

**Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА АНАЛІЗУ ЯКОСТІ ОПТИЧНИХ
СИСТЕМ**

**AUTOMATED SYSTEM FOR ANALYZING THE QUALITY OF OPTICAL
SYSTEMS**

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

освітня програма «Системи керування та діагностування технологічного
устаткування»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи СКДм - 21
Олекса Владислав Леонтійович

(підпис)

Керівник:
к. т. н., доцент
Гуменюк Павло Олександрович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2025 р.
Гарант освітньої програми:
д.т.н., професор
Пальчевський Б. О.

(підпис)

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма: «Системи керування та діагностування технологічного устаткування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

О. Ю. Повстяной

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ДРУГОГО (МАГІСТЕРСЬКОГО) РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Олекси Владислава Леонтійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Автоматизована система аналізу якості оптичних систем*

Керівник роботи: *к.т.н., доцент Гуменюк Павло Олександрович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 27 » 06 2025 року N 304/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: « 1 » 12 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: *експериментальні дані*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Якість оптичних систем. Основні метрики якості та методології їх оцінки. Типи

тест-мішеней та методології вимірювань. Установка для дослідження якості оптичних

систем. Автоматизація обчислення модуляційної передавальної функції (MTF) за методом

похилого краю. Загальний аналіз зображення. Система оцінки функції передачі модуляції

(MTF) зображень з ручним вибором області інтересу. Визначення параметрів дисторсії

об'єктива та корекції спотворень на зображенні. Автоматизоване вимірювання роздільної

здатності зображень з використанням тестової міри USAF 1951. Алгоритм та програмна

реалізація оцінки локальної різкості зображення.

5. Перелік графічного матеріалу:

графічний матеріал виконано у вигляді презентації, яка складається з 16 слайдів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Гуменюк П. О.		
Розділ 2	Гуменюк П. О.		
Розділ 3	Гуменюк П. О.		
Розділ 4	Гуменюк П. О.		
Розділ 5	Гуменюк П. О.		
Розділ 6	Гуменюк П. О.		
Розділ 7	Гуменюк П. О.		
Розділ 8	Гуменюк П. О.		
Розділ 9	Гуменюк П. О.		
Нормоконтроль	Лапченко Ю. С.		
Показник запозичень тексту			
Академічна доброчесність	Федік Л. Ю.		

7. Дата видачі завдання 27.06.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз проблеми за темою роботи та постановка задач	01.09.2025 р.	
2	Аналіз і вибір напрямків дослідження	10.09.2025 р.	
3	Теоретичне дослідження та практична реалізація	20.09.2025 р.	
4	Опис засобів розробки об'єкта проектування	01.10.2025 р.	
5	Загальні висновки та рекомендації	20.10.2025 р.	
6	Оформлення роботи	10.11.2025 р.	
7	Оформлення презентації	20.11.2025 р.	
8	Задача чистового варіанту кваліфікаційної роботи на кафедрі	01.12.2025 р.	

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Олекса В. Л.
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис)

Гуменюк П. О.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Олекса В. Л. Автоматизована система аналізу якості оптичних систем.
Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Луцький національний технічний університет, Луцьк 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, дев'яти розділів, загальних висновків та рекомендацій, переліку використаних джерел та додатків.

Кваліфікаційна робота спрямована на створення автоматизованої системи аналізу якості оптичних систем із фокусом на комплексну обробку зображень, оцінку метрик та виправлення спотворень.

Результати роботи засвідчують ефективність розробленої автоматизованої системи для комплексного аналізу якості оптичних зображень. Запропоновані алгоритми та програмне забезпечення дозволяють точно діагностувати оптичні недоліки та проводити об'єктивний контроль систем у виробництві, тестуванні та експлуатації. Система може бути інтегрована у процеси інженерного проектування, метрологічного забезпечення та AI-підтримки візуального контролю.

Об'єм графічної частини магістерської роботи складає 16 слайдів. Обсяг пояснювальної записки становить 108 друкованих сторінок.

Ключові слова: якість оптичних систем, моделювання, обробка зображень, алгоритм.

ANNOTATION

Oleksa V. Automated system for analyzing the quality of optical systems. Manuscript.

Master's qualification work of OP "Automation and computer-integrated technologies" specialty 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics. Lutsk National Technical University, Lutsk 2025.

The master's qualification work consists of an introduction, nine chapters, general conclusions and recommendations, a list of references and appendices.

The qualification work aims to create an automated system for analyzing the quality of optical systems with a focus on comprehensive image processing, metric evaluation, and distortion correction.

The research results confirm the effectiveness of the developed automated system for comprehensive analysis of the quality of optical images. The proposed algorithms and software allow for accurate diagnosis of optical defects and objective control of systems in production, testing, and operation. The system can be integrated into engineering design, metrological support, and AI-supported visual control processes.

The volume of the graphic part of the master's thesis is 16 slides. The volume of the explanatory note is 108 printed pages.

Keywords: quality of optical systems, modeling, image processing, algorithm.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 ЯКІСТЬ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ	10
1.1 Фактори впливу на якість оптичних систем при виготовленні	11
1.2 Фактори впливу на якість оптичних систем при експлуатації	15
1.3 Методології та техніки аналізу якості оптичних систем	19
Висновок до розділу 1	21
РОЗДІЛ 2 ОСНОВНІ МЕТРИКИ ЯКОСТІ ТА МЕТОДОЛОГІЇ ЇХ ОЦІНКИ .	22
2.1 Функція передачі модуляції (MTF)	22
2.2 Роздільна здатність	30
2.3 Карти різкості	34
2.4 Оптичні аберації	36
2.5 Виклики та перспективи у тестуванні оптичних систем	39
Висновок до розділу 2	41
РОЗДІЛ 3 ТИПИ ТЕСТ-МІШЕНЕЙ ТА МЕТОДОЛОГІЇ ВИМІРЮВАНЬ	43
3.1 Мішені USAF 1951. Розрахунок роздільної здатності	43
3.2 Мішень Рончі. Вимірювання роздільної здатності та контрасту ...	45
3.3 Зірчасті мішені. Комплексна оцінка	46
3.4 Мішені для вимірювання MTF	47
3.5 Мішені для вимірювання спотворень	49
3.6 Стандарти ISO для оптичного тестування	50
Висновок до розділу 3	52
РОЗДІЛ 4 УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ	53
Висновок до розділу 4	57
РОЗДІЛ 5 АВТОМАТИЗАЦІЯ ОБЧИСЛЕННЯ МОДУЛЯЦІЙНОЇ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ (MTF) ЗА МЕТОДОМ ПОХИЛОГО КРАЮ. ЗАГАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЗОБРАЖЕННЯ	58

	7
5.1 Опис алгоритму	58
5.2 Програмна реалізація та взаємодія функцій	61
Висновок до розділу 5	66
РОЗДІЛ 6 СИСТЕМА ОЦІНКИ ФУНКЦІЇ ПЕРЕДАЧІ МОДУЛЯЦІЇ (MTF) ЗОБРАЖЕНЬ З РУЧНИМ ВИБОРОМ ОБЛАСТІ ІНТЕРЕСУ	67
6.1 Алгоритм обчислення MTF50 при ручному виборі ROI	67
6.2 Програмна реалізація алгоритму	68
6.3 Взаємодія функцій	70
Висновок до розділу 6	76
РОЗДІЛ 7 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИСТОРСІЇ ОБ'ЄКТИВА ТА КОРЕКЦІЇ СПОТВОРЕНЬ НА ЗОБРАЖЕННІ	77
7.1 Алгоритм визначення дисторсії	77
7.2 Програмна реалізація	80
Висновок до розділу 7	83
РОЗДІЛ 8 АВТОМАТИЗОВАНЕ ВИМІРЮВАННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕСТОВОЇ МІРИ USAF 1951	84
8.1 Алгоритм вимірювання роздільної здатності	84
8.2 Програмна реалізація	86
Висновок до розділу 8	92
РОЗДІЛ 9 АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ОЦІНКИ ЛОКАЛЬНОЇ РІЗКОСТІ ЗОБРАЖЕННЯ	93
9.1 Опис алгоритму оцінки локальної різкості	93
9.2 Програмна реалізація алгоритму	94
Висновок до розділу 9	100
ВИСНОВКИ	101
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	104
ДОДАТКИ	109

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку цифрової оптики та високих очікувань споживачів щодо якості зображень, ефективна організація аналізу та контролю якості оптичних систем стає критично важливою. Оптичні пристрої, що застосовуються у фотографії, відеозйомці, науці й промисловості, мають забезпечувати стабільні характеристики за різних умов експлуатації. При цьому кожна складова – від проектування й виробництва до калібрування й обслуговування – суттєво впливає на підсумкову оптичну якість.

Проблема полягає в тому, що навіть незначні оптичні дефекти або похибки можуть суттєво знизити деталізацію, контрастність та точність передачі просторової інформації. Стандартизовані методики часто не враховують впливу специфіки об'єктива, сенсора, а також цифрових обробок. Існує потреба у впровадженні гнучких, адаптивних систем, здатних оперативно аналізувати якість оптики в динамічних умовах і забезпечувати контроль.

У контексті розвитку автоматизованих систем керування та діагностування технологічного устаткування, зростає актуальність застосування програмних методів для оцінки якості оптичних систем, що включає такі метрики, як MTF, дисторсія, роздільна здатність, різкість тощо. Особливо важливою є можливість локального аналізу зображень, адаптації до конкретних типів тестових мішеней та корекції спотворень на основі калібрування.

Метою роботи є створення автоматизованої системи аналізу якості оптичних систем, яка дозволяє проводити комплексне оцінювання різних метрик якості зображення з урахуванням просторових характеристик та геометричних спотворень, використовуючи як стандартизовані мішені, так і сучасні алгоритмічні підходи.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання та оцінювання характеристик оптичних систем на основі аналізу цифрових зображень.

Предмет дослідження – алгоритми та програмні засоби аналізу модуляційної передавальної функції (MTF), дисторсії, роздільної здатності, локальної різкості, а також методи автоматизації процесу тестування оптики.

Наукова новизна полягає в розробці комплексної системи аналізу, яка поєднує різні типи оцінки якості (MTF, роздільна здатність, дисторсія, різкість); дозволяє вручну або автоматично вибирати області інтересу (ROI); забезпечує точне калібрування параметрів камери та оптики.

Результати дослідження можуть бути використані для створення інструментів тестування камер та об'єктивів у виробничому середовищі.

У процесі виконання роботи необхідно вирішити такі задачі.

1. Дослідити чинники, що впливають на оптичну якість, включаючи технологічні, конструктивні та експлуатаційні аспекти.
2. Проаналізувати сучасні метрики якості зображень.
3. Проаналізувати основні типи оптичних тест-мішеней та методи їх використання для оцінки якості оптичних систем.
4. Розробити методи оцінки функції передачі модуляції (MTF), включаючи метод похилого краю та з використанням ручного ROI.
5. Розробити алгоритм автоматизованого вимірювання дисторсії та параметрів калібрування камери на основі шахової мішені.
6. Реалізувати автоматизований аналіз роздільної здатності за допомогою тестової мішені USAF 1951.
7. Розробити систему візуалізації різкості та побудови теплових карт для локального аналізу якості зображення.
8. Провести експериментальні дослідження за допомогою камери Canon EOS R8 з об'єктивом Canon RF 15-30 мм і протестувати ефективність запропонованих методів.

Апробація результатів дослідження. Основні результати досліджень відображені у науковій статті Олекса В. Л., Гуменюк П. О. Якість оптичних систем. *Технологічні комплекси*. Луцьк, 2025. Том 17, № 2. С. 36-47.

РОЗДІЛ 1

ЯКІСТЬ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

Якість оптичної системи визначає, наскільки ефективно оптична система передає просторову, спектральну й інтенсивнісну інформацію від об'єкта до сенсора. У більшості застосувань – від наукових приладів до споживчих камер – якість отриманого зображення напряму залежить від характеристик оптичної системи.

Висока оптична якість дозволяє мінімізувати аберації, підвищити роздільну здатність, зберегти геометричну точність і забезпечити високу контрастність. Це особливо важливо для застосувань, де від зображення залежить результат аналізу або управління процесом, як-от у промисловій автоматизації, медичній візуалізації чи автономному транспорту. Точна передача зображення визначає, наскільки ефективно система виконує свою функцію, зокрема в умовах складного освітлення або динамічного середовища [1].

З розвитком цифрових камер, роздільна здатність яких постійно зростає, основним обмеженням у якості зображень стає саме оптика, а не сенсор. Саме об'єktiv визначає рівень деталізації, контрасту та передачі світла. Вплив мають такі параметри, як фокусна відстань, відносна апертура, кут поля зору. Наприклад, менше число діафрагми означає більшу апертуру, що покращує світлочутливість системи. Вибір сенсора також відіграє важливу роль: CCD-камери забезпечують низький рівень шуму, але мають повільну передачу сигналу; CMOS-сенсори працюють швидше; GigE-системи підходять для задач, де критична швидкість зчитування. Всі ці компоненти – оптика, сенсор, програмне забезпечення – формують єдину систему, в якій якість зображення залежить від збалансованої взаємодії усіх елементів.

Традиційна оцінка оптичної якості базувалась на ручній інспекції. Цей підхід був суб'єktivним, нестабільним і схильним до помилок. З появою автоматизованих систем оптичного контролю ситуація змінилася. У 1980-х

роках такі системи почали замінювати ручну перевірку на алгоритми аналізу, що дозволило досягти більшої точності та швидкості. Сьогодні застосовуються системи, що базуються на алгоритмах обробки зображень, які суттєво підвищують ефективність аналізу. Вони здатні обробляти великі обсяги даних з високою повторюваністю та стабільністю [2-4].

Автоматизована оцінка якості дозволяє стандартизувати процес, забезпечити повторюваність і виявити дефекти на ранніх етапах. Це скорочує цикл виробництва й підвищує надійність продукту в період експлуатації.

1.1 Фактори впливу на якість оптичних систем при виготовленні

Якість оптичних систем формується ще на етапі проектування і виготовлення. Конструктивні рішення мають прямий вплив на довговічність, точність і стабільність роботи системи. Зокрема, визначальне значення мають архітектура системи, вибір матеріалів і встановлення технічних допусків.

Матеріали, з яких виготовлені оптичні компоненти, повинні мати поєднання оптичної однорідності, механічної стабільності та термостійкості. Наприклад, кремнієвий карбід і берилій є придатними для конструкцій, де критичними є жорсткість і мала маса. Проте їх використання вимагає врахування умов експлуатації, таких як вібрації, температурні поля чи радіаційне навантаження [5-6].

Допуски на технічні характеристики окремих елементів задають допустимі межі їхніх відхилень. Ці межі повинні бути жорстко пов'язані з загальними допусками системи. Помилка в цьому розрахунку може призвести до втрати якості, навіть якщо виготовлення проведено точно.

Таким чином, конструктивні фактори не є ізольованими – вони формують єдину систему, де кожен етап підготовки впливає на кінцеву якість. Вибір матеріалу має фундаментальний характер, бо визначає не лише початкові властивості, а й стійкість до зовнішніх чинників. Навіть за високоточних

технологій обробки невдалий вибір матеріалу створює ризики, які неможливо компенсувати на пізніших етапах.

1.1.1 Виробничі допуски та дефекти

Високоточні допуски в оптичному виробництві регламентуються чіткими цифровими межами, які задають допустимі відхилення для кожного критичного параметра. Це дозволяє забезпечити стабільність характеристик системи в широкому діапазоні умов.

Для оптичних компонентів із стандартною якістю допускається діаметр у межах $+0,00/-0,10$ мм, тоді як у високоточному виконанні – до $+0,00/-0,010$ мм. Такі межі забезпечують точну механічну посадку без ризику децентрування.

Допуск на товщину в центрі $+/-0,20$ мм для стандартних лінз та $+/-0,010$ мм для прецизійних [7].

Радіус кривизни дозволяється відхиляти на $+/-0,5$ % у звичайних компонентах. У системах з високою числовою апертурою застосовують допуски до $+/-0,01$ %, що відповідає похибці менш ніж 10 мкм при радіусі 100 мм [7].

Паралельність поверхонь задається в межах від 5 кутових хвилин до 10 кутових секунд залежно від застосування. Для лазерних вікон та еталонів інтерферометрів потрібна паралельність не гірша за 3 кутові секунди ($\approx 0,015$ мрад), що вимагає використання оптичного контактного методу або інтерферометричного контролю [7].

Чиста апертура зазвичай становить не менше 90-95 % від номінального діаметра. Наприклад, для лінзи $\varnothing 50$ мм корисна зона становитиме щонайменше $\varnothing 45$ мм, решта використовується під фаски або опору в оправі [7].

Зменшення допуску на 90 % (наприклад, з $+/-0,20$ мм до $+/-0,010$ мм) може збільшити вартість виробництва компонента в 2-5 разів залежно від обсягу партії та складності обробки [8].

1.1.2 Дефекти матеріалів

Дефекти матеріалів мають критичне значення для функціональності оптичних систем. Неоднорідність показника заломлення в об'ємі матеріалу

призводить до викривлення хвильового фронту. Неоднорідність у матеріалі означає, що показник заломлення змінюється в різних частинах оптичного елемента. Це може стосуватись всього об'єму або лише окремих ділянок. Якщо ці зміни складають хоча б одну мільйонну, світло починає розсіюватися, що викривляє його напрям і знижує точність фокусування [9].

Включення та бульбашки утворюються під час виробництва, особливо на етапі плавлення або при недостатньому очищенні сировини. Їх розміри можуть сягати від кількох мікрометрів до десятків мікрометрів. За концентрації понад $0,03 \text{ мм}^3/100 \text{ см}^3$ у прозорому склі починається суттєве розсіювання світла, особливо в короткохвильовому діапазоні [9].

Через напруження після обробки світло з різною поляризацією проходить по-різному, ніби через різні середовища. Навіть невелике заломлення, наприклад 5 нанометрів на сантиметр, у деталях товщиною 10 міліметрів призводить до зсуву хвилі світла, що вже може розмити зображення. У точній оптиці допускається не більше 2 нанометрів на сантиметр [10].

Наявність вищезазначених дефектів обмежує функціональні можливості оптичної системи ще до початку її використання. Дизайн або юстування не можуть компенсувати втрати, що виникають через неоднорідності або включення. Тому якість матеріалу задає верхню межу для продуктивності, яка не може бути перевищена жодними інженерними заходами після виготовлення компонента.

1.1.3 Помилки покриття та напруження

Покриття, нанесені на підкладки, можуть викликати невеликі зміни у структурі матеріалу, зокрема невідповідність кристалічної решітки. Це призводить до збільшення внутрішніх напружень у тонких плівках, особливо на полірованих поверхнях. Такі напруження виникають через різницю в структурі решіток підкладки і покриття, а також через різні коефіцієнти теплового розширення матеріалів у процесі осадження плівки [6].

Ці напруження впливають на форму поверхні оптичних елементів. Вони можуть деформувати кривизну, що призводить до помилок у формі поверхні. На легких дзеркалах деформації, спричинені напруженнями плівки, формують характерну текстуру деформації, що викликає аберації середніх і високих просторових частот [6].

Для вивчення впливу параметрів плівки – напруження, товщини та діапазону покриття – на аберації застосовують метод скінченних елементів (FEM) [6, 11]. За допомогою цього методу можна проаналізувати і оптимізувати характеристики плівки, щоб мінімізувати її негативний вплив на оптичну якість.

Взаємодія покриття і підкладки, що викликає напруження і відповідні аберації, підкреслює, що якість оптичної системи залежить не лише від властивостей окремих компонентів, але й від їхньої взаємодії та інтеграції [6, 11]. Системний підхід у проектуванні і виробництві є необхідним, адже навіть корисні технологічні доповнення, як-от антивідблискові покриття, можуть створювати нові дефекти, якщо їх не контролювати.

1.1.4 Точність збірки та вирівнювання

Зміщення елементів, децентрування та нахил у оптичних системах викликають поступове зниження якості зображення. Температурні зміни провокують розширення та стиснення матеріалів, що призводить до зміни оптичних відстаней, зокрема відстані між лінзами, а також фокусних відстаней [10].

Високі напруження, що виникають через швидкі температурні коливання, можуть спричинити руйнування лінз або корпусів. Також з'являється стресове заломлення, яке погіршує чіткість зображення. Механічне кріплення лінз має враховувати різницю в коефіцієнтах теплового розширення між компонентами, забезпечуючи достатній зазор для компенсування температурних деформацій. Аналіз допусків і контроль накопичення похибок є необхідними для забезпечення коректної збірки [10].

Теплове розширення та механічні напруження під час складання оптичних систем є динамічними чинниками, що викликають аберації навіть за умови ідеального виготовлення компонентів. Це підкреслює важливість не лише високої точності виробництва, а й стабільності під час експлуатації та врахування зовнішніх впливів у конструктивних рішеннях. Навіть ідеально виготовлені лінзи можуть втратити ефективність через неправильний монтаж або температурні коливання, що змінюють оптичний шлях.

Таким чином, механічний дизайн та терморегуляція мають таке саме значення, як і оптичний дизайн для загальної якості системи, особливо в умовах змінної температури.

1.2 Фактори впливу на якість оптичних систем при експлуатації

Після виготовлення та збірки оптичні системи піддаються впливу різноманітних факторів, що можуть спричинити деградацію їхньої якості протягом експлуатаційного періоду.

1.2.1 Аберації, спричинені експлуатацією

Аберації – це оптичні спотворення, при яких реальне зображення відхиляється від ідеального. Вони виникають через геометричні або фізичні недосконалості в компонентах системи. Джерелом аберацій можуть бути форма поверхонь, властивості матеріалів або некоректне налаштування під час монтажу й експлуатації [12].

Сферична аберація з'являється, коли промені, що проходять через центральну та крайові зони лінзи, фокусуються на різних відстанях. Це призводить до втрати чіткості зображення.

Хроматична аберація виникає через дисперсію – різне заломлення світла різних довжин хвиль. Результатом є кольорові обводи на межах об'єктів.

Астигматизм призводить до того, що промені у вертикальній і горизонтальній площинах не зводяться в одній точці, тому зображення виглядає витягнутим або розмитим по одному напрямку [12].

Кома спостерігається, коли точкові об'єкти поза оптичною віссю виглядають витягнутими. Це спричинено тим, що промені, які проходять через різні частини оптики під кутом, не фокусуються в одній точці.

Дисторсія характеризується нерівномірним масштабуванням зображення по полю зору. Вона проявляється у вигляді викривлення форми об'єктів – подушкоподібного або бочкоподібного.

Наявність аберацій, викликаних саме неправильним налаштуванням оптичної системи, вказує на критичну роль людського фактора. Система, яка виготовлена з високою точністю, може демонструвати погані результати через помилки під час юстування або експлуатації. Неправильне встановлення компонентів або порушення регламенту обслуговування здатні активувати аберації, які б інакше не проявилися [12].

1.2.2 Зовнішні фактори

На надійність та якість оптичних систем під час експлуатації суттєво впливають зовнішні фактори, зокрема кліматичні, механічні та біологічні умови. Температура та вологість здатні викликати деформації оптичних матеріалів і компонентів, що змінює їхні геометричні параметри та оптичні властивості. При підвищених температурах прискорюється старіння матеріалів, зокрема органічних, через активацію хімічних реакцій. Коливання вологості сприяє гігроскопічному розширенню та може активізувати корозійні процеси в матеріалах, що містять метали [13, 14].

Забруднення повітря у вигляді пилу, піску або дрібнодисперсних частинок спричиняє абразивне зношення оптичних поверхонь, а також погіршує прозорість шляхом розсіювання світла. Частинки, що осідають на оптичних поверхнях, знижують контрастність та пропускну здатність, особливо в системах високої чутливості [5].

Механічні впливи, зокрема удари, вібрації або тривалі навантаження, можуть спричинити мікропошкодження, зміщення компонентів або порушення юстування. У волоконно-оптичних системах критичною є стійкість до вигину, стиснення та зовнішніх агресивних впливів. Пошкодження оболонки або внутрішнього волокна може призвести до втрат сигналу або повної втрати працездатності.

Випромінювання, включаючи ультрафіолет та іонізуючу радіацію, впливає на полімерні матеріали, викликаючи жовтіння, крихкість та втрату прозорості. Це особливо важливо для систем, які працюють на відкритому повітрі або в умовах підвищеної радіаційної активності [14, 15].

Біологічні фактори, зокрема грибки, пліснява можуть пошкоджувати як оптичні, так і електронні компоненти. Зокрема, грибкове забруднення на оптичних поверхнях знижує прозорість [5].

Комбінована дія температури, вологості, забруднень та механічних навантажень створює складне середовище, у якому системи піддаються не лінійним ефектам деградації. Наприклад, вологість, що проникає в мікротріщини, разом із температурою може прискорити корозію або руйнування захисних шарів. Такі синергетичні дії вимагають моделювання та прогнозування довготривалої стабільності оптичних систем із урахуванням усіх факторів [14].

1.2.3 Механічний знос та деградація

Деградація матеріалів в оптичних системах відбувається під впливом часу та зовнішніх чинників, змінюючи фізичні та хімічні властивості компонентів. Полімери, що застосовуються як захисні елементи або конструкційні частини, зокрема піддаються старінню. Під впливом ультрафіолетового випромінювання відбувається розрив полімерних зв'язків, утворення тріщин, крихкість і втрата цілісності матеріалу [16].

Поверхневі забруднення, особливо ті, що адсорбуються з повітря або з'являються внаслідок конденсації, стають джерелами локальних напружень. Вони можуть ініціювати мікротріщини або змінювати оптичні параметри

компонентів, зокрема прозорість та коефіцієнт заломлення. Додатково, фотохімічні процеси, що відбуваються за участю ультрафіолетового світла, можуть осаджувати забруднення прямо на оптичних поверхнях, впливаючи на їх спектральні характеристики [15, 17].

Фізичне зношення функціональних поверхонь відбувається внаслідок різних механізмів. Адгезійний знос виникає при локальному злипанні матеріалів, що супроводжується їх подальшим розривом. Абразивний знос реалізується через контакт з твердими частинками, що діють як різальні або руйнівні агенти. Поверхнева втома відбувається при циклічних навантаженнях і веде до мікротріщин, які згодом поширюються в глибину матеріалу. Фретинговий знос є наслідком малих амплітудних коливань між контактуючими поверхнями, які поступово руйнують зону контакту. Ерозійний знос пов'язаний з ударною дією твердих або рідких частинок, що веде до поступового видалення матеріалу. Корозійний і окислювальний знос виникають при хімічній взаємодії матеріалів з агресивним середовищем і змінюють їх структуру.

Ці процеси спостерігаються не лише на етапі тривалого зберігання або експлуатації, але й у перші роки використання. Їхня накопичувана дія знижує надійність оптичних систем і вимагає довгострокового контролю їх технічного стану, незалежно від початкової якості виготовлення [15-18].

1.2.4 Суб'єктивні експлуатаційні фактори

Суб'єктивні фактори експлуатації безпосередньо впливають на надійність оптичних систем і визначають ступінь реалізації їх технічного потенціалу. До них належить кваліфікація персоналу, що відповідає за експлуатацію та обслуговування. Наявність необхідних навичок, досвіду і розуміння принципів роботи обладнання є ключовою умовою для підтримання його у справному стані. Недостатня підготовка може призвести до неправильної інтерпретації технічних параметрів, невчасного виявлення відхилень або порушення процедур [5].

Організація технічного обслуговування включає регулярність, повноту і якість виконання регламентних робіт. Наявність чітко визначених процедур,

стандартів, контрольних списків та відповідальності сприяє підтриманню функціонального стану систем. Ігнорування регламентів або їх формальне виконання збільшує ризик деградації або несподіваних відмов.

Загальна структура експлуатації також впливає на стан систем. Вона визначає, чи забезпечується правильне середовище для роботи, чи враховано графіки навантаження, умови зберігання та використання. Невідповідні методи організації, такі як надмірне навантаження або недотримання режимів, здатні спричинити поступове погіршення характеристик навіть без явних зовнішніх пошкоджень [5].

Усі ці чинники свідчать, що суб'єктивні аспекти експлуатації є не менш важливими за технічні характеристики. Надійність у цьому контексті формується не лише технологічними рішеннями, але й людськими діями та організаційною структурою протягом усього життєвого циклу системи.

1.3 Методології та техніки аналізу якості оптичних систем

Оцінка якості оптичних систем починається з аналізу оптичних і фізико-хімічних властивостей матеріалів. Основою є вимірювання показників поглинання, заломлення, розсіювання та інших характеристик взаємодії світла з речовиною. Методи на кшталт фотоколориметрії та спектрофотометрії дозволяють виявити домішки, що впливають на якість компонентів.

Техніки 3D-вимірювань використовуються для геометричного аналізу деталей. Застосовуються тіньовий метод, структуроване світло та тріангуляція. Проблемою тіньового методу є недійсність теорії Кірхгофа-Френеля при великих товщинах об'єктів, що знижує точність [19].

Модуляційна передавальна функція (MTF) оцінює здатність системи передавати контраст на різних просторових частотах. Це кількісний стандарт для об'єктивного порівняння оптики, дозволяє виявити аберації та відхилення від ідеальної дифракційної межі [20, 21].

Інтерферометрія заснована на аналізі інтерференційних картин. Вона дає нанометрову точність у вимірюваннях площинності, нерівностей та показника заломлення. Основні типи включають інтерферометри Майкельсона, Тваймана-Гріна, Фізо, Фабрі-Перо, PSI та CSI . Вона забезпечує точне визначення профілю поверхні та оптичної довжини шляху. Фазозсувна та когерентна скануюча інтерферометрія застосовуються для гладких і шорстких поверхонь відповідно, дозволяючи усунути неоднозначності фазових вимірювань.

Сенсори хвильового фронту, зокрема типу Шак-Гартмана, вимірюють аберації шляхом аналізу локальних відхилень хвильового фронту. Дані перетворюються на карту фазових похибок, дозволяючи оптимізувати систему під час збірки або експлуатації [19].

Перевага вимірювання хвильового фронту – можливість трасування джерела дефектів. На відміну від MTF, цей метод дозволяє виявити конкретний тип аберації та її локалізацію, що є ключовим для адаптивної оптики, мікроскопії, офтальмології та лазерних систем [22].

Методи аналізу розсіяного світла дозволяють виявити джерела внутрішніх паразитних відбиттів, які погіршують контраст та знижують точність вимірювань. Розсіяне світло виникає через мікродефекти, дифракцію та відбиття від другорядних поверхонь [23].

Комплексне оцінювання якості оптики передбачає поєднання кількох методів. MTF надає глобальну характеристику продуктивності, інтерферометрія мікропрофіль поверхонь, сенсори хвильового фронту – джерело аберацій, а аналіз розсіяного світла – зниження контрасту [20].

Якість оптичної системи визначається не лише макроскопічними параметрами. Для досягнення високої точності необхідно контролювати параметри на мікро- та нанорівні, що вимагає використання комплексного набору методів метрології [20-23].

Висновок до розділу 1

Якість оптичних систем визначається не лише технічними характеристиками окремих компонентів, а й комплексом факторів, що охоплюють проектування, виробництво, збірку та експлуатацію. Кожен етап створення системи вносить свій внесок у кінцеву оптичну ефективність, і навіть незначні відхилення можуть призвести до суттєвої втрати якості зображення.

У сучасних високотехнологічних застосуваннях, де оптична точність має критичне значення, особливу увагу слід приділяти як вибору матеріалів і технологічним процесам, так і впровадженню метрологічного контролю на всіх стадіях життєвого циклу. Водночас необхідно враховувати вплив зовнішніх факторів і людського чинника, які можуть суттєво змінювати характеристики системи в процесі експлуатації.

Таким чином, забезпечення високої якості оптичних систем вимагає міждисциплінарного підходу, який поєднує точне інженерне проектування, контроль за виробництвом, стабільність експлуатаційного середовища та кваліфіковане обслуговування.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНІ МЕТРИКИ ЯКОСТІ ТА МЕТОДОЛОГІЇ ЇХ ОЦІНКИ

2.1 Функція передачі модуляції (MTF)

Функція передачі модуляції (MTF) – це метод оцінки здатності об’єктива або оптичної системи передавати роздільну здатність і контраст. MTF визначає, наскільки добре система відображає дрібні деталі на зображенні, зберігаючи розподіл яскравості між світлими та темними ділянками [24, 25].

Показник MTF є стандартизованим параметром. Його використовують для порівняння оптичних систем у дослідженнях та промисловості. Він дозволяє вимірювати, як система передає просторові частоти, тобто скільки дрібних ліній на міліметр вона здатна розрізнити. Значення MTF коливається від 0 % (0) до 100 % (1), де 0 % означає повну втрату інформації, а 100 % – ідеальне передавання без втрат [26] – рисунок 2.1.

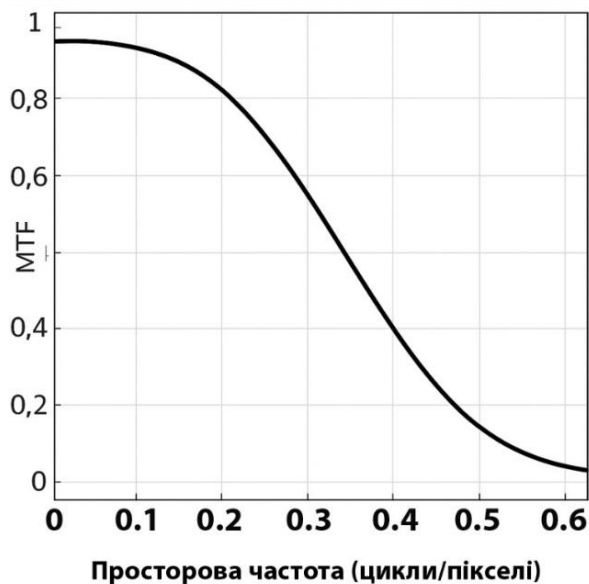


Рисунок 2.1 – Графік MTF [26]

На рисунку 2.2 зліва направо: збільшення щільності ліній призводить до зменшення контрасту, що відображає зниження значення MTF.

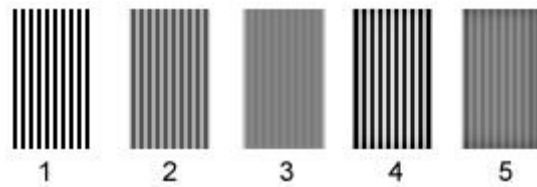


Рисунок 2.2 – Зміна чіткості зображення при зростанні просторової частоти [26]

Контраст у зображенні визначається за формулою $(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$, де I_{\max} – максимальна, а I_{\min} – мінімальна інтенсивність світла. Цей показник показує різницю між яскравими і темними зонами. MTF використовує це співвідношення, щоб оцінити, наскільки добре система розрізняє чорні та білі лінії. Якщо значення MTF дорівнює 1, то білі лінії виглядають чисто білими, а чорні – повністю чорними. Якщо значення нижче, наприклад 0,5, темні ділянки будуть у два рази темніші за світлі, але без повного контрасту [25].

Цикли/піксель (cycles/pixel) – це просторі частоти, які описують кількість пар «чорна-біла» ліній у межах одного пікселя.

Це не означає, що ці деталі містяться в одному пікселі. Це означає, скільки циклів (пар ліній) припадає на кількість пікселів.

0,1 циклів/піксель – одна пара ліній (чорно-біла) розтягнута на 10 пікселів.

0,5 циклів/піксель – одна пара ліній укладається в 2 пікселі (1 чорний + 1 білий).

1 цикл/піксель – фізично неможливий, бо для передачі пари потрібно принаймні два пікселі.

Тобто, просторова частота в циклах/піксель – це відношення просторової частоти до дискретизації зображення. Вона не говорить про те, що всередині одного пікселя, а як часто змінюється сигнал відносно кількості пікселів.

Стандартизація MTF дозволяє проводити точне порівняння між різними системами – об'єктивами, мікроскопами, камерами [25]. Зменшення контрасту знижує можливість побачити дрібні елементи на зображенні, що безпосередньо

впливає на сприйняття чіткості. Через це MTF має важливе значення в інженерії, виробництві та контролі якості. Він дозволяє встановлювати вимоги до продуктивності системи, перевіряти відповідність і забезпечувати стабільний розвиток у галузі обробки зображень.

Модуляційна функція передачі (MTF) – це математична величина, яка визначається як модуль оптичної функції передачі (OTF) [25].

У лінійних системах, що не змінюються при зсуві та працюють із розсіяним світлом, оптичну функцію передачі (OTF) отримують шляхом перетворення Фур'є функції розсіювання точки (PSF).

Функція розсіювання точки (PSF) показує, як система формує зображення точкового джерела світла. Для впорядкованого світла (узгоджених хвиль) PSF визначається через перетворення Фур'є амплітуди, а для розсіяного – через перетворення Фур'є інтенсивності. У випадку розсіяного світла PSF дорівнює квадрату модуля PSF для впорядкованого світла. OTF для розсіяного світла також можна подати через самозв'язок хвильового фронту.

Зазвичай функцію передачі нормалізують: її значення при нульовій просторовій частоті приймають за одиницю. OTF є комплексною функцією і може набувати від'ємних значень, що вказує на фазове обертання. Це обертання може змінювати контраст смугових зображень: світлі елементи стають темними, а темні – світлими.

Виведення MTF з OTF та PSF демонструє, що фур'є-оптика надає фундаментальну математичну основу для аналізу й оцінки того, як оптичні системи впливають на якість зображення при різних просторових частотах. Зокрема, значення MTF використовують в оптичному проектуванні для аналізу, оптимізації та встановлення допусків оптичних систем.

2.1.1 Використання тестових мішеней для побудови MTF

Тестові мішені є ключовим інструментом для оцінки просторової роздільної здатності оптичних систем через вимірювання функції передачі

модуляції (MTF). Вони дозволяють кількісно оцінити, наскільки якісно система відтворює деталі зображення на різних просторових частотах.

Смугові діаграми складаються з чорних і білих паралельних смуг, які мають різну ширину, вимірювану у лінійних парах на міліметр (рис. 2.3).

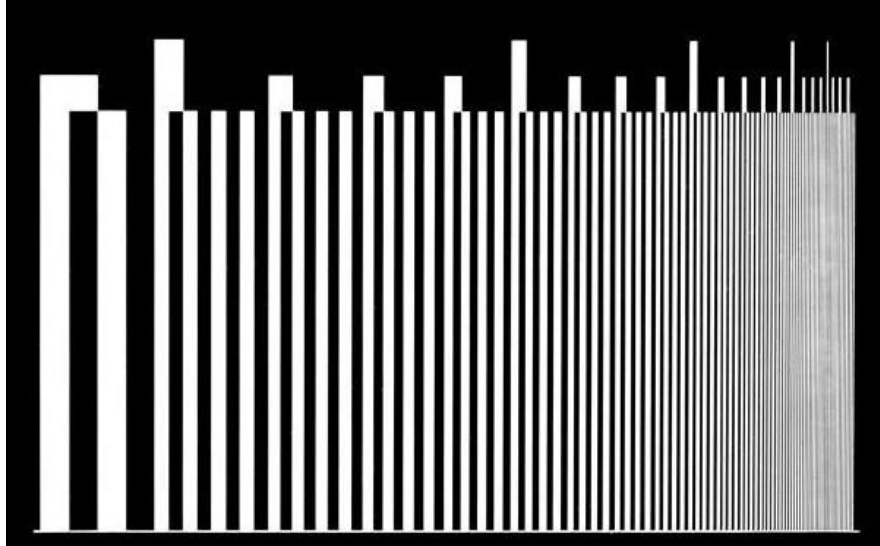


Рисунок 2.3 – Смугова діаграма [25]

Ці діаграми застосовуються для візуального аналізу якості зображення. Під час проходження через оптичну систему чіткість смуг змінюється: з підвищенням розмиття вони починають зливатися, а контраст між світлими і темними зонами зменшується. Це призводить до зниження амплітуди світлових коливань, які на графіку перетворюються на синусоїдальні хвилі з меншою яскравістю [24]. Такий метод надає загальне уявлення про деградацію зображення, але не забезпечує точних числових значень MTF.

Синусоїдальні шаблони мають вигляд смуг із плавним коливанням яскравості за синусоїдальним законом (рис. 2.4).

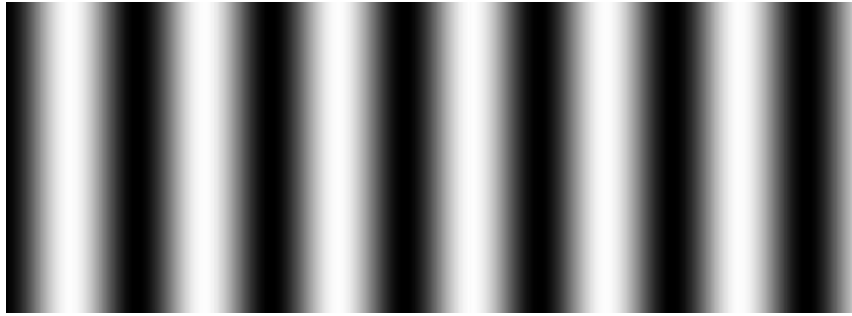


Рисунок 2.4 – Синусоїдальний шаблон [25]

Вони дозволяють безпосередньо вимірювати передачу контрасту на визначених просторових частотах. Цей підхід більш точний у порівнянні зі смуговими діаграмами, оскільки амплітуда синусоїди безпосередньо пов'язана з модуляцією світла, що проходить через систему. Однак для коректного вимірювання потрібне спеціалізоване обладнання або програмне забезпечення, яке здатне аналізувати результати на рівні окремих частот [25].

Мішені з похилими краями широко застосовуються для точного розрахунку MTF і є стандартом у багатьох галузях, зокрема відповідно до ISO 12233 (рис. 2.5).

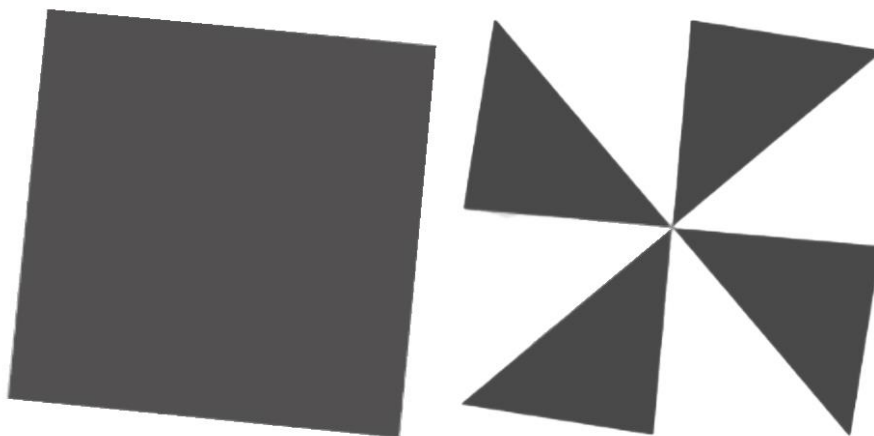


Рисунок 2.5 – Мішені з похилими краями:

а) ISO 12233:2017 похилий квадрат, б) ISO 12233:2023 похила зірка [25]

Ці мішені мають контрастний край, нахилений під кутом приблизно 5-7 градусів відносно піксельної сітки. Нахил забезпечує більш точний збір даних

про розподіл яскравості на межі, що дозволяє побудувати функцію переходу краю (Edge Spread Function). Аналіз цієї функції дає змогу отримати функцію розподілу лінійної відповіді (Line Spread Function) і за допомогою перетворення Фур'є – MTF. Цей метод є найбільш поширеним у цифровій обробці зображень, бо дозволяє отримувати повну характеристику передачі просторових частот у широкому діапазоні [25].

Використання різних типів мішеней має важливе значення для комплексного тестування оптичних систем. Смугові діаграми дають швидку та просту оцінку, синусоїдальні шаблони – точні виміри на окремих частотах, а мішені з похилими краями – детальну та стандартизовану характеристику MTF. Вибір методу залежить від конкретних цілей дослідження та вимог до точності оцінки [24-27].

2.1.2 Ключові зведені метрики MTF

MTF50 (або MTF₅₀). Це просторова частота, при якій функція передачі модуляції падає до 50 % (або $n\%$) від її низької (0) частоти MTF. MTF50 широко використовується, оскільки вона добре корелює з сприйнятою різкістю і є аналогічною до пропускної здатності в електротехніці [28].

MTF50P (або MTF_{50P}). Ця метрика представляє просторову частоту, при якій MTF становить 50 % (або $n\%$) від пікового значення MTF. Вона ідентична MTF50 для низького та помірного програмного підвищення різкості, але дає нижчі значення, ніж MTF50, коли значне програмне підвищення різкості призводить до того, що максимальне значення MTF перевищує 1 (тобто, пік підвищення різкості). MTF50P вважається кращою метрикою, оскільки вона значно менш чутлива до програмного підвищення різкості [28].

MTF Area Normalized. Ця метрика обчислює площу під кривою MTF (зазвичай нижче частоти Найквіста), нормалізовану до її пікового значення (яке дорівнює 1 при $f = 0$ з невеликим або відсутнім підвищенням різкості, але може бути > 1 при сильному підвищенні різкості). Це особливо цікава нова метрика, оскільки вона тісно відстежує MTF50 при мінімальному підвищенні різкості, але

не збільшується при сильному надмірному підвищенні різкості, таким чином не винагороджуючи надмірне підвищення різкості. Вона все ще відносно незнайома в галузі [28].

MTF10, MTF10P, MTF20, MTF20P. Це просторові частоти, при яких MTF становить 10 % або 20 % від нульової частоти або пікового значення MTF. Ці значення цікаві, оскільки вони порівнянні з «зникаючою роздільною здатністю» (межею Релея) – рисунок 2.6. Однак шум може сильно впливати на результати на цих нижчих рівнях MTF [28].

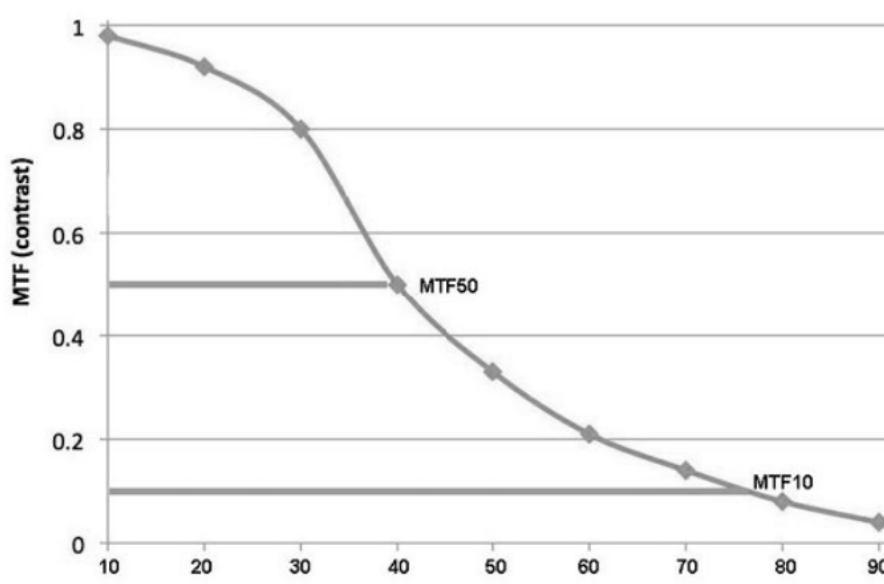


Рисунок 2.6 – Функція передачі модуляції (MTF) [28]

Загалом, вищі та більш плоскі лінії MTF (ближче до 1,0) на діаграмі вказують на кращу продуктивність об'єктива щодо роздільної здатності та контрасту, що свідчить про об'єktiv, близький до ідеального [29]. Більшість об'єктивів демонструють оптимальну продуктивність у центрі зображення, що призводить до того, що результати MTF зазвичай вигинаються вниз до периферії через властиві оптичні аберації [29].

Поява та зростаюче впровадження метрик MTF, таких як MTF50P та MTF Area Normalized, відображає еволюцію в оцінці якості зображень. Ці нові

метрики мають на меті забезпечити більш точне представлення оптичної здатності системи

2.1.3 Фактори, що впливають на продуктивність MTF

Чіткість системи, яка вимірюється як SFR/MTF , значно залежить від зовнішніх факторів, таких як тремтіння камери (яке можна зменшити за допомогою хорошого штатива), точність фокусування та атмосферні збурення (наприклад, теплові ефекти та аерозолі) [28]. Хоча деяку втрачену різкість можна частково відновити за допомогою цифрового підвищення різкості, цей процес має свої обмеження. Він не може відновити деталі там, де MTF дуже низька (менше приблизно 10 %) [28]. Надмірне підвищення різкості може призвести до появи видимих «ореолів» на краях. Лінзові аберації, такі як хроматична аберация, є однією з поширених причин нижчих показників MTF, особливо на периферії зображення [29].

Продуктивність MTF є складною взаємодією якості оптичного обладнання, умов навколишнього середовища та цифрової обробки зображень. Оптимізація одного аспекту без врахування інших може призвести до оманливих результатів. Наприклад, ідеальний об'єктив може давати низькі показники MTF, якщо камера тремтить або фокус неточний [28]. Крім того, цифрова обробка, така як підвищення різкості, може штучно покращити сприйняту різкість, але не може відновити справжню втрачену оптичну деталізацію, особливо там, де MTF вже дуже низька. Надмірне підвищення різкості, хоча й може зробити зображення «гострішим», призводить до появи артефактів, таких як «ореоли» [28, 30] Це підкреслює принципову відмінність між справжньою роздільною здатністю, яка є функцією оптичної системи, та штучним покращенням, що досягається програмним забезпеченням. Це означає, що для досягнення оптимальної якості зображення необхідно враховувати всі ці взаємодіючі фактори.

2.2 Роздільна здатність

Роздільна здатність відноситься до здатності оптичної системи розрізняти дрібні деталі об'єкта [31]. У контексті зображень «вища роздільна здатність» означає більшу деталізацію зображення. Важливо розрізняти роздільну здатність від кількості пікселів. Хоча термін «роздільна здатність» часто помилково використовується як синонім кількості пікселів у цифровій візуалізації, міжнародні стандарти в галузі цифрових камер визначають її як «загальну кількість пікселів» для сенсорів та «кількість записаних пікселів» для фактично захоплених зображень [26, 32]. Кількість пікселів (наприклад, 7680×6876 або мегапікселі) служить лише верхньою межею роздільної здатності зображення, тоді як справжня просторова роздільна здатність (кількість незалежних значень пікселів на одиницю довжини) визначає чіткість зображення.

Одиниці роздільної здатності можуть бути пов'язані з фізичними розмірами (наприклад, лінії на мм, лінії на дюйм), загальним розміром зображення (лінії на висоту зображення, також відомі як ТВ-лінії або TVL). Замість окремих ліній часто використовуються лінійні пари, що складаються з темної та сусідньої світлої лінії; наприклад, роздільна здатність 10 ліній на міліметр означає 5 темних ліній, що чергуються з 5 світлими лініями, або 5 лінійних пар на міліметр (5 лп/мм). Об'єктиви для фотографії найчастіше вказуються в лінійних парах на міліметр.

Роздільна здатність є мірою розрізняваної деталізації, а не просто кількістю пікселів. Хоча кількість пікселів забезпечує верхню межу, справжня просторова роздільна здатність обмежена всією системою (об'єктивом, сенсором, обробкою) і саме вона визначає сприйняту чіткість. Незважаючи на те, що користувачі часто асоціюють «високу роздільну здатність» з великою кількістю мегапікселів, це є спрощеним уявленням. Насправді, здатність камери розрізняти дрібні деталі є функцією її оптичної системи, сенсора та внутрішньої обробки зображення. Таким чином, справжня роздільна здатність є складним

показником, що відображає продуктивність усієї системи формування зображення [26, 32].

2.2.1 Методи вимірювання

USAF 1951 є класичною оптичною тестовою таблицею, створеною для ВПС США з метою визначення роздільної здатності різних типів об'єктивів і систем візуалізації [33]. Її структура базується на групах і елементах, які містять тріади ліній, що поступово зменшуються (рис. 2.7). Візуальна здатність спостерігача розрізнити лінії визначає межу просторової роздільності. Метод застосовується у вигляді друкованих таблиць або скляних пластин, що дозволяє проводити оцінювання без складного обладнання.

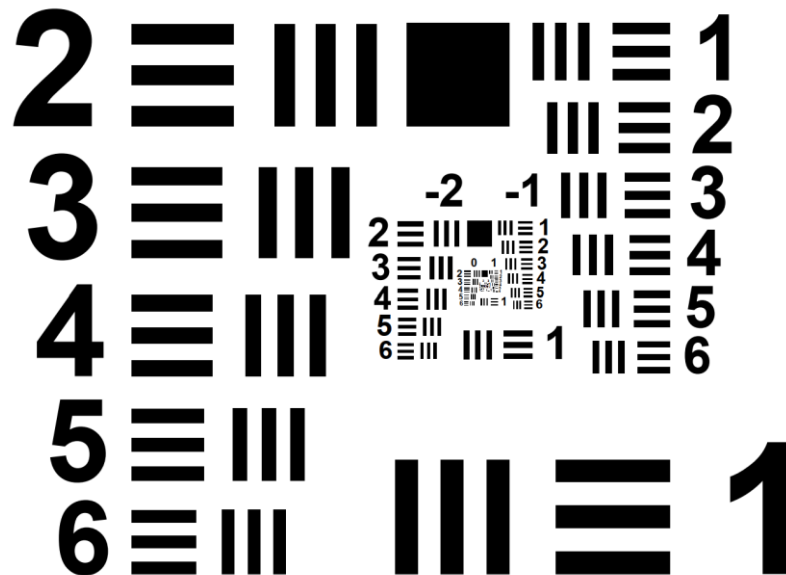


Рисунок 2.7 – Тестова таблиця USAF 1951 [33]

Результат залежить від суб'єктивного сприйняття, а формула розрахунку роздільної здатності є стандартизованою:

$$P_3 \text{ (ліній/мм)} = 2^{\text{Group} + (\text{Element}-1)/6} \text{ [33].}$$

ISO 12233 є актуальним міжнародним стандартом для тестування цифрових камер [34]. Він базується на автоматизованому аналізі, який охоплює широкий спектр характеристик зображення, зокрема роздільну здатність,

просторову частотну характеристику (SFR), шум, артефакти, точність кольору та геометричні викривлення (рис. 2.8).

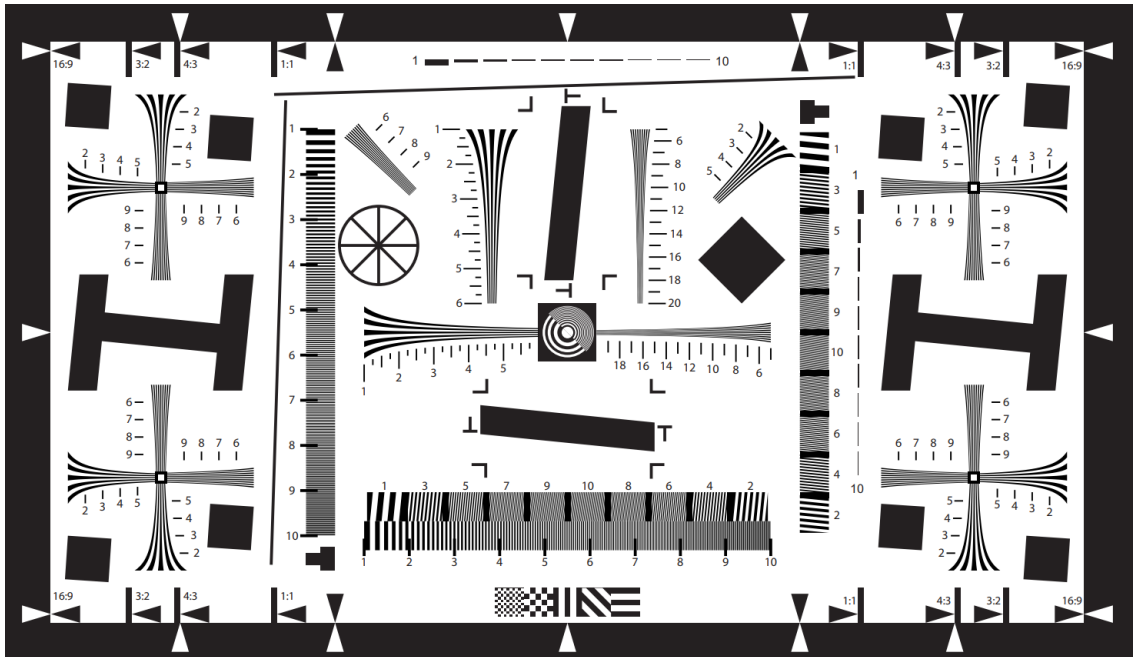


Рисунок 2.8 – Тестова таблиця ISO 12233 [34]

Стандарт потребує спеціалізованого програмного забезпечення. Вимірювання проводяться в контрольованих умовах з точним врахуванням світла, об'єктивів і матриць камер. Метод забезпечує об'єктивні числові результати, що мають високу відтворюваність і точність [33, 34].

2.2.2 Фактори, які впливають на роздільну здатність

2.2.2.1 Якість об'єктива

Якість об'єктива є першочерговою для різкості та роздільної здатності зображення. Високоякісні об'єктиви використовують краще скло, покриття та більшу кількість оптичних елементів (наприклад, асферичні елементи) [30]. Об'єктиви з фіксованою фокусною відстанню часто є гострішими, оскільки вони містять менше оптичних елементів, що зменшує розсіювання світла та покращує контраст. Оптичні аберації, такі як сферична аберация, хроматична аберация, кома, астигматизм, дисторсія та кривизна поля, погіршують якість зображення та знижують роздільну здатність [12, 35].

Хоча сенсор забезпечує піксельну сітку, об'єктив принципово визначає оптичну роздільну здатність завдяки своїй здатності фокусувати світло без надмірних аберацій. Сенсор з великою кількістю мегапікселів, але з поганим об'єктивом, не зможе реалізувати свій потенціал роздільної здатності. Це підкреслює, що оптична якість є обмежуючим фактором для загальної роздільної здатності системи [12, 30].

2.2.2.2 Характеристики сенсора

Розмір пікселя є важливим фактором: більші пікселі, як правило, збирають більше фотонів, що призводить до кращого співвідношення сигнал/шум (SNR) та потенційно кращого відтворення деталей, особливо в умовах низької освітленості [36, 37]. Фільтр згладжування (анти-аліасинг) призначений для запобігання муаровим візерункам, але може дещо зменшити різкість.

Роздільна здатність є синергетичним результатом взаємодії об'єктива та сенсора. Крок пікселів сенсора встановлює межу Найквіста (максимальна частота (кількість ліній), яку може точно зафіксувати цифровий сенсор без спотворень), але об'єктив повинен бути здатним розрізняти деталі до цієї межі. Більші пікселі покращують SNR, що опосередковано сприяє сприйнятій деталізації за рахунок зменшення шуму. Це означає, що для досягнення оптимальної роздільної здатності системи необхідно ретельно збалансувати характеристики об'єктива та сенсора [25, 36, 37].

2.2.2.3 Цифрова обробка зображень

Цифрова обробка зображень відіграє значну роль у сприйнятій роздільній здатності, але має свої компроміси. Підвищення різкості може покращити сприйняту різкість, але воно не може відновити втрачені деталі та може призвести до артефактів («ореолів»), якщо його застосувати надмірно [28, 30]. Зменшення шуму згладжує зображення для зменшення шуму, але може приховувати дрібні, низькоконтрастні деталі.

Цифрова обробка включає компроміси. Підвищення різкості може покращити видиму деталізацію, але ризикує створити артефакти. Зменшення

шуму покращує чистоту зображення, але може пожертвувати дрібними деталями. Ці процеси маніпулюють сприйнятою роздільною здатністю, а не обов'язково справжньою оптичною роздільною здатністю. Це означає, що зображення може виглядати різким завдяки програмній обробці, але не мати справжньої оптичної деталізації, що важливо для точних застосувань [28, 30].

2.2.2.4 Умови зйомки

Навіть з ідеальним апаратним забезпеченням, умови зйомки та техніка користувача значно впливають на кінцеву роздільну здатність зображення. Тремтіння камери зменшує різкість. Точність фокусування має вирішальне значення для різкості. Атмосферні збурення, такі як теплові ефекти та аерозолі, можуть погіршити різкість. Налаштування ISO також впливає на якість: високе ISO збільшує шум, що може зробити зображення зернистими та менш різкими. Низьке ISO (базове ISO) забезпечує кращу якість, ширший динамічний діапазон та нижчий рівень шуму.

Це підкреслює важливість контрольованих умов тестування та правильної фотографічної практики. Навіть найдосконаліша камера не зможе досягти своєї максимальної роздільної здатності, якщо її використовувати в несприятливих умовах або з неправильною технікою. Це означає, що оцінка якості зображення повинна враховувати не лише апаратне забезпечення, але й умови його експлуатації.

2.3 Карти різкості

Різкість визначає кількість деталей, які може відтворити система формування зображення, і визначається межами між зонами різних тонів або кольорів [28, 30]. Вона є комбінацією роздільної здатності та контрасту країв. Важливо розрізняти технічну різкість, яка вимірює, наскільки дрібні лінії можуть бути розрізнені системою, та сприйняту різкість, яка є тим, що людський мозок визначає як різке. Сприйнята різкість залежить не тільки від технічної різкості,

але й від мікροконтрасту (чи тонка лінія чи товста), глобального контрасту (біла куля на чорному фоні) та чистоти кольорів [30].

Різкість має як вимірюваний технічний аспект (SFR/MTF), так і суб'єктивний аспект. Хоча технічні метрики є вирішальними для інженерії та об'єктивного порівняння систем, сприйнята різкість, яка формується мікροконтрастом, загальним контрастом та загальним «тривимірним виглядом» зображення, є тим, що врешті-решт має значення для людського глядача. Це означає, що зображення може мати високі технічні показники різкості, але не виглядати «різким» для людини, якщо інші фактори, що впливають на сприйняття, не оптимізовані [28, 30].

2.3.1 Карти різкості та їх інтерпретація

2.3.1.1 Карта різкості на основі оператора Собеля та дисперсії

Для оцінки локальної різкості використовується градієнтний підхід із фільтрацією за допомогою оператора Sobel. Зображення перетворюється у відтінки сірого. Потім обчислюються градієнти по горизонталі та вертикалі. Об'єднання цих компонентів у модуль градієнта дозволяє отримати карту локальних змін яскравості. Далі в межах кожного пікселя розглядається локальне вікно, в якому обчислюється дисперсія значень модуля градієнта. Це значення відображає ступінь варіацій в межах локальної області. Чим вища дисперсія, тим більше деталей або контурів у цій області. Побудована карта показує, де на зображенні присутні чіткі структури або текстури.

2.3.1.2 Карта різкості на основі оператора Лапласа та дисперсії

Цей метод заснований на використанні оператора Laplacian, який виявляє області зі швидкою зміною яскравості, тобто локальні максимуми або мінімуми. Після переведення зображення в градації сірого застосовується фільтр Laplacian, який виділяє контрастні області з високою другою похідною. Для кожного пікселя обчислюється дисперсія значень у фіксованому вікні. Це дозволяє врахувати локальну неоднорідність, яка є ознакою дрібних деталей. Метод менш чутливий до напрямку змін, ніж Sobel, і краще фіксує симетричні або складні

контури. Отримана карта показує розподіл різкості по зображенню з урахуванням його структурної складності.

2.3.1.3 Гістограма градієнтів для глобальної оцінки різкості

Для побудови інтегральної характеристики зображення використовується гістограма модуля градієнтів. Після перетворення в сірий формат зображення обробляється градієнтним фільтром, наприклад Sobel. Для кожного пікселя обчислюється модуль градієнта, що відображає силу локального переходу. З отриманих значень формується гістограма, де по осі X відкладаються величини градієнтів, а по осі Y – кількість пікселів із відповідною величиною. Розподіл градієнтів дозволяє оцінити загальний рівень різкості: зсув у бік більших значень свідчить про переважання різких контурів, тоді як низькі значення вказують на однорідні або розмиті ділянки. Такий підхід дозволяє охарактеризувати зображення на рівні всього кадру, не вдаючись до локального аналізу.

2.4 Оптичні аберації

Оптичні аберації – це спотворення зображення, яке утворюється внаслідок відхилень у поведінці світлових променів у реальних оптичних системах [12]. Унаслідок цих відхилень зображення не збігається з ідеальним, втрачається різкість або з'являється хибне забарвлення.

У теоретично ідеальній системі промені з однієї точки об'єкта збираються в одній точці площини зображення. У реальних умовах світлові пучки мають ширину, а об'єкти розміщені на скінченній відстані від оптичної осі. Через це промені не перетинаються в одній точці, що спричиняє розмиття.

Аберації поділяються на два основні типи. Монохроматична аберация виникає при проходженні світла однієї довжини хвилі. Вона спричинена геометричними відхиленнями у фокусуванні і не залежить від спектрального складу світла. Хроматична аберация пов'язана з дисперсією – залежністю показника заломлення від довжини хвилі. Через це світло різного кольору

фокусується в різних точках. Унаслідок цього зображення набуває кольорових контурів або змазаності.

2.4.1 Дисторсія

Дисторсія є монохроматичною оптичною аберацією, яка описує, як збільшення зображення змінюється по всьому полю зору (FOV) при фіксованій робочій відстані (WD) [35] Важливо зазначити, що дисторсія геометрично зміщує інформацію, а не розмиває її, на відміну від інших абераций, які змішують інформацію, створюючи розмиття зображення.

Існують два основні типи дисторсії: негативна (бочкоподібна), позитивна (подушкоподібна) [12] (рис.2.9).

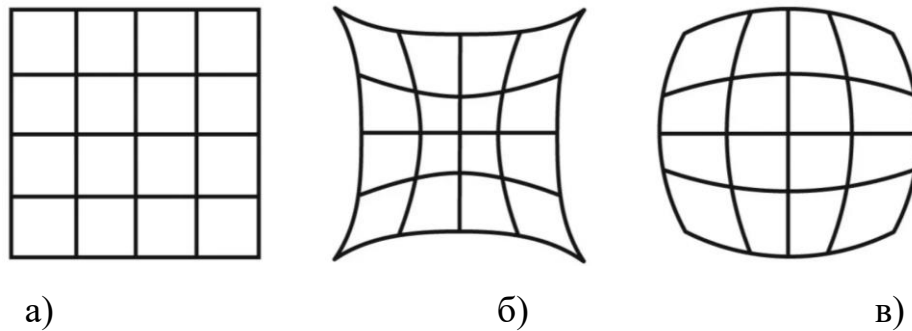


Рисунок 2.9 – Види дисторсії:

а) вихідний об'єкт, б) позитивна дисторсія, в) негативна дисторсія [12]

Бочкоподібна дисторсія часто є результатом використання ширококутних об'єктивів або повного зуму, тоді як подушкоподібна дисторсія найчастіше виникає при використанні телеоб'єктивів.

Дисторсія – це геометрична аберация, яка зміщує інформацію зображення, але не зменшує її, на відміну від інших абераций, які викликають розмиття. Дисторсію можна виправити програмно, перемістивши пікселі, тоді як розмиття, спричинене іншими аберациями, не може бути повністю відновлено, оскільки інформація вже втрачена або змішана. Це означає, що, хоча дисторсія може бути візуально неприємною, вона не є втратою інформації в тому ж сенсі, як розмиття.

2.4.2 Методи вимірювання дисторсії

2.4.2.1 Відсоток висоти поля

Дисторсія зазвичай вказується у відсотках від висоти поля. Вона обчислюється за формулою: $D(\%) = (\text{Фактична Відстань} - \text{Прогнозована Відстань}) / \text{Прогнозована Відстань} \times 100 \%$. Для вимірювання використовують шаблони з регулярною структурою, наприклад, точкову мішень.

Якщо значення дисторсії не перевищує $\pm 2-3 \%$, спотворення зазвичай залишаються непомітними для ока, якщо не застосовуються спеціальні алгоритми.

Кількісне визначення дисторсії дозволяє об'єктивно оцінити якість оптичної системи. Це важливо для встановлення допустимих меж спотворення залежно від задачі. У точних системах, як-от машинний зір, навіть малі відхилення можуть бути критичними. У споживчій фотографії така точність зазвичай не є необхідною [35].

2.4.2.2 Радіальна/геометрична дисторсія

Радіальна дисторсія вимірює відстань між тим, де точки з'являються на спотвореному зображенні, і тим, де вони повинні були б бути в ідеальній системі [35]. Вона вимірюється за допомогою мішені з точками дисторсії (наприклад, шахова дошка). Різниця між відстанню від центру мішені до будь-якої точки в полі зору та відстанню від центру зображення до тієї ж, тепер зміщеної точки, дає відсоток радіальної дисторсії, розрахований за згаданою вище формулою (рис. 2.10).

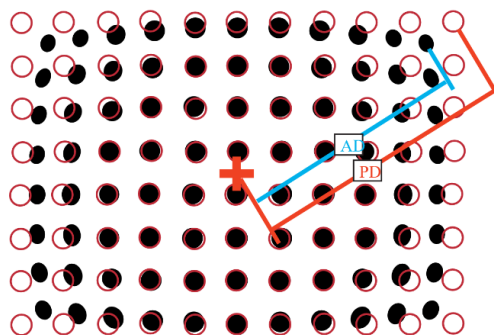


Рисунок 2.10 – Мішень з точками дисторсії [35]

Вимірювання радіальної/геометричної дисторсії забезпечує повну просторову карту геометричних неточностей по всьому полю зображення, що має вирішальне значення для точних застосувань, таких як машинний зір та вимірювальні системи. Це дозволяє не тільки кількісно оцінити дисторсію, але й візуалізувати її розподіл, що є важливим для корекції та оптимізації об'єктива.

2.4.3 Фактори, що впливають на дисторсію

Дисторсія формується під впливом кількох параметрів, що пов'язані з конструкцією об'єктива. Основними є фокусна відстань і поле зору: коротші фокусні відстані та ширші кути огляду зазвичай призводять до сильніших спотворень [35].

Додатково на дисторсію впливає довжина хвилі світла, оскільки заломлення в матеріалах об'єктива змінюється для різних спектральних компонентів. Робоча відстань також змінює геометричні співвідношення між об'єктом і сенсором, що може впливати на ступінь дисторсії.

Хоча цифрова корекція дає змогу зменшити видимість спотворень, вона не замінює точного оптичного контролю. Вимірювання дисторсії до застосування програмних методів дає реальну оцінку характеристик об'єктива [38].

Розуміння необробленої дисторсії є ключовим для аналізу, оскільки дозволяє визначити межі, в яких оптична система може працювати без критичної залежності від цифрової компенсації. Це особливо важливо в умовах, де автоматична обробка може приховати спотворення від користувача, але не від вимог до точності системи [35, 38].

2.5 Виклики та перспективи у тестуванні оптичних систем

Попри технологічний прогрес, тестування оптичних систем залишається складним завданням через вимоги до високої точності [39]. Такі системи потребують обладнання з високою роздільною здатністю і мінімальними похибками.

На точність вимірювань впливають умови довкілля. Температура, вологість і вібрації змінюють показники заломлення матеріалів і оптичні траєкторії [10, 39]. Це може призвести до похибок, які важко виявити без спеціальних засобів компенсації.

Інтеграція оптичних компонентів вимагає точного контролю відстаней, центрування та кутів нахилу. Навіть незначні відхилення можуть спричинити помітні спотворення. Термічне розширення матеріалів додає ризик зміщення або пошкодження, особливо при раптових змінах температури [10].

На відміну від механічних систем, в оптиці погіршення якості відбувається поступово. Це ускладнює ідентифікацію моменту відмови.

Лабораторне тестування вимагає ретельного контролю всіх умов. Показники заломлення змінюються зі зміною температури і вологості, створюючи спотворення, які можна помилково прийняти за аберації об'єктива. Щоб уникнути таких помилок, необхідно строго калібрувати тестове середовище та використовувати високоточні вимірювальні інструменти [10, 39].

Майбутнє оцінки якості зображень активно змінюється під впливом штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання. Ці технології істотно підвищують швидкість, точність і рівень автоматизації у тестуванні, що особливо важливо в умовах зростання складності оптичних систем.

Штучний інтелект та машинне навчання вже успішно використовуються в реконструкції зображень, придушенні шуму та автоматичному аналізі якості [40]. Моделі глибокого навчання, такі як CNN, GAN і трансформери, дають змогу виявляти характеристики зображень і оцінювати їхню якість навіть без доступу до еталонних зображень (No-Reference IQA) [41, 42]. Це відкриває нові можливості в сферах, де еталон неможливо отримати, наприклад, у реальному часі чи в медичній візуалізації.

Використання ШІ змінює сам підхід до оцінки якості, переходячи від формальних, детермінованих методів до моделей, що враховують людське сприйняття. Це дає змогу краще обробляти складні, нелінійні артефакти, які не

охоплюються класичними метриками. Моделі, навчені на великих обсягах даних з людськими оцінками, можуть вловлювати тонкі аспекти візуального сприйняття та забезпечувати результати, ближчі до реального досвіду споживача [35, 39, 41, 42].

У випадках, коли ручна оцінка неможлива або непридатна, автоматизовані підходи, засновані на ШІ, дозволяють підтримувати суб'єктивну точність без втрати ефективності. Це критично важливо для практичних застосувань, де якість сприймається людиною, але контроль має здійснюватися без її участі.

Висновок до розділу 2

Досліджено ключові метрики якості зображення, включаючи функцію передачі модуляції (MTF), роздільну здатність, карти різкості та оптичні аберації. Розглянуто методи оцінки цих характеристик у контексті сучасних вимог до оптичних систем.

Функція MTF є базовим інструментом для аналізу якості зображення, оскільки вона кількісно описує, наскільки ефективно система передає контраст на різних просторових частотах. Для практичного вимірювання використовуються тестові мішені, такі як смугові діаграми, шаблони з синусоїдальним профілем та мішені з похилими краями. Метрики нового покоління, зокрема MTF50P та MTF Area Normalized, дозволяють зменшити вплив цифрового підвищення різкості та надати більш точну оцінку оптичної якості.

Роздільна здатність пов'язана з функцією MTF, але відображає здатність системи до розрізнення деталей, а не лише передачі контрасту. Вона визначається за допомогою стандартизованих процедур, таких як USAF 1951 та ISO 12233, які враховують комплексний вплив об'єктива, сенсора та програмної обробки.

Оптичні аберації, включаючи дисторсію, мають суттєвий вплив на точність та якість візуального відтворення. Вони можуть бути виміряні за допомогою спеціальних мішеней та оброблені за допомогою алгоритмів, які дозволяють побудувати просторову карту спотворень і врахувати їх у загальній оцінці системи.

Актуальні напрями розвитку тестування пов'язані з впровадженням штучного інтелекту та алгоритмів навчання на даних. Це дозволяє автоматизувати оцінку та враховувати аспекти, пов'язані з людським сприйняттям якості зображення, що особливо важливо у випадках відсутності еталонів.

РОЗДІЛ 3

ТИПИ ТЕСТ-МІШЕНЕЙ ТА МЕТОДОЛОГІЇ ВИМІРЮВАНЬ

Оптичні тест-мішені слугують незамінними інструментами протягом усього життєвого циклу систем формування зображень. Вони є важливими для початкового усунення несправностей, встановлення еталонів продуктивності, сертифікації можливостей системи, оцінки поточних вимірювань та забезпечення послідовних операційних стандартів для кількох розгорнутих систем [43]. Ці мішені є спеціально розробленими прецизійними інструментами, призначеними для сприяння об'єктивній оцінці різноманітних параметрів пристроїв формування зображень, від фундаментальних можливостей роздільної здатності до складної точності передачі кольору.

Оптичні тест-мішені, калібрувальні мішені та сітки доступні в різноманітних конфігураціях, включаючи спеціалізовані мішені для тестування роздільної здатності, загальні калібрувальні мішені, мішені для тестування спотворень та мішені MTF зі скошеним краєм [44]. Ці прецизійні інструменти зазвичай виготовляються зі складними металевими візерунками, нанесеними на прозорі скляні підкладки. Процес виготовлення, часто фотолітографія, дозволяє створювати надзвичайно тонкі елементи, іноді розміром приблизно 1 мкм, що дозволяє характеризувати високопродуктивні оптичні системи.

3.1 Мішені USAF 1951. Розрахунок роздільної здатності

Мішень USAF 1951 є однією з найпоширеніших і широко використовуваних мішеней для тестування роздільної здатності [43].

Вона характеризується структурованим розташуванням наборів горизонтальних і вертикальних лінійних візерунків, відомих як елементи, які поступово змінюються в розмірі. Ці елементи організовані в пронумеровані групи (рис. 3.1).

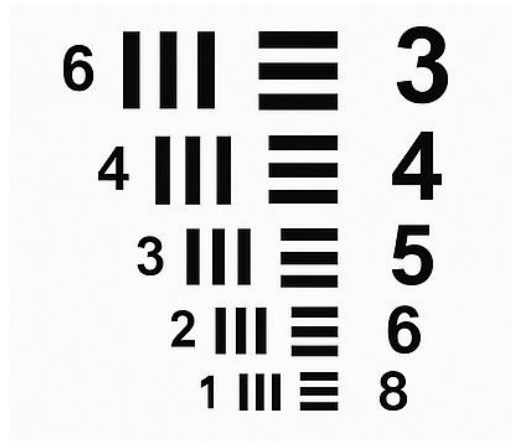


Рисунок 3.1 – Мішень USAF 1951 [43]

Корисним аспектом дизайну є те, що елементи з вищою роздільною здатністю стратегічно розташовані ближче до центру мішені, що є перевагою для тестування зум-об'єктивів. Мішень USAF 1951 в основному використовується для оцінки роздільної здатності в широкому спектрі оптичних систем, включаючи системи зору, загальне оптичне випробувальне обладнання, мікроскопи, об'єктиви для відео з високим збільшенням, флуоресцентну та конфокальну мікроскопію, фотолітографію та нанотехнологічні застосування. Ключовою перевагою є її здатність одночасно оцінювати як вертикальну, так і горизонтальну роздільну здатність на дискретних, заздалегідь визначених просторових частотах.

Для визначення горизонтальної роздільної здатності оцінюється здатність системи розрізнити візерунки вертикальних смуг. І навпаки, візерунки горизонтальних смуг використовуються для розрахунку вертикальної роздільної здатності. Якісна роздільна здатність зазвичай визначається візуальним виявленням конкретної комбінації групи та елемента, де чіткі чорно-білі смуги знаходяться на межі розмиття. Для кількісного вимірювання роздільної здатності (вираженої в лінійних парах на міліметр, лп/мм) застосовується формула 3.1 [43]:

$$\xi \left[\frac{\text{лп}}{\text{мм}} \right] = 2^{\left[G + \left(E - \frac{1}{6} \right) \right]}, \quad (3.1)$$

де ξ – роздільна здатність в лп/мм,

G – ідентифікований номер групи,

E – номер елемента в цій групі.

3.2 Мішень Рончі. Вимірювання роздільної здатності та контрасту

Мішень Рончі характеризується повторюваним візерунком паралельних ліній на одній фіксованій просторовій частоті, що рівномірно поширюється по всій поверхні мішені в одній орієнтації [43] (рис. 3.2).

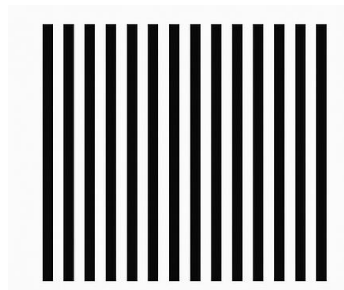


Рисунок 3.2 – Лінійка Рончі [43]

Вона в основному використовується для тестування роздільної здатності та контрасту. Її деталізація по всій поверхні дозволяє одночасно визначати найкраще фокусування системи по всьому полю зору. Вона також застосовна для тестування дифракції. Її простий дизайн робить її легкою у використанні, особливо для застосувань, які вимагають аналізу лише на одній просторовій частоті. Безперервна деталізація по всій мішені спрощує оцінку оптимального фокусування системи по всьому полю.

Суттєвим обмеженням є те, що для кожної окремої просторової частоти, яку потрібно проаналізувати, потрібна окрема мішень. Крім того, через те, що лінії поширюються лише в одному напрямку, лінійки Рончі не можуть за своєю суттю аналізувати несиметричні зменшення роздільної здатності, такі як ті, що викликані астигматизмом, якщо мішень не повертається на 90° і не робиться

друге зображення для аналізу. Це обертання та повторне зображення можуть ускладнити пошук збалансованого фокусу.

3.3 Зірчасті мішені. Комплексна оцінка

Кожен елемент зірчастої мішені складається з кругового візерунка, утвореного чергуванням позитивних і негативних клиноподібних сегментів, які безперервно звужуються до центру під точно відомим кутом [43] (рис. 3.3).

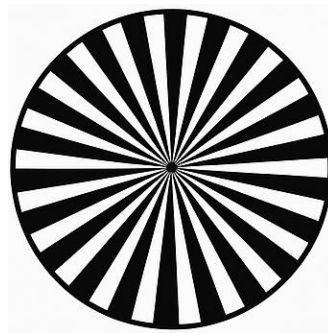


Рисунок 3.3 – Зірчаста мішень [43]

Цей тип мішені є інструментом для всебічного тестування роздільної здатності та контрасту оптичної системи. Вони також дуже ефективні для юстирування системи та надають допомогу під час процесів збирання. Їхня конструкція сприяє порівнянню продуктивності різних систем формування зображень. Унікальна конструкція клиноподібних сегментів забезпечує безперервну зміну роздільної здатності, дозволяючи оцінювати її у вертикальній, горизонтальній та різних інших орієнтаціях без необхідності переміщення мішені. Наявність кількох зірчастих візерунків, розподілених по полю зору, спрощує порівняння різних рішень для формування зображень, дозволяючи визначати оптимальне фокусування по всьому полю зору, одночасно аналізуючи горизонтальну та вертикальну інформацію в широкому діапазоні роздільних здатностей.

Через безперервну зміну роздільної здатності, що забезпечується клиноподібними сегментами, візуально складніше визначити точну роздільну здатність, досягнуту для кожного конкретного елемента. Хоча це математично можливо, це нелегко зробити за допомогою простого візуального огляду. Крім того, кругова природа зірчастих елементів у поєднанні з потенційним несиметричним розмиттям ускладнює вилучення детальної інформації за допомогою базових програмних засобів, таких як лінійні профайлери. Отже, для повного використання діагностичної потужності зірчастих мішеней зазвичай потрібне вдосконалене програмне забезпечення для аналізу зображень.

3.4 Мішені для вимірювання МТФ

3.4.1 Щілинна мішень (Slit Target)

В основі методу лежить проєкція вузької освітленої щілини на детектор (рис. 3.4). Типовий розмір щілини – від 1 до 10 мкм.

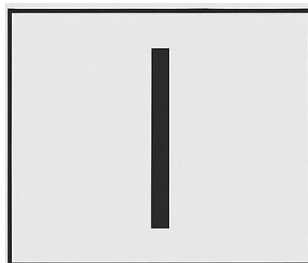


Рисунок 3.4 – Щілинна мішень [43]

Під час вимірювання формується LSF (Line Spread Function), що описує розмиття у вигляді розподілу інтенсивності вздовж напрямку щілини. МТФ отримується шляхом прямого перетворення Фур'є LSF. Метод забезпечує високу точність і добре підходить для монохроматичних оптичних систем. Основним обмеженням є чутливість до вирівнювання, що вимагає точної юстування.

3.4.2 Хрестоподібна мішень (Cross Target)

Цей тип використовує перпендикулярні щілини – вертикальну і горизонтальну (рис. 3.5).

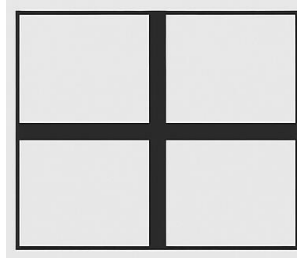


Рисунок 3.5 – Хрестоподібна мішень [43]

Дає змогу одночасно вимірювати MTF у двох ортогональних напрямках. Застосовується в системах з ПЗЗ-сенсорами, де напрямки сагітальний і тангенціальний мають технічне значення. Метод дозволяє швидко отримати двовимірну оцінку якості, однак перетин ліній ускладнює аналіз і обробку сигналу.

3.4.3 Точкова мішень (Point Source або Pinhole Target)

Реалізується як дуже малий отвір, що моделює точкове джерело світла. Розмір отвору зазвичай становить 1-5 мкм (рис. 3.6).

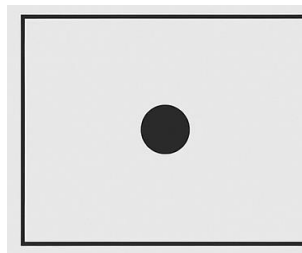


Рисунок 3.6 – Точкова мішень [43]

У результаті формується PSF (Point Spread Function), яка фіксується на сенсорі. MTF розраховується через двовимірне перетворення Фур'є від PSF. Метод забезпечує повну інформацію про MTF в усіх напрямках поля зору. Це особливо корисно для виявлення оптичної асиметрії, зокрема астигматизму.

Основним недоліком є слабкий сигнал, що вимагає використання високочутливих сенсорів.

3.4.4 Крайова мішень (Edge Target)

Принцип роботи базується на різкому переході між чорним і білим полем (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Крайова мішень [43]

Аналіз починається з побудови ESF (Edge Spread Function), яка визначається з яскравості вздовж краю. MTF отримується після обчислення Фур'є-перетворення від ESF. Метод є простим у реалізації й широко використовується в тестуванні камер і об'єктивів. Основне обмеження – підвищена чутливість до шуму, що може спотворити результат [45].

3.5 Мішені для вимірювання спотворень

Мішені для вимірювання спотворень зазвичай мають точно визначені сітчасті візерунки, такі як концентричні квадрати або сітки з певною частотою (рис. 3.8).

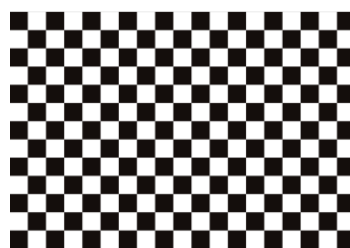


Рисунок 3.8 – Мішень для вимірювання спотворень [43]

Спосіб вимірювання включає перевірку геометричної форми. Для цього роблять знімки певних калібрувальних візерунків. Завдяки ретельному аналізу змін у формі цих візерунків на знімку, порівняно з їхніми відомими ідеальними формами, можна точно оцінити ступінь і тип спотворення.

Візуальна оцінка схильна до людських помилок та обмежень, особливо при вимірюванні складних геометричних деформацій. Людське сприйняття може бути неточним через повторювані візерунки або може несвідомо доповнювати деталі, що призводить до неправильних оцінок. Програмний аналіз забезпечує дуже об'єктивне, повторюване та точне вимірювання спотворень. Крім точності, автоматизація за допомогою програмного забезпечення також значно прискорює процес тестування та різко зменшує можливість людської помилки [46].

3.6 Стандарти ISO для оптичного тестування

Стандарти ISO (Міжнародна організація зі стандартизації) охоплюють багато критеріїв, гарантуючи, що кожен аспект оптичного елемента, від його точності розмірів до якості матеріалу та функціональних можливостей, відповідає міжнародним нормам.

ISO 12233 визначає методи вимірювання роздільної здатності та просторової частотної характеристики (SFR) цифрових камер. Він має два основні методи вимірювання SFR: E-SFR, який вимірює реакцію на похилий край, та S-SFR, який вимірює реакцію на синусоїдально модульовану мішень у полярній формі [47].

ISO 9334 надає основні терміни та математичні співвідношення, що стосуються модуляційно-передавальної функції (MTF). Це забезпечує спільну мову та метод для характеристики MTF [45, 47].

ISO 17850 визначає точний протокол для вимірювання геометричних спотворень у цифрових камерах. Це забезпечує послідовність у кількісній оцінці деформацій зображення [47].

ISO 15739 детально описує методи вимірювання та звітності шуму залежно від рівня сигналу та динамічного діапазону цифрових камер. Це дуже важливо для оцінки якості зображення в різних умовах освітлення [47].

ISO 12232 визначає методи присвоєння та звітності індексу експозиції, рейтингів швидкості ISO, стандартної вихідної чутливості та рекомендованого індексу експозиції для цифрових фотокамер [47].

ISO 17957 визначає методи вимірювання систематичних змін інтенсивності по зображенню, відомих як затінення яскравості або однорідність [47].

ISO 18844 зосереджується на методах вимірювання ореолів зображення. Він кількісно визначає розсіяне світло в оптичній системі [47].

ISO 19084 стосується методів вимірювання хроматичного зміщення, що є ключовим аспектом хроматичної аберації [47].

Широкий спектр стандартів ISO, присвячених різним оптичним параметрам, таким як роздільна здатність, спотворення, шум, хроматична аберация та затінення, однозначно показує, що «якість зображення» не є єдиним показником. Це складна концепція, яка складається з багатьох точно визначених та незалежно вимірюваних характеристик.

Кожен стандарт надає конкретний метод для об'єктивного вимірювання однієї конкретної грані роботи. Це означає, що для дійсно повної та надійної оцінки якості оптичної системи, особливо для професійних або важливих застосувань, потрібно дотримуватися багатьох із цих стандартів. Один «показник якості» був би занадто простим. Натомість, детальний звіт про якість має розбивати роботу за цими різними стандартизованими параметрами, надаючи повну картину можливостей та обмежень системи.

Висновок до розділу 3

Розглянуто основні типи оптичних тест-мішеней та методи їх використання для оцінки якості оптичних систем.

Серед найпоширеніших мішеней можна виділити мішень USAF 1951, яка є стандартним інструментом для оцінки роздільної здатності. Лінійки Рончі ефективні для аналізу контрасту та фокусування, але їх використання обмежене необхідністю окремих мішеней для різних просторових частот. Зірчасті мішені забезпечують комплексну оцінку роздільної здатності у різних напрямках, що робить їх корисними для юстирування оптичних систем.

Для вимірювання MTF використовуються щілинні, хрестоподібні, точкові та крайові мішені. Мішені для вимірювання спотворень використовуються для виявлення геометричних деформацій зображення.

Також було проаналізовано міжнародні стандарти ISO, які регламентують методи вимірювань оптичних параметрів. До них належать стандарти для роздільної здатності (ISO 12233), MTF (ISO 9334), геометричних спотворень (ISO 17850) та інших. Ці стандарти забезпечують об'єктивність та повторюваність результатів тестування.

РОЗДІЛ 4

УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

Установка для дослідження якості оптичних систем базується на камері Canon EOS R8 – рисунок 4.1.



Рисунок 4.1 – Камера Canon EOS R8 (корпус)

Матриця Canon R8 є повнокадровою CMOS з розмірами приблизно 35,9 x 23,9 мм. Кількість ефективних пікселів становить близько 24,2 мегапікселя, загальна кількість пікселів – приблизно 25,6 мегапікселя. Матриця оснащена фільтром низьких частот, який є вбудованим та фіксованим.

Обробка зображення відбувається за допомогою процесора DIGIC X.

Система автофокусування Dual Pixel CMOS AF II забезпечує точне наведення на об'єкт. Вона включає до 1053 зон кадру AF для фото. Покриття автофокусу становить 100 % по горизонталі та вертикалі у режимах відстеження обличчя та автоматичного вибору. Робочий діапазон автофокусу – від EV -6,5 до EV 21 за умов температури 23 °C та ISO100.

Стандартний діапазон ISO для фото складає 100-102,400 з можливістю розширення до L:50 та H:204,800. Для відео діапазон ISO – 100-25,600 з розширеним значенням H:102,400.

Як оптична система в установці використано об'єктив Canon RF 15-30 mm F4,5-6,3 IS STM – рисунок 4.2.



Рисунок 4.2 – Об'єктив Canon RF 15-30 mm F4,5-6,3 IS STM

Цей об'єктив є надширококутним зумом, для повнокадрових бездзеркальних камер Canon EOS R. Він забезпечує зйомку в діапазоні фокусних відстаней від 15 до 30 мм.

Об'єктив використовує байонет Canon RF. Максимальна діафрагма змінюється від $f/4,5$ на 15 мм до $f/6,3$ на 30 мм. Мінімальна діафрагма становить $f/22$ на 15 мм та $f/32$ на 30 мм. Система оптичної стабілізації (IS) компенсує змазування до 5,5 ступенів. Оптична конструкція об'єктива Canon RF 15-30 mm представлена на рисунку 4.3.

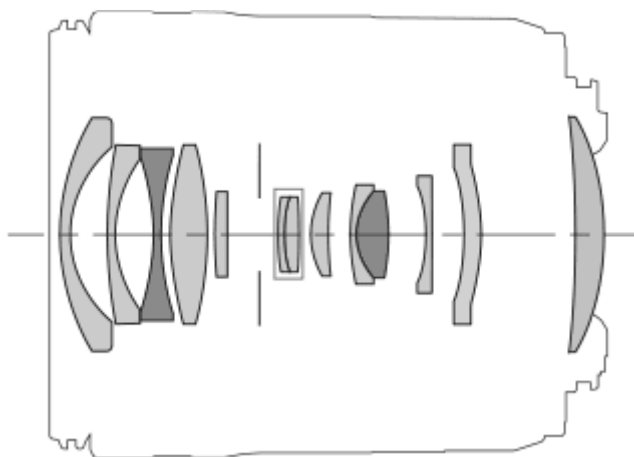


Рисунок 4.3 – Оптична конструкція об'єктива Canon RF 15-30mm [48]

Оптична схема складається з 13 елементів, розподілених у 11 груп. Для підвищення якості зображення застосовано асферичні елементи та елементи з наднизькою дисперсією. Покриття Super Spectra зменшує відблиски та ореоли.

Мінімальна дистанція фокусування в режимі автофокусу – 0,28 м на всіх фокусних відстанях. У ручному режимі на 15 мм можна наблизитися до об'єкта на 0,128 м, що забезпечує макро-збільшення 0,52х. В автофокусі максимальне збільшення становить 0,09х на 15 мм.

Діафрагма має 7 пелюсток, що сприяє плавному розмиттю фону.

Камера закріплена на штативі Manfrotto з механічною головкою (Benro GD3WH) для штатива, призначена для точного позиціонування камери у трьох площинах: горизонтальній, вертикальній та нахилу.

Для освітлення мішеней використовується спалах GODOX TT685II, який синхронізується з камерою за допомогою Godox XPro II-Canon. Рівномірність освітлення забезпечується софтбоксом MITOYA INTENSE 70 см. Установка для дослідження якості оптичних систем представлена на рисунку 4.4.

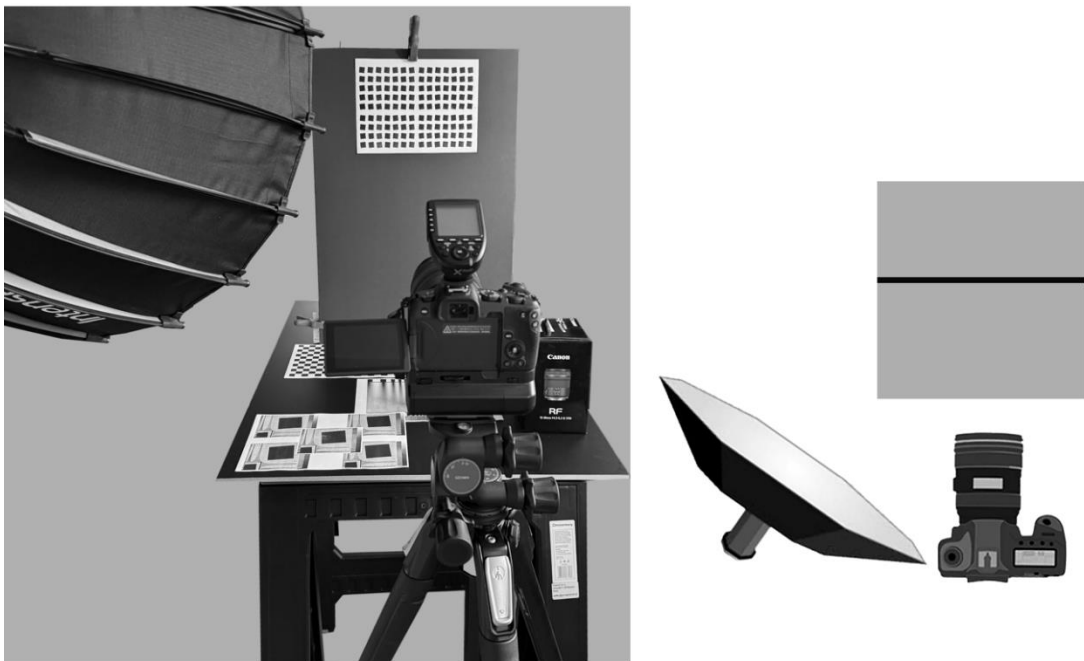


Рисунок 4.4 – Установка для дослідження якості оптичних систем

Мішені закріплюються на чорному матовому столику. Вони надруковані на папері формату A4 за допомогою принтера HP LaserJet 1320 з роздільною здатністю 300 dpi. Приклад друкованої мішені наведено на рисунку 4.5.

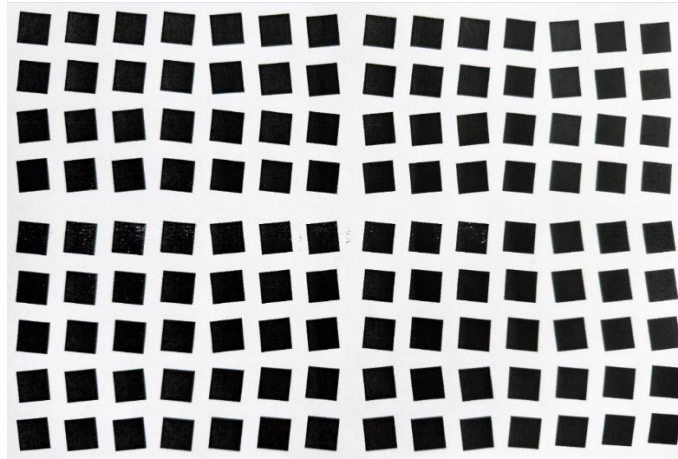


Рисунок 4.5 – Тестова таблиця для визначення MTF

Усі знімки мішеней було збережено у форматі RAW. RAW – це формат цифрового зображення, який зберігає повні дані, отримані з сенсора камери під час зйомки [49]. У файлі RAW зберігаються значення світлочутливості кожного пікселя сенсора, що дозволяє зберігати максимальний обсяг інформації для подальшої обробки.

На відміну від форматів із втратами, таких як JPEG, формат RAW не відкидає інформацію з тіней, світлих ділянок або кольорових переходів. Це зберігає можливість подальшої роботи з усім динамічним діапазоном і кольоровим охопленням, який був присутній під час зйомки.

RAW не є готовим зображенням. Це набір даних, який потребує перетворення для виводу на екран або друк. Обробка цих даних виконується за допомогою спеціального програмного забезпечення, яке інтерпретує значення світлочутливості, структуру кольорових фільтрів сенсора та супутні метадані.

Кожен виробник камер реалізує власний тип RAW-файлів. Наприклад, Canon використовує CR2 або CR3, Nikon – NEF, Sony – ARW, Fujifilm – RAF. Крім них існує універсальніший формат DNG, створений для стандартизації обробки.

RAW зберігає всі технічні параметри зйомки. У ньому фіксується значення ISO, витримка, діафрагма, тип об'єктива, баланс білого, фокусна відстань, координати GPS та інша інформація. Вони не впливають на вихідні піксельні

дані, але використовуються для правильної обробки та аналізу. Цей формат забезпечує повний контроль над зображенням і дозволяє отримати максимально точний результат під час подальшої обробки.

Для подальшої роботи RAW дані конвертувалися у зображення в TIFF формат без стиснення. Зображення не піддавалися жодній додатковій обробці в графічних редакторах.

Висновок до розділу 4

Для експериментальних досліджень було створено установку на базі камери Canon EOS R8 з об'єктивом Canon RF 15-30 mm F4,5-6,3 IS STM. Ця конфігурація дозволить провести всебічний аналіз якості зображення, використовуючи різні типи тест-мішеней. Установка забезпечує гнучкість у тестуванні, дозволяючи оцінювати роздільну здатність, контраст, MTF та геометричні спотворення.

Усі знімки мішеней було збережено у форматі RAW, що забезпечує повне збереження даних з сенсора без втрати інформації. Завдяки цьому формат дозволяє отримати максимальний обсяг візуальної інформації, зберігаючи природний динамічний діапазон та точну передачу кольорів. RAW-файли забезпечують можливість точного подальшого аналізу зображень, оскільки вони містять необроблені дані кожного пікселя разом із усіма параметрами зйомки.

РОЗДІЛ 5

АВТОМАТИЗАЦІЯ ОБЧИСЛЕННЯ МОДУЛЯЦІЙНОЇ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ (MTF) ЗА МЕТОДОМ ПОХИЛОГО КРАЮ. ЗАГАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЗОБРАЖЕННЯ

Програмне забезпечення призначене для автоматизованого аналізу роздільної здатності та контрасту оптичних систем шляхом обчислення модуляційної передавальної функції (MTF) за методом похилого краю. Алгоритм виявляє на вхідному зображенні тестової міри спеціальні мішені (темні прямокутники), аналізує перехідну характеристику на їхніх межах та розраховує ключові показники якості зображення, такі як MTF10, MTF50 та контраст. Результати представляються у вигляді зображень, теплових карт та порівняльних графіків.

Основними вхідними даними для системи є цифрове зображення, отримане з аналізованої оптичної системи. На зображенні зафіксована тестова таблиця, яка містить сітку з темних прямокутних мішеней на світлому фоні. Кожна мішень повинна мати принаймні один чіткий, дещо нахилений край відносно осей піксельної матриці сенсора (див. рисунок 4.5). Програмний комплекс приймає стандартні формати зображень, такі як TIFF, JPEG або PNG, які зчитуються за допомогою бібліотеки OpenCV.

5.1 Опис алгоритму

Алгоритм аналізу складається з кількох послідовних етапів.

На першому етапі виконується автоматичне виявлення областей інтересу (ROI). Вхідне зображення перетворюється у відтінки сірого, після чого до нього застосовується бінаризація за методом Оцу для відділення темних мішеней від фону. Для усунення шумів та згладжування контурів виконуються морфологічні операції закриття та відкриття. Далі, за допомогою алгоритму пошуку контурів,

ідентифікуються всі замкнені області. Контури, що відповідають певним критеріям (мінімальна площа, співвідношення сторін), класифікуються як прямокутні мішені.

Для кожної знайденої мішені виконується процедура розрахунку MTF. Спочатку в межах ROI за допомогою детектора країв Canny та імовірнісного перетворення Хафа визначається найдовша лінія, що відповідає похилому краю. Кут нахилу цієї лінії має знаходитись у заданому діапазоні (наприклад, від 1° до 89°), щоб уникнути аналізу горизонтальних або вертикальних країв.

Після ідентифікації лінії краю будується функція розмиття краю (Edge Spread Function, ESF). Для цього всі пікселі в ROI проєктуються на вісь, перпендикулярну до знайденого краю. Цей процес виконується з надлишковою дискретизацією (oversampling), що дозволяє отримати профіль краю з точністю меншою за розмір пікселя. Отриманий масив даних (ESF) є одновимірним представленням переходу від темної до світлої області. Далі ESF піддається згладжуванню за допомогою фільтра для зменшення впливу шуму, після чого нормалізується до діапазону значень від 0 до 1.

Наступним кроком є отримання функції розсіювання лінії (Line Spread Function, LSF), яка є похідною від згладженої ESF. LSF обчислюється як перша різниця сусідніх елементів масиву ESF і нормалізується таким чином, щоб її інтеграл дорівнював одиниці.

Модуляційна передавальна функція (MTF) розраховується як модуль швидкого перетворення Фур'є (FFT) від LSF – формула 5.1:

$$MTF(f) = |\mathcal{F}\{LSF(x)\}|, \quad (5.1)$$

де $\mathcal{F}\{\cdot\}$ – пряме перетворення Фур'є,

$LSF(x)$ – лінійна функція розмиття (нормована так, щоб площа під нею дорівнювала 1),

f – просторова частота.

Перед виконанням FFT до LSF застосовується вікно Ханна для зменшення спектральних витоків – формула 5.2:

$$\omega(n) = 0.5 \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N-1}\right)\right), \quad 0 \leq n \leq N, \quad (5.2)$$

де $\omega(n)$ – значення вікна в точці n ,

N – загальна кількість точок сигналу.

Отриманий спектр нормалізується до одиниці на нульовій частоті.

На основі отриманої кривої MTF розраховуються її ключові характеристики: MTF50 та MTF10, що відповідають просторовим частотам, на яких амплітуда MTF спадає до 50 % та 10 % від максимального значення відповідно. Ці значення знаходяться шляхом лінійної інтерполяції. Додатково для кожної мішені обчислюється локальний контраст за формулою Мікельсона (формула 5.3):

$$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \quad (5.3)$$

де I_{max} – максимальна яскравість (інтенсивність),

I_{min} – мінімальна яскравість (інтенсивність).

На завершальному етапі всі знайдені мішені класифікуються за їхнім положенням на зображенні («центр», «край», «кут»). Це дозволяє порівнювати роздільну здатність у різних зонах кадру. Генеруються візуальні звіти: вихідне зображення зі значеннями MTF50 та контрасту; будуються 2D теплові карти для візуалізації просторового розподілу цих параметрів; створюється порівняльний графік кривих MTF для центральної та кутових мішеней.

5.2 Програмна реалізація та взаємодія функцій

Програмна реалізація – це набір функцій мовою Python з використанням бібліотек OpenCV, NumPy, SciPy, Matplotlib та Seaborn.

Основне виконання програми запускається з блоку `if __name__ == "__main__"`. Спочатку йде завантаження зображення. Функція `detect_dark_rectangles` відповідає за перший етап – виявлення мішеней. Вона повертає список координат прямокутників, який передається до головної аналітичної функції `analyze_targets`.

Функція `analyze_targets` ітерує по кожному знайденому прямокутнику. Для кожного ROI вона викликає `calculate_mtf_from_edge` для повного циклу розрахунку MTF та `calculate_contrast` для оцінки контрасту.

Ключовою функцією є `calculate_mtf_from_edge`, яка послідовно викликає `find_slanted_edge_line` для знаходження краю, `get_binned_esf` для побудови профілю краю, а потім виконує згладжування, диференціювання (для отримання LSF) та FFT для розрахунку MTF. У цій же функції викликається `correct_finite_differences` для корекції. Після отримання кривої MTF, `analyze_targets` викликає `calculate_mtf_characteristics` та `calculate_normalized_mtf_area` для обчислення фінальних метрик (MTF50, MTF10, площа під кривою). Результати для всіх мішеней збираються у єдиний список словників.

Після завершення аналізу функція `classify_center_edge` обробляє список результатів, додаючи до кожного запису мітку про його просторове розташування ('center', 'corner', 'edge').

Для візуалізації результатів використовуються дві основні функції.

Функція `annotate_image` приймає вихідне зображення, координати прямокутників та список результатів для нанесення текстових анотацій та побудови теплової карти за допомогою `seaborn.heatmap`.

Функція `plot_mtf_comparison` використовує дані з класифікованих результатів для побудови порівняльного графіка MTF для центральної та кутових зон за допомогою `matplotlib.pyplot`.

Таким чином, скрипт реалізує модульний підхід, що забезпечує гнучкість та легкість модифікації системи.

Лістинг фрагменту скрипта представлений в додатку А.

Вихідне зображення зі значеннями MTF50 та вихідне зображення зі значеннями контрасту наведені на рисунках 5.1-5.2.

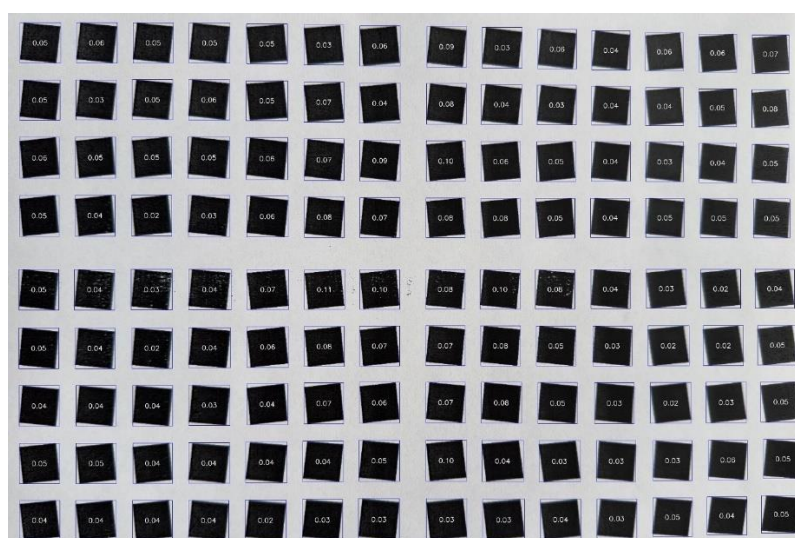


Рисунок 5.1 – Вихідне зображення зі значеннями MTF50

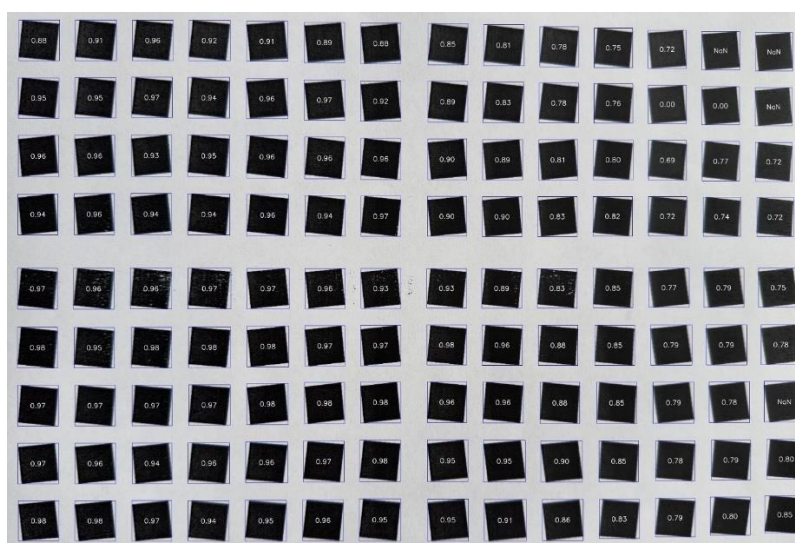


Рисунок 5.2 – Вихідне зображення зі значеннями контрасту

Якість зображення, отриманого об'єктива Canon RF 15-30 mm при фокусній віддалі 20 mm і діафрагмі 8. Знімки виконувались у форматі RAW, що дозволило зберегти максимальну деталізацію без додаткових обробок.

Криві розподілу MTF для центра зображення та кутів наведені на рисунку 5.3.

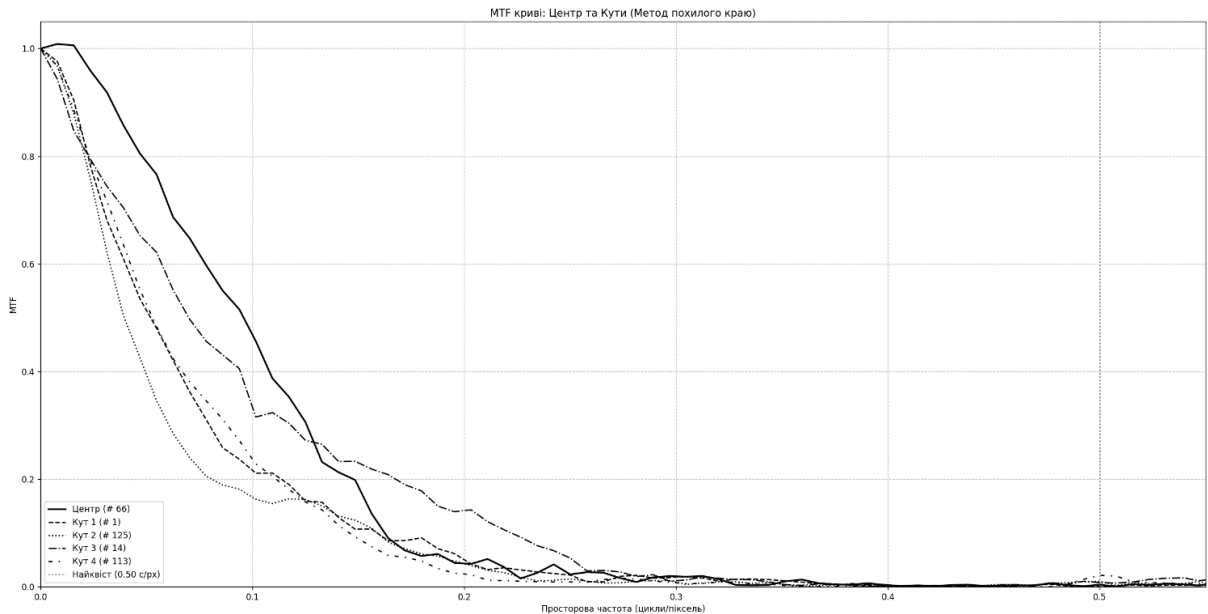


Рисунок 5.3 – Криві розподілу MTF для центра зображення та кутів

На графіку MTF (рис. 5.3) суцільна лінія показує результати для центру зображення. Тут значення MTF є найвищим, досягаючи приблизно 1,0 на низьких частотах. Центральна частина об'єктива забезпечує найвищу різкість.

Кути зображення демонструють зниження якості. Це відбувається через кілька причин, таких як оптичні аберації, зокрема астигматизм, а також падіння освітлення по краях кадру, відоме як віньєтування, та спотворення поля зору.

На частотах від 0,1 до 0,2 циклів на піксель значення MTF для кутів падає до рівня 0,2-0,4. Межа 0,5 циклів на піксель позначена як найвища можлива якість. Жодна з кривих не перетинає цю межу, що відповідає Nyquist limit. Система не може чітко показати деталі, дрібніші за половину розміру пікселя – це фізичне обмеження.

Отримані результати є реалістичними для оцінки якості друку з роздільною здатністю 300 DPI, коли зображення знято на Sf_{non} у форматі RAW. Центр кадру очікувано виявився кращим за кути. Графік точно відображає природні оптичні властивості об'єктива та загальної системи камери.

Проаналізуємо побудовану теплову карту. Теплова карта MTF50 для того ж зображення наведена на рисунку 5.4.

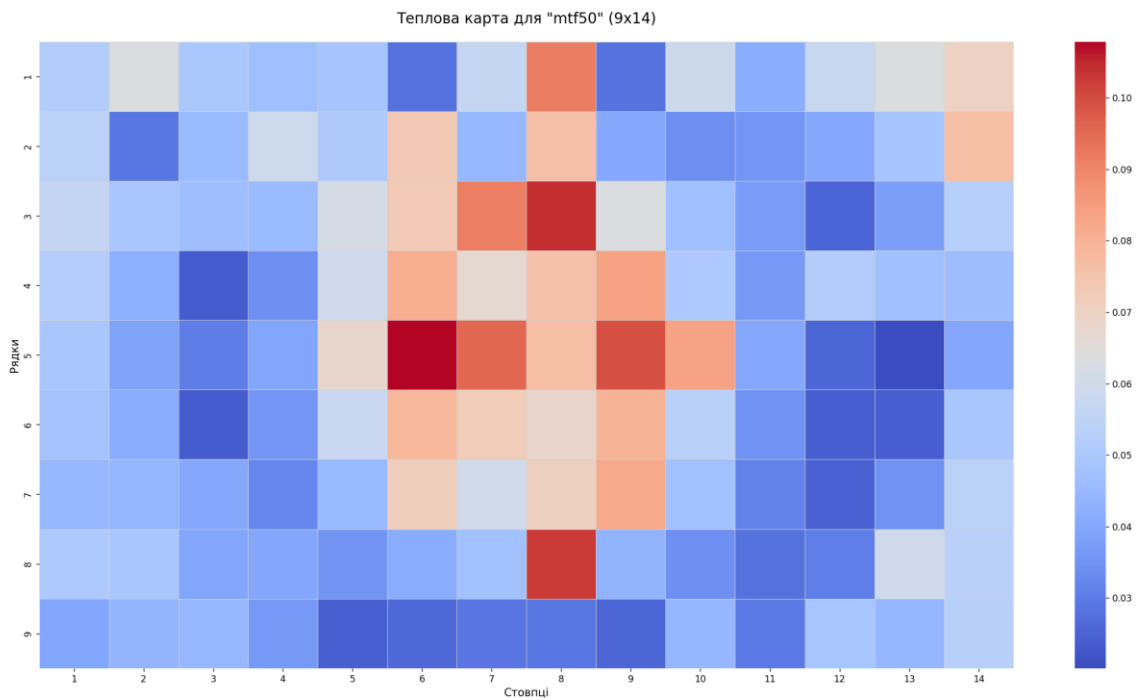


Рисунок 5.4 – Теплова карта MTF50 для того ж зображення

У центральній області зображення (стовпці 6-9, рядки 3-6) зафіксовані найвищі значення MTF50 – у межах 0,09-0,11 циклів на піксель. Це вказує на високу деталізацію в центрі кадру, що є типовим для будь-якої оптичної системи. Значення вище 0,1 вважаються дуже добрими для камер споживчого класу.

На периферії значення MTF50 знижуються до рівня 0,025-0,06 циклів на піксель. Найнижчі показники спостерігаються у кутах зображення, зокрема в ділянках стовпців 1-2 і 13-14 та рядках 1 і 9. Це узгоджується зі зменшенням контрастності у крайових зонах, яке було помітно й на відповідних MTF-кривих.

Об'єктив Canon RF 15-30 mm забезпечує відмінну якість у центрі кадру і зниження якості по краях – нормальне явище для ширококутних об'єктивів.

Проаналізуємо побудовану теплову карту контрасту. Теплова карта контрасту наведена на рисунку 5.5.

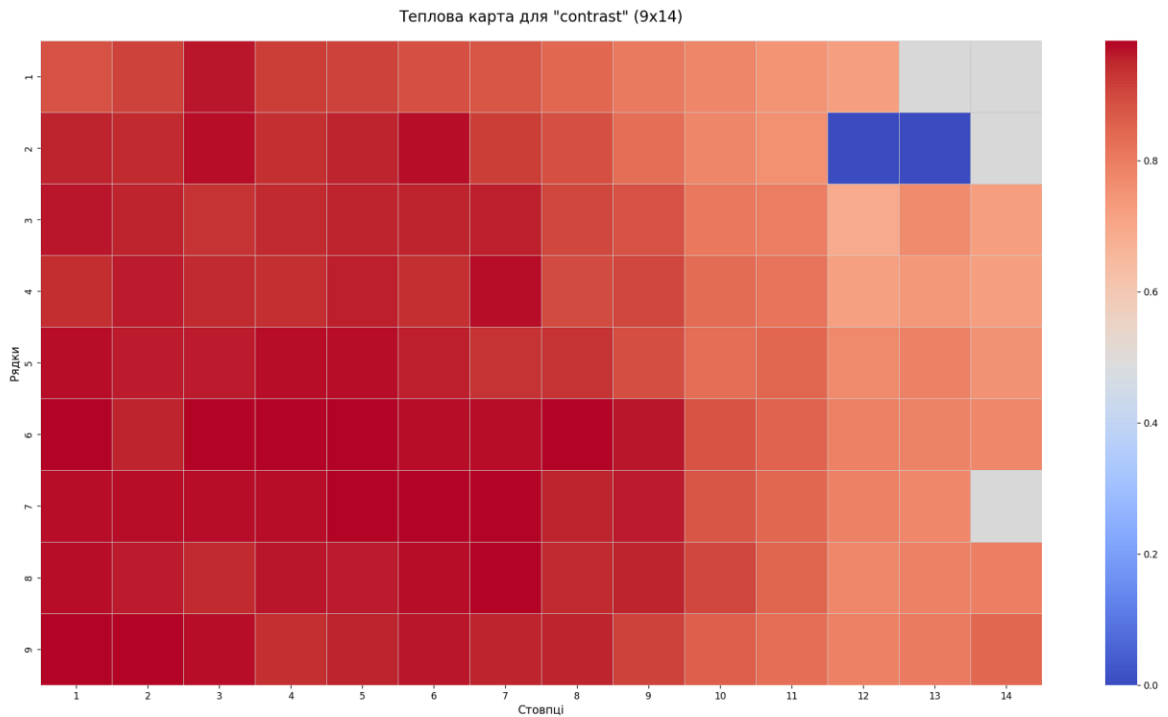


Рисунок 5.5 – Теплова карта контрасту (normalized contrast)

У центрі кадру (стовпці 3-9, рядки 3-7) контраст залишається стабільно високим – понад 0,9. Це свідчить про якісну передачу тонових переходів і чітких меж у центральній частині зображення. Такі результати корелюють із високими показниками MTF50, що підтверджує добру різкість і контрастність.

У правій верхній області (стовпці 12-14, рядки 1-3) спостерігається різке падіння контрасту, яке досягає нуля у точці (13,2). Це вказує на значне погіршення оптичних характеристик або проблеми з фокусуванням у цьому куті. Ймовірно, присутня невелика дисторсія або кривина поля.

Присутність освітлення праворуч на тепловій карті може пояснюватися тим, що ліва сторона оригінальної сцени могла бути краще освітлена, що

призвело до більших перепадів яскравості та, відповідно, вищих значень контрасту.

Висновок до розділу 5

Алгоритм та програмна реалізація дозволяють оцінювати якість оптичних систем за допомогою аналізу модуляційної передавальної функції (MTF) методом похилого краю. Він виявляє тестові мішені на зображенні, аналізує їхні межі та обчислює ключові показники, такі як MTF50, MTF10 і контраст.

Центр зображення характеризується найвищою якістю, про що свідчать високі значення MTF ($\approx 1,0$ на низьких частотах) та контрасту понад 0,9. У кутах зображення якість погіршується, що призводить до зниження MTF до 0,2-0,4.

Обмеження граничної деталізації зумовлені піксельною структурою сенсора, де межа Найквіста становить 0,5 циклів на піксель. Теплові карти чітко відображають розподіл якості: значення MTF50 у центрі коливаються від 0,09 до 0,11, а по краях падають до 0,025-0,06. Контраст у центрі перевищує 0,9, тоді як на краях він різко знижується, іноді до нуля.

Об'єктив Canon RF 15-30 mm (f/8, 20 мм) демонструє типову для ширококутних лінз картину – високу різкість у центрі і помітне падіння якості на периферії. Отримані результати відповідають фізичним обмеженням сенсора та оптики. Метод ефективний для оцінки роздільної здатності, зокрема при друку з роздільністю 300 DPI.

РОЗДІЛ 6

СИСТЕМА ОЦІНКИ ФУНКЦІЇ ПЕРЕДАЧІ МОДУЛЯЦІЇ (MTF)

ЗОБРАЖЕНЬ З РУЧНИМ ВИБОРОМ ОБЛАСТІ ІНТЕРЕСУ

6.1 Алгоритм обчислення MTF50 при ручному виборі ROI

Основними даними є файлове зображення. Зображення завантажується у відтінках сірого для подальшої обробки.

За основу взято алгоритм, представлений у розділі 5, але з рядом відмінностей.

Головною особливістю є інтерактивний ручний вибір області інтересу (ROI), що здійснюється користувачем через графічний інтерфейс. Користувач візуально позначає прямокутну ділянку на зображенні, що вимагає безпосередньої участі при кожному аналізі.

Відмінністю також є розширений набір метрик для оцінки: окрім обчислення MTF50, алгоритм визначає MTF10 та нормалізовану площу під кривою MTF. Для більш точного відображення характеристики просторової роздільної здатності застосовується поліноміальна апроксимація кривої MTF, що забезпечує її згладжене представлення.

Обидва алгоритми, включаючи базовий, використовують аналогічну послідовність обчислень MTF за методом похилого краю. Спочатку зображення перетворюється у відтінки сірого, що є стандартним кроком для спрощення подальшої обробки. Для виявлення похилого краю застосовується комбінація детектора Canny та імовірнісного перетворення Хафа (HoughLinesP), що дозволяє знайти найдовшу похилу лінію, яка ідентифікує край. Встановлені додаткові критерії для кута нахилу, що обмежують пошук релевантного краю.

Далі здійснюється проєкція пікселів на вісь, перпендикулярну до краю, із надлишковою дискретизацією для формування ESF. Згладжування ESF виконується з метою зменшення шуму, при цьому застосовуються фільтрів Савіцкі-Голея або Гаусового згладжування. Лінійна функція розподілу (LSF)

отримується як перша похідна від згладженої ESF та нормалізується для подальшої обробки.

Для отримання MTF виконується швидке перетворення Фур'є (FFT) від LSF, при цьому перед трансформацією до LSF застосовується віконна функція Ханна для зменшення спектральних витоків. Отриманий спектр MTF нормалізується відносно амплітуди на нульовій частоті. Ключові показники роздільної здатності – MTF50 та MTF10 – визначаються шляхом лінійної інтерполяції на основі отриманої кривої MTF.

6.2 Програмна реалізація алгоритму

Функція `on_rectangle_select` є обробником подій графічного інтерфейсу. Вона активується при виборі користувачем прямокутної області на зображенні. Функція отримує координати початку та кінця виділення, конвертує їх у цілі значення та зберігає у глобальній змінній `selected_roi_coords`.

Функція `select_roi_from_image` відповідає за завантаження зображення та надання користувачеві можливості інтерактивного вибору області інтересу (ROI). Вона завантажує зображення у відтінках сірого. Ця функція використовує компоненти `Matplotlib` для створення інтерактивного селектора прямокутників. Користувач може виділити область за допомогою лівої кнопки миші. Після вибору та підтвердження (натисканням 'Enter'), функція вирізає вибрану ROI із зображення та повертає її разом із координатами.

Функція `find_slanted_edge_line` призначена для виявлення лінії похилого краю в межах обраної ROI. Вона застосовує алгоритм `Canny` для виявлення контурів, а потім використовує перетворення Хафа (`HoughLinesP`) для ідентифікації прямих ліній. Функція фільтрує знайдені лінії за довжиною та кутом нахилу, щоб переконатися, що виявлена лінія є саме похилим краєм, а не горизонтальним чи вертикальним. Повертається кутовий коефіцієнт та зміщення (інтерцепт) знайденої лінії, а також її кінцеві координати.

Побудову функції розповсюдження краю (ESF) за допомогою методу субпіксельного бінінгу здійснює функція `get_binned_es`. На основі знайденої лінії краю, функція обчислює перпендикулярну відстань кожного пікселя в ROI до цієї лінії. Інтенсивності пікселів групуються (бінуються) відповідно до цих відстаней, формуючи профіль інтенсивності поперк краю. Здійснюється нормалізація отриманої ESF.

Для корекції отриманих значень MTF використовуємо функцію `correct_finite_differences`. Ця корекція необхідна для компенсації спотворень, що виникають внаслідок використання методу кінцевих різниць при обчисленні функції розповсюдження лінії (LSF) з ESF.

Функція `calculate_mtf_from_edge` є центральною для обчислення MTF. Вона інтегрує результати попередніх функцій: спочатку виявляє похилий край, потім будує біновану ESF. Отриману ESF згладжує за допомогою фільтра Savitzky-Golay або Гауссового фільтра для зменшення шуму. Далі, шляхом диференціювання згладженої ESF, отримується функція розповсюдження лінії (LSF). LSF нормалізується, центрується та доповнюється нулями до потрібного розміру для ефективного перетворення Фур'є. Застосовується віконна функція для зменшення спектрального лікінгу. Нарешті, виконується швидке перетворення Фур'є (FFT) LSF для отримання MTF. Отримана MTF нормалізується до одиниці на нульовій частоті та, за бажанням, застосовується корекція кінцевих різниць. Функція повертає значення частот, MTF, біновану та згладжену ESF, LSF, а також координати знайденої лінії краю.

Ключові метрики MTF50 та MTF10 отримуємо використовуючи функцію `calculate_mtf_characteristics`. Ці значення представляють просторові частоти, на яких функція передачі модуляції зменшується до 50 % та 10 % від свого максимального значення відповідно. Розрахунок виконується за допомогою лінійної інтерполяції.

Функція `calculate_normalized_mtf_area` обчислює інтеграл (площу) під кривою MTF до частоти Найквіста, нормалізуючи її до значення самої частоти

Найквіста. Цей показник є інтегральною оцінкою загальної якості передачі деталей системою.

За візуалізацію отриманої кривої MTF відповідає функція `plot_mtf_curve`. Вона будує графік MTF залежно від просторової частоти. На графік додаються позначки частоти Найквіста, а також обчислені значення MTF50 та MTF10, якщо вони доступні. Також на графік наноситься поліноміальна апроксимація кривої MTF для згладженого представлення.

Функція `main` є головною функцією виконання програми. Вона відповідає за послідовне виклик всіх інших функцій для виконання повного циклу аналізу MTF.

6.3 Взаємодія функцій

Виконання програми починається з функції `main`.

Функція `main` завантажує зображення за вказаним шляхом.

Далі викликається функція `select_roi_from_image`, яка відображає завантажене зображення та дозволяє користувачеві інтерактивно вибрати ROI. У процесі вибору `on_rectangle_select` зберігає координати ROI, а `on_key_press` закриває вікно після підтвердження.

Після успішного вибору ROI та отримання її зображення (`roi_img`) та координат, `main` передає `roi_img` до функції `calculate_mtf_from_edge`. Мішень, що відповідає стандарту ISO 12233:2023 з вибраним ROI наведена на рисунку 6.1.

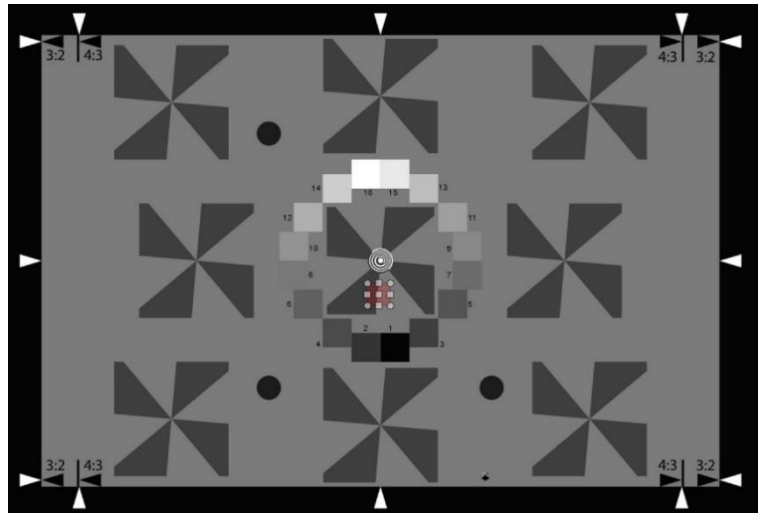


Рисунок 6.1 – Мішень, що відповідає стандарту ISO 12233:2023 з вибраним ROI

Функція `calculate_mtf_from_edge` всередині себе викликає `find_slanted_edge_line` для визначення точної геометрії краю в ROI – рисунок 6.2.

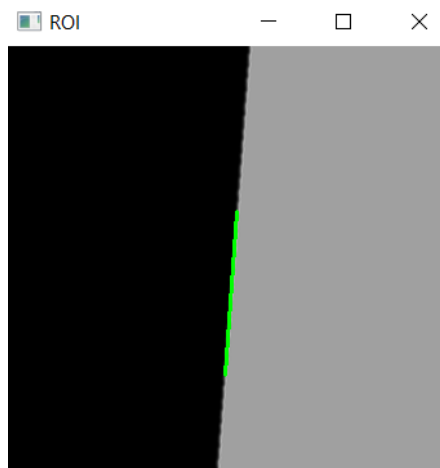


Рисунок 6.2 – Визначення точної геометрії краю в ROI

Після цього `calculate_mtf_from_edge` використовує отримані дані про лінію краю та `roi_img` для виклику `get_binned_esf`, що генерує біновану Edge Spread Function.

Функція `calculate_mtf_from_edge` обробляє ESF (згладжування, диференціювання до LSF, нормалізація, віконна функція, FFT) і, за необхідності,

викликає `correct_finite_differences` для корекції MTF. Вона повертає частоти та значення MTF, а також проміжні результати ESF та LSF.

Функція `main` отримує ці результати та передає їх до `calculate_mtf_characteristics` для обчислення MTF50 та MTF10.

Також `main` викликає `calculate_normalized_mtf_area` для розрахунку площі під кривою MTF.

На завершальному етапі `main` візуалізує знайдену лінію краю на ROI, а потім викликає `plot_mtf_curve` для відображення основної кривої MTF з усіма розрахованими показниками. Додатково, окремими викликами `plt.figure` та `plt.plot` відображаються графіки ESF та LSF.

Графік функції розкиду краю (ESF) має дуже круту S-подібну форму, що є характерним для різкого краю – рисунок 6.3.

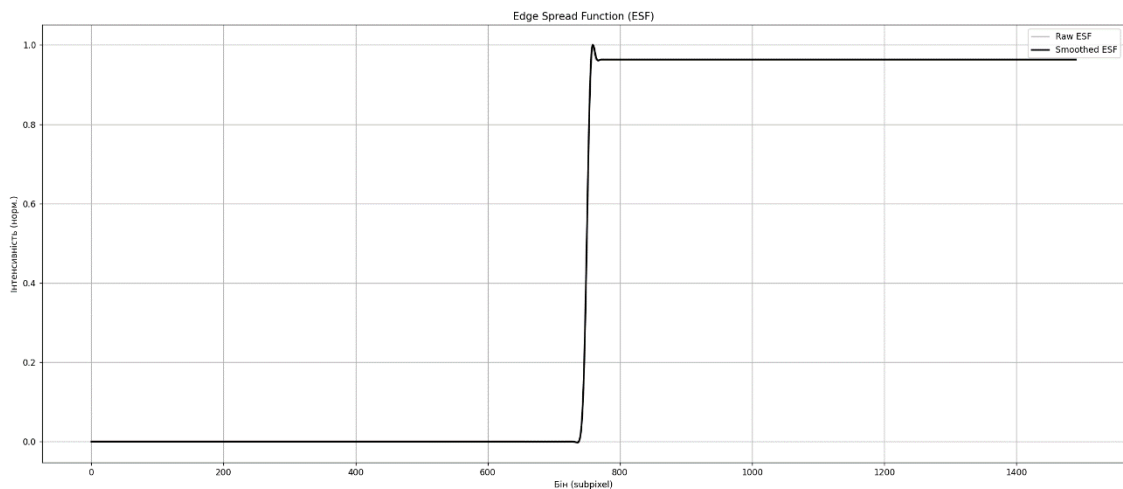


Рисунок 6.3 – Графік функції розкиду краю (ESF – Edge Spread Function)

Перехід інтенсивності відбувається приблизно між 700-м та 800-м бінном на осі X. Цей перехід від низької інтенсивності (0) до високої інтенсивності (1) є дуже різким.

Той факт, що ESF переходить від 0 до 1 майже миттєво (на дуже малому діапазоні субпікселів), свідчить про те, що або вхідне зображення містить

надзвичайно різкий край, або об'єктив Canon має високу різкість і мінімальне розмиття.

Графік функції розкиду лінії – LSF, як і попередній ESF, свідчить про велику різкість та роздільну здатність об'єкта або системи, яка використовувалася для отримання зображення – рисунок 6.4.

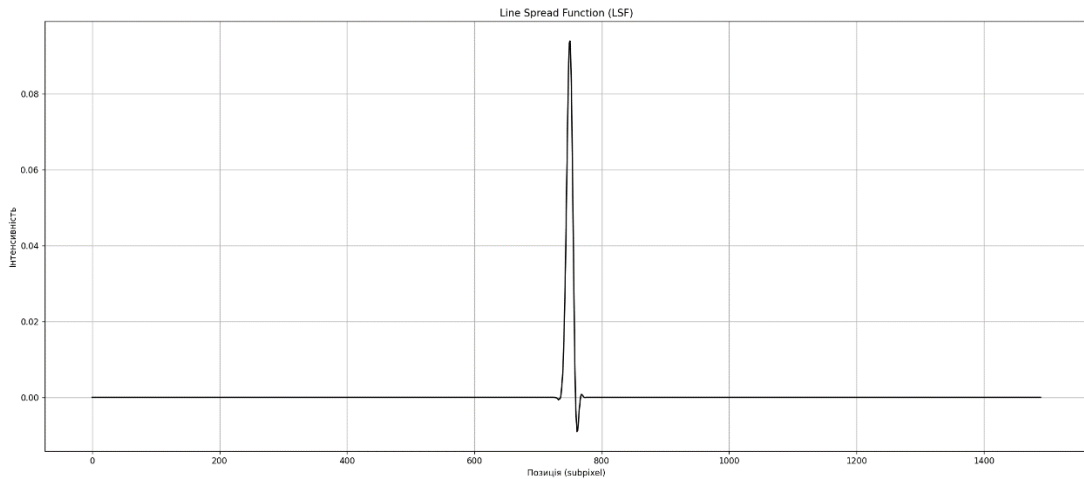


Рисунок 6.4 – Графік функції розкиду лінії (LSF – Line Spread Function)

Надзвичайно вузький пік LSF вказує на високу різкість системи візуалізації. Чим вужча LSF, тим менше розмиття і тим краще система може розрізняти дрібні деталі.

Ця послідовність забезпечує повноцінний аналіз MTF зображення, починаючи від інтерактивного вибору області та закінчуючи візуалізацією кінцевих метрик.

Графік модуляційної передавальної функції (MTF), розрахований для конкретної області інтересу (ROI) на зображенні наведено на рисунку 6.5.

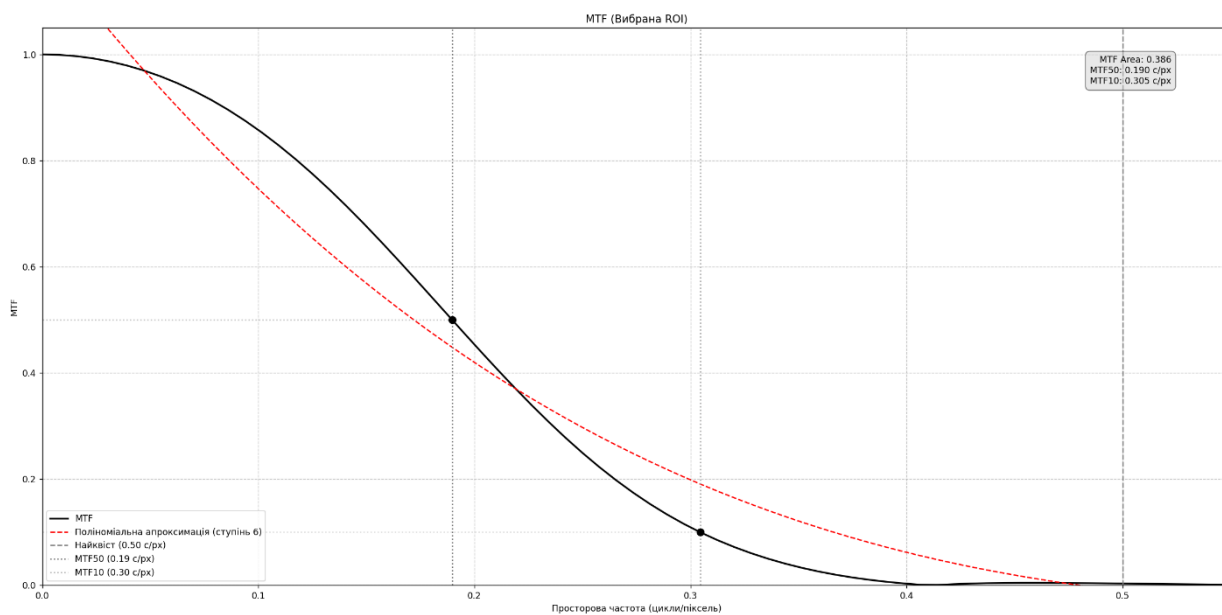


Рисунок 6.5 – Графік модуляційної передавальної функції (MTF – Modulation Transfer Function), розрахований для конкретної області інтересу (ROI) на зображенні

Графік відображає залежність контрастної передачі системи від просторової частоти. По осі X відкладено просторову частоту в циклах на піксель. Нуль відповідає середній інтенсивності зображення. Зі зростанням значення частоти аналіз переходить до все тонших деталей. Максимум – 0,5 циклів/піксель, що відповідає частоті Найквіста.

По осі Y показано значення MTF. Воно характеризує здатність системи передавати контраст. Значення змінюється від 0 до 1. Якщо MTF дорівнює 1, контраст зберігається повністю. Якщо 0 – втрачається повністю.

Основна чорна суцільна лінія демонструє розраховану криву MTF. Вона починається з 1,0 і поступово знижується у напрямку до частоти Найквіста. Цей спад відображає зменшення контрасту на вищих просторових частотах.

Червона пунктирна лінія показує поліноміальну апроксимацію шостого ступеня. Вона згладжує початкову криву, зберігаючи її основну форму. Це підтверджує точність апроксимації.

Вертикальна сіра пунктирна лінія при значенні 0,5 вказує на частоту Найквіста. Вона слугує граничною точкою для дискретних систем. Поза цією межею можуть з'явитися спотворення зображення.

Вертикальна пунктирна лінія з крапкою при значенні 0,19 відповідає MTF50. Це частота, на якій система передає 50 % початкового контрасту. Вона використовується як орієнтир різкості. Значення 0,19 означає, що система здатна розрізняти деталі з просторовим періодом приблизно 5,26 пікселів.

Ще одна вертикальна лінія з крапкою при значенні 0,30 відповідає MTF10. Це межа, на якій контраст падає до 10 %. Вона визначає граничну роздільну здатність системи. Значення 0,30 означає збереження помітного контрасту для деталей з періодом близько 3,33 пікселів.

Площа під кривою MTF до частоти Найквіста нормалізована та дорівнює 0,390. Це узагальнена оцінка ефективності передачі просторових частот. У порівнянні з максимально можливим значенням 0,5, результат 0,390 вважається високим.

Форма MTF-кривої без різких змін або осциляцій свідчить про стабільну та якісну роботу системи. Відсутність пікоподібних коливань виключає вплив артефактів підвищення різкості.

Частота MTF50 перебуває в типовому діапазоні для цифрових камер. Це підтверджує хорошу робочу різкість. Значення MTF10 демонструє здатність передавати контраст на високих частотах. Разом з високим значенням площі під кривою, ці характеристики вказують на ефективне збереження деталей по всьому спектру просторових частот.

Результати графіка MTF узгоджуються з даними ESF та LSF. Центр зображення отриманого камерою Canon R8 з об'єктивом Canon RF 15-30 mm (f/8, 20 мм) показує високу якість зображення, збереження дрібних деталей та чіткість.

Фрагмент скрипта програмної реалізації системи оцінки функції передачі модуляції зображень при ручному виборі ROI представлено в додатку Б.

Висновок до розділу 6

Представлено алгоритм і програмну реалізацію системи оцінки функції передачі модуляції (MTF) з інтерактивним ручним вибором області інтересу (ROI). Основна ідея полягає в забезпеченні точного аналізу вибраної ділянки зображення, що дає змогу досліднику або інженеру зосередитись на ключових фрагментах сцени.

Алгоритм підтримує розширений набір метрик, зокрема MTF50, MTF10 та нормалізовану площу під кривою MTF. Це дозволяє отримати повнішу характеристику контрастної здатності оптичної системи у широкому діапазоні просторових частот.

Реалізований програмний модуль забезпечує повний цикл обробки: від завантаження зображення та вибору ROI до побудови графіків ESF, LSF і MTF.

Аналіз зображень, отриманих за допомогою камери Canon R8 з об'єктивом Canon RF 15-30 mm (f/8, 20 мм), демонструє високу якість оптичної системи. Побудовані графіки ESF та LSF вказують на мінімальний рівень розмиття. Значення MTF50 – 0,19 циклів/піксель, MTF10 – 0,30 циклів/піксель, площа під кривою MTF – 0,390. Відсутність коливань на графіку MTF свідчить про відсутність цифрових артефактів.

Система надає об'єктивний інструмент для оцінки різкості та деталізації зображень. Ручний вибір ROI підвищує точність та актуальність оцінки в прикладних дослідженнях, а також у виробничому контролі якості оптики та цифрових камер.

РОЗДІЛ 7

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИСТОРСІЇ ОБ'ЄКТИВА ТА КОРЕКЦІЇ СПОТВОРЕНЬ НА ЗОБРАЖЕННІ

Алгоритм та програмна реалізація призначені для визначення параметрів дисторсії об'єктива та корекції спотворень на зображенні за допомогою шахової дошки як калібрувального зразка – рисунок 7.1.

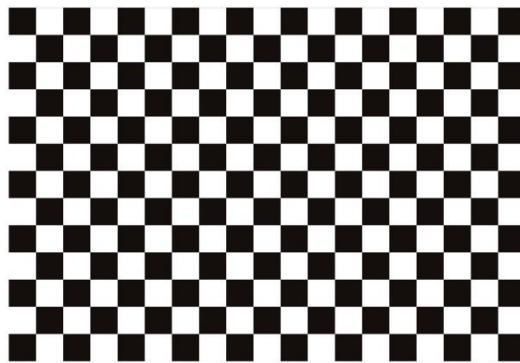


Рисунок 7.1 – Мішень – шахова дошка

Процес ґрунтується на методології калібрування камери, яка передбачає встановлення відповідності між координатами точок на об'єкті (шаховій дошці) та їх двовимірними проекціями на площині зображення. Завдяки цій відповідності можливо розрахувати внутрішні параметри камери, включаючи матрицю камери та коефіцієнти дисторсії.

7.1 Алгоритм визначення дисторсії

Алгоритм калібрування камери та корекції дисторсії складається з кількох послідовних етапів. На початковому етапі відбувається завантаження вхідного зображення та ініціалізація параметрів калібрувальної шахової дошки (рис. 7.2).

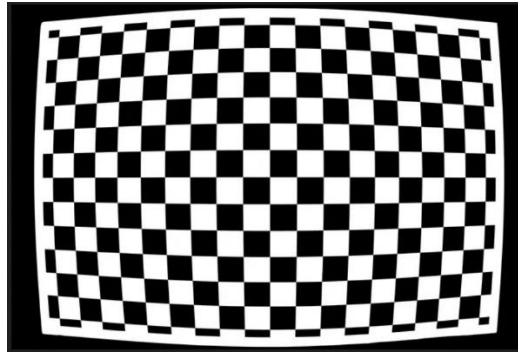


Рисунок 7.2 – Зображення, отримане об'єктивом Canon RF 15-30 mm (f/8, 15 мм), фокусна віддаль 15мм

Далі виконується виявлення кутів шахової дошки на завантаженому зображенні, що є критично важливим для встановлення відповідності між реальними та проєкованими точками (рис. 7.3).

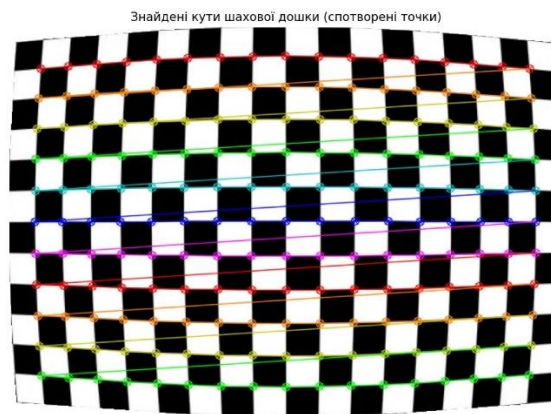


Рисунок 7.3 – Знайдені кути шахової дошки

Після цього відбувається підготовка тривимірних координат кутів шахової дошки у системі координат об'єкта. Ключовим етапом є калібрування камери, під час якого обчислюються матриця камери та коефіцієнти дисторсії на основі виявлених точок та їх реальних координат. Отримані параметри дисторсії використовуються для корекції вихідного зображення, усуваючи оптичні спотворення.

Завершальний етап включає візуалізацію оригінального та виправленого зображень, а також оцінку середньої помилки проєкції для кількісної оцінки точності калібрування (рис. 7.4).

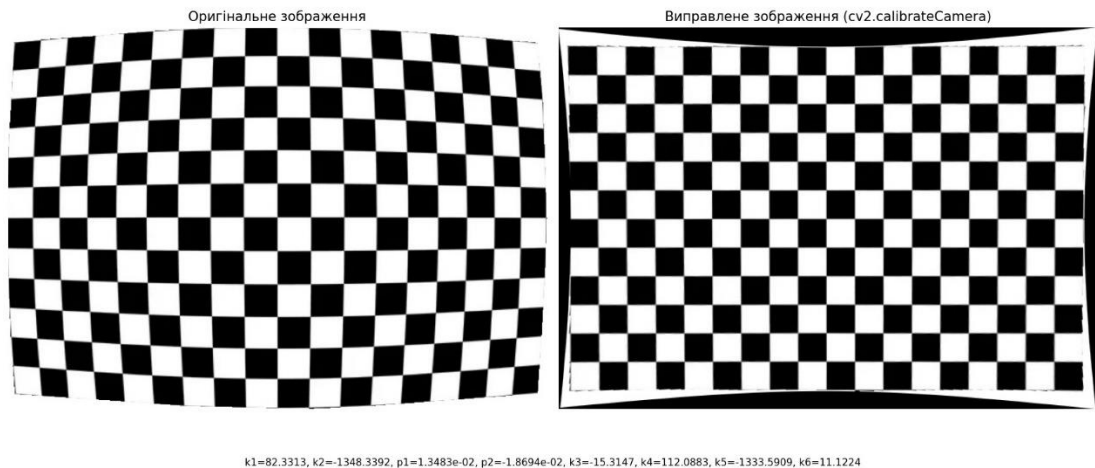


Рисунок 7.4 – Візуалізація оригінального та виправленого зображень

Вивід результатів калібрування в термінал наведено на рисунку 7.5.

```

--- Результати калібрування ---
Матриця камери (fx, fy, cx, cy):
[[5.23423295e+03 0.00000000e+00 3.67224994e+02]
 [0.00000000e+00 5.26411151e+03 2.60325693e+02]
 [0.00000000e+00 0.00000000e+00 1.00000000e+00]]
Коефіцієнти дисторсії (k1,k2,p1,p2,k3,k4,k5,k6,s1,s2,s3,s4,tx,ty):
[ 8.23313133e+01 -1.34833923e+03 1.34834307e-02 -1.86941536e-02
 -1.53147131e+01 1.12088336e+02 -1.33359092e+03 1.11224300e+01
 0.00000000e+00 0.00000000e+00 0.00000000e+00 0.00000000e+00
 0.00000000e+00 0.00000000e+00]
→ Виявлено подушкоподібну дисторсію (k1=82.3313).

```

Рисунок 7.5 – Вивід результатів в термінал

Вхідними даними для алгоритму є шлях до файлу зображення (наприклад, Canon rf 15-30_15 mm.tif), яке містить зображення калібрувальної шахової дошки. Додатково, необхідні параметри шахової дошки: кількість внутрішніх кутів по горизонталі (internal_corners_x) та по вертикалі (internal_corners_y), а

також розмір сторони одного квадрата на шаховій дошці (`square_size`), який може бути умовним (наприклад, 1,0) або відображати реальний фізичний розмір (наприклад, 25 мм).

7.2 Програмна реалізація

Реалізація використовує декілька ключових функцій бібліотеки OpenCV. Функція `cv2.imread()` відповідає за завантаження зображення за вказаним шляхом.

Перетворення колірного простору зображення у відтінки сірого здійснюється за допомогою `cv2.cvtColor()`.

Виявлення кутів шахової дошки на сірому зображенні виконується функцією `cv2.findChessboardCorners()`, яка повертає булеве значення, що вказує на успішність знаходження кутів, та масив координат знайдених кутів.

Для підвищення точності локалізації кутів застосовується функція `cv2.cornerSubPix()`, яка уточнює їхнє положення з субпіксельною точністю.

Візуалізація знайдених кутів на зображенні реалізується функцією `cv2.drawChessboardCorners()`.

Центральною функцією для калібрування камери є `cv2.calibrateCamera()`, яка приймає списки тривимірних координат об'єкта та двовимірних координат зображення, розмір зображення, а також початкові матрицю камери та коефіцієнти дисторсії, повертаючи обчислену матрицю камери, коефіцієнти дисторсії, вектори повороту та переміщення. Для отримання оптимальної матриці камери після калібрування використовується функція `cv2.getOptimalNewCameraMatrix()`.

Безпосереднє виправлення дисторсії на зображенні виконується функцією `cv2.undistort()`. Функція `cv2.projectPoints()` застосовується для проєціювання 3D точок об'єкта на площину зображення з використанням отриманих параметрів

калібрування, що дозволяє обчислити помилку репроекції за допомогою `cv2.norm()`.

Візуалізація результатів здійснюється з використанням бібліотеки `Matplotlib`, зокрема функцій `plt.imshow()` та `plt.title()`.

Програма використовує `cv2.imread()` для завантаження зображення. У разі успішного завантаження, зображення перетворюється у відтінки сірого за допомогою `cv2.cvtColor()`. Далі, `cv2.findChessboardCorners()` намагається виявити кути шахової дошки.

Якщо перша спроба з прапором `cv2.CALIB_CB_FAST_CHECK` не вдається, робиться друга спроба без цього прапора. Знайдені кути потім уточнюються функцією `cv2.cornerSubPix()`.

Для візуальної перевірки `cv2.drawChessboardCorners()` наносить виявлені кути на копію оригінального зображення, яка потім відображається за допомогою `Matplotlib`.

Тривимірні координати точок об'єкта (`objp`) генеруються програмно. Списки об'єктних та зображуваних точок передаються у `cv2.calibrateCamera()` разом з розмірами зображення.

Після успішного калібрування, `cv2.getOptimalNewCameraMatrix()` обчислює оптимальну матрицю камери для виправлення дисторсії, яка, разом з отриманими коефіцієнтами дисторсії, використовується функцією `cv2.undistort()` для створення виправленого зображення. Оригінальне та виправлене зображення відображаються паралельно за допомогою `Matplotlib`.

Нарешті, для оцінки точності калібрування використовується `cv2.projectPoints()`, щоб проектувати об'єктні точки на зображення, а `cv2.norm()` обчислює середню помилку між проєктованими та фактичними (спостережуваними) точками.

При зміні фокусної віддалі в об'єктиві `Canon RF 15-30 mm F4,5-6,3 IS STM` на 15 мм, 20 мм, 24 мм та 30 мм виявлено подушкоподібну дисторсію. У всіх випадках значення коефіцієнта k_1 є позитивним і суттєвим. Це вказує на

характер спотворення, при якому прямі лінії викривлюються назовні від центру зображення. Значення k_1 для 15 мм – 82,33, для 20 мм – 10,02, для 24 мм – 151,31, для 30 мм – 123,45.

Візуалізація оригінального та виправленого зображень, виконаних об'єктивом Canon RF 15-30 mm з фокусною віддаллю 15, 20, 24 і 30 мм наведена в додатку В.

Точність калібрування оцінюється за середньою помилкою репроекції. У всіх випадках ця помилка становить від 0,0100 до 0,0111 пікселів. Це свідчить про стабільний і точний результат внутрішньої оптимізації параметрів.

Внутрішні параметри камери демонструють очікуване зростання фокусної довжини. Для фокусної 15 мм значення f_x становить приблизно 5234, тоді як для 30 мм – 10593. Це підтверджує масштабування оптичної системи зі зміною фокусної відстані. Центр проєкції камери залишається стабільним і наближеним до центру зображення в усіх випадках.

У разі 15 мм виявлено дуже сильну дисторсію. Значення k_1 велике, а k_2 має високе від'ємне значення. Це створює складний профіль спотворення, можливе також зміщення центру дисторсії. Зображення потребує точної та повної геометричної корекції.

Для 20 мм спотворення менш виражене. Значення k_1 на порядок нижче, ніж для 15 мм і 24 мм. Це свідчить про спрощений характер викривлень, які легко піддаються математичному вирівнюванню. Таке фокусне значення є помірним за ступенем дисторсії.

Фокусна відстань 24 мм має найвище значення k_1 . Додатково велике значення k_2 посилює ефект спотворення по периферії зображення. Така картина є нетиповою для цього діапазону і, ймовірно, пов'язана з оптичними особливостями конструкції об'єктива.

На 30 мм спостерігається зменшення значення k_1 порівняно з 24 мм, але дисторсія залишається значною. Високе значення k_2 формує спотворення в

крайових ділянках зображення. Це вимагає застосування розширеної моделі дисторсії з корекцією по полю кадру.

Отримані результати дозволяють чітко відокремити оптичну поведінку кожної фокусної відстані. Усі калібрування продемонстрували високу точність і дозволяють ефективно компенсувати дисторсію при подальшій обробці зображень.

Програмний код та параметри дисторсії об'єктива та корекції спотворень на зображенні представлені в додатках Г, Д відповідно.

Висновок до розділу 7

Розроблено алгоритм та програмне рішення для визначення параметрів дисторсії на основі зображень шахової дошки. Метод дозволяє точно встановити внутрішні параметри камери й оцінити характер оптичних спотворень за різних фокусних відстаней.

У процесі калібрування визначено значення фокусної довжини, координати центру проєкції, а також коефіцієнти дисторсії. Для об'єктива Canon RF 15-30 mm зафіксовано стабільно подушкоподібний тип спотворень із позитивним значенням коефіцієнта k_1 на всіх фокусних. Найсильніші дисторсії виявлені на 15 мм та 24мм. На 20 мм спотворення мають найменший рівень і добре піддаються корекції. Для 30 мм характерне зниження k_1 , однак зберігається потреба в компенсації крайових деформацій.

Середня помилка репроекції не перевищує 0,0111 пікселів, що підтверджує високу точність отриманих параметрів. Візуалізація результатів до і після виправлення спотворень демонструє ефективність методу та доцільність застосування індивідуальних параметрів корекції для кожної фокусної відстані. Отримані результати можуть бути використані для точного калібрування камер у задачах комп'ютерного зору, фотограмметрії або 3D-реконструкції.

РОЗДІЛ 8

АВТОМАТИЗОВАНЕ ВИМІРЮВАННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕСТОВОЇ МІРИ USAF 1951

Скрипт реалізує алгоритм виявлення елементів міри, групування їх у триплети та розрахунку відповідної роздільної здатності для кожного визначеного регіону інтересу (ROI).

Вхідними даними для системи є зображення у форматі .tif, що містить тестову міру USAF 1951. Зображення представлено у градаціях сірого або може бути конвертовано до такого формату для обробки.

8.1 Алгоритм вимірювання роздільної здатності

Алгоритм складається з кількох ключових етапів: ініціалізації параметрів, інтерактивного вибору регіонів інтересу (ROI), попередньої обробки зображення, виявлення та фільтрації контурів, ідентифікації триплетів, розрахунку роздільної здатності та візуалізації результатів.

На етапі ініціалізації параметрів встановлюються константи, що визначають порогові значення для адаптивної бінаризації, розмірних характеристик контурів (мінімальна / максимальна площа, мінімальне співвідношення сторін) та критерії для групування елементів у триплети (максимальна відстань між елементами, стандартне відхилення розмірів). Також визначаються номінальні параметри для калібрування роздільної здатності.

Процес інтерактивного вибору ROI дозволяє користувачеві вручну визначити 12 прямокутних областей на зображенні, які відповідають блокам тестової міри USAF 1951. Вибір здійснюється за допомогою миші: користувач послідовно обирає верхній лівий та нижній правий кути кожного блоку. Програма відображає обрані ROI на копії оригінального зображення, позначаючи їх прямокутниками та нумеруючи.

Після вибору ROI виконується попередня обробка зображення. Оригінальне зображення у градаціях сірого спочатку згладжується за допомогою Гауссового розмиття для зменшення шуму. Далі застосовується адаптивна порогова бінаризація, яка перетворює зображення на бінарне, що дозволяє виділити об'єкти (смуги міри) на тлі. Адаптивний поріг обчислюється локально для кожного пікселя, що робить метод стійким до нерівномірного освітлення.

На етапі виявлення та фільтрації контурів на бінаризованому зображенні знаходяться всі зовнішні контури. Кожен знайдений контур аналізується за його обмежувальним прямокутником для обчислення площі та співвідношення сторін. Контури, які не відповідають заданим критеріям (мінімальна/максимальна площа, мінімальне співвідношення сторін), відсіюються. Залишені контури розглядаються як потенційні елементи.

Функція ідентифікації триплетів групує відфільтровані потенційні елементи у триплети. Триплетом вважається набір з трьох паралельних смуг, що мають близькі розміри та розташовані на невеликій відстані одна від одної. Цей процес виконується як для вертикальних, так і для горизонтальних смуг шляхом сортування елементів за відповідною координатою та послідовного групування. Для кожної групи перевіряється стандартне відхилення розмірів елементів, щоб забезпечити однорідність триплета.

Етап розрахунку роздільної здатності виконується для кожного обраного ROI. Для кожного ROI фільтруються потенційні елементи, що знаходяться в межах цієї області. Потім для цих елементів ідентифікуються триплети. Серед усіх знайдених триплетів вибирається триплет з найменшими смугами, оскільки саме він визначає граничну роздільну здатність у цьому блоці. Для першого обраного ROI (верхній лівий блок) проводиться калібрування: ширина смуг найбільшого триплета в пікселях співвідноситься з номінальною шириною смуг цього триплета в міліметрах (виходячи з визначених номінальних значень групи та елемента USAF), що дозволяє обчислити глобальний коефіцієнт перетворення «пікселів на міліметр». Використовуючи цей коефіцієнт, ширина смуг

найменшого триплета в кожному ROI перетворюється на міліметри, і на основі цієї величини розраховується роздільна здатність в лініях на міліметр (lp/mm). Результат перетворюється назад у формат «група-елемент» за стандартом USAF 1951.

На етапі візуалізації результатів на оригінальному зображенні відображаються всі виявлені потенційні елементи, а також межі обраних ROI з відповідними підписами. Додатково будується теплова карта, яка наочно демонструє розподіл розрахованої роздільної здатності по всіх 12 блоках ROI.

8.2 Програмна реалізація

Програмна реалізація використовує бібліотеки `opencv-python` для обробки зображень, `numpy` для числових обчислень та `matplotlib` для візуалізації.

Функція `calc_resolution(group, element)` приймає номери групи та елемента за стандартом USAF 1951 і повертає відповідну роздільну здатність у лініях на міліметр (lp/mm).

Зворотне перетворення дробового індексу елемента, отриманого з логарифмічних обчислень, назад у цілочисельні номери групи та елемента USAF здійснює функція `element_index_to_group_element(idx)`. Це дозволяє інтерпретувати розраховану роздільну здатність у стандартних позначеннях.

Функція `select_roi(event, x, y, flags, param)` дозволяє користувачеві інтерактивно вибрати прямокутні регіони інтересу на відображуваному зображенні. Вона дозволяє користувачеві інтерактивно вибрати прямокутні регіони інтересу на відображуваному зображенні. Функція відстежує натискання, переміщення та відпускання лівої кнопки миші для визначення координат ROI. Вона також масштабує координати миші до оригінального розміру зображення та оновлює візуалізацію, відображаючи поточний та вже вибрані ROI.

Функція `find_triplets_by_axis(elements_list, axis="y")` призначена для пошуку триплетів серед списку потенційних елементів. Вона приймає список елементів (представлених їхніми обмежувальними прямокутниками (x, y, w, h)) та вісь, вздовж якої шукаються триплети ("y" для вертикальних смуг/горизонтального розташування, "x" для горизонтальних смуг/вертикального розташування). Функція сортує елементи за відповідною координатою та ітерує по ним, групуючи сусідні елементи, що задовольняють критеріям близькості розташування та схожості розмірів (вимірюється за допомогою стандартного відхилення).

Програма починається із завантаження зображення та ініціалізації глобальних змінних для інтерактивного вибору ROI.

Зображення зчитується у градаціях сірого. Створюється кольорова копія для візуалізації ROI – рисунок 8.1.

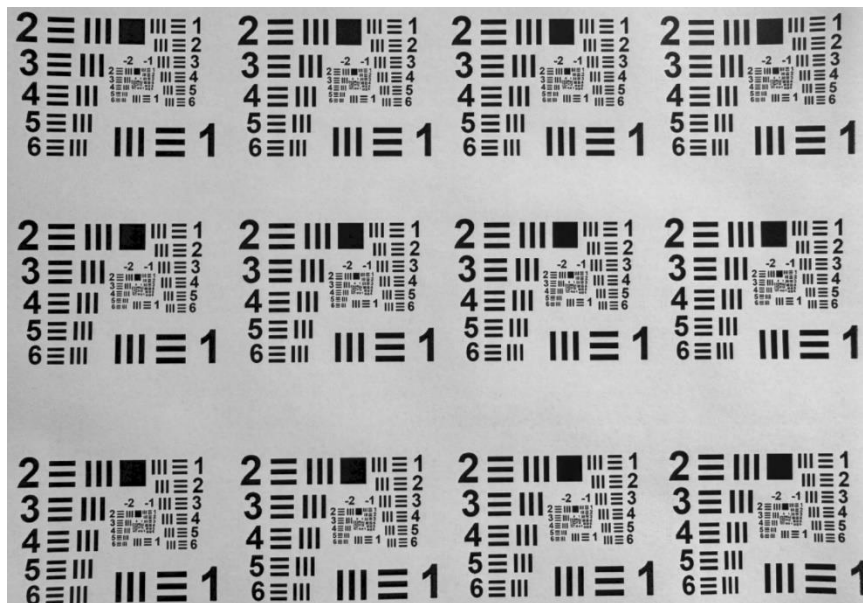


Рисунок 8.1 – Зображення міри USAF 1951

Налаштування вікна для ROI полягає у створенні вікна OpenCV та призначенні функції `select_roi` як обробника подій миші для цього вікна. Розмір вікна адаптується до розміру зображення, щоб уникнути відображення занадто великого зображення.

Головний цикл програми очікує, доки користувач не обере 12 ROI, викликаючи функцію `select_roi` при кожній події миші. Обрані ROI зберігаються у списку `selected_rois`. Після вибору всіх ROI вікно закривається – рисунок 8.2.



Рисунок 8.2 – Інтерактивний вибір ROI

До всього оригінального зображення застосовуються `cv2.GaussianBlur` та `cv2.adaptiveThreshold` для підготовки до виявлення контурів.

Функція `cv2.findContours` використовується для знаходження всіх контурів на бінаризованому зображенні. Кожен контур аналізується, і лише ті, що відповідають параметрам `MIN_AREA`, `MAX_AREA` та `MIN_ASPECT_RATIO`, додаються до списку `all_potential_elements`.

Програма ітерує по всіх 12 обраних ROI.

Для кожного ROI відфільтровуються елементи зі списку `all_potential_elements`, які повністю або частково знаходяться в межах поточного ROI.

Викликається функція `find_triplets_by_axis` двічі: один раз для пошуку триплетів з вертикальними смугами (`axis="y"`) та один раз для триплетів з горизонтальними смугами (`axis="x"`). Результати об'єднуються.

Серед знайдених триплетів визначається найбільший (для калібрування, якщо це перший ROI) та найменший (для розрахунку роздільної здатності).

Якщо це перший ROI (блок (0,0)), виконується калібрування `global_pixels_per_mm`: обчислюється номінальна ширина смуги в міліметрах для відомої номінальної роздільної здатності, а потім співвідноситься з середньою шириною смуг найбільшого виявленого триплета в пікселях, щоб отримати коефіцієнт перетворення «пікселів на міліметр».

Для всіх ROI, використовуючи `global_pixels_per_mm`, обчислюється фактична ширина смуг найменшого виявленого триплета в міліметрах. На основі цієї ширини розраховується роздільна здатність у `lp/mm`.

Отримана роздільна здатність конвертується назад у формат «група-елемент» за допомогою `element_index_to_group_element`.

Результати для кожного блоку зберігаються у списку `results_data` та у матриці `resolution_matrix`.

На консоль виводяться розраховані значення групи, елемента та роздільної здатності для кожного блоку – рисунок 8.3.

```
Знайдено контурів: 6786
Відфільтровано потенційних елементів (смуг): 1154
ГЛОБАЛЬНЕ КАЛІБРУВАННЯ: pixels_per_mm встановлено на 19.33 на основі блоку (1,1).

--- Результати вимірювання роздільної здатності ---
Блок Ряд 1, Стовпець 1: Group 1, Element 5, Resolution 3.22 lp/mm
Блок Ряд 1, Стовпець 2: Group 1, Element 5, Resolution 3.22 lp/mm
Блок Ряд 1, Стовпець 3: Group 1, Element 5, Resolution 3.22 lp/mm
Блок Ряд 1, Стовпець 4: Group 1, Element 5, Resolution 3.22 lp/mm
Блок Ряд 2, Стовпець 1: Group 1, Element 5, Resolution 3.22 lp/mm
Блок Ряд 2, Стовпець 2: Group 1, Element 6, Resolution 3.62 lp/mm
Блок Ряд 2, Стовпець 3: Group 1, Element 5, Resolution 3.22 lp/mm
Блок Ряд 2, Стовпець 4: Group 1, Element 6, Resolution 3.62 lp/mm
Блок Ряд 3, Стовпець 1: Group 1, Element 6, Resolution 3.62 lp/mm
Блок Ряд 3, Стовпець 2: Group 1, Element 5, Resolution 3.22 lp/mm
Блок Ряд 3, Стовпець 3: Group 1, Element 5, Resolution 3.22 lp/mm
Блок Ряд 3, Стовпець 4: Group 1, Element 5, Resolution 3.22 lp/mm
```

Рисунок 8.3 – Розраховані значення групи, елемента та роздільної здатності для кожного блоку

На копії оригінального зображення зеленим кольором позначаються всі потенційні елементи, синім – обрані ROI з підписами. Це зображення відображається у вікні OpenCV – рисунок 8.4.

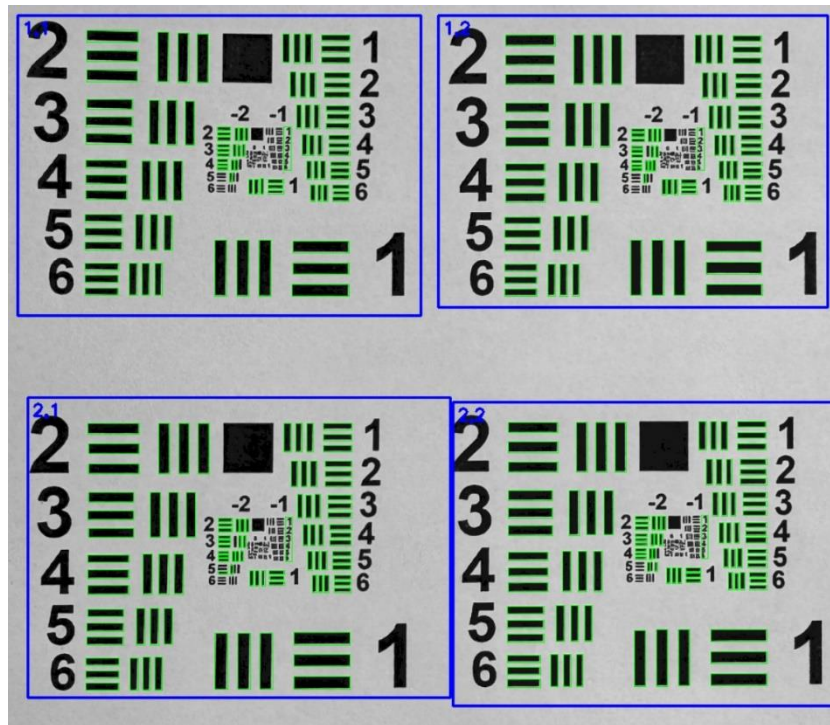


Рисунок 8.4 – Фрагмент оригінального зображення. Зеленим кольором позначаються всі потенційні елементи

За допомогою matplotlib будується теплова карта матриці `resolution_matrix`, що дозволяє візуально оцінити розподіл роздільної здатності по тестовій мірі. На тепловій карті чисельні значення роздільної здатності відображаються безпосередньо на кожній клітинці – рисунок 8.5.

Отримані результати відображають оцінку роздільної здатності зображення, зафіксованого камерою Canon R8 з об'єктивом Canon 15-30 мм на фокусній віддалі 20 мм.

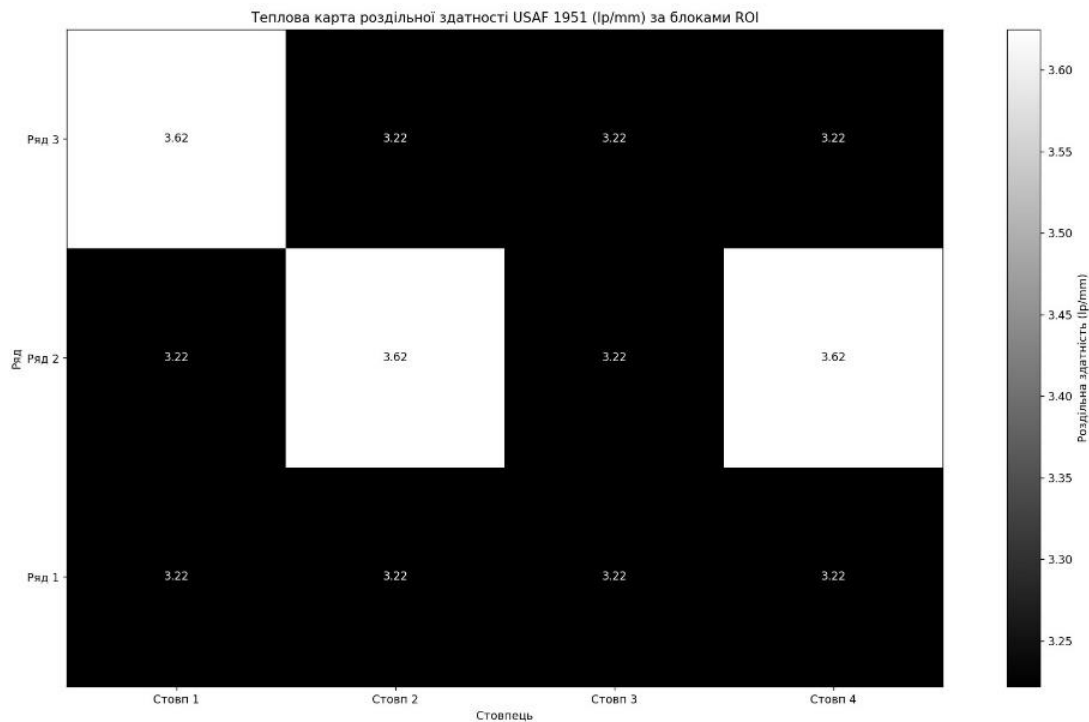


Рисунок 8.5 – Теплова карта з чисельними значеннями роздільної здатності

На етапі попередньої обробки зображення було виявлено 6786 контурів. Подальша фільтрація за площею та геометричними параметрами зменшила кількість релевантних елементів до 1154, що вказує на ефективне відсікання несуттєвих контурів. Глобальне калібрування визначило співвідношення 19,33 пікселя на міліметр, зафіксоване в блоці (1,1). Це значення використовувалось для перетворення піксельних даних у метричні одиниці.

Основна частина зображення продемонструвала роздільну здатність, що відповідає Group 1, Element 5, еквівалентно 3,22 lp/mm. Цей показник зафіксовано в 9 з 12 досліджених блоків і він визначає типовий рівень деталізації системи у більшості зони кадру. У трьох окремих блоках спостерігалось покращення до Group 1, Element 6, що становить 3,62 lp/mm.

Результати свідчать про відносну однорідність роздільної здатності по всьому кадру. Максимальна зафіксована різниця становить лише 0,4 lp/mm. Відсутність значних відхилень підтверджує стабільну якість передачі деталей як з боку об'єктива, так і камери в межах проведеного тестування.

Загалом система Canon R8 з об'єктивом Canon 15-30 мм забезпечує рівномірну та передбачувану роздільну здатність, що визначається значеннями 3,22 lp/mm з окремими локальними покращеннями до 3,62 lp/mm.

Висновок до розділу 8

Алгоритм та програмна реалізація реалізує автоматизоване вимірювання роздільної здатності зображень за допомогою тестової міри USAF 1951. Скрипт виявляє та групує елементи міри в триплети, а потім розраховує відповідну роздільну здатність для кожного визначеного регіону інтересу (ROI).

Алгоритм охоплює наступні етапи: ініціалізацію параметрів, інтерактивний вибір ROI, попередню обробку зображення (Гауссове розмиття, адаптивна бінаризація), виявлення та фільтрацію контурів, ідентифікацію триплетів, розрахунок роздільної здатності та візуалізацію результатів. Інтерактивний вибір 12 ROI дозволяє гнучко адаптувати аналіз до конкретних блоків міри на зображенні. Калібрування «пікселів на міліметр», проведене на основі першого ROI, забезпечує точність подальших метричних розрахунків.

Проведений аналіз зображення, отриманого камерою Canon R8 з об'єктивом Canon 15-30 mm, показав роздільну здатність Group 1, Element 5 (3,22 lp/mm) для більшості досліджених блоків. У трьох окремих областях було зафіксовано незначне покращення до Group 1, Element 6 (3,62 lp/mm). Відносна однорідність результатів по всьому полю зображення (максимальна різниця становить 0,4 lp/mm) свідчить про стабільну якість оптичного відтворення системи «камера-об'єктив» у межах проведеного тестування.

Таким чином, розроблений інструмент можна використовувати для оцінки роздільної здатності зображень, надаючи аналіз за різними регіонами кадру та візуалізуючи отримані дані у зручному форматі.

РОЗДІЛ 9

АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ОЦІНКИ ЛОКАЛЬНОЇ РІЗКОСТІ ЗОБРАЖЕННЯ

9.1 Опис алгоритму оцінки локальної різкості

Алгоритм функціонує шляхом послідовного застосування операцій обробки зображень для визначення локальних варіацій інтенсивності, які корелюють з різкістю. Він включає два основні підходи до обчислення карт різкості: на основі оператора Собеля та на основі оператора Лапласіана.

Оператор Собеля використовує два ядра для обчислення горизонтального та вертикального градієнтів зображення. Він підкреслює області з різкими змінами яскравості, які відповідають краям об'єктів. Результатом є карта градієнтів, де кожне значення показує інтенсивність зміни в конкретній точці.

Оператор Лапласіана базується на другій похідній яскравості та виявляє місця швидких перепадів інтенсивності. Він є ізотропним, тобто реагує однаково на краї у всіх напрямках.

Початковий етап для обох методів полягає у конвертації вхідного кольорового зображення у відтінки сірого, що спрощує подальші обчислення. Для методу, що базується на операторі Собеля, обчислюються горизонтальні та вертикальні градієнти зображення за допомогою операторів Собеля. Це дозволяє визначити величину градієнта для кожного пікселя, що є індикатором присутності країв та текстур. Отримана карта градієнтів потім використовується для розрахунку локальної дисперсії в межах визначеного вікна. Ця дисперсія слугує показником різкості. Карта різкості нормалізується до діапазону від 0 до 100 %.

Альтернативний метод використовує оператор Лапласіана для безпосереднього виявлення перепадів інтенсивності, що також відображають різкість. Абсолютні значення відгуку Лапласіана обробляються аналогічним

чином, шляхом обчислення локальної дисперсії в заданому вікні, яка потім нормалізується.

Після отримання карт різкості, алгоритм виконує аналіз розподілу різкості. Це включає обчислення середньої різкості в центральній області зображення, на його краях, а також оцінку асиметрії різкості між лівою та правою частинами. Додатково, зображення поділяється на сітку, і для кожного сектора обчислюється середня різкість, що дозволяє отримати детальну картину просторового розподілу різкості. Результати аналізу візуалізуються за допомогою гістограми градієнтів та карт різкості, які відображаються разом з оригінальним зображенням для порівняння. Візуалізація сітки різкості також надає числові значення середньої різкості для кожного сектора.

9.2 Програмна реалізація алгоритму

Програмна реалізація включає декілька функціональних модулів, що взаємодіють для виконання описаного алгоритму.

Основним вхідним даним є шлях до файлу зображення. Це зображення завантажується за допомогою бібліотеки OpenCV і представляється у вигляді багатовимірному масиву NumPy. Додатковим параметром є розмір вікна, який використовується для обчислення локальної дисперсії.

Функція `compute_sharpness_map(image, window_size)` приймає вхідне зображення та розмір вікна. Вона перетворює зображення в градації сірого, застосовує оператор Собеля для обчислення градієнтів по осях X та Y, а потім визначає величину градієнта. Після цього обчислюється локальна дисперсія величини градієнта в межах вікна визначеного розміру за допомогою фільтрації зображення ядром, що представляє собою усереднюючий фільтр. Отримана карта дисперсії нормалізується до діапазону від 0 до 100 %. Функція повертає карту різкості та величину градієнта.

Функція `compute_laplacian_sharpness_map(image, window_size)` перетворює зображення в градації сірого і застосовує оператор Лапласіана. Обчислюється абсолютне значення відгуку Лапласіана, після чого розраховується його локальна дисперсія в межах вікна, аналогічно попередній функції. Отримана карта різкості також нормалізується до діапазону від 0 до 100 %. Функція повертає карту різкості.

За допомогою функції `plot_gradient_histogram(gradient_magnitude)` генерується та відображається гістограму розподілу величин градієнта, надаючи візуальне представлення про загальний рівень різкості зображення.

За побудову карти різкості відповідає `analyze_sharpness_distribution(sharpness_map)`. Вона сегментує карту на центральну область та області країв, а потім обчислює середню різкість для кожної з цих областей. Також розраховується асиметрія різкості між лівою та правою частинами зображення. Функція повертає ці три показники.

Поділ на сектори і обчислення середнього значення різкості, це завдання функції `analyze_sharpness_by_grid(sharpness_map, grid_size)`. Результатом є матриця середніх значень різкості для кожного сектора.

Функція `isualize_sharpness_grid(sharpness_values, title)` приймає матрицю значень різкості для сітки. Вона візуалізує ці значення у вигляді теплової карти з числовими позначеннями для кожного сектора, демонструючи просторовий розподіл різкості.

Відображення оригінального зображення поряд з візуалізацією карти різкості у вигляді теплової карти завдання функції `visualize_sharpness(image, sharpness_map, title, scale)`.

Основна функція `main(image_path, window_size)`. Вона координує виконання всіх інших функцій. Спочатку вона завантажує зображення – рисунок 9.1.



Рисунок 9.1 – Оригінальне зображення з Canon R8 та Canon 15-30 mm на 20 мм,
f/8

Потім викликаються `compute_sharpness_map` та `compute_laplacian_sharpness_map` для отримання двох різних карт різкості – рисунок 9.2 і рисунок 9.3.

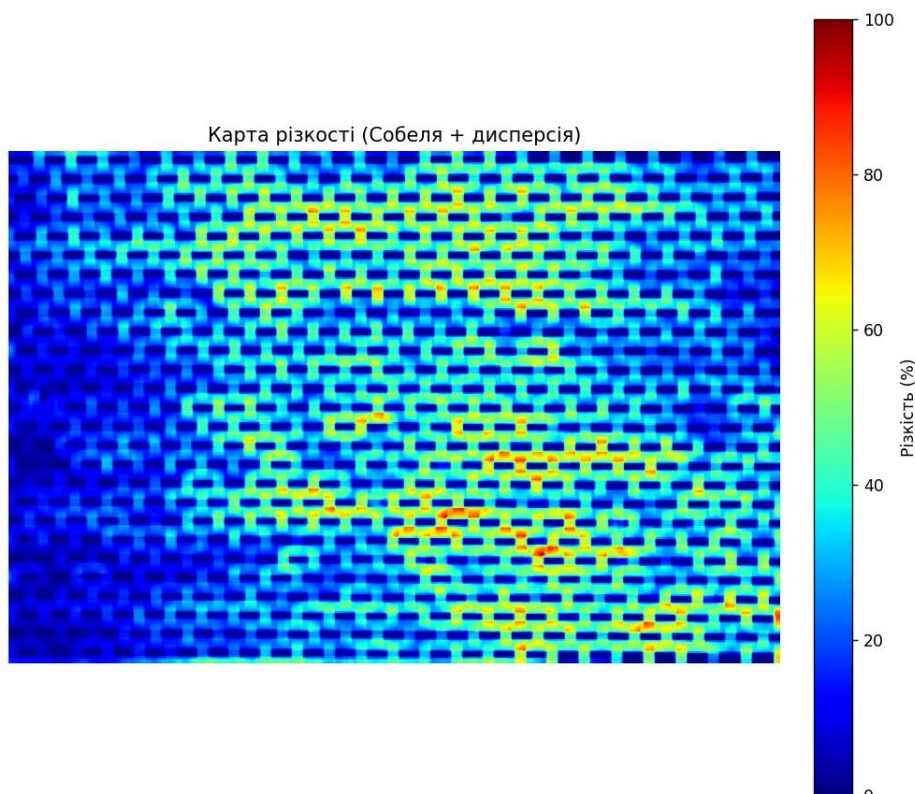


Рисунок 9.2 – Карта різкості за оператором Собеля

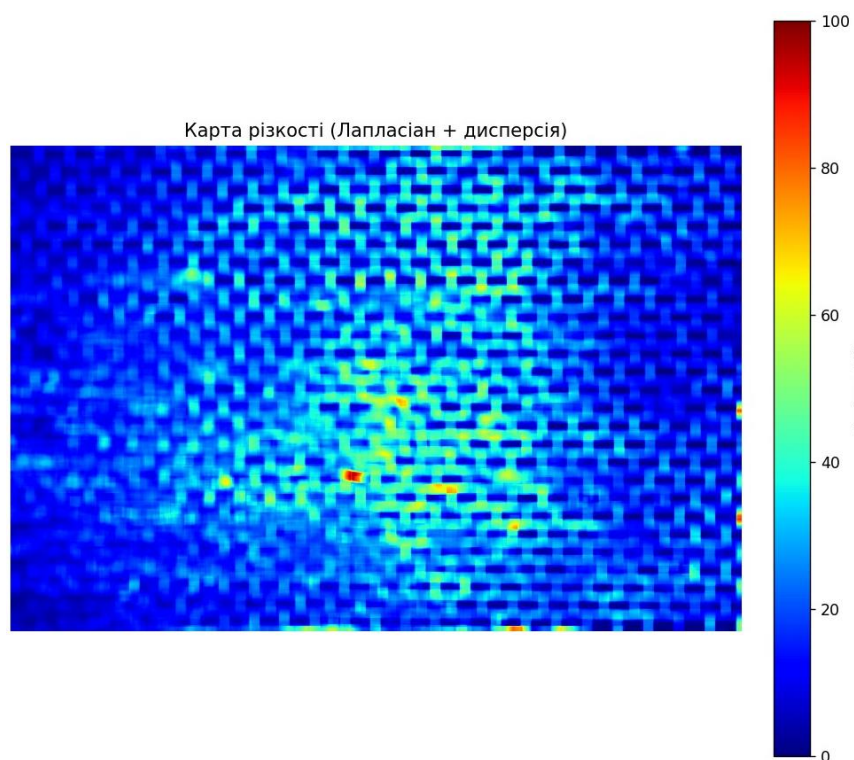


Рисунок 9.3 – Карта різкості за оператором Лапласіана

Отримана з `compute_sharpness_map` величина градієнта передається до `plot_gradient_histogram` для візуалізації – рисунок 9.4.

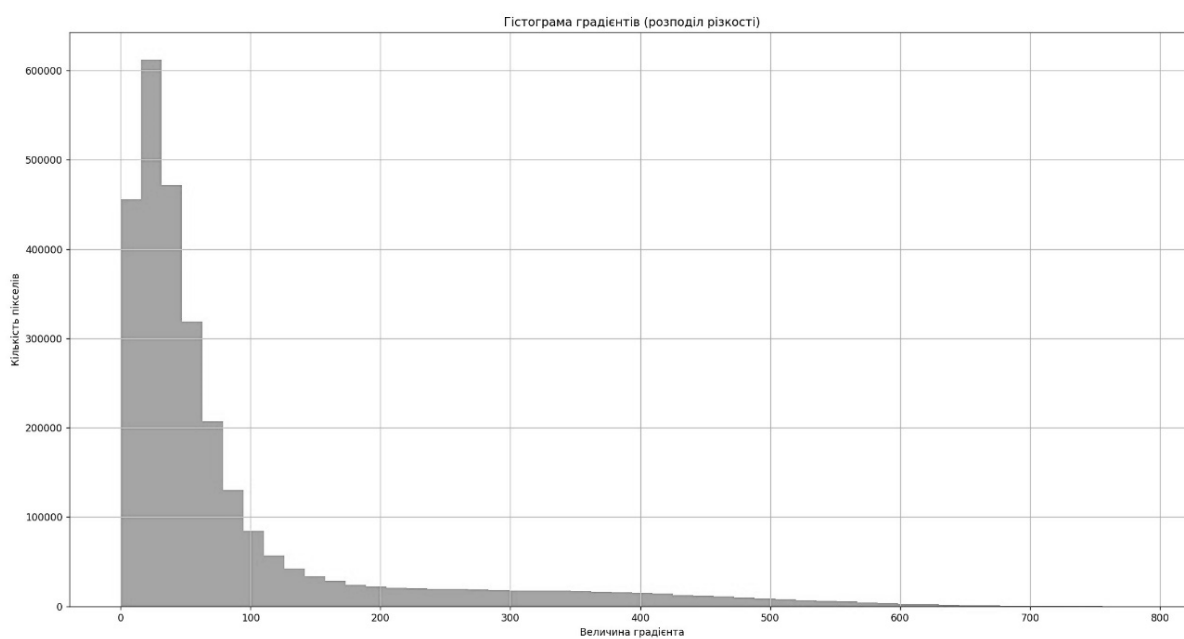


Рисунок 9.4 – Гістограма розподілу різкості

Обидві карти різкості, або лише одна з них (в даному випадку карта Собеля), використовуються як вхідні дані для `analyze_sharpness_distribution` та `analyze_sharpness_by_grid`, що дозволяє провести статистичний та просторовий аналіз. Результати аналізу по сітці передаються до `visualize_sharpness_grid` для їх візуалізації. Зрештою, `visualize_sharpness` викликається двічі, щоб відобразити оригінальне зображення разом з обома картами різкості.

Результати вимірювання різкості зображення, знятого на камеру Canon R8 з об'єктивом Canon 15-30 mm на фокусній відстані 20 mm та діафрагмі f/8 наведено на рисунку 9.5.

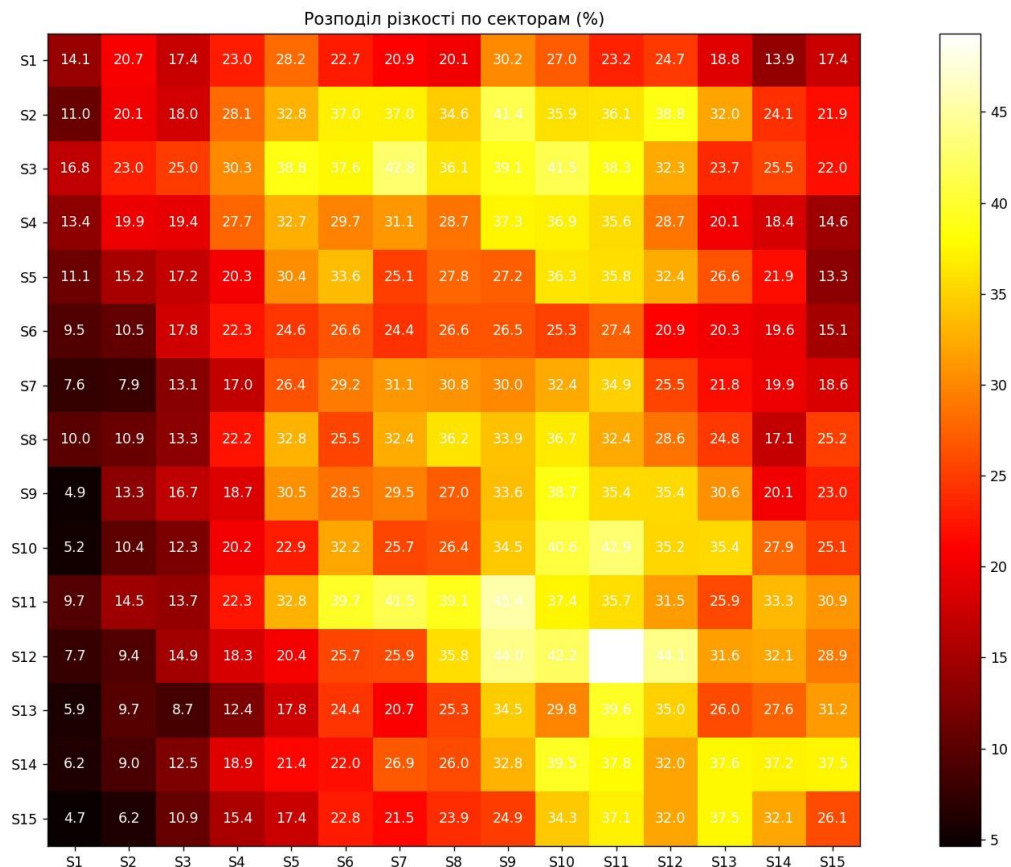


Рисунок 9.5 – Карта різкості по секторах 15X15

Проаналізуємо загальну оцінку різкості.

Різкість у центрі: 32,44 % – це показник різкості центральної частини зображення. Значення у 32,44 % не є високим. Це може вказувати умови зйомки (наприклад, мікрозмаз від рухів).

Різкість на краях: 23,04 % – різкість на краях нижча, ніж у центрі. Це типова поведінка для багатьох об'єктів, особливо ширококутних зумів. Однак різниця між центром і краями досить відчутна (близько 9 %).

Асиметрія різкості: 11,93 % – це значення вказує на помітну різницю в різкості між лівим і правим краями зображення. Асиметрія спричинена тим, що об'єкт зйомки не був ідеально паралельний сенсору.

Виконаємо детальний аналіз різкості по секторах.

Аналіз «гарячих» зон різкості показує, що найвищі значення різкості, які перевищують 40 %, зосереджені у кількох секторах. Зокрема, сектори з координатами [11, 12] мають значення 49,32 %, сектор [9, 11] – 45,4 %, [9, 12] і [12, 12] – 44,1 %. Ці сектори розташовані ближче до центру зображення, але не безпосередньо в його геометричному центрі; вони демонструють деяке зміщення. Той факт, що максимальні значення різкості знаходяться у діапазоні від 40 % до 50 %, свідчить про те, що загальна різкість зображення не є винятково високою.

Розгляд «холодних» зон різкості виявляє, що найнижчі показники, менші за 10 %, сконцентровані у кутах та на краях зображення. Так, верхній лівий кут ([0, 0]) має різкість 14,11 %, а нижній лівий кут ([14, 0]) демонструє дуже низьке значення – 4,65 %. На лівому краї зображення також спостерігаються низькі показники: [6, 0] – 7,56 %, [6, 1] – 7,93 %, [7, 0] – 9,97 % та [8, 0] – 4,88 %.

Ці дані підтверджують очікуване зниження різкості до країв зображення. Однак, надзвичайно низькі значення у лівих кутах, які становлять 4,65 % та 4,88 %, є критичними і значно гіршими порівняно з протилежними кутами. Наприклад, нижній правий кут ([14, 14]) має різкість 26,06 %, а верхній правий кут ([0, 14]) – 17,42 %.

Лістинг скрипта побудови карти різкості представлено в додатку Е.

Висновок до розділу 9

Представлено алгоритм та програмна реалізація оцінки локальної різкості зображення, який базується на двох основних підходах: з використанням оператора Собеля та оператора Лапласіана.

Вибір цих операторів дозволяє врахувати як напрямлені зміни інтенсивності (градієнти), так і ізотропні перепади яскравості, що забезпечує гнучкість та точність оцінки. Обчислення локальної дисперсії в межах рухомого вікна дає змогу кількісно охарактеризувати різкість у різних ділянках зображення.

Програмна реалізація побудована як модульна структура з чітким розподілом функцій, що спрощує підтримку та адаптацію алгоритму. Засоби візуалізації, включаючи гістограми градієнтів та теплові карти, надають наочне представлення просторового розподілу різкості. Результати оцінки дозволяють виявляти не лише загальну якість зображення, а й його просторові недосконалості, що є корисним для аналізу оптики, фокусування або умов зйомки.

Застосування цієї реалізації до тестового зображення, знятого на камеру Canon R8 з об'єктивом Canon 15-30 mm на фокусній відстані 20 mm та діафрагмі f/8, показало значні відмінності у розподілі різкості.

Аналіз отриманих даних виявив загальну різкість зображення, з показником у центрі близько 32,44 % та зниженням до 23,04 % на краях. Найбільш суттєвим результатом є помітна асиметрія різкості у 11,93 %, що виражається у значно нижчих показниках різкості на лівому боці зображення, особливо в кутах. Наприклад, різкість у нижньому лівому куті становить лише 4,65 %, тоді як у відповідному правому куті – 26,06 %. Ця асиметрія свідчить про нерівномірний розподіл різкості по кадру, що пояснюється тим, що об'єкт зйомки не був ідеально паралельний сенсору.

ВИСНОВКИ

Головною метою роботи було створення автоматизованої системи аналізу якості оптичних систем із фокусом на комплексну обробку зображень, оцінку метрик та виправлення спотворень.

Для досягнення цієї мети проведено вивчення теоретичних аспектів оптичної якості, включаючи аналіз ключових факторів впливу, а саме проектування, виробництва, експлуатаційного середовища та людського чинника. Показано важливість міждисциплінарного підходу, що охоплює метрологію, цифрову обробку та комп'ютерний зір.

Розглянуто і проаналізовано основні метрики якості зображення: функція передачі модуляції (MTF), роздільна здатність, контраст, аберації. Проведено огляд традиційних методів оцінки (USAF 1951, ISO 12233) та сучасних алгоритмів, зокрема MTF50P, які враховують цифрову обробку та людське сприйняття. Розглянуто методи оцінки цих характеристик у контексті сучасних вимог до оптичних систем.

Класифіковано типи оптичних тест-мішеней і методи вимірювання: від мішеней Ronchi та зірчастих структур до ISO-стандартів для MTF, роздільної здатності й спотворень. Визначено їх переваги та обмеження у практичному застосуванні. Також проаналізовано міжнародні стандарти ISO, які регламентують методи вимірювань оптичних параметрів. Ці стандарти забезпечують об'єктивність та повторюваність результатів тестування.

Розроблено експериментальну установку на базі камери Canon EOS R8 з об'єктивом Canon RF 15-30 mm F4,5-6,3 IS STM. Використання RAW-формату забезпечило повноцінний доступ до первинних даних сенсора, дозволяючи провести точний аналіз MTF, роздільної здатності та спотворень.

Розроблено алгоритм і виконано програмну реалізацію системи оцінки якості оптичних систем за допомогою аналізу модуляційної передавальної функції (MTF) методом похилого краю з побудовою теплових карт та

виявленням зниження якості у периферійних зонах. Він виявляє тестові мішені на зображенні, аналізує їхні межі та обчислює ключові показники, такі як MTF50, MTF10 і контраст.

Розроблено алгоритм і виконано програмну реалізацію системи оцінки функції передачі модуляції (MTF) з інтерактивним ручним вибором області інтересу (ROI). Алгоритм підтримує розширений набір метрик, зокрема MTF50, MTF10 та нормалізовану площу під кривою MTF. Реалізований програмний модуль забезпечує повний цикл обробки: від завантаження зображення та вибору ROI до побудови графіків ESF, LSF і MTF. Ручний вибір ROI підвищує точність та актуальність оцінки в прикладних дослідженнях, а також у виробничому контролі якості оптики та цифрових камер.

Розроблено алгоритм та програмне рішення для визначення параметрів дисторсії на основі шахової мішені. Метод дозволяє точно встановити внутрішні параметри камери й оцінити характер оптичних спотворень за різних фокусних відстаней. Візуалізація результатів до і після виправлення спотворень демонструє ефективність методу та доцільність застосування індивідуальних параметрів корекції для кожної фокусної відстані. Отримані результати можуть бути використані для точного калібрування камер у задачах комп'ютерного зору, фотограмметрії або 3D-реконструкції.

Розроблено алгоритм і виконано програмну реалізацію автоматизованого вимірювання роздільної здатності зображень за допомогою тестової міри USAF 1951. Скрипт виявляє та групує елементи міри в триплети, а потім розраховує відповідну роздільну здатність для кожного визначеного регіону інтересу (ROI). Розроблений інструмент можна використовувати для оцінки роздільної здатності зображень, надаючи аналіз за різними регіонами кадру та візуалізуючи отримані дані у зручному форматі

Представлено алгоритм та програмна реалізація візуалізації різкості та побудови теплових карт для оцінки локальної різкості зображення, який базується на двох основних підходах: з використанням оператора Собеля та

оператора Лапласіана. Засоби візуалізації, включаючи гістограми градієнтів та теплові карти, надають наочне представлення просторового розподілу різкості. Результати оцінки дозволяють виявляти не лише загальну якість зображення, а й його просторові недосконалість, що є корисним для аналізу оптики, фокусування або умов зйомки.

Проведено понад 100 експериментів за допомогою камери Canon EOS R8 з об'єктивом Canon RF 15-30 мм у різних конфігураціях з фіксацією MTF, контрасту, дисторсій і різкості і протестовано ефективність запропонованих методів. Проведений аналіз зображень показав високу якість оптичної системи. Отримані результати відповідають фізичним обмеженням сенсора та оптики. Оцінка якості оптичних систем об'єктивний інструмент для оцінки різкості та деталізації зображень. Побудовані графіки ESF та LSF вказують на мінімальний рівень розмиття. Ручний вибір ROI підвищує точність та актуальність оцінки в прикладних дослідженнях, а також у виробничому контролі якості оптики та цифрових камер. Аналіз отриманих даних свідчить про стабільну якість оптичного відтворення системи «камера-об'єктив» у межах проведеного тестування.

Таким чином, результати дослідження засвідчують ефективність розробленої автоматизованої системи для комплексного аналізу якості оптичних зображень. Запропоновані алгоритми та програмне забезпечення дозволяють точно діагностувати оптичні недоліки та проводити об'єктивний контроль систем у виробництві, тестуванні та експлуатації. Система може бути інтегрована у процеси інженерного проєктування, метрологічного забезпечення та AI-підтримки візуального контролю.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Практикум для самостійної роботи студентів з дисципліни (ДВВС) «Цифрова фотографія». URL: <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/05/Telehuz-Digital-photo-book.pdf> (дата звернення: 5.08.2025).
2. Maximizing PCB Quality - Automated Optical Inspection (AOI). URL: <https://arkcircuits.com/blog/maximizing-pcb-quality-automated-optical-inspection-aoi-benefits-challenges/> (дата звернення: 5.08.2025).
3. Automated Optical Inspection (AOI). URL: <https://www.nextpcb.com/blog/automated-optical-inspection-aoi> (дата звернення: 5.08.2025).
4. Low Cost Vision Inspection System. URL: <https://averroes.ai/blog/low-cost-vision-inspection-system> (дата звернення: 5.08.2025).
5. Вплив різних факторів на показники надійності. URL: <https://learn.ztu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=147412> (дата звернення: 5.08.2025).
6. Stress-induced deformation of the coating on large lightweight freeform optics. URL: https://www.researchgate.net/publication/348637803_Stress-induced_deformation_of_the_coating_on_large_lightweight_freeform_optics/download (дата звернення: 5.08.2025).
7. Understanding Optical Specifications. URL: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/understanding-optical-specifications/> (дата звернення: 5.08.2025).
8. Optical Tolerances: Impact and Costs. URL: <https://avantierinc.com/resources/knowledge-center/optical-tolerances-impact-and-costs/> (дата звернення: 5.08.2025).
9. Homogeneity and Scatter from Inclusions and Bubbles. URL: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application->

notes/lasers/homogeneity-and-scatter-from-inclusions-and-bubbles/ (дата звернення: 5.08.2025).

10. 4 Challenges for Mechanical Integration of Optical Systems. URL: <https://www.simplexitypd.com/blog/4-challenges-and-solutions-for-mechanical-integration-of-optical-systems/> (дата звернення: 5.08.2025).

11. Mechanical method to reduce aberrations for a two-sided coating axisymmetric optical lens based on the specialized finite element method. URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=ao-63-2-429> (дата звернення: 5.08.2025).

12. Аберация оптичних систем. URL: <https://internetri.net/qntm/2023/09/25/aberacziya-optychnyh-system/> (дата звернення: 5.08.2025).

13. Environmental Factors Affecting Temperature Measurement. URL: https://www.researchgate.net/publication/389745017_Environmental_Factors_Affecting_Temperature_Measurement (дата звернення: 5.08.2025).

14. Temperature, Relative Humidity, Light, and Air Quality: Basic Guidelines for Preservation. URL: <https://www.nedcc.org/free-resources/preservation-leaflets/2.-the-environment/2.1-temperature,-relative-humidity,-light,-and-air-quality-basic-guidelines-for-preservation> (дата звернення: 5.08.2025).

15. Contamination Control Engineering Design Guidelines for the Aerospace Community. NASA Technical Reports Server (NTRS). URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19960044619/downloads/19960044619.pdf> (дата звернення: 5.08.2025).

16. Degradation Rates of Plastics in the Environment. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.9b06635> (дата звернення: 5.08.2025).

17. Optical Fiber Mechanical Reliability. URL: <https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/white-paper/WP8002.pdf> (дата звернення: 5.08.2025).

18. Optical Fiber Loss and Attenuation. URL: <https://www.meetoptics.com/academy/optical-fiber-loss> (дата звернення: 5.08.2025).

19. Аналітичний огляд сучасних оптичних систем. URL: https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/3_2021/28.pdf (дата звернення: 5.08.2025).

20. MTF Measurement: How to Measure Lens MTF Effectively? URL: <https://www.ci-systems.com/mtf-measurement-lens> (дата звернення: 5.08.2025).

21. 5 Ways to Use MTF Charts for Optical Instrument Design. URL: <https://evidentscientific.com/en/insights/5-ways-mtf-charts-optical-instrument-design> (дата звернення: 5.08.2025).

22. Wavefront Sensing. URL: <https://www.axiomoptics.com/application/wavefront-sensing-aapplications/> (дата звернення: 5.08.2025).

23. What is Stray Light Analysis? URL: <https://lambdares.com/news/what-is-stray-light-analysis> (дата звернення: 5.08.2025).

24. Lens MTF Test Results. URL: <https://www.the-digital-picture.com/Help/MTF.aspx> (дата звернення: 5.08.2025).

25. What Is the Modulation Transfer Function? URL: <https://evidentscientific.com/en/learn/white-papers/what-is-the-modulation-transfer-function> (дата звернення: 5.08.2025).

26. Image Resolution. ISO 12233. Image Quality Factors. URL: <https://www.image-engineering.de/library/image-quality/factors/1055-resolution> (дата звернення: 5.08.2025).

27. Camera imaging quality testing with MTF. URL: <https://www.sgs.com/-/media/sgscorp/documents/corporate/white-papers/sgs-cp-camera-testing-white-paper-en.cdn.en.pdf> (дата звернення: 5.08.2025).

28. Sharpness. URL: <https://www.imatest.com/imaging/sharpness/> (дата звернення: 5.08.2025).

29. Lens MTF Test Results. URL: <https://www.the-digital-picture.com/Help/MTF.aspx> (дата звернення: 5.08.2025).

30. Sharpness, what is it exactly? URL: https://www.reddit.com/r/AskPhotography/comments/1hojqjk/sharpness_what_is_it_exactly/ (дата звернення: 5.08.2025).

31. Optical System Design. URL: <https://www.hypoptics.com/optical-system-design.html> (дата звернення: 5.08.2025).

32. Digital Capture Resolution Measurements. URL: https://www.imaging.org/IST/IST/Standards/Digital_Camera_Resolution_Tools.aspx#:~:text=This%20resolution%20is%20typically%20measured,produced%20by%20the%20imaging%20device (дата звернення: 5.08.2025).

33. Camera Measurement Standards. URL: https://www.imaging.org/IST/IST/Standards/Camera_Measurement_Standards.aspx (дата звернення: 5.08.2025).

34. ISO 12233:2023. URL: <https://blog.ansi.org/iso-12233-2023-photography-resolution-sfr/> (дата звернення: 5.08.2025).

35. Distortion. URL: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/distortion/> (дата звернення: 5.08.2025).

36. Technical Terms for Digital Microscope Cameras and Image. URL: <https://www.leica-microsystems.com/science-lab/industrial/technical-terms-for-digital-microscope-cameras-and-image-analysis/> (дата звернення: 5.08.2025).

37. Noise. URL: <https://www.imatest.com/imaging/noise/> (дата звернення: 5.08.2025).

38. Lens Distortion. ISO 17850. URL: <https://www.image-engineering.de/library/image-quality/factors/1062-distortion> (дата звернення: 5.08.2025).

39. Optical Testing. URL: <https://app2-exday.net.isc.upenn.edu/optical-testing> (дата звернення: 5.08.2025).

40. AI Revolutionising CT Image Quality Control. URL: <https://www.emjreviews.com/radiology/news/ai-revolutionising-ct-image-quality-control/> (дата звернення: 5.08.2025).

41. Advancements in image quality assessment: a comparative study of image processing and deep learning techniques. URL: https://www.researchgate.net/publication/387777546_Advancements_in_image_quality_assessment_a_comparative_study_of_image_processing_and_deep_learning_techniques (дата звернення: 5.08.2025).

42. A Survey on Image Quality Assessment: Insights, Analysis, and Future Outlook. URL: <https://arxiv.org/abs/2502.08540> (дата звернення: 5.08.2025).

43. Testing and Targets. URL: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/testing-and-targets/> (дата звернення: 5.08.2025).

44. Test Targets, Calibration Targets, and Reticles. URL: https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=2332 (дата звернення: 5.08.2025).

45. MTF measurement to determine the image quality of optics. URL: <https://www.trioptics.com/applications/alignment-and-testing-of-lens-systems/image-quality> (дата звернення: 5.08.2025).

46. Calibration Targets. URL: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=16223 (дата звернення: 5.08.2025).

47. Standards. URL: <https://www.imatest.com/imaging/standards/> (дата звернення: 5.08.2025).

48. Canon 15-30 mm RF IS STM. URL: <https://www.kenrockwell.com/canon/eos-r/lenses/15-30mm.htm> (дата звернення: 5.08.2025).

49. RAW file format. URL: <https://www.cambridgeincolour.com/tutorials/raw-file-format.htm> (дата звернення: 5.08.2025).

50. Олекса В. Л., Гуменюк П. О. Якість оптичних систем. *Технологічні комплекси*. Луцьк, 2025. Том 17, № 2. С. 36-47.