

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-02-08>
УДК 681.5: 004.9

Олекса В. Л.
магістрант
Гуменюк Л. О.
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0002-7678-7060
Гуменюк П. О.
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0002-6251-8548

Луцький національний
технічний університет / Україна

АВТОМАТИЗОВАНИЙ АНАЛІЗ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ТА КОНТРАСТУ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

Анотація: у роботі виконано аналіз факторів, що впливають на якість оптичних систем при виготовленні та при експлуатації. Визначено, що якість оптичних систем визначається не лише технічними характеристиками окремих компонентів, а й комплексом факторів, що охоплюють проектування, виробництво, збірку та експлуатацію. Описано методології та техніки аналізу якості оптичних систем. 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. Проведено експерименти за допомогою камери Canon EOS R8 з об'єктивом Canon RF 15-30 мм у різних конфігураціях і протестовано ефективність запропонованого методу. Проведений аналіз зображень показав високу якість оптичної системи. Отримані результати відповідають фізичним обмеженням сенсора та оптики у межах проведеного тестування.

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

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

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'єктив 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'єктивним, 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].

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.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

1. Фактори впливу на якість оптичних систем при виготовленні.

Якість оптичних систем формується ще на етапі проєктування 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 [3]. 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.

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 [4].

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 [5-6].

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. Ці напруження впливають на форму поверхні оптичних елементів. Вони можуть деформувати кривизну, що призводить до помилок у формі поверхні. Для вивчення впливу параметрів плівки – напруження, товщини та діапазону покриття – на аберації застосовують метод скінченних елементів (FEM) [7]. За допомогою цього методу можна проаналізувати і оптимізувати характеристики плівки, щоб мінімізувати її негативний вплив на оптичну якість.

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 [6]. 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 [6]. Навіть ідеально виготовлені лінзи можуть втратити ефективність через неправильний монтаж або температурні коливання, що змінюють оптичний шлях.

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.

Аберації, спричинені експлуатацією. Аберации – це оптичні спотворення, при яких реальне зображення відхиляється від ідеального [8]. Наявність абераций, викликаних 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.

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 [9]. Комбінована дія температури, вологості, забруднень та механічних навантажень створює складне середовище, у якому системи піддаються не лінійним ефектам деградації.

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 [10]. Поверхневі забруднення 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 [11].

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. Недостатня підготовка може призвести до неправильної інтерпретації технічних параметрів, невчасного виявлення відхилень або порушення процедур [3].

Організація технічного обслуговування включає регулярність, повноту і якість виконання регламентних робіт. 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 [3].

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.

Техніки 3D-вимірювань використовуються для геометричного аналізу деталей. Застосовуються тінювий метод, структуроване світло та триангуляція. Проблемою тінювого методу є недійсність теорії Кірхгофа-Френеля при великих товщинах об'єктів, що знижує точність [12].

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 [13].

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 [12].

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 [14].

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 [15].

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 [13].

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 [13-15].

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є розробка алгоритму і програмної реалізації 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..

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

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.

Для експериментальних досліджень було створено установку на базі камери Canon EOS R8 з об'єктивом Canon RF 15-30 мм F4,5-6,3 IS STM. Ця конфігурація дозволяє 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.

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. Програмний комплекс приймає стандартні формати зображень, такі як TIFF, JPEG або PNG, які зчитуються за допомогою бібліотеки OpenCV.

На першому алгоритм аналізу здійснює 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 імовірного 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 1:

$$MTF(f) = |F\{LSF(x)\}|, \quad (1)$$

де $F\{\cdot\}$ – 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 2:

$$\omega(n) = 0,5 \left(1 - \cos \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N-1} \right) \right), \quad 0 \leq n \leq N. \quad (2)$$

де $\omega(n)$ – значення вікна в точці n ,
 N – загальна кількість точок у сигналі.

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 3):

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (3)$$

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.

Програмна реалізація виконана мовою Python.

Вихідне зображення зі значеннями MTF50 та вихідне зображення зі значеннями контрасту наведені на рисунках 1-2.

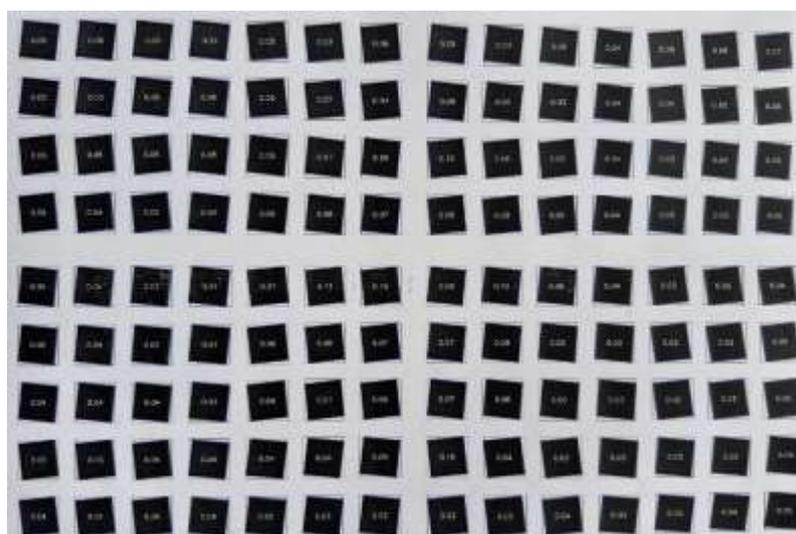


Рисунок 1 – Вихідне зображення зі значеннями MTF50

Якість зображення, отриманого об'єктива Canon RF 15-30 mm при фокусній

віддалі 20 мм і діафрагмі 8. Знімки виконувались у форматі RAW, що дозволило зберегти максимальну деталізацію без додаткових обробок.

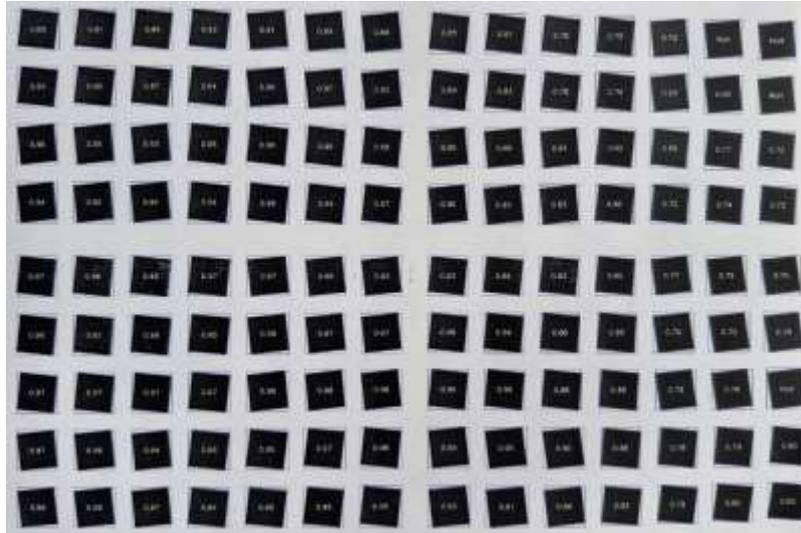


Рисунок 2 – Вихідне зображення зі значеннями контрасту

Криві розподілу MTF для центра зображення та кутів наведені на рисунку 3.

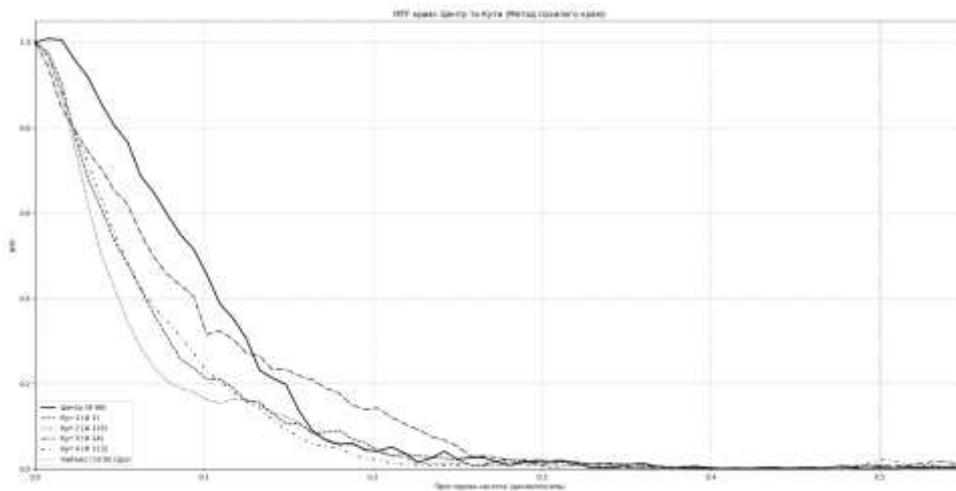


Рисунок 3 – Криві розподілу MTF для центру зображення та кутів

На графіку MTF (рис.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 Cfnop 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 4.

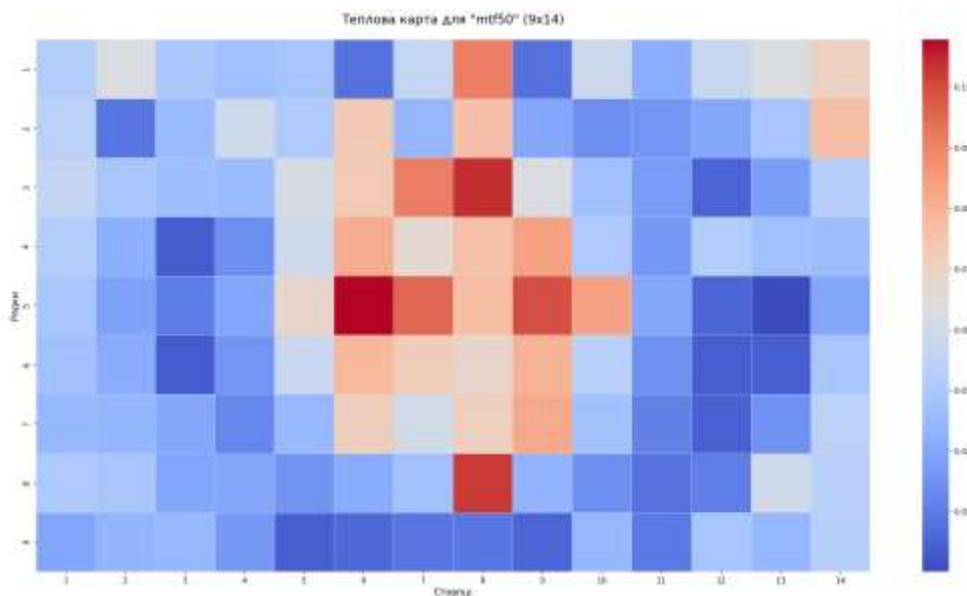


Рисунок 4 – Теплова карта MTF50 для того ж зображення

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.

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.

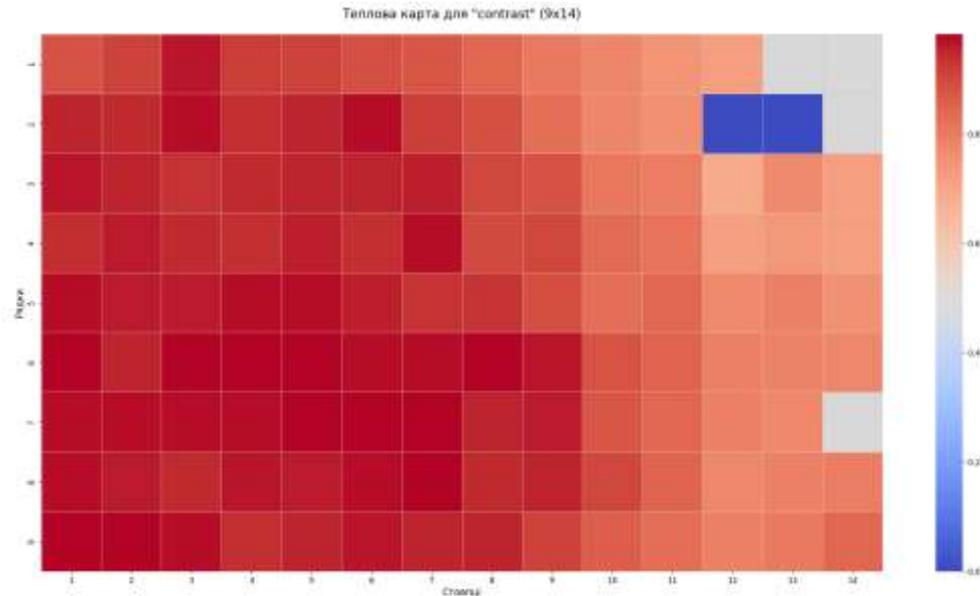


Рисунок 5 – Теплова карта контрасту (normalized contrast)

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.

ВИСНОВКИ

Алгоритм та його 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 мм (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.

ЛІТЕРАТУРА

- [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: 5.05.2025).
- [2] Maximizing PCB Quality - Automated Optical Inspection (AOI). URL: <https://arkcircuits.com/blog/maximizing-pcb-quality-automated-optical-inspection-aoi-benefits-challenges/> (дата звернення: 5.05.2025).
- [3] Вплив різних факторів на показники надійності. URL: <https://learn.ztu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=147412> (дата звернення: 5.05.2025).
- [4] Understanding Optical Specifications. URL: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/understanding-optical-specifications/> (дата звернення: 5.05.2025).
- [5] 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: 5.05.2025).
- [6] 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: 5.05.2025).
- [7] 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: 5.05.2025).
- [8] Аберация оптичних систем. URL: <https://surl.lt/kexiio> (дата звернення: 5.05.2025).
- [9] Temperature, Relative Humidity, Light, and Air Quality: Basic Guidelines for Preservation. URL: <https://surl.li/ltvyzu> (дата звернення: 5.05.2025).
- [10] Degradation Rates of Plastics in the Environment. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.9b06635> (дата звернення: 5.05.2025).
- [11] 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: 5.05.2025).
- [12] Аналітичний огляд сучасних оптичних систем. URL: https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/3_2021/28.pdf (дата звернення: 5.05.2025).

- [13] MTF Measurement: How to Measure Lens MTF Effectively? URL: <https://www.ci-systems.com/mtf-measurement-lens> (дата звернення: 5.05.2025).
- [14] Wavefront Sensing. URL: <https://www.axiomoptics.com/application/wavefront-sensing-applications/> (дата звернення: 5.05.2025).
- [15] What is Stray Light Analysis? URL: <https://lambdare.com/news/what-is-stray-light-analysis> (дата звернення: 5.05.2025).

AUTOMATED ANALYSIS OF RESOLUTION AND CONTRAST OF OPTICAL SYSTEMS

Oleksa, V. Undergraduate
Gumeniuk, L PhD, Associate Professor
Humeniuk, P. PhD, Associate Professor

Lutsk National Technical University / Ukraine

Abstract. The paper analyzes factors affecting the quality of optical systems during manufacture and operation. It has been determined that the quality of optical systems is determined not only by the technical characteristics of individual components, but also by a complex of factors covering design, production, assembly, and operation. Methodologies and techniques for analyzing the quality of optical systems are described. An algorithm has been developed and a software implementation of a system for evaluating the quality of optical systems has been performed using modulation transfer function (MTF) analysis with the sloping edge method, with the construction of heat maps and the detection of quality degradation in peripheral areas. It detects test targets in the image, analyzes their boundaries, and calculates key indicators such as MTF50, MTF10, and contrast. Experiments were conducted using a Canon EOS R8 camera with a Canon RF 15-30 mm lens in various configurations, and the effectiveness of the proposed method was tested. The image analysis showed the high quality of the optical system. The results obtained correspond to the physical limitations of the sensor and optics within the scope of the testing.

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

Дата першого надходження статті до видання	Дата прийняття статті до друку статті після рецензування	Дата оприлюднення
24.10.2025 р.	09.11.2025 р.	23.12.2025 р.