
5.	Виконання розділу 3	16.06 – 28.06.2026	вик.
6.	Виконання розділу 4	28.06 – 05.07.2026	вик.
7.	Виконання розділу 5	06.07 – 13.07.2026	вик.
8.	Виконання розділу 6	10.07 – 14.07.2026	вик.
9.	Оформлення презентаційного матеріалу, підготовка до захисту в ЕК	10.07 – 16.07.2026	вик.

Дата видачі завдання 08 червня 2026р.

Здобувач _____
 (підпис)

Керівник роботи _____ ст. викл. Олексій Федоров
 (підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 56 с., 10 рис., 26 джерел, 1 додаток.

Об'єктом дослідження є методи тонального відображення зображень з високим динамічним діапазоном, отриманих шляхом комбінування звичайних зображень, захоплених за різних значень експозиції.

Мета кваліфікаційної роботи – вивчення методів тонального відображення (компресії) HDR зображень та застосування цих методів відображення HDR зображень на LDR дисплеях.

Динамічний діапазон HDR-зображення часто охоплює понад п'ять порядків величини, з яких звичайний дисплей здатний візуалізувати максимум два порядки величини. Тоді постає проблема вписати більший динамічний діапазон HDR-зображення в обмежений колірний обхват пристрою відображення. Ця проблема розв'язується завдяки тональному відображенню і по суті є проблемою стиснення динамічного діапазону зі збереженням видимості. Дана кваліфікаційна робота присвячена аналізу методів розв'язання саме цієї проблеми.

ВИСОКИЙ ДИНАМІЧНИЙ ДІАПАЗОН, ЗОБРАЖЕННЯ, КОМПРЕСІЯ,
ТОНАЛЬНЕ ВІДОБРАЖЕННЯ, ЕКСПОЗИЦІЯ, НИЗЬКИЙ ДИНАМІЧНИЙ
ДІАПАЗОН

ABSTRACT

Explanatory note: 56 p., 10 fig., 26 sources, 1 app.

Object of study is methods for tone mapping of high dynamic range images obtained by combining conventional images captured at different exposure levels.

Purpose of the qualification work is to study methods of tone mapping (compression) of HDR images and the application of these methods to display HDR images on LDR displays.

The dynamic range of an HDR image often spans more than five orders of magnitude, of which a conventional display is capable of rendering a maximum of two orders of magnitude. This raises the challenge of fitting the wider dynamic range of an HDR image into the limited color gamut of the display device. This problem is solved through tone mapping and is essentially a problem of compressing the dynamic range while preserving visual quality. This thesis is devoted to analyzing methods for solving this specific problem.

HIGH DYNAMIC RANGE, IMAGE, COMPRESSION, TONE MAPPING,
EXPOSURE, LOW DYNAMIC RANGE

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 ПОНЯТТЯ ПРО HDR ЗОБРАЖЕННЯ.....	10
2 КОЛІРНІ ПРОСТОРИ.....	13
2.1 Колірні простори RGB	13
2.2 Колірні простори яскравості-хроматичності	14
2.2.1 Опонентний колірний простір	15
2.3 Колірний простір YUV.....	17
2.3.1 Колірний простір HSV	18
3 ОТРИМАННЯ HDR ЗОБРАЖЕНЬ	19
3.1 Функція відгуку камери	19
3.2 HDR-сенсори	23
4 АЛГОРИТМИ КОМПОЗИЦІЇ HDR ЗОБРАЖЕНЬ	25
4.1 Монохромна HDR-композиція	25
4.2 Композиція HDR у просторі яскравості-хроматичності	27
4.2.1 Постановка задачі	28
4.2.2 Композиція компонента яскравості.....	28
4.2.3 Композиція хроматичних компонентів	30
4.2.4 Контроль насиченості HDR	31
5 АЛГОРИТМИ ДЛЯ HDR-ВІДОБРАЖЕННЯ.....	34
5.1 Тональне відображення монохромного HDR	36
5.2 Тональне відображення HDR яскравості-хроматичності.....	37
5.2.1 Стиснення на основі прив'язки	38
5.2.2 Стиснення на основі гістограми	40
5.2.3 Стиснення компонентів ароматичності.....	41
6 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	42
6.1 Отримання HDR зображень за набором LDR зображень	42

ВИСНОВКИ	45
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	46
ДОДАТОК А СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ	49

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

HDR (High-Dynamic Range) – Високий динамічний діапазон.

LDR (Low-Dynamic Range) – Низький динамічний діапазон.

HVS (Human Visual System) – Зорова система людини.

TMO (tone mapping operator) - Оператор тонального відображення.

LCD (Liquid Crystal Display) – Рідкокристалічний екран.

ВСТУП

Термін «зображення з високим динамічним діапазоном» (High-Dynamic Range, HDR) позначає процес зйомки, зберігання, обробки, передачі та відображення зображень, які точніше відтворюють широкий діапазон рівнів освітлення, що існують у реальному світі.

Значення захоплення світла можна порівняти з появою кольорової фотографії. Зображення у форматі HDR можна отримати шляхом зйомки декількох кадрів однієї й тієї ж сцени з різними рівнями експозиції та їх об'єднання для відтворення оригінального динамічного діапазону знятої сцени.

Зображення та відео у форматі HDR можуть займати в чотири рази більше пам'яті, ніж відповідні зображення у форматі LDR. Це пов'язано з тим, що у зображеннях HDR значення освітленості зберігаються за допомогою трьох чисел з плаваючою комою. Це має значний вплив не лише на зберігання та передачу даних HDR, а й на їхню обробку. Як наслідок, для HDR-зображень було розроблено ефективні способи представлення чисел з плаваючою комою, а багато класичних алгоритмів стиснення, таких як JPEG та MPEG, було розширено для обробки HDR-зображень та відео.

Динамічний діапазон HDR-зображення часто охоплює понад п'ять порядків величини, з яких звичайний дисплей здатний візуалізувати максимум два порядки величини. Тоді постає проблема вписати більший динамічний діапазон HDR-зображення в обмежений колірний обхват пристрою відображення. Ця проблема розв'язується завдяки тональному відображенню і по суті є проблемою стиснення динамічного діапазону зі збереженням видимості. Дана кваліфікаційна робота присвячена аналізу методів розв'язання саме цієї проблеми.

1 ПОНЯТТЯ ПРО HDR ЗОБРАЖЕННЯ

Динамічний діапазон - це термін, який використовується в багатьох галузях для опису відношення між найвищим і найнижчим значенням змінної величини. У сфері зображень, і особливо в технологіях відображення, динамічний діапазон також відомий як коефіцієнт контрастності або просто контрастність, що позначає відношення яскравості між чорними та білими пікселями, видимими на екрані одночасно. Для природних сцен динамічний діапазон — це відношення густини світлової інтенсивності найяскравішого сонячного променя до найтемнішої тіні. У фотографії одиниця яскравості, cd/m^2 (кандела на квадратний метр) також відома як «ніт» [26].

Проблема формування зображень з високим динамічним діапазоном (High-Dynamic Range, HDR) є подвійною [26]:

а) як захопити справжню яскравість і повну хроматичну інформацію HDR-сцени, можливо, за допомогою пристрою захоплення з меншим динамічним діапазоном, ніж у сцени ;

б) як вірно відтворити цю інформацію на пристрої, який не здатний відтворювати ані фактичну яскравість найтемніших чи найяскравіших ділянок, ані справжні кольори.

Перша частина проблеми зазвичай називається композицією або відновленням високого динамічного діапазону, а остання — стисненням або, частіше, тональним відображенням (tone mapping). У подальшому використовуються терміни «композиція» для процесу отримання та «тональне відображення» для частини відображення [26].

Рисунок 1.1 ілюструє проблему HDR-зображень. Зокрема, на рисунку 1.1(a) показано, що звичайний знімок із низьким динамічним діапазоном (Low-Dynamic Range, LDR) має дуже обмежений діапазон, що проявляється у «зрізаних» яскравих ділянках, а також у недоекспонованих темних частинах. HDR-зображення, показане на рис. 1.1(b), містить всю інформацію, але лише її

частина видима на LDR-носіях, наприклад, при друці. Тонально відображене HDR-зображення, показане на рис. 9.1(с), демонструє найбільшу кількість видимої інформації [26].

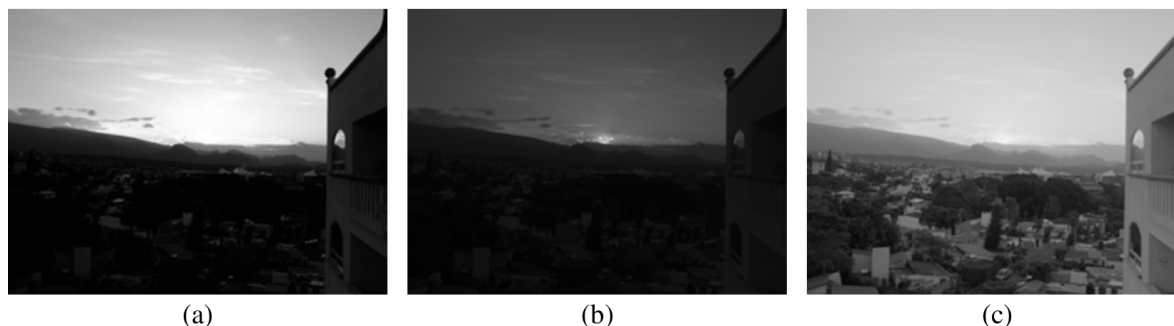


Рисунок 1.1 - HDR-зображення: (а) окремий знімок чітко вираженої HDR-сцени, (b) HDR-зображення, лінійно масштабоване для відповідності стандартному 8-бітному діапазону відображення - необхідність тонального відображення (тобто компресії) очевидна, та (с) HDR-зображення з тональним відображенням, що демонструє більший обсяг інформації порівняно з двома попередніми малюнками

HDR-зображення можна отримати шляхом зйомки реальних сцен або шляхом відтворення тривимірної (3D) комп'ютерної графіки з використанням таких методів, як радіоситі (radiosity) та трасування променів. HDR-зображення природних сцен можна отримати або шляхом зйомки кількох зображень однієї сцени з різною експозицією, або за допомогою нещодавно представлених спеціальних камер, здатних безпосередньо захоплювати HDR-дані [1]. Метод множинної експозиції базується на поєднанні різних експозицій в одне зображення, що охоплює весь динамічний діапазон сцени [2, 3]. Етап композиції зображення вимагає попереднього калібрування відгуку камери [3, 4]. В даній кваліфікаційній роботі основна увага зосереджена підході композиції множинної зйомки [26].

Друга частина проблеми полягає у відповідному тональному відображенні отриманого HDR-зображення назад на LDR-дисплей. Методи

тонального відображення варіюються за складністю від простої гамма-кривої до складних методів вирівнювання гістограм та моделей сприйняття світлості [5 - 7]. Останнім часом також почали з'являтися пристрої відображення, оснащені розширеним динамічним діапазоном [8, 26].

Методи HDR-зображень спочатку були розроблені для кольірних моделей RGB. Проте методи, що працюють у просторах яскравості-хроматичності, здаються більш змістовними та кращими з кількох причин:

1. Декорельовані кольірні простори пропонують кращу стисливість. Фактично, майже всі методи стиснення зображень зберігають зображення в якомусь просторі яскравості-хроматичності. Коли ми починаємо з уже стиснутих LDR-зображень з множинною експозицією, ефективніше скласти HDR-зображення безпосередньо в тому ж кольірному просторі. Отримане HDR-зображення краще підходить для стиснення, і якщо його потрібно відобразити, його можна відобразити в sRGB на етапі тонального відображення [26].

2. Будь-яка HDR-техніка, що працює в просторі RGB, потребує балансу білого після композиції, оскільки три кольірні канали проходять паралельні перетворення. Хоча баланс білого дасть сприйнятливо переконливі кольори, вони можуть не бути істинними. Заради збереження відтінку та кращого стиснення доцільно вибрати простір яскравості-хроматичності, навіть якщо вхідні дані знаходяться в RGB (наприклад, нестиснуте зображення TIFF) [26].

3. Канал яскравості, будучи середньозваженим значенням каналів R, G та B, має краще співвідношення сигнал/шум (SNR), що є критично важливим, якщо процес отримання HDR-зображення відбувається в умовах шумів. В роботі розглядається проблема формування HDR-зображень у загальному просторі яскравості-хроматичності, представлені ефективні алгоритми композиції HDR-зображень та тонального відображення (компресії), а також досліджено функціональність такого підходу за різних умов [26].

2 КОЛІРНІ ПРОСТОРИ

Взагалі кажучи, сітківка має три типи кольорових фоторецепторних клітин, відомих як колбочки. Вони реагують на випромінювання з різним спектральним відгуком, тобто різні колбочки генерують фізичне відчуття різних кольорів, яке поєднується зоровою системою людини (Human Visual System, HVS) для формування кольорового зображення. З цього інтуїтивно зрозуміло описувати колір трьома числовими компонентами. Усі можливі значення цього трикомпонентного вектора утворюють простір, який називається колірним простором або колірною моделлю. Ці три компоненти можуть бути визначені різними змістовними способами, що призводить до визначення різних колірних просторів [1, 9, 26].

2.1 Колірні простори RGB

Тристимульний колірний простір RGB можна визначити як модель на основі декартової системи координат із червоним, зеленим та синім первинними спектральними компонентами [10, 26]. Усі стандартизовані колірні простори RGB (Red, Green, Blue) можна визначити, вказавши хроматичності CIE XYZ (x та y) кожного основного кольору та опорну точку білого. Опорна точка білого служить для визначення білого кольору всередині охоплення визначеного колірного простору. Модель RGB є найчастіше використовуваним представленням у комп'ютерній графіці та мультимедіа, і різні простори RGB (комбінації основного кольору та точки білого) були стандартизовані для різних застосунків [11, 26]. Що їх усіх об'єднує, так це ідея змішування червоного, зеленого та синього первинних кольорів у різних відношеннях для створення будь-якого заданого кольору всередині охоплення цього простору. Усі колірні моделі RGB можна класифікувати як фізіологічно натхненні колірні моделі, оскільки три первинні кольори були розроблені з ідеєю відповідності

трьом різним типам колбочок у сітківці людини. Для простоти реалізації координати RGB зазвичай обмежуються $[0,1]^3$ (з плаваючою комою) або $[0, 255]^3$ (8-бітне ціле число без знака).

2.2 Колірні простори яскравості-хроматичності

Хоча технології спрямували вибір колірної моделі, що використовується в комп'ютерній графіці, до моделей RGB, це не є психофізичною колірною інтерпретацією. Перцептивні ознаки, а саме яскравість (luminance), насиченість та відтінок (hue), формують відчуття кольору в зоровій системі людини (HVS). Ці ознаки можна інтуїтивно формалізувати через введення колірних моделей яскравості-хроматичності.

Розглянемо загальний колірний простір яскравості-хроматичності, лінійно пов'язаний із простором RGB. Грубо кажучи, такий простір характеризується ахроматичним компонентом яскравості, який відповідає градаційній частині зображення, та двома компонентами хроматичності, які є ортогональними до сірого [26].

В роботі латинські літери використовуються для позначення зображень у RGB, а відповідні грецькі літери — для позначення зображень у просторі яскравості-хроматичності. Таким чином, $\mathbf{z} = [z^R, z^G, z^B]$ позначає зображення у просторі RGB а $\zeta = [\zeta^Y, \zeta^U, \zeta^V]$ — те саме зображення у просторі яскравості-хроматичності, де яскравість та два канали хроматичності позначаються відповідно Y , U , and V , respectively. Перетворення зображення з RGB у яскравість-хроматичність визначається в матричній формі як $\zeta = \mathbf{zA}$ де матриця $\mathbf{A}$ нормалізована таким чином, що якщо $\mathbf{z}(\cdot) \in [0,1]^3$ то $\zeta(\cdot) \in [0,1] \times [-0.5,0.5]^2$ Через це обмеження перший стовпець матриці $\mathbf{A}$ має всі додатні елементи, $a_{j,1} \geq 0$ Крім того, припускається, що $\sum_{j=1}^3 a_{j,1} = 1$, що забезпечує повне використання діапазону $[0, 1]$ компонента яскравості. Прикладами таких

просторів яскравості-хроматичності є опонентний колірний простір, простори YUV/YCbCr, та YIQ [9, 26].

Перетворення яскравості-хроматичності стають особливо значущими, коли зображення $\mathbf{z}$ пошкоджене певним незалежним шумом. Фактично, через типову кореляцію між z^R , z^G , та z^B , можна помітити, що яскравість ζ^Y має помітно вище співвідношення сигнал/шум (SNR), ніж два значення хроматичності ζ^U та ζ^V , а також ніж будь-який з окремих компонентів z^R , z^G , and z^B [26].

Добре відомо, що природні кольорові зображення демонструють високу кореляцію між каналами R, G, та B. Таким чином, можна помітити, що яскравість Y містить більшу частину цінної інформації (краї, відтінки, об'єкти, текстурні візерунки тощо), а хроматичності U та V містять переважно низькочастотну інформацію (враховуючи специфіку роботи алгоритмів стиснення, ці канали дуже часто піддаються субдискретизації) [26].

2.2.1 Опонентний колірний простір

Опонентний колірний простір, представлений, наприклад, у посиланні [9], базується на теорії колірної опонентності 1964 року німецького фізіолога Евальда Герінга. Теорія передбачає дві пари опонентних кольорів: червоно-зелений та жовто-синій, які не можуть сприйматися одночасно. Ця теорія була підкріплена експериментами з найменування кольорів, де не було ідентифіковано червонувато-зелених та жовтуватих синіх тонів. Це спонукало Герінга припустити існування трьох опонентних каналів: червоно-зеленого, жовто-синього та чорно-білого (ахроматична яскравість). Фактично, Герінг був одним із перших, хто розділив яскравість та дві хроматичності в колірній моделі [26]. На відміну від тристимульної моделі RGB, зумовленої наміром моделювання відповіді сітківки на колірний стимул, Опонентний колірний простір ґрунтується на більш центральних механізмах головного мозку. Опонентні процеси набуваються через перетворення відповідей колбочок.

Трансформаційні матриці для опонентного колірному простору мають вигляд [26]:

$$\mathbf{A}_{opp} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/2 & 1/4 \\ 1/3 & 0 & -1/2 \\ 1/3 & -1/2 & 1/4 \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad \mathbf{B}_{opp} = \mathbf{A}_{opp}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2/3 \\ 1 & 0 & -4/3 \\ 1 & -1 & 2/3 \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Можна помітити, що другий і третій стовпці матриці $\mathbf{A}_{opp}$ мають нульове середнє значення. Це еквівалентно тому, що внутрішній добуток між векторами базису хроматичності та вектором, що відповідає сірому пікселю (для якого $z^R = z^G = z^B$) завжди дорівнює нулю. Це означає, що сірий колір є ортогональним до компонентів хроматичності, і що елементи першого рядка оберненої матриці колірному перетворення $\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-1}$ є рівними: $b_{1,1} = b_{1,2} = b_{1,3}$. Оскільки $1 = \sum_{j=1}^3 a_{j,1} b_{1,j}$ та $\sum_{j=1}^3 a_{j,1} = 1$, з цього випливає, що $b_{1,1} = b_{1,2} = b_{1,3} = 1$. Це означає, що компонент яскравості ζ^Y можна безпосередньо розглядати як компонент відтінків сірого RGB-зображення $\mathbf{z}$, оскільки обернене перетворення компонента яскравості, $[\zeta^Y \ 0 \ 0] \mathbf{B} = \mathbf{z}_{gray}(\mathbf{x})$, є зображенням у відтінках сірого [26].

Перетворення яскравості-хроматичності можна розглядати як спеціальні перетворення для декореляції кольорів. Зокрема, з точністю до діагонального коефіцієнта нормалізації, матриця $\mathbf{A}_{opp}$ є не чим іншим, як матрицею 3×3 перетворення DCT (DCT означає дискретне косинусне перетворення, яке широко використовується у стисненні зображень із втратами). Крім того, зазначається, що стовпці $\mathbf{A}_{opp}$ — це, відповідно, фільтр усереднення, фільтр скінченної похідної та фільтр другої похідної [26].

2.3 Колірний простір YUV

Колірний простір YUV був вперше розроблений для цілей телевізійного мовлення з наміром мінімізації вимог до пропускної здатності. Подібно до колірного простору YIQ, який також використовується в телевізійному мовленні, він відповідає визначенню опонентного колірного простору, оскільки складається з каналу яскравості та двох каналів різниці кольорів. Як примітку можна згадати, що звичайна схема стиснення сигналу YUV полягає в понижувальній дискретизації (downsample) кожного хроматичного каналу з коефіцієнтом два або чотири, щоб хроматичні дані займали щонайбільше половину загальної смуги пропускання відео. Це можна зробити без помітної втрати візуальної якості, оскільки зорова система людини набагато менш чутлива до просторових деталей у хроматичності, ніж у яскравості. Такий самий підхід до стиснення використовується, серед іншого, у відомому стандарті стиснення зображень JPEG (Joint Photographic Experts Group) [26].

Трансформаційні матриці для колірного простору YUV мають вигляд

$$\mathbf{A}_{YUV} = \begin{bmatrix} 0.30 & -0.17 & 0.50 \\ 0.59 & -0.33 & -0.42 \\ 0.11 & 0.50 & -0.08 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_{YUV} = \mathbf{A}_{YUV}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1.4020 \\ 1 & -0.3441 & -0.7141 \\ 1 & 1.7720 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Через схожу природу колірних моделей, властивості ортогональності, наведені в попередньому розділі для опонентного колірного простору, справедливі також для простору YUV. Слід зазначити, що ці властивості не залежать від ортогональності матриці $\mathbf{A}$ (насправді три стовпці $\mathbf{A}_{YUV}$ are not orthogonal), не є ортогональними), а радше від ортогональності між константним вектором та другим і третім стовпцями матриці. [26]

2.3.1 Колірний простір HSV

Колірний простір HSV є представником класу перцептивних колірних просторів. Назва походить від трьох компонентів, що формують простір:

відтінок (hue), насиченість (saturation) та значення/інтенсивність/яскравість (value). Цей тип колірних моделей не дарма віднесено до категорії перцептивних колірних просторів; тоді як непідготовлений спостерігач навряд чи зможе уявити колір, базуючись на окремих тристимульних компонентах RGB, кожен може уявити колір, базуючись на його відтінку та насиченості [26].

Відтінок може бути визначений як

$$H = \arctan(\zeta^U / \zeta^V), \quad (2.3)$$

а насиченість як:

$$S = \sqrt{(\zeta^U)^2 + (\zeta^V)^2} \quad (2.4)$$

або нормалізована значенням ζ^Y як

$$S = \sqrt{(\zeta^U)^2 + (\zeta^V)^2} / \zeta^Y. \quad (2.5)$$

Їх можна інтерпретувати як кутовий компонент і довжину плоского вектора. Таким чином, трійка Y, H та S відповідає представленню яскравості-хроматичності відносно циліндричних координат. Зазначається, що в літературі можна знайти численні визначення як відтінку, так і насиченості [12], і хоча представлені тут визначення належать до найбільш часто згадуваних, вони обрані передусім заради простоти [26].

3 ОТРИМАННЯ HDR ЗОБРАЖЕНЬ

У цьому розділі представлені техніки, необхідні для успішного отримання HDR. Оскільки пристрої формування зображень, безпосередньо здатні захоплювати HDR-контент, рідко доступні на споживчому ринку, тут наводяться засоби для захоплення HDR-контенту за допомогою звичайної камери. Крім того, представлено короткий огляд технологій сенсорів зображення, що швидко розвиваються і безпосередньо здатні захоплювати HDR-сцени [26].

3.1 Функція відгуку камери

Найважливішим кроком у отриманні HDR-зображень є визначення функції відгуку камери. Ця функція визначає зв'язок між іррадіансом сцени та вихідним сигналом пікселя камери, і тому може бути використана для лінеаризації вихідних даних. Навпаки, знання відгуку камери є вирішальним для визначення іррадіансу вихідної сцени з наданих даних зображення [3].

По суті, існують дві техніки для калібрування відгуку. Підхід, визначений у [3], розширює попередню роботу, представлену в [2]. Основний принцип цього підходу полягає в тому, що, захоплюючи кадри нерухомої сцени з різною експозицією, користувач фактично здійснює вибірку функції відгуку камери для кожного пікселя. Техніка є відносно простою та надійною і докладно описана далі в цьому розділі [26].

Інший метод калібрування представлений у [4]. Замість заповнення перелічуваної таблиці, як у попередньому підході, цей метод апроксимує поліноміальні коефіцієнти для функції відгуку. Це не лише дозволяє знайти рішення функції відгуку камери, але також дозволяє отримати точні коефіцієнти експозиції, які є необхідними при поєднанні HDR-зображень із вихідних послідовностей, де апертура та витримка відомі не точно [26].

З експозицією пікселя $e(\mathbf{x})$ визначеною як добуток часу експозиції Δt та інтенсивністю опромінення $E(\mathbf{x})$, тобто, $e(\mathbf{x}) = E(\mathbf{x})\Delta t$, загальний вихідний сигнал пікселя $\ell(\mathbf{x})$ задається формулою [26]:

$$\ell(\mathbf{x}) = f(e(\mathbf{x})) = f(E(\mathbf{x})\Delta t), \quad (3.1)$$

де $f(\cdot)$ це функція, що описує відгук початкового сигналу на задану експозицію. Тому інтенсивність опромінення можна отримати з початкового сигналу пікселя за допомогою такого формального виразу [3]:

$$\ln E(\mathbf{x}) = g(\ell(\mathbf{x})) - \ln \Delta t, \quad (3.2)$$

де $g(\cdot) = \ln f^{-1}(\cdot)$ — це обернена функція відгуку камери. Цю функцію можна оцінити з набору зображень нерухомої сцени, знятих з різним часом експозиції. Передбачається, що зображення для калібрувальної послідовності ідеально вирівняні, зняті при постійному освітленні та містять незначний рівень шуму. Для калібрування функції відгуку камери використовується набагато більший набір зображень (тобто більш щільний набір експозицій), ніж зазвичай доступний для HDR-композиції. Функція відгуку камери оцінюється (калібрується) лише один раз для кожної камери. Оцінена функція потім може бути використана для лінеаризації вхідних значень у всіх наступних HDR-композиціях того самого пристрою [26].

Через недостане експонування (яке створює надзвичайно низьке співвідношення SNR) та надлишкове експонування (яке призводить до «зрізання» значень, що в іншому випадку перевищили б динамічний діапазон), не всі пікселі з наведеного набору зображень слід використовувати для калібрування функції відгуку камери, а також для подальшої композиції, з рівними вагами. Поблизу мінімуму інтервалу значень пристрою формування зображень інформація спотворюється численними компонентами шуму,

найвпливовішим з яких є пуассонівський дробовий шум фотонів [13]. Оскільки кількість фотонів, що потрапляють у комірку сенсора протягом заданого інтервалу часу, є випадковим процесом із розподілом Пуассона, при низьких рівнях освітленості варіації в кількості фотонів стають істотними порівняно з середніми рівнями, фактично роблячи струм, створений у комірці, абсолютно ненадійним. Крім цього, такі компоненти, як тепловий шум та шум зчитування, відіграють певну роль у спотворенні початкового сигналу сенсора низького рівня. Поблизу максимуму інтервалу значень починає відігравати свою роль «зрізання» (clipping) [26].

Звісно, насичений піксель може передати лише дуже обмежену кількість інформації про сцену. Описані явища мотивують застосування штрафів (penalization) до недоекспонованих та переекспонованих пікселів як під час калібрування відгуку камери, так і на етапі композиції HDR-зображення. Крім того, лише пікселі, що мають монотонно строго зростаючі значення між недоекспонуванням та переекспонуванням протягом усієї послідовності, можуть вважатися валідними для калібрування відгуку камери. Це природна ідея, оскільки передбачається, що пікселі, використані для калібрування відгуку, надходять із послідовності, знятої зі збільшенням часу експозиції [26].

Оскільки передбачається, що сцена статична, а іррадіанс пікселя постійний, єдиним відхиленням від строго монотонного зростання значення пікселя може бути шум. Шумові пікселі не слід використовувати для калібрування відгуку камери, оскільки помилкова функція відгуку спричинила б систематичну помилку в подальших HDR-композиціях. Використовуючи ці критерії валідності пікселів, функцію $g(\cdot)$ можна підібрати, мінімізуючи квадратичну цільову функцію [3, 26]

$$\sum_{j=1}^P \sum_{i=1}^N w_{cam}(\zeta_i^Y(\mathbf{x}_j)) [g(\zeta_i^Y(\mathbf{x}_j)) - \ln E_i - \ln \Delta t_i]^2 + \lambda \int_0^1 w_{cam}(\zeta) [g''(\zeta)]^2 d\zeta, \quad (3.3)$$

де P кількість пікселів, використаних з кожного зображення, а w_{cam} вагова функція, що обмежує вплив недоекспонованих та переэкспонованих пікселів. Регуляризаційний член у правій частині використовує штраф на другу похідну від $g(\cdot)$ для забезпечення гладкості рішення [26].

Ми надаємо перевагу використанню відносно великої кількості пікселів (наприклад, 1000 пікселів), щоб мінімізувати потребу в регуляризації при апроксимації даних. Система рівнянь розв'язується за допомогою сингулярного розкладу, подібно до способу, описаного в Джерелі [3]. Якщо замість прямої обробки одного з RGB-виходів сенсора розглядається комбінація ζ_i^Y (наприклад, яскравість), слід зазначити, що деякі пікселі в цій комбінації можуть включати переэкспоновані компоненти, не досягаючи верхньої межі діапазону комбінації. Такі пікселі повинні бути оштрафовані під час обробки. Щоб забезпечити більш потужне ослаблення (attenuation) потенційно переэкспонованих пікселів, замість простої трикутної функції (наприклад, як у [3]) використовується асиметрична функція виду [26]:

$$w_{cam}(\rho) = \rho^\alpha (1 - \rho)^\beta, \quad (3.4)$$

де $0 \leq \rho \leq 1$ та $1 \leq \alpha < \beta$, використовується.

Приклад такої вагової функції наведено на рисунку 3.1. Приклад функції відгуку камери для яскравості, розв'язаної цим методом, проілюстровано на рисунку 3.2.

Розглядаючи відгук камери, можна помітити різкий пік ближче до правого краю графіка. Це результат нестабільності системи для переэкспонованих пікселів. Стає очевидним, що такі пікселі не можуть бути безпосередньо включені в наступний етап композиції. Натомість вони повинні бути оштрафовані ваговими коефіцієнтами. Як обговорювалося в [14], проблема наявності переэкспонування також у пікселях, значення яких нижче

максимуму, не відсутня навіть для звичайних підходів, що працюють у просторі RGB.

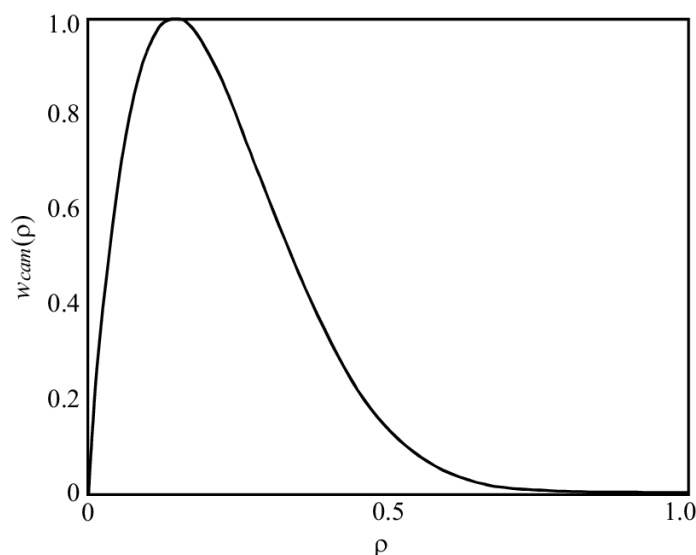


Рисунок 3.1 - Вагова функція, що використовується для значень яскравості у визначенні функції відгуку камери

3.2 HDR-сенсори

Важливість та потенціал HDR-зображень додатково підкреслюються впровадженням HDR-апаратури. Кілька компаній стали піонерами у застосуванні сенсорних технологій наприкінці 2000-х років. Для безпосереднього захоплення HDR-даних існує кілька конструкцій сенсорів [1, 15, 16]. Більшість конструкцій HDR-сенсорів зосереджені на розширенні динамічного діапазону шляхом збільшення максимальної кількості світла, яке сенсор може захопити без насичення, а не на підвищенні чутливості для умов низького освітлення.

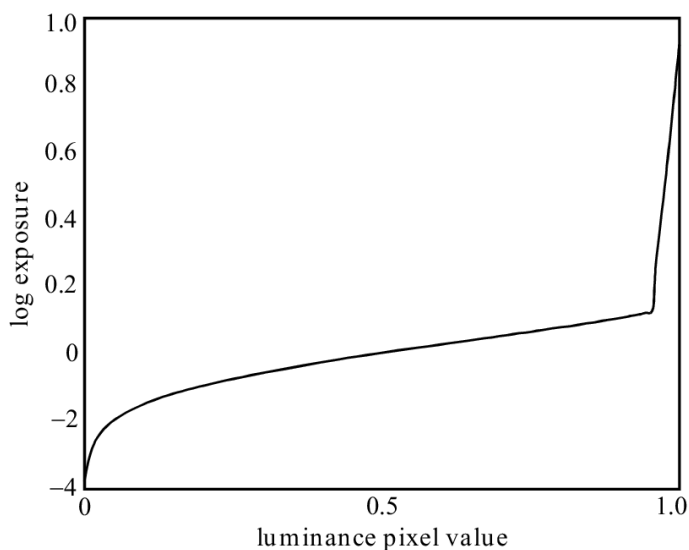


Рисунок 3.2 - Розрахункова функція зворотного відгуку $g(\cdot)$ для каналу яскравості Nikon COOLPIX E4500

В роботі [15] досліджуються чотири різні архітектури: час до насичення (time-to-saturation), множинне захоплення (multiple capture), асинхронне самоскидання з множинним захопленням та синхронне самоскидання зчитування залишку (residue readout). Методи «час до насичення» та «множинне захоплення» пропонують розширений динамічний діапазон за допомогою різних способів варіювання часу експозиції. Варіювання часу експозиції робить саме те, що можна було б очікувати; воно адаптує час інтеграції для кожного пікселя до фотоструму пікселя, дозволяючи використовувати довгий час експозиції для малих фотострумів і короткий час експозиції для більших. При асинхронному самоскиданні напруга пікселя вибірково зчитується через регулярні інтервали, а пікселі скидаються автономно при насиченні. Синхронне самоскидання потребує лічильника на пікселі для відстеження кількості скидань. Наприкінці інтеграції кількість скидань поєднується із залишковою напругою для оцінки загального фотоструму [26].

4 АЛГОРИТМИ КОМПОЗИЦІЇ HDR ЗОБРАЖЕНЬ

Історія HDR-зображень відносно коротка [26]. Перші статті, присвячені створенню HDR-зображень, були опубліковані на початку 1990-х років; див., наприклад, [2] та [17]. Частково базуючись на цих попередніх зусиллях, ядро HDR-зображень у просторі RGB було визначено в [3]. Переважна більшість досліджень у цій галузі була зосереджена на оптимізації параметрів (кількості експозицій, часу експозиції тощо) [18] або розробці різних методів тонального відображення (tone mapping) [6]. Хоча паралельна обробка каналів RGB спричиняє спотворення кольорів [3], лише дуже обмежена увага була приділена вирішенню цих проблем [26]. В одному з цих небагатьох досліджень пропонується використовувати колірні профілі Міжнародного колірного консорціуму (ICC) у спробі досягти більш реалістичного відтворення кольорів у контексті RGB HDR-зображень [19]. У той час як техніки HDR-композиції практично зупинилися у своєму розвитку, тональне відображення, або компресія стала популярною темою досліджень після появи роботи [3].

4.1 Монохромна HDR-композиція

Проблема HDR-зображень та сучасні методи, запропоновані для вирішення цієї проблеми, обговорюються в [1]. Ці методи використовують ту саму базову концепцію HDR з множинною експозицією. Відправною точкою є послідовність зображень, що відповідає вимогам, обговорюваним у підрозділі 3.1. З виконанням цієї передумови, загальний план процесу, проілюстрований на структурній схемі рисунка 4.1, виглядає наступним чином [26]:

1. Потрібно вирішити питання кривої відгуку для кожного колірного каналу камери. Це потрібно зробити лише один раз для даного пристрою формування зображень.

2. На основі цієї кривої відгуку та часу експозиції різні експозиції можуть бути лінеаризовані, а карта яскравості отримана з використанням середньозваженого значення лінеаризованих даних.

3. Отримані HDR-дані повинні зберігатися ефективним способом. Цей крок не є необхідним, якщо дані створюються лише для безпосереднього відображення.

4. HDR-дані повинні бути стиснуті так, щоб їх можна було відобразити на звичайному LDR-дисплеї або, наприклад, на роздруківці. Стиснення візуального діапазону, яке загалом відоме як тональне відображення, можна пропустити, якщо зображення відображається на пристрої з HDR-дисплеєм.

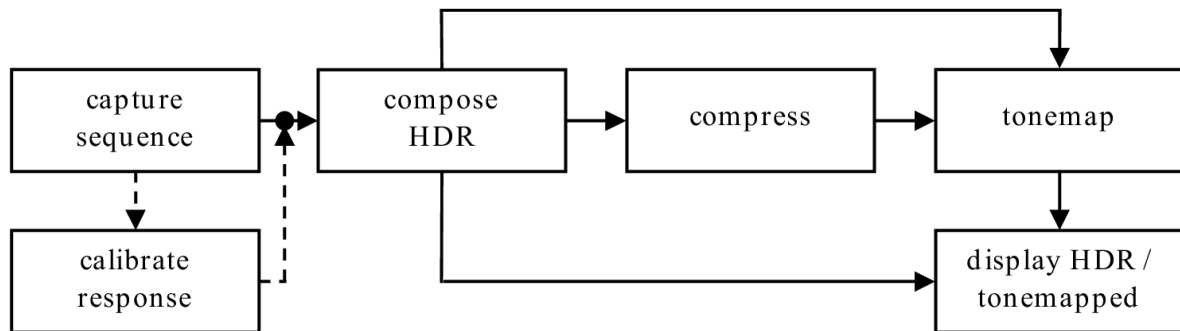


Рисунок 4.1 – Структурна схема загального конвеєра створення HDR-зображень із множинною експозицією. Різні шляхи вказують на альтернативи в процесі, такі як демонстрація тонально відображеного HDR-зображення на звичайному дисплеї або, як альтернатива, демонстрація HDR-зображення на дисплеї, здатному до відтворення HDR

Після того, як функцію відгуку камери визначено, як описано в підрозділі 3.1, і відомо час експозиції для кожного знятого кадру, логарифмічна карта HDR-яскравості для монохроматичного каналу C може бути складена як зважена сума значень пікселів виходу камери наступним чином [26]:

$$\ln E_i^C = \frac{\sum_{j=1}^P w_C(z_i(\mathbf{x}_j))(g_C(z_i(\mathbf{x}_j)) - \ln \Delta t_i)}{\sum_{j=1}^P w_C(z_i(\mathbf{x}_j))}. \quad (4.1)$$

Іншими словами, ми використовуємо всі доступні експозиції для конкретного пікселя, щоб обчислити його яскравість. Вагова функція $w_c(\cdot)$ використовується для надання більшої ваги тим експозиціям, у яких значення пікселя є ближчим до середини функції відгуку. Усі ці кроки дозволяють нам досягти надійності при відновленні значень яскравості з високим динамічним діапазоном [26].

У випадку кольорових зображень канали RGB обробляються паралельно. Це передбачає, що взаємодією між каналами можна знехтувати, що, як визнається в [3], є проблематичним для обґрунтування. Як результат паралельної обробки трьох каналів, у складеному зображенні в багатьох випадках виникають спотворення кольорів. Їх необхідно коригувати за допомогою балансування білого після композиції, що, своєю чергою, може призвести до кольорів, які не відповідають оригінальним. Тим не менш, цей підхід працює досить добре для отримання задовільних результатів за умови, що вихідна послідовність дуже добре вирівняна, а шум є незначним [26].

4.2 Композиція HDR у просторі яскравості-хроматичності

Альтернативний підхід до паралельної обробки трьох каналів RGB ґрунтується на психофізично натхнених колірних моделях, де зображення формується на основі одного компонента, що описує яскравість, і двох компонентів, які містять хроматичну інформацію [26].

Один лише канал яскравості формує напівтонове (чорно-біле) представлення сцени, і, як такий, містить більшу частину інформації, пов'язаної із зображенням. Два канали хроматичності майже не мають сенсу самі по собі, і тому містять допоміжну інформацію, яка сама по собі не є вирішальною. Цей факт також використовується при стисненні кольорових зображень, де хроматичні компоненти часто піддаються зниженню дискретизації (downsampling) порівняно з яскравістю. Абсолютно різна природа яскравості та

хроматичності мотивує новий підхід до композиції HDR. Описаний тут метод обробляє канал яскравості подібно до традиційного підходу для одного каналу триплету RGB і представляє більш обґрунтований метод для композиції кольору [26].

4.2.1 Постановка задачі

Нехай $\zeta_j = [\zeta_j^Y, \zeta_j^U, \zeta_j^V]$ для $j = 1, 2, \dots, P$, буде набором зображень у просторі яскравості-хроматичності, захоплених з різним часом експозиції Δt_j і з LDR, де $\zeta(\mathbf{x}) \in [0, 1] \times [-0.5, 0.5]^2$ а $\mathbf{x} = [x_1, x_2]$ координата пікселя. Мета полягає в тому, щоб отримати єдине HDR-зображення $\tilde{\zeta} = [\tilde{\zeta}^Y, \tilde{\zeta}^U, \tilde{\zeta}^V]$ у тому самому колірному просторі [26]. У цій постановці канали яскравості та хроматичності обробляються окремо. Попередньо відкалібрована функція відгуку камери використовується для каналу яскравості, тоді як для хроматичних каналів використовується зважування на основі насиченості.

4.2.2 Композиція компонента яскравості

HDR-компонент яскравості отримується шляхом піксельного зваженого середнього значень логарифма інтенсивності опромінення пікселів, визначених згідно з рівнянням (3.2) як [26]

$$\ln E_j(\mathbf{x}) = g(\zeta_j^Y(\mathbf{x})) - \ln \Delta t_j. \quad (4.2)$$

Як зазначалося в попередньому розділі, пікселі, значення яких близькі до нуля або одиниці, несуть мало цінної інформації через низьке співвідношення сигнал/шум (недостатнє експонування) та кліпінг (надмірне експонування) відповідно. Тому такі пікселі штрафуються шляхом застосування ваг під час композиції. Поліноміальна функція

$$w^Y(\rho) = \rho^\alpha (1 - \rho)^\beta \text{ with } 0 \leq \rho \leq 1 \quad \alpha = 2, \text{ and } \beta = 2 \quad (4.3)$$

використовується як вагова функція, забезпечуючи таким чином менший вплив недоекспонованих або переекспонованих пікселів [26]. Приклад такої вагової функції для яскравості показано на рисунку 4.2.

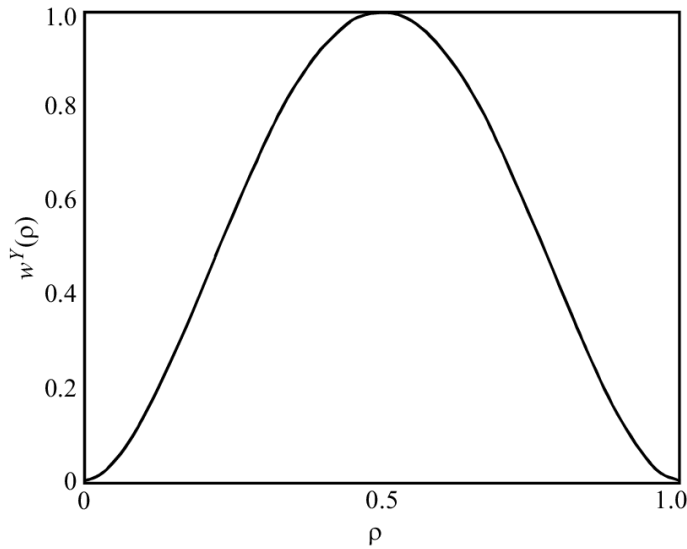


Рисунок 4.2 - Вагова функція w^Y , що використовується для композиції каналу яскравості

Логарифмічна HDR-яскравість отримується наступним чином:

$$\ln \tilde{\zeta}^Y(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{j=1}^P w^Y(\zeta_j^Y(\mathbf{x})) (g(\zeta_j^Y(\mathbf{x})) - \ln \Delta t_j)}{\sum_{j=1}^P w^Y(\zeta_j^Y(\mathbf{x}))}. \quad (4.4)$$

Через природу функції відгуку камери $g(\cdot)$, HDR-яскравість отримується в логарифмічному масштабі. Після застосування натуральної експоненти отримані значення є додатними, зазвичай у діапазоні $[10^{-4}, 10^4]$, що, таким чином, справді становить високий динамічний діапазон.

4.2.3 Композиція хроматичних компонентів

Для хроматичних компонентів функція відгуку камери не визначена. Натомість хроматичні сигнали зважуються залежно від рівня насиченості кольору. Чим вища насиченість кольору, тим більше піксель містить цінної хроматичної інформації, і, отже, тим вища вага. Це мотивується тим фактом, що коли піксель переекспонований або недоекспонований, він завжди менш насичений, ніж був би при правильній експозиції. Зокрема, $w^{UV}(S) = S^\alpha$ Іт $\alpha > 1$. У вичерпних експериментах було встановлено, що, $\alpha = 1,5$ є хорошим вибором. Щоб зберегти колірну інформацію, однакові ваги використовуються для обох хроматичних компонентів, і будь-який хроматичний компонент $C \in \{U, V\}$ складається наступним чином [26]:

$$\tilde{\zeta}^C(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{j=1}^P w^{UV}(S_j(\mathbf{x})) \zeta_j^C(\mathbf{x})}{\sum_{j=1}^P w^{UV}(S_j(\mathbf{x}))}, \quad (4.5),$$

де S_j позначає насиченість ζ_j . Зазначається, що будучи опуклою комбінацією вхідних хроматичних сигналів, діапазон $\tilde{\zeta}^C(x)$ знову знаходиться в межах $[-0,5; 0.5]$. Однак через усереднення можлива кількість окремих значень хроматичності є помітно вищою, ніж у вихідній послідовності джерел [26].

Ще одним інтуїтивно цікавим підходом було б використання ваг w^Y що залежать від яскравості, як для каналів яскравості, так і для хроматичних каналів. У загальних рисах цей підхід був би схожим на запропоноване зважування на основі насиченості, оскільки насиченість кольору зазвичай зменшується в міру наближення яскравості до крайніх значень. Однак в ході експериментів було встановлено, що зважування на основі насиченості забезпечує кращу передачу кольору, особливо для насичених яскравих або затемнених деталей [26].

4.2.4 Контроль насиченості HDR

Після композиції, компонента яскравості, або, точніше, карта інтенсивності опромінення, має діапазон, значно більший за початковий $[0, 1]$. Отримані значення інтенсивності опромінення пікселів охоплюють розширений діапазон, тоді як композиція компонент хроматичності, будучи опуклою комбінацією компонентів, призводить до щільнішої дискретизації початкового діапазону. Це створює проблему, оскільки колірні простори яскравості-хроматичності представляють колір як різницю відносно сірого компонента яскравості. Якби HDR-зображення було безпосередньо відображене в RGB для виведення на дисплей, результатом було б фактично напівтонове (чорно-біле) зображення, оскільки різниці, представлені хроматичністю в діапазоні $[-0,5; 0,5]$ не можуть утворити насичені кольори відносно компоненти яскравості з максимальними значеннями до 10^5 . Це можна практично продемонструвати на такому прикладі.

Червоний піксель у колірному просторі RGB, визначений як $z = [1, 0, 0]$ перетворюється в опонентний колірний простір за допомогою матриці A_{opp} визначеної в підрозділі 2.2.1, що дає його представлення яскравості-хроматичності $\zeta = [1/3, 1/2, 1/4]$. Припускаючи, що процес HDR-композиції призводить до іррадіансу пікселя 100 та хроматичностей ζ , HDR-піксель в опонентному колірному просторі визначається як $\tilde{\zeta} = [100, 1/2, 1/4]$. Застосування зворотного перетворення призводить до RGB-пікселя $\tilde{z} = [100 \frac{2}{3}, 99 \frac{2}{3}, 99 \frac{2}{3}]$. Отримані значення утворюють сірий піксель, оскільки відносні різниці між компонентами не передаються через збільшення яскравості. Це, звісно, небажано, оскільки правильним результатом мало б бути $\tilde{z} = [100, 0, 0]$. Це явище проілюстровано на рисунку 4.3 [26].

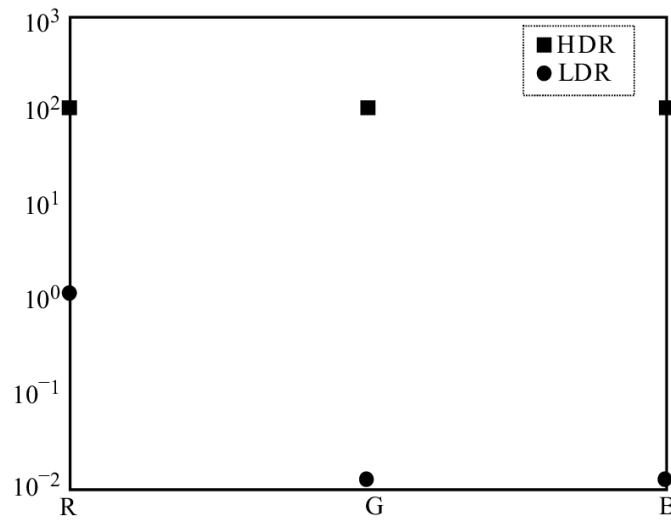


Рисунок 4.3 - Ілюстрація ефекту знебарвлення композиції HDR, що поєднує яскравість і кольоровість

Очевидно, що для відображення або обробки HDR-даних на пристрої з входом RGB HDR необхідно запровадити метод контролю насиченості. Для цієї мети можна використовувати такий підхід. Нехай $\mu(x)$ визначене як [26]:

$$\mu(\mathbf{x}) = \frac{\tilde{\zeta}^Y \sum_{j=1}^P w^{UV}(S_j(\mathbf{x}))}{\sum_{j=1}^P w^{UV}(S_j(\mathbf{x})) \zeta_j^Y(\mathbf{x})} \quad (9.8)$$

є скалярним коефіцієнтом пропорційності між HDR-яскравістю $\tilde{\zeta}^Y$ та зваженим середнім значень яскравості LDR $\zeta_j^Y(\mathbf{x})$ з вагами $w^{UV}(S_j(\mathbf{x}))$. Іншими словами, $\mu(\mathbf{x})$ це піксельний параметр масштабування, що визначає співвідношення між зваженим середнім вихідних значень пікселів та значеннями іррадіансу пікселів, отриманими в результаті процесу HDR-композиції. HDR-зображення у просторі RGB тепер можна отримати за допомогою нормалізованого зворотного колірної перетворення [24]:

$$\tilde{\mathbf{z}}(\mathbf{x}) = \tilde{\zeta}(\mathbf{x}) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu(\mathbf{x}) & 0 \\ 0 & 0 & \mu(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \mathbf{B}, \quad (*. *)$$

де нормалізація реалізується шляхом множення на діагональну матрицю $diag(1, \mu(\mathbf{x}), \mu(\mathbf{x}))$ яка масштабує дві хроматичності $\tilde{\zeta}^U$ and $\tilde{\zeta}^V$ даючи значення насиченості, що відповідає повному динамічному діапазону, досягнутому $\tilde{\zeta}^Y$. Дійсно, ваги $w^{UV}(S_i(\mathbf{x}))$ у рівняннях (9.7) та (9.8) є абсолютно однаковими. З діагональної матриці масштабування можна помітити, що значення $\mu(\mathbf{x})$ не має жодного впливу на яскравість $\tilde{\mathbf{z}}(\mathbf{x})$. Аналогічно, з визначення відтінку $H = \arctan(\zeta^U / \zeta^V)$, стає зрозуміло, що відтінок залишається недоторканим, і змінюється лише насиченість [24].

Хоча необхідність контролю насиченості неможливо візуалізувати на звичайних дисплеях, не кажучи вже про роздруківки, у повному HDR цю проблему можна передати через ланцюг тонального відображення RGB [26].

5 АЛГОРИТМИ ДЛЯ HDR-ВІДОБРАЖЕННЯ

Динамічний діапазон HDR-зображення часто охоплює понад п'ять порядків величини, з яких звичайний дисплей здатний візуалізувати максимум два порядки величини. Це створює проблему, оскільки, хоча HDR-зображення стають все більш доступними, HDR-дисплеї відстають. Тоді постає проблема вписати більший динамічний діапазон HDR-зображення в обмежений колірний обхват пристрою відображення. Найпростішим рішенням є лінійне масштабування даних, і хоча просте лінійне масштабування дуже рідко дає прийнятні результати, застосування гамма-кривих або деяких більш складних процедур відображення, швидше за все, спрацює краще [26].

Проблема тонального відображення по суті є проблемою стиснення зі збереженням видимості. Лінійне відображення сцени на вихід HDR-зображення дає результати, подібні до зображення, показаного на рисунку 5.1(a). Тонально відображена версія тієї ж сцени з використанням методу, який буде описано в підрозділі 5.2.1, показана на рисунку 5.1(b). Як бачимо, зображення у форматі HDR на дисплеї, що підтримує лише LDR, без тонового мапування є фактично непридатним.

Історія тонального відображення сягає значно глибше, ніж поява HDR-зображень. Оскільки динамічний діапазон плівки завжди перевищував діапазон фотографічного паперу того часу, у процесі проявлення був необхідний ручний контроль. Фотолабораторія (темна кімната) була впроваджена наприкінці 19 століття, і з того часу техніка, яка називається «освітлення та затемнення» (dodging and burning), використовується для маніпулювання експозицією фотографічного відбитка [26].



Рисунок 5.1 - HDR-зображення вітража з Тамперського собору, Фінляндія: (a) зображення лінійно масштабоване для відображення, і (b) тональне відображення було виконано методом стиснення на основі прив'язки (anchoring-based), описаним далі

Ця сама ідея пізніше була перенесена на контроль видимості цифрових HDR-зображень. У цьому контексті операція відома як тональне відображення (tone mapping). Основна мета тонального відображення або відтворення тонів (ці два терміни є взаємозамінними) полягає в тому, щоб викликати через тонально відображене зображення таку саму реакцію, яку викликала б реальна сцена. Іншими словами - відповідність видимості. У фотолабораторії ця процедура, звичайно, виконувалася вручну, але для цифрових цілей ідеальним рішенням було б таке, що підходило б до кожної проблеми й не потребувало втручання людини. На сьогодні оптимальний метод тонального відображення ще не винайдений, і доводиться обирати метод залежно від задачі. Багато методів вимагають налаштування параметрів, тоді як деякі є автоматичними. Результати тонального відображення значною мірою залежать як від обраного методу, так і від використаних параметрів [26]. Нові підходи до тонального відображення з'являються майже щомісяця, і мета наукової спільноти, як завжди, полягає в розробці більш універсальних підходів, добре придатних для більшості проблем. Деякі з основних алгоритмів тонального відображення були розглянуті в [6].

5.1 Тональне відображення монохромного HDR

Методи тонального відображення можна розділити різними способами. Одним із найбільш часто використовуваних є поділ на локальні та глобальні. Крім того, методи, що працюють у певній області перетворень, можна класифікувати як окремі класи. У роботі [1] розрізняють глобальні, локальні, частотні та градієнтні оператори.

Глобальні методи є найпростішим класом операторів тонального відображення (tone mapping operator, ТМО). Вони всі мають кілька притаманних властивостей: до всіх пікселів застосовується однакове відображення, а крива тонального відображення завжди має монотонний характер. Відображення має бути монотонним, щоб уникнути появи небажаних артефактів. Це накладає велике обмеження на комбінацію стиснення та збереження видимості [26].

Локальні методи здатні певною мірою уникнути обмежень, з якими стикаються глобальні ТМО. Загалом локальні методи не покладаються на статистику всього зображення. Натомість кожен піксель стискається залежно від його значення яскравості та значень у локальному оточенні. Часто локальні методи намагаються імітувати властивості зорової системи людини (HVS); відомо, що око фокусується локально на ділянці сцени, формуючи незалежну адаптацію на основі вмісту локального оточення. У результаті ціною більш гнучкого стиснення є обчислювальна складність. Кількість необхідних обчислень зростає з кількістю зон локальної адаптації. Також вище локальне стиснення яскравості сцени іноді може призводити до появи галоподібних артефактів навколо об'єктів [26].

Оператори області перетворень відрізняються як від глобальних, так і від локальних методів тим, що вони працюють з даними в області, відмінній від звичайної просторової. Частотні оператори стискають дані, як впливає з назви, використовуючи частотно-залежну схему. Перший цифровий оператор

тонального відображення був опублікований ще в 1968 році, і це був оператор частотної області [20]. Багато властивостей сучасних операторів частотної області успадковані від цього підходу. Градієнтні оператори покладаються на те, що розрізнення між освітленістю та відбивною здатністю для багатьох сцен відносно добре апроксимується градієнтним підходом. Це підтверджується тим, що ділянка зображення з високим динамічним діапазоном зазвичай проявляється великим градієнтом між сусідніми пікселями. Наступним кроком є оператор тонального відображення, що функціонує в області диференціювання, використовуючи маніпуляцію градієнтом для зменшення динамічного діапазону [26].

Більшість методів тонального відображення працюють у просторовій області і тому класифікуються як локальні або глобальні, залежно від характеру стиснення. Нарешті, слід зазначити, що оскільки існує багато методів тонального відображення HDR-сцен, і їхня базова функціональність, крім основної ідеї стиснення діапазону, дуже відрізняється від методу до методу, немає сенсу наводити детальний опис прикладу реалізації. Усі методи добре описані в літературі, а методи, реалізовані для підходу яскравості-хроматичності детально описані в наступному підрозділі.

5.2 Тональне відображення HDR яскравості-хроматичності

Існує ряд методів тонального відображення, що працюють у просторі RGB. Ці методи можна легко адаптувати для зменшення діапазону яскравості. Однак термін «тональне відображення» був би сумнівним у цьому контексті, оскільки тон зазвичай використовується у зв'язку з кольором. У цьому розділі такий оператор зменшення діапазону яскравості позначається як $\cdot$. Його вихідними даними є зображення яскравості з діапазоном $[0, 1]$, тобто, $\Lambda(\tilde{\zeta}^Y)(\cdot) \in [0, 1]$. Щодо хроматичних каналів, представлено простий, але ефективний підхід [26].

Для стиснення каналу яскравості представлено два глобальні оператори зменшення діапазону яскравості. Вибір обмежений глобальними операціями просто тому, що на цей час локальні оператори не змогли дати результати, вірні оригінальній сцені. Слід зазначити, що більшість методів тонального відображення, розроблених для RGB, можна більш-менш безпосередньо застосувати для стиснення каналу яскравості, ніби це було HDR-зображення у відтінках сірого. Таким чином, постійний розвиток методів тонального відображення для RGB HDR-зображень також сприяє стисненню даних HDR яскравості-хроматичності [26].

5.2.1 Стиснення на основі прив'язки

Перший метод базується на теорії прив'язки (anchoring) сприйняття світлості та був представлений для RGB у [7]. Основна ідея методу полягає в тому, щоб розділити зображення яскравості на структури або кластери (frameworks) на основі теорії сприйняття світлості [21]. Ця теорія стверджує, що для того, щоб пов'язати значення яскравості зі сприйнятою світлістю, необхідно визначити одне або кілька відображень між яскравістю та сприйнятими значеннями у відтінках сірого, так звану прив'язку (anchor). Структурна схема методу зображена на рисунку 5.2 [26].

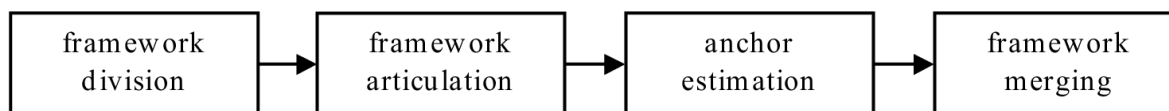


Рисунок 5.2 — Структурна схема процесу тонального відображення на основі прив'язки (anchoring-based). Блоки представляють чотири основні етапи процедури. Тут термін “framework” відповідає поняттю кластера

Поділ на кластери (фреймворки) здійснюється за допомогою стандартного алгоритму K внутрішньо групових середніх (K -means) і ґрунтується на гістограмі значень десяткових логарифмів від яскравості ($\log_{10}$). Попередні центроїди розташовуються в межах однієї логарифмічної одиниці

($\log_{10}$) один від одного. На наступних етапах кластери, побудовані на цих центроїдах, об'єднуються, якщо відстань між двома центроїдами стає меншою за одиницю, а кластер не містить жодного пікселя або жодного пікселя з імовірністю приналежності до цього кластера понад 0,6. Ймовірність обчислюється як функція відстані від центроїда кластера. Коли цей алгоритм завершує свою роботу, результатом стає поділ, як правило, не більше ніж на три кластери з подібною інтенсивністю. На останньому етапі поділу на кластери, отримані кластери артикулюються на основі динамічного діапазону окремого кластера. Кластер з високим динамічним діапазоном (вище однієї $\log_{10}$ - одиниці) має максимальну артикуляцію, яка знижується до нуля разом із динамічним діапазоном [26]. Артикуляція накладається на кластери для того, щоб кластер, який складається з фону, не відігравав суттєвої ролі в обчисленні чистої світлості [26]. На передостанньому етапі кластери фіксуються (anchored) таким чином, що в кожному окремому кластері 95-й процентиль відображається білим кольором. Зрештою, яскравість зі скороченим діапазоном обчислюється шляхом віднімання значень яскравості з фіксованих кластерів від вихідної яскравості.

Що стосується видимості деталей, метод на основі анкерування (прив'язки) перевершує деякі інші методи. Навіть сцени з надзвичайно високим контрастом втискуються в діапазон, характерний для рідкокристалічних екранів (liquid crystal display, LCD) споживчого рівня. Для деяких сцен це може призвести до того, що результати виглядатимуть дещо неприродно, оскільки загальний контраст знижується дуже суттєво. Той факт, що описаний метод не дозволяє здійснювати ручне налаштування, є одночасно і недоліком, і перевагою; для більшості зображень більша частина сцени стає видимою у реалістичний спосіб, але для зображень із надзвичайно високим динамічним діапазоном відсутність загального контрасту може іноді призвести до того, що результати виглядатимуть дещо занадто «сплюсненими» [26].

5.2.2 Стиснення на основі гістограми

Інший метод ґрунтується на відносно простій техніці налаштування гістограми. Він грубо апроксимує метод, описаний у [5]. Зауважимо, однак, що більшість складних ідей, впроваджених у [5], приносяться в жертву заради швидкості та простоти реалізації [26]. У методі налаштування гістограми першим кроком є обмеження значень HDR-зображення яскравості до нижньої межі HVS (10^{-4}cd/m^2). Потім зображення яскравості можна піддати проріджуванню (downsampling) з коефіцієнтом вісім (зниженню дискретизації має передувати відповідна низькочастотна фільтрація, щоб уникнути аліасингу). Зниження дискретизації є спрощеною апроксимацією явища фовеальної фіксації, що зустрічається при адаптації ока. Після цього з отриманого зображення з меншою роздільною здатністю обчислюється гістограма яскравості [26]. Кумулятивний розподіл визначається як:

$$P(b) = \frac{\sum_{b_i < b} f(b_i)}{\sum_{b_i} f(b_i)}, \quad (5.1)$$

де $f(b)$ - кількість частот в i -му інтервалі. Якщо метою було вирівнювання ймовірності кожного значення яскравості, це можна було б досягти за допомогою вирівнювання гістограми [26]:

$$B_{disp} = \log(L_{dmin}) + [\log(L_{dmax}) - \log(L_{dmin})] \cdot P(b), \quad (5.2)$$

де L_{dmax} та L_{dmin} відповідно максимальне та мінімальне значення яскравості дисплея, а B_{disp} вихідна яскравість дисплея. Однак, хоча вирівнювання гістограми стискає динамічний діапазон у зріджених областях гістограми, воно також посилює контраст у щільних областях, що призводить до надмірного контрасту. Цього можна уникнути, наклавши лінійну межу на

контраст, створюваний цим методом. Лінійна межа може бути визначена наступним чином [26]:

$$f(b) \leq \frac{\sum_{b_i} f(b_i) \Delta b}{\log(L_{dmax}) - \log(L_{dmin})}, \quad (5.3)$$

де Δb - ширина кроку побудови гістограми. Ця межа повинна бути накладена на вирівнювання гістограми в ітеративній формі, оскільки при усіченні значень, що перевищують межу, кількість вибірок гістограми $\sum_{b_i} f(b_i)$ змінюється, що, відповідно, змінює і саму межу. Відображення на дисплей отримується шляхом використання новоствореної гістограми яскравості (або її кумулятивного розподілу) у наведеній вище формулі вирівнювання гістограми.

5.2.3 Стиснення компонентів хроматичності

Колірна гама sRGB не дозволяє передавати дуже темні або дуже яскраві та насичені кольори, які існують у реальних сценах і захоплюються в HDR-зображеннях. Тому існує потреба в хроматичному тональному відображенні. У цьому підході, щоб отримати достовірні кольори, які вписуються в гаму sRGB, відтінок залишається недоторканим за рахунок жертвування насиченістю. Введення коефіцієнта масштабування 8 для двох значень хроматичності не змінить відтінок, але зменшить насиченість. Більше інформації з цього питання можна знайти в [26].

6 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

6.1 Отримання HDR зображень за набором LDR зображень

Для демонстрації основ композиції HDR у просторі яскравості-хроматичності була знята послідовність із 28 кадрів за допомогою камери Canon EOS 40D, встановленої на штативі. Зображення були зняті з ISO 100, завдяки чому вони мають дуже низький рівень шуму, що також досягалось завдяки характеристикам камери. Послідовність зображень скомпонована в HDR в опонентному колірному просторі за допомогою методів, описаних у попередніх розділах [26]. Спочатку для камери оцінюється функція відгуку, як описано в підрозділі 3.1. Використовуючи знайдену функцію відгуку, отримують HDR-зображення у просторі яскравості-хроматичності, як описано в підрозділі 4.2. Час експозиції для знятої послідовності варіюється від 0,01 с до 5,00 с; на рисунку 6.1 показані фрагменти цієї послідовності.

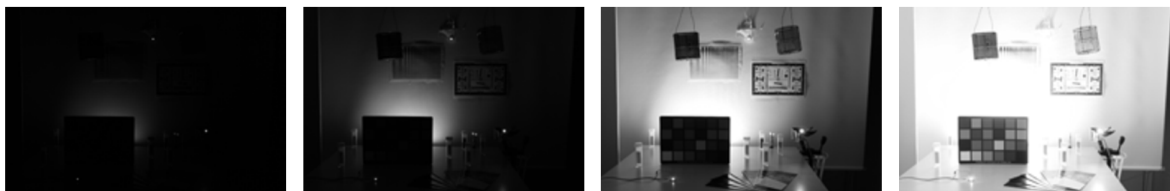


Рисунок 6.1 — Чотири експозиції з реальної послідовності LDR зображень, використані для створення HDR-зображення. Час експозиції кадрів становить 0,01, 0,0667, 0,5 та 5 секунд

Гістограма для каналів R, G та B HDR-зображення показана в логарифмічному масштабі на рисунку 6.2.

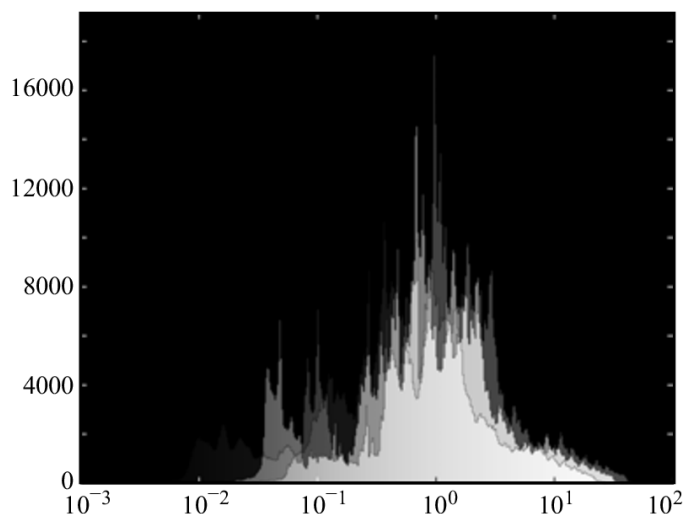


Рисунок 6.2 - Гістограми HDR-зображення, сформованого у просторі яскравість-хроматичність та перетвореного в RGB. Гістограму відображено в логарифмічному масштабі

На рисунках 6.3(a) та 6.3(b) показані результати тонального відображення, досягнуті за допомогою двох методів, описаних у 5-му розділі. На рисунку 6.3(c) показано результат адаптивного логарифмічного тонального відображення HDR-зображення, перетвореного в RGB, досягнутий за допомогою методу, описаного в [22]. Зауважте, що цей метод тонального відображення був реалізований так, як у [23], з параметрами налаштування експозиції, зміщення, яскравості тіней та контрасту, встановленими відповідно на 0,64, 0,77, 1,00 та 0,00.

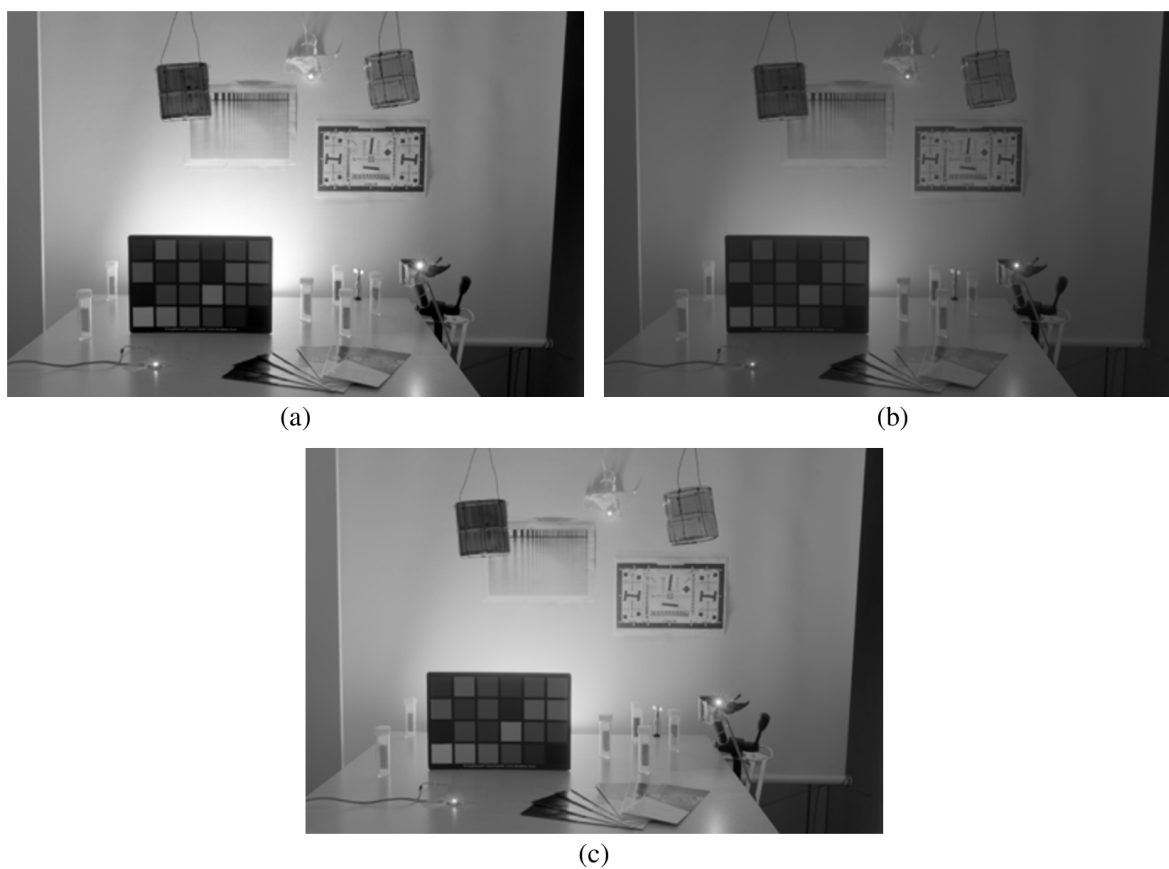


Рисунок 6.3 - HDR-зображення, скомпоноване у просторі яскравості-хроматичності з реальних даних і тонально відображене з використанням: (a) техніки налаштування гістограми, (b) техніки прив'язки (anchoring), та (c) адаптивної логарифмічної техніки, представленої в [22], яка виконується в RGB колірному просторі

ВИСНОВКИ

В роботі було представлено методи захоплення, композиції та відображення HDR зображень (включаючи кольорові зображення). Зокрема, були розглянуті методи композиції, які ефективно дозволяють створювати HDR-зображення за допомогою пристроїв отримання LDR зображень. Окрема увага була приділена методам компресії HDR зображень, яка дозволяє ефективно знизити динамічний діапазон HDR зображення для демонстрації його на LDR екрані.

Окрім більшої стійкості до погіршень якості, підхід до HDR-зображень на основі яскравості-хроматичності приділяє особливу увагу достовірній обробці кольору. На відміну від традиційних методів, що працюють із каналами RGB, цей метод не страждає від систематичних кольірних артефактів у випадках невідповідності даних або помилок кольірного балансу, які зазвичай спричиняються, серед іншого, недосконало відкаліброваним відгуком камери. З огляду на постійне впровадження обладнання для захоплення та відображення HDR, методи HDR-зображень відіграватимуть ще важливішу роль у всіх галузях обчислювальної фотографії та обробки зображень. З появою майже щодня нових промислових та комерційних застосувань, не буде перебільшенням сказати, що HDR у багатьох сенсах стане "новим кольоровим телебаченням".

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Reinhard, E., Ward, G., Pattanaik, S., & Debevec, P. (2005). High dynamic range imaging. Morgan Kaufmann Publishers.
2. Mann, S., & Picard, R. (1995). Being “undigital” with digital cameras: Extending dynamic range by combining differently exposed pictures. Proceedings of the IS&T 46th Annual Conference, 422–428.
3. Debevec, P., & Malik, J. (1997). Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. Proceedings of the 24th Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 369–378.
4. Mitsunaga, T., & Nayar, S. (1999). Radiometric self calibration. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1374–1380.
5. Larson, G., Rushmeier, H., & Piatko, C. (1997). A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes. IEEE Transactions on Visual and Computer Graphics, 3(4), 291–306.
6. Devlin, K., Chalmers, A., Wilkie, A., & Purgathofer, W. (2002). Tone reproduction and physically based spectral rendering. Proceedings of EUROGRAPHICS, 101–123.
7. Krawczyk, G., Myszkowski, K., & Seidel, H. (2005). Lightness perception in tone reproduction for high dynamic range images. Computer Graphics Forum, 24(3), 635–645.
8. Seetzen, H., Heidrich, W., Stuerzlinger, W., Ward, G., Whitehead, L., Trentacoste, M., Ghosh, A., & Vorozcovs, A. (2004). High dynamic range display systems. ACM Transactions on Graphics, 23(3), 760–768.
9. Plataniotis, K. N., & Venetsanopoulos, A. N. (2000). Color image processing and applications. Springer-Verlag.
10. Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2002). Digital image processing (2nd ed.). Prentice-Hall.

11. Susstrunk, S., Buckley, R., & Swen, S. (1999). Standard RGB color spaces. *Proceedings of the IS&T/SID 7th Color Imaging Conference*, 127–134.
12. Ford, A., & Roberts, A. (n.d.). Colour space conversions. <https://opticsoflife.org/pdfs/tech/colorconversion.pdf>
13. Blanksby, A., Loinaz, M., Inglis, D., & Ackland, B. (1997). Noise performance of a color CMOS photogate image sensor. *International Electron Devices Meeting, Technical Digest*, 20–23.
14. Pirinen, O., Foi, A., & Gotchev, A. (2007). Color high dynamic range imaging: The luminance-chrominance approach. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 17(3), 152–162.
15. Kavusi, S., & Gamal, A. E. (2004). Quantitative study of high-dynamic-range image sensor architectures. *Proceedings of Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications*, 264–275.
16. Burghartz, J., Graf, H. G., Harendt, C., Klingler, W., Richter, H., & Strobel, M. (2006). HDR CMOS imagers and their applications. *Proceedings of the 8th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology*, 528–531.
17. Madden, B. C. (1993). Extended intensity range imaging (Technical Report No. MS-CIS-93-16). GRASP Laboratory, University of Pennsylvania. <https://repository.upenn.edu/server/api/core/bitstreams/23329053-4397-4579-a233-72aa62c5b0b3/content>
18. O'Malley, S. (2006). A simple, effective system for automated capture of high dynamic range images. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Systems*, 15.
19. Goesele, M., Heidrich, W., & Seidel, H. P. (2001). Color calibrated high dynamic range imaging with ICC profiles. *Proceedings of the 9th Color Imaging Conference*, 286–290.
20. Oppenheim, A. V., Schafer, R., & Stockham, T. (1968). Nonlinear filtering of multiplied and convolved signals. *Proceedings of the IEEE*, 56(8), 1264–1291.

21. Gilchrist, A., Kossyfidis, C., Bonato, F., Agostini, T., Cataliotti, J., Li, X., Spehar, B., Annan, V., & Economou, E. (1999). An anchoring theory of lightness perception. *Psychological Review*, 106(4), 795–834.
22. Drago, F., Myszkowski, K., Annen, T., & Chiba, N. (2003). Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes. *Computer Graphics Forum*, 22(3), 419–426.
23. Picturenaut 3.0. (n.d.). <https://www.picturenaut.de/download.html>
24. Foi, A., Trimeche, M., Katkovnik, V., & Egiazarian, K. (2008). Practical Poissonian-Gaussian noise modeling and fitting for single-image raw-data. *IEEE Transactions on Image Processing*, 17(10), 1737–1754.
25. Foi, A. (2009). Clipped noisy images: Heteroskedastic modeling and practical denoising. *Signal Processing*, 89(12), 2609–2629.
26. Pirinen, O., Foi, A., & Gotchev, A. (2010). Color High-Dynamic Range Imaging: Algorithms for Acquisition and Display. *Computational Photography: Methods and Applications*, 228-256.