

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації
(повна назва)

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Аналіз технічних характеристик професійних фотокамер
і камер сучасних смартфонів.
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи МІМ-22-1
Горянський А.І.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації та
радіотехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Горелов Д.Ю.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Володимир КАРТАШОВ
(підпис)

2023 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«_____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту Горянському Артему Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз технічних характеристик професійних фотокамер і камер сучасних смартфонів.

затверджена наказом по університету від " 20 " 10 2023 р. № 1224 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10.01.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Модель смартфона – Xiaomi Redmi Note 12 Plus 5G. Модель камери – Canon EOS m50 MarkII. Провести є теоретичний аналіз та практичне порівняльне дослідження технічних характеристик професійних фотокамер і камер сучасних смартфонів задля визначення тих граничних умов їхньої експлуатації, в яких вони можуть дати наближені результати зйомки. Для цього: скласти структурну схему камери, порівняти будову камери і смартфона. Отримати формули для чутливості і SNR. Визначити SNR для смартфона і камери. Поставити експеримент з вимірювання SNR і динамічного діапазону. За результатами досліджень зробити висновки.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Вступ

1 Аналіз принципів побудови та технічних характеристик фото- та відеокамер.

2 Теоретичні оцінки технічних характеристик професійних фотокамер і камер сучасних смартфонів.

3 Експериментальні оцінки технічних характеристик професійних фотокамер і камер сучасних смартфонів.

Висновки

Перелік посилань

Додатки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням обов'язкових креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

1. Постановка задачі (1 аркуш А4).
2. Мета роботи (1 аркуш А4).
3. Структурна схема камери (1 аркуш А4).
4. Порівняння камери і смартфона (1 аркуш А4).
5. Формули для чутливості і SNR (1 аркуш А4).
6. SNR для смартфона (1 аркуш А4).
7. SNR для камери (1 аркуш А4).
8. Вимірювання освітленості (1 аркуш А4).
9. Вимірювання SNR (1 аркуш А4).
10. Результати експерименту (1 аркуш А4).
11. Вимірювання динамічного діапазону (1 аркуш А4).
12. Висновки (1 аркуш А4).

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	01.09.23–27.09.23	
2	Теоретичний аналіз	28.09.23–11.10.23	
3	Проведення розрахунків	12.10.23–10.11.23	
4	Експериментальна частина	11.11.23–03.12.23	
5	Обробка результатів	04.12.23–17.12.23	
6	Графічна частина роботи	18.12.23–17.12.23	
7	Перевірка керівником	18.12.23–30.12.23	
8	Перевірка на академічний плагіат	02.01.24–05.01.24	
9	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	06.01.24–09.01.24	

Дата видачі завдання _____ 20.10.2023 р. _____

Студент _____ (підпис) _____ Артем ГОРЯНСЬКИЙ _____

Керівник роботи _____ (підпис) _____ Денис ГОРЕЛОВ _____

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 62 сторінки, 33 рисунків, 6 таблиць, 28 джерел.

ВІДЕО, ДИФУЗНІСТЬ, КАМЕРА, КОЛІР, ОСВІТЛЕНІСТЬ,
ПРЕДМЕТНА ЗЙОМКА, СОФТ-БОКС, СМАРТФОН, СИЛА СВІТЛА,
СВІТЛОСИЛА, ФОКУСНА ВІДСТАНЬ, ФОТО, ЧУТЛИВІСТЬ

Об'єкт дослідження – процес формування фото- і відеозображень в камері смартфона і в професійній камері.

Метою даної роботи є теоретичний аналіз та практичне порівняльне дослідження технічних характеристик професійних фотокамер і камер сучасних смартфонів задля визначення тих граничних умов їхньої експлуатації, в яких вони можуть дати наближені результати зйомки.

Методи роботи – теоретичний аналіз, модельний експеримент, натурний експеримент, статистична обробка даних.

Розглянута будова, принцип дії та складена електрична структурна схема цифрової фото- або відеокамери. Визначені головні відмінності в камерах смартфона і професійних. Відмінності обумовлені матрицею (чутливість, динамічний діапазон, роздільна здатність) і об'єктивом (світлосила, кут поля зору, чіткість зображення, аберації). Дані параметри оцінені теоретично і на практиці. Проведені оцінки чутливості і динамічного діапазону камери смартфона і професійної камери. Проведена експериментальна перевірка результатів розрахунків.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 62 pages, 33 figures, 6 tables, 28 sources.

VIDEO, DIFFUSION, CAMERA, COLOR, LIGHT, SUBJECT SHOOTING, SOFTBOX, SMARTPHONE, LIGHT POWER, FOCUS LENGTH, PHOTOS, SENSITIVITY

The object of research is the process of forming photo and video images in a smartphone camera and in a professional camera.

The purpose of this work is a theoretical analysis and a practical comparative study of the technical characteristics of professional cameras and cameras of modern smartphones in order to determine the limit conditions of their operation in which they can give approximate shooting results.

Work methods – theoretical analysis, model experiment, natural experiment, statistical data processing.

The structure, principle of operation and the assembled electrical structural diagram of a digital photo or video camera are considered. The main differences between smartphone and professional cameras are determined. The differences are caused by the matrix (sensitivity, dynamic range, resolution) and the lens (aperture, field of view, image clarity, aberrations). These parameters should be evaluated theoretically and in practice. The sensitivity and dynamic range of the smartphone camera and professional camera were evaluated. An experimental verification of the calculation results was carried out.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	8
Вступ.....	9
1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ ТА ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТО- ТА ВІДЕОКАМЕР.....	11
1.1 Принцип роботи та загальна структура фото- та відеокамер.....	11
1.2 Світлочутлива матриця.....	14
1.3 Передача кольору.....	16
1.4 Геометричний розмір матриці та його вплив на зображення.....	18
1.5 Об'єктиви фото- та відеокамер.....	19
1.6 Висновки по розділу 1.....	24
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФЕСІЙНИХ ФОТОКАМЕР І КАМЕР СУЧАСНИХ СМАРТФОНІВ.....	26
2.1 Оцінка чутливості камер смартфона.....	26
2.2 Оцінка чутливості професійної камери.....	34
2.3 Оцінки динамічного діапазону.....	39
2.4 Висновки по розділу 2.....	42
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФЕСІЙНИХ ФОТОКАМЕР І КАМЕР СУЧАСНИХ СМАРТФОНІВ.....	44
3.1 Умови експерименту.....	44
3.2 Вимірювання відношення сигнал-шум.....	45
3.3 Дослідження динамічного діапазону.....	50
3.4 Висновки по розділу 3.....	53

Висновки.....	55
Перелік джерел посилань.....	59
ДОДАТКИ.....	63
Додаток А. Графічний матеріал.....	64
Додаток В. Відомість кваліфікаційної роботи.....	76

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- БПЛА – безпілотний літальний апарат;
- ГРЗП – глибина різко зображуваного простору;
- КМОП – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник;
- МДФ – мінімальна дистанція фокусування;
- Мпікс – мегапікселі – 1 млн. пікселів;
- ПЗЗ – прилад із зарядовим зв'язком;
- CCD – charge-coupled device – прилад із зарядовим зв'язком;
- CMOS – complementary metal-oxide-semiconductor – набір напівпровідникових технологій побудови інтегральних мікросхем та відповідна їй схемотехніка мікросхем;
- E – енергетична опроміненість, Вт/м²;
- EFL – effective focus length – ефективна фокусна відстань;
- F – світлосила об'єктива;
- f - stop – один крок зміни експозиції у фотографії;
- $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постійна Планка;
- HDR – High Dynamic Range – технологія зйомки з високим динамічним діапазоном;
- ISO – International Organization for Standardization – Міжнародна організація зі стандартизації;
- MTF – Modulation Transfer Function – модуляційна передатна функція;
- S – площа пікселя, м²;
- SNR – signal-to-noise ratio – відношення сигнал-шум;
- T_e – час експонування, с;
- $\bar{W}_\phi = h\bar{\nu}$ – середня енергія фотона, Дж;
- $\bar{\nu}$ – середня частота випромінення джерела світла, Гц;
- η – квантовий вихід.

ВСТУП

За останні два десятиліття камери смартфонів пройшли довгий шлях від примітивних «затичок» з мильною картинкою до пристроїв, якість знімків яких може суперничати з професійними фотоапаратами.

Одним з найдавніших апаратів є телефон Sharp J-SH04. Він вийшов у 2000-му році, а його єдина камера мала роздільну здатність 0,111 Мпікс. Про фронтальну камеру в ті часи не замислювалися, тому для селфі фотографій в корпус було вбудоване маленьке дзеркальце.

У 2000 році люди зробили у світі близько 80 мільярдів фотографій, але переважно на плівку та перші цифрові камери [1]. Коли через пару років на ринку з'явилися телефони з камерою, критики глузували: «Врешті-решт ми дійдемо до того, що наш пейджер з'єднають із блендером».

У 2023 році в світі зробили більше 1,5 трильйона знімків, багато з яких на телефони з камерою з роздільною здатністю в 400 разів більшою, ніж Sharp J-SH04. Sharp продовжує розробляти телефони з камерою для азійського ринку, від дивних (об'єktiv селфі-камери на рівні рота) до чудових (перший у світі 1-дюймовий датчик камери).

Але японський бренд не зміг захопити міжнародний ринок, залишивши ключових гравців Apple, Samsung і Xiaomi диктувати порядок денний. Знамені бренди телефонів співпрацюють із найвідомішими виробниками камер, зокрема Leica, Zeiss і Hasselblad.

Масова фотографія змінила культуру. Сьогодні розмова зосереджена на достоїнствах найновішої версії Galaxy або iPhone, причому різні теми виникають навколо кількох культових альтернатив і серйозних оцінок від таких компаній, як Google. Але історія телефону з камерою розігралася на більш широкому полі.

Цілком серйозно на професійних форумах, сайтах для медіамейкерів виникають дискусії про використання флагманських смартфонів як альтернативи професійній фото- та відеоапаратурі. Серед переваг

відзначають менші габарити, більшу автономність роботи, інколи більшу функціональність, наприклад електронну стабілізацію відео, легшу інтеграцію з Інтернетом і додатками з постобробки. При цьому вважається, що якість фото і відео майже наблизилася до професійної фото- та відеоапаратури.

Метою даної роботи є теоретичний аналіз та практичне порівняльне дослідження технічних характеристик професійних фотокамер і камер сучасних смартфонів задля визначення тих граничних умов їхньої експлуатації, в яких вони можуть дати наближені результати зйомки.

1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ ТА ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТО- ТА ВІДЕОКАМЕР

1.1 Принцип роботи та загальна структура фото- та відеокамер

Цифрова камера – оптико-механічний прилад з електронним способом реєстрації, обробки та зберігання цифрових зображень, за допомогою якого здійснюється фотозйомка.

Будова професійної цифрової дзеркальної фотокамери показана на (рис. 1.1).

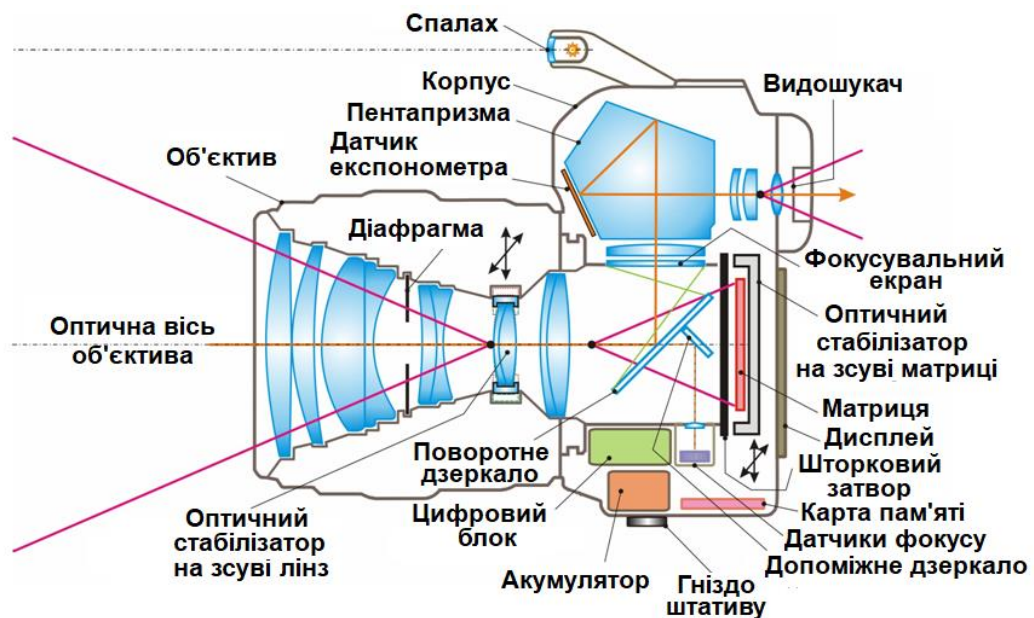


Рисунок 1.1 – Будова професійної цифрової дзеркальної фотокамери

Цифрова фотокамера складається з наступних основних частин:

- корпус зі світлонепроникною камерою;
- об'єктив;
- діафрагма;
- фотографічний затвор;
- кнопка спуску – ініціює зйомку кадру;
- видошукач;
- фокусувальний пристрій;

- фотоекспонетр;
- вбудований фотоспалах;
- елементи живлення камери;
- матриця;
- дисплей;
- органи управління;
- оптичний стабілізатор зображення;
- цифровий блок обробки та зберігання даних;
- карта пам'яті.

Електричне поєднання складових частин камери описується структурною схемою, показаною на рис.1.2.

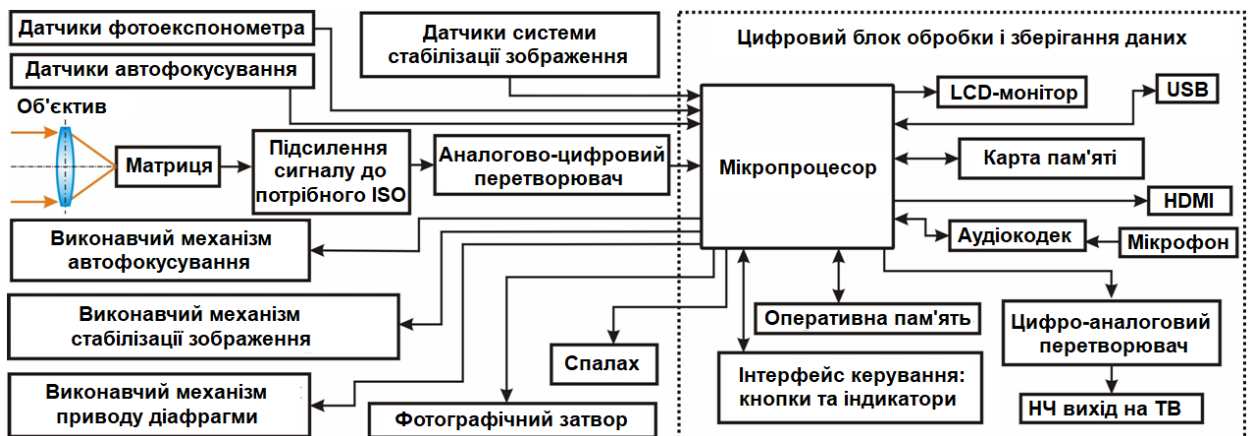


Рисунок 1.2 – Електрична структурна схема цифрової камери

Конструкція сучасної цифрової камери має багато спільного з плівковою камерою. Розглянемо елементи, які є унікальними для цифрової фотокамери або мають певну специфіку використання.

Фотографічний затвор – пристрій, який відкриває світлу доступ до матриці на час витримки (рис.1.3, а). Цифрові фотокамери можуть мати як механічний затвор так і електронний.

Електронні фотографічні затвори є не окремим пристроєм, а принципом дозування експозиції самою світлочутливою матрицею. Витримка визначається часом між обнуленням матриці та моментом зчитування з неї інформації (рис.1.3, б).

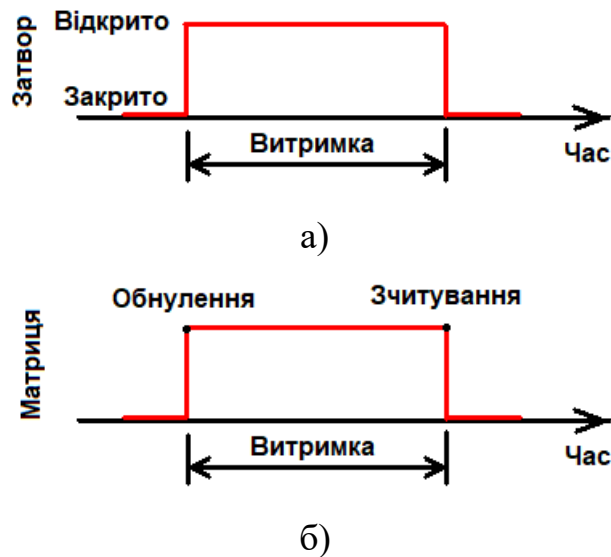


Рисунок 1.3 – Принцип роботи механічного (а) і електронного (б) затворів

Застосування електронного затвора дозволяє досягти більш коротких витримок без використання високошвидкісних дорогих механічних затворів. Є моделі фотоапаратів, у яких використовується комбінація механічного та електронного затвора. У таких камерах механічний затвор використовується при тривалих витримках, а електронний за коротких.

Видошукач. В даний час багато цифрових камер мають оптичний або електронний видошукач (електронна система, що імітує видошукач дзеркальної фотокамери) для швидкого komponування кадру і рідкокристалічний дисплей, що виконує кілька функцій, для більш точної побудови композиції, і перегляду результату зйомки.

Недоліком рідкокристалічного дисплея є неможливість його використання при високій освітленості, так як в таких умовах інформація на дисплеї ставати не помітна, і як наслідок неможливість здійснити кадрування.

На РК-дисплеї в залежності від режиму роботи фотокамери може відобразитися інформація про експозиційні параметри та ін. За допомогою РК-дисплея ми отримуємо доступ до меню керування настройками камери.

1.2 Світлочутлива матриця

Матриця (світлочутлива матриця) – спеціалізована аналогова або цифро-аналогова інтегральна мікросхема, що складається з світлочутливих елементів (фотосенсорів), збудованих у стовпці та рядки (рис.1.4).

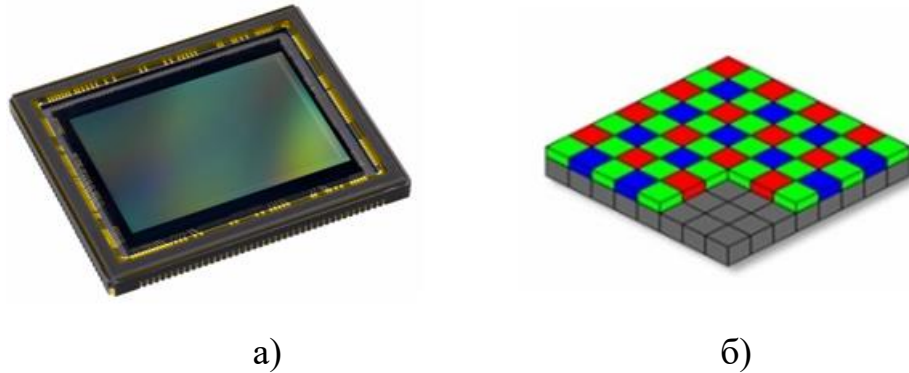


Рисунок 1.4 – Світлочутлива матриця: а – зовнішній вигляд, б – розташування елементів (фотосенсорів)

Матриця призначена для перетворення, спроектованого на неї оптичного зображення аналоговий електричний сигнал або в потік цифрових даних (за наявності АЦП безпосередньо в складі матриці). При проектуванні зображення на матрицю, в кожному її фотосенсорі накопичується електричний заряд, пропорційний яскравості елемента зображення, що припадає на нього. Матриця є основним елементом цифрових фотоапаратів та відеокамер. Застосовується також в планшетних та проєкційних сканерах.

Фотосенсор – це елемент матриці, що перетворює світлову енергію (фотони) на енергію електричного заряду (електрони): чим яскравіше світло, тим більше заряд:

$$q = kE, \quad (1.1)$$

де E – освітленість фотосенсора,

k – коефіцієнт пропорційності.

Схема фрагмента матриці цифрової фотокамери показана на рис.1.5.

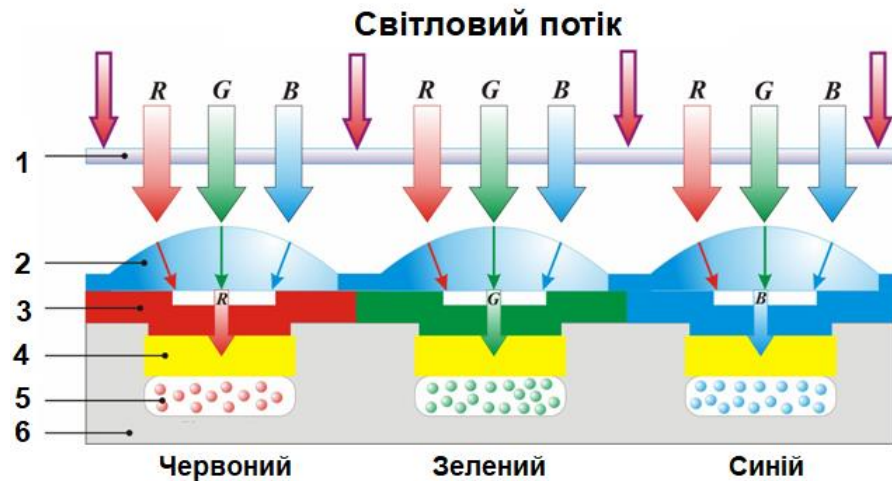


Рисунок 1.5 – Схема фрагмента матриці цифрової фотокамери (1 – інфрачервоний фільтр; 2 – мікролінза; 3 – червоний світлофільтр пікселя (фрагмент фільтра Байєра); 4 – фотосенсор; 5 – кремнієва підкладка)

Сигнал зображення визначається кількістю фотоелектронів N_{ϕ} , які накопичує піксель за час експонування кадру [7]

$$N_{\phi} = \frac{E \cdot S \cdot T_e}{\bar{W}_{\phi}} \cdot \eta, \quad (1.2)$$

де E – енергетична опроміненість, Вт/м²;

S – площа пікселя, м²;

T_e – час експонування, с;

$\bar{W}_{\phi} = h\bar{\nu}$ – середня енергія фотона, Дж;

$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постійна Планка;

$\bar{\nu}$ – середня частота випромінення джерела світла, Гц;

η – квантовий вихід.

Сигнал матриці надходить на аналоговий підсилювач, коефіцієнт підсилення якого може змінюватися, регулюючи загальну світлочутливість камери.

ISO – це параметр камери, що вказує на рівень її чутливості до світла. Спочатку значення ISO були встановлені Міжнародною організацією зі стандартизації (звідки і походить назва ISO) для позначення чутливості плівки у камері до світла. Стандарти ISO у цифровій фотографії, як і раніше, мають ту саму систему нумерації, яка вказує на чутливість матриці цифрової камери до світла.

Само значення ISO може приймати будь-який цілочисельний вираз від 1 до нескінченності. Наприклад, на камері Canon EOS 4000D можна встановити ISO від 100 до 12800, а на камері смартфона Xiaomi Redmi Note 12 Pro – ISO від 50 до 6400.

Далі підсилений аналоговий сигнал, за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) перетворюється на цифрову форму – двійковий код. Число біт m називають глибиною кольору, m біт несе інформацію про M можливих значень яскравості фотосенсора:

$$M = 2^m. \quad (1.3)$$

У цифровій фотографії, як правило, двійкові біти групуються в ланцюжки з 8 біт – байти. Байт несе інформацію про 256 (десятькова система) можливих значень яскравості фотосенсора, що відповідає 256 відтінкам сірого.

1.3 Передача кольору

Фотосенсори фіксують яскравість елемента зображення, не несучи жодної інформації про його колір.

Для отримання інформації про колір матрицю фотосенсорів зверху накривають матрицею мініатюрних світлофільтрів, кожен з яких пропускає червоне, зелене або синє світло і затримує решту упорядкованих у вигляді мозаїчного візерунка Байера (рис. 1.6, а).

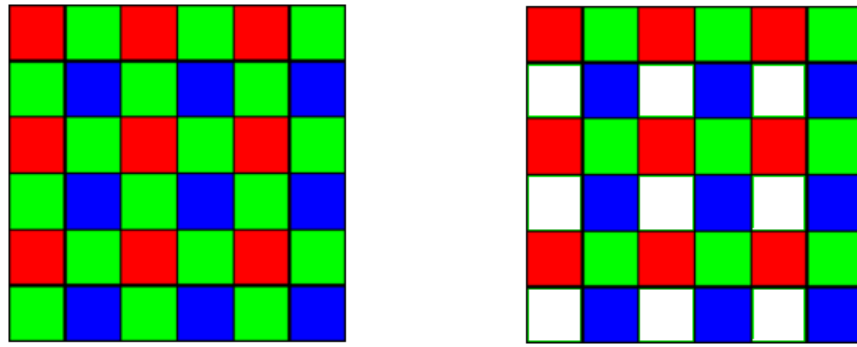


Рисунок 1.6 – Мозаїчний візерунок Байера (а) та його модифікація (б)

Як видно з рис.1.6, а, при цьому переважає зелений колір, що пояснюється фізіологією сприйняття кольору оком людини найбільш чутливим до зеленої частини спектра.

Завдяки наявності світлофільтрів кожен піксель (від англ. pixel – picture element – елемент, з сукупності яких будується цифрове зображення) в конкретному місці сенсора здатний реєструвати інтенсивність тільки одного з трьох основних кольорів (рис. 1.6, а). Внаслідок цього більша кількість світла, що досягає фотосенсора, втрачається. Захоплюється тільки 50% зеленого світла, тому що кожен ряд містить тільки половину зелених пікселів, а другу половину складають сині або червоні. Реєструється 25% червоного та 25% синього світла. Оскільки більшість світла не реєструється, світлочутливість матриці загалом знижується.

Для збільшення світлочутливості матриці інколи використовують модифікацію колірної схеми Байера (рис.1.6, б), залишаючи один з 4 пікселів взагалі без фільтра. При цьому погіршується колірна чіткість і кольоропередача.

Повне кольорове зображення (відновлення кольору кожного пікселя) утворюється в результаті математичної обробки (інтерполяції) мікропроцесором фотокамери.

Фотосенсори мають підвищену чутливість до інфрачервоного діапазону спектру, тому крім кольорових фільтрів, встановлюють і інфрачервоний.

1.4 Геометричний розмір матриці та його вплив на зображення

На відміну від фіксованого формату кадру плівкової фотографії 36×24 мм, розміри матриць сучасних цифрових фотоапаратів значно відрізняються один від одного. Розмір матриці вимірюється по діагоналі (рис.1.7), у частках дюйма (4/3", 2/3", 1/1,8", 1/2,2"). Ця традиція вимірювання походить від діаметра телевізійних трубок, що передають, і часто називається «дюйми відікона».

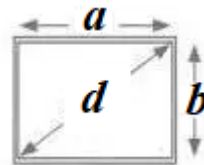


Рисунок 1.7 – Вимірювання розміру матриці

Матриці розміром 36×24 мм називають повно кадровими (full frame matrix). У більшості цифрових фотоапаратів розмір фотосенсора менший за розміром кадру 36-мм плівки (рис.1.8).

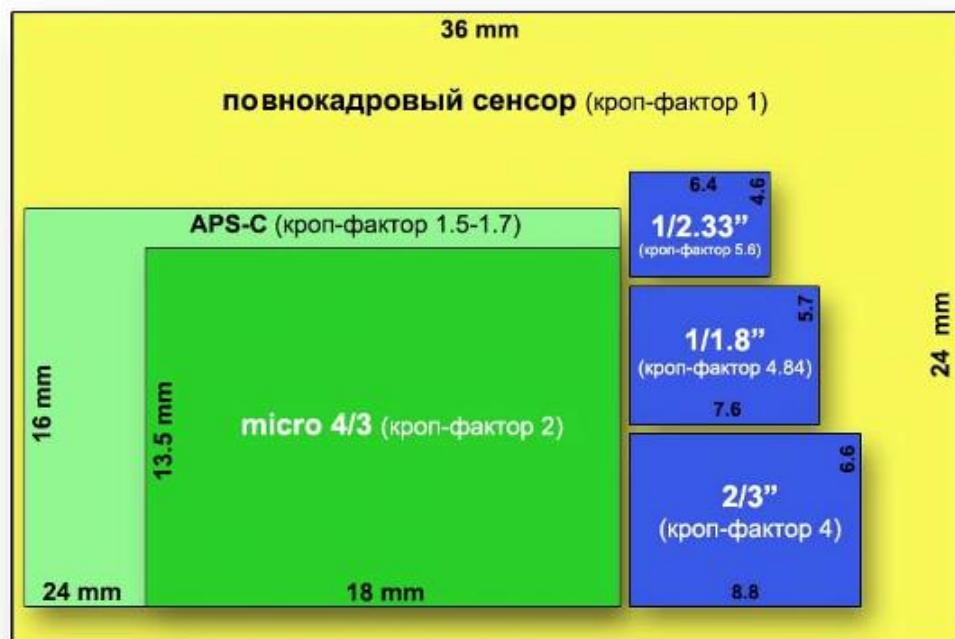


Рисунок 1.8 – Популярні розміри світлочутливих матричних перетворювачів

Відношення сторін кадру. В аналоговій (плівковій) фотографії використовується формат кадру 3:2 (36x24 мм).

У цифровій фотографії є кілька форматів кадру (рис.1.9):

- формат кадру 4:3 (телевізійний формат кадру телебачення стандартної чіткості);
- формат кадру 16:9 (телевізійний формат кадру телебачення високої чіткості);
- формат кадру 3:2.

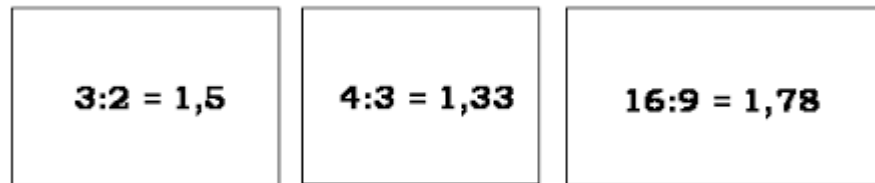


Рисунок 1.9 – Формати кадру в цифровому фото

У фотокамерах є налаштування, що дозволяє програмно змінювати формат кадру, це призводить до зміни роздільної здатності знімка (мегапікселі), так як формат кадру визначається геометричним розміром матриці та співвідношенням її сторін.

Формат кадру необхідно враховувати під час зйомки залежно від передбачуваного подальшого використання фотографії.

1.5 Об'єктиви фото- та відеокамер

Об'єктив – це оптичний пристрій, що призначений для отримання оптичного зображення. В оптиці об'єктив розглядається як аналог збиральної лінзи. На практиці об'єктив складається з набору лінз, до 10...15, зібраних в єдиній системі всередині оправы.. Велика кількість лінз потрібна для взаємної компенсації оптичних аберацій (спотворень).

Основні оптичні характеристики об'єктивів, це фокусна відстань, світлосила, величина та характер аберацій.

Зображення точкового об'єкта, що знімається, потрапляє в об'єктив, переломлюється там і зводиться в одну точку на певній відстані від задньої частини об'єктива (рис.1.10). Ця точка називається фокусом (точкою фокусування), а відстань від фокуса до лінзи (системи лінз) називається фокусною відстанню.

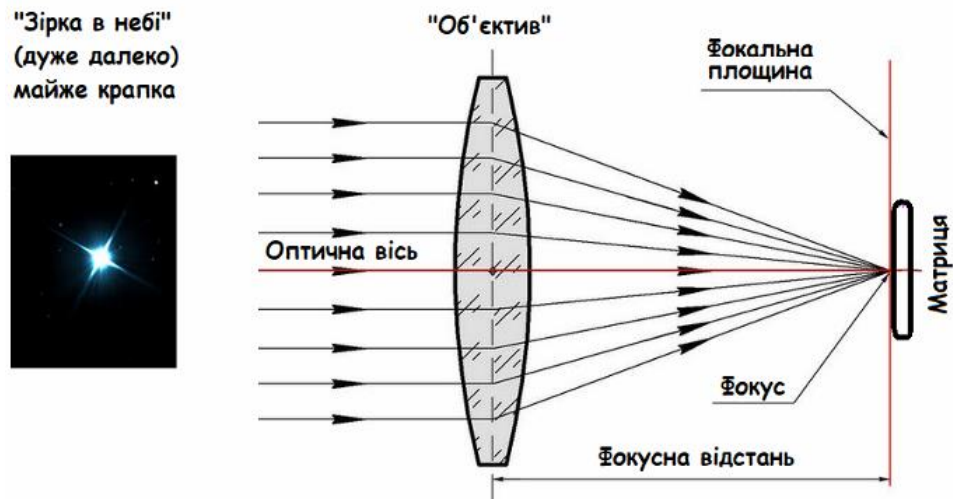


Рисунок 1.10 – Визначення фокусної відстані об'єктива

Кут зору об'єктива α обернено пропорційний фокусній відстані f . У загальному вигляді формула, за допомогою якої можна прорахувати кут поля зору, має такий вигляд [2]:

$$\alpha = 2 \arctg \left(\frac{d}{2f} \right), \quad (1.4)$$

де d – діагональний розмір світлочувливої матриці.

Відповідний процес формування зображення на матриці показаний на рис.1.11.

В реальності в камері може використовуватися матриця з меншим розміром d_1 , ніж діагональ зображення d . Для порівняння об'єктивів цифрових фотокамер з об'єктивами камер формату 36 x 24 мм використовується коефіцієнт перетворення фокусної відстані – кроп-фактор

$$Cf = d/d_1, \quad (1.5)$$

$d = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{36^2 + 24^2} \approx 43,3$ мм – діагональ матриці повнокадрового формату.

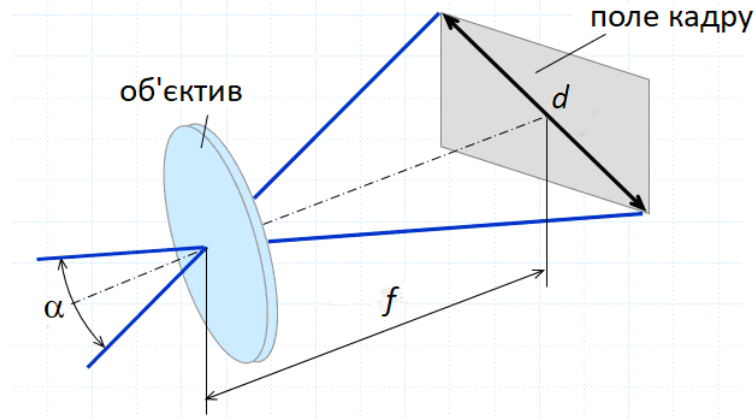


Рисунок 1.11 – Процес формування зображення на матриці

Для об'єктива такої камери вводиться поняття ефективної) фокусної відстані (effective focus length) [2]:

$$efl = f \cdot Cf. \quad (1.6)$$

Порівнюючи матрицю з кадром фотоплівки, ми бачимо, що при тій же фізичній фокусній відстані об'єктива, на датчик цифрової камери потрапляє менша частина сцени, що знімається (рис.1.12).

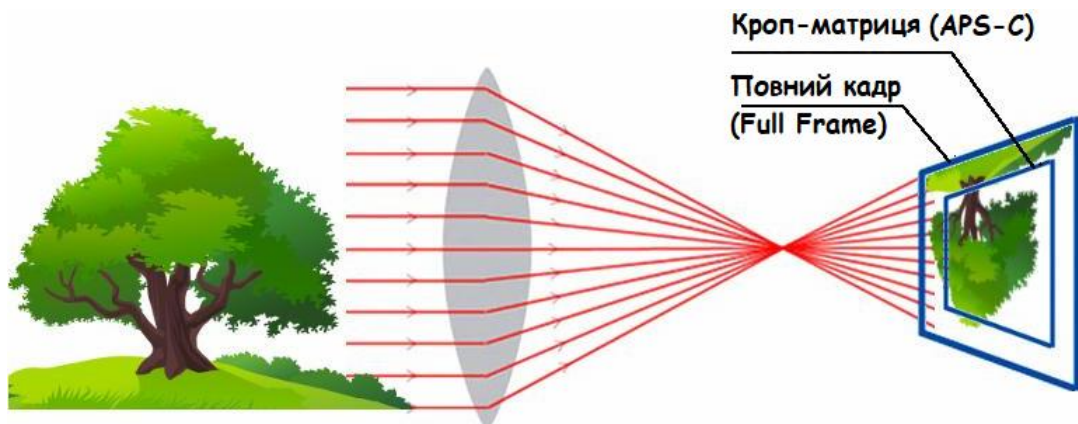


Рисунок 1.12 – Вплив розміру матриці на зображення при фіксованій фокусній відстані об'єктива

Світлосила об'єктиву показує кількість світла, який проходить крізь об'єктив. Світлосила дорівнює відношенню ефективного діаметра вхідної зіниці об'єктива D до його фокусної відстані f .

Відношення D/f для фотооб'єктивів є меншим за одиницю, для більшої зручності світлосила вказується у вигляді діафрагмового числа F , яке дорівнює відношенню фокусної відстані f до ефективного діаметру D [4]:

$$F = \frac{f}{D}. \quad (1.7)$$

Об'єктиви з різною діафрагмою показані на рис.1.13 [3]. Максимальній діафрагмі відповідає найменше діафрагмове число F .



а)

б)

в)

Рисунок 1.13 – Об'єктиви з різною діафрагмою

(а – $F = 16$, б – $F = 5,6$, в – $F = 2,0$)

Крім розглянутих технічних параметрів об'єктивів є ті, які характеризують їх спотворення (аберації).

Роздільна здатність об'єктива – характеризує можливість передачі чіткого зображення. Роздільна здатність оцінюється кількістю відтворюваних штрихів на 1 мм зображення, що може спроектувати об'єктив на світлочутливу матрицю. При цьому об'єкт має знаходитися у фокусі. Вимірювання роздільної здатності виконують за допомогою спеціальних мір (рис.1.14).

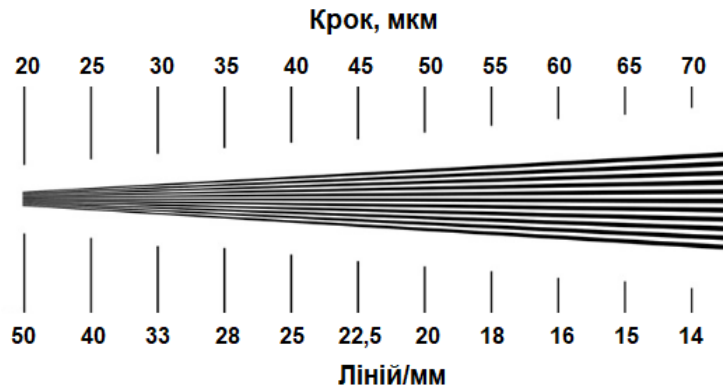


Рисунок 1.14 – Штрихова міра для вимірювання роздільної здатності об'єктиву

Аберация – це спотворення зображення в об'єктиві. Аберации характеризують різного роду порушення у структурі променів, що виходять з об'єктиву.

Найбільш часто в фотографічних об'єктивах помітні такі види абераций, як сферична, коматична, кривизна поля зображення, хроматичні (рис.1.15).

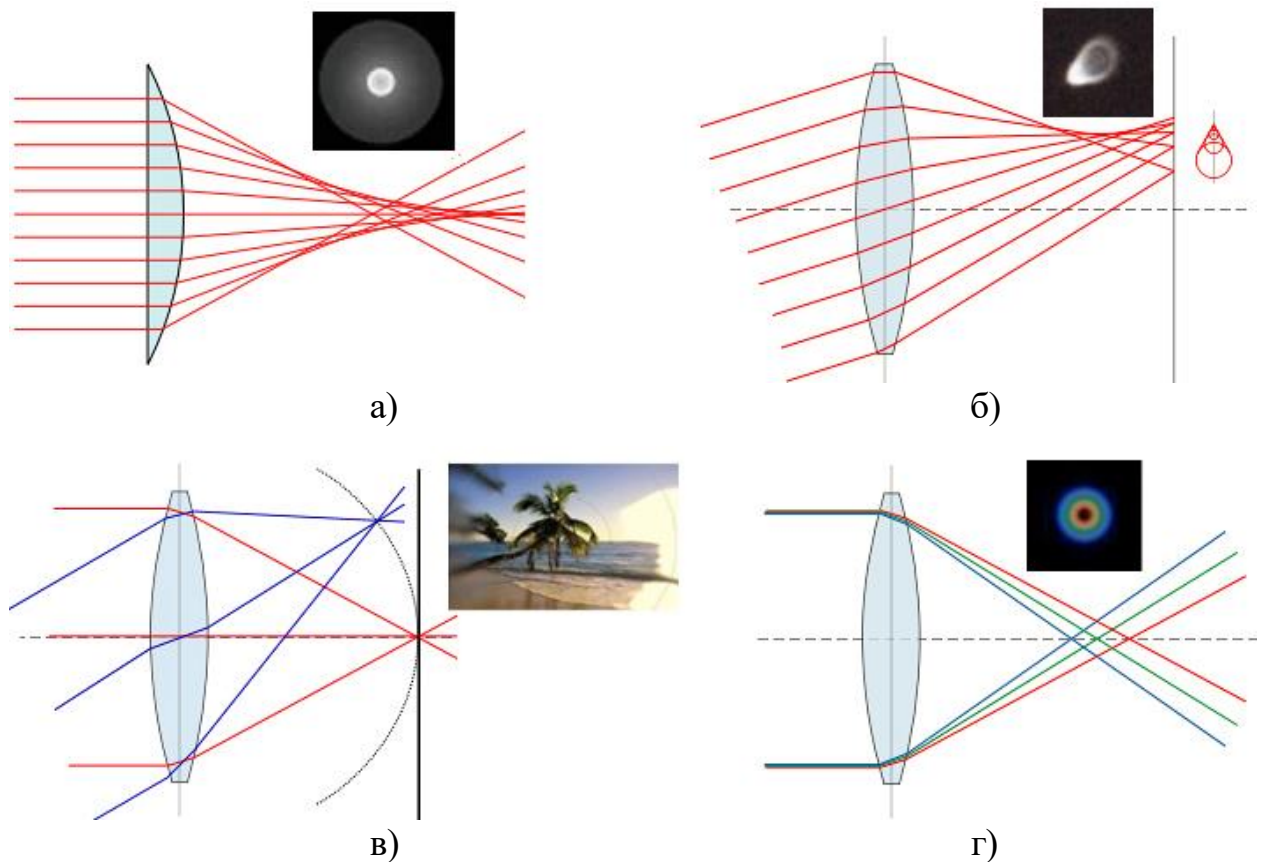


Рисунок 1.15 – Аберации в об'єктивах

(а – сферична, б – коматична, в – кривизна поля зображення, г – хроматичні)

Найбільше дані види аберацій проявляються при найбільшій світлосилі об'єктивів. Тому іноді фотографи вимушені трішки закривати діафрагму, щоби знизити помітність аберацій.

Таким чином, характеристики об'єктивів сильно впливають якісні показники фото- і відеотехніки.

1.6 Висновки по розділу 1

1. Розглянута будова, принцип дії та складена електрична структурна схема цифрової фото- або відеокамери. Камера є приймачем світла, отже як і у бідь-якому приймачеві, найбільш відповідальними є ланки, що розташовані ближче до входу. У камери це об'єктив і світлочутлива матриця. Саме від них в першу чергу залежать якісні показники зображення. Постобробка в камері або на комп'ютері має за мету зменшити ті спотворення або шуми, що виникли в цих перших двох ланках.

2. Камери смартфонів і професійні камери відрізняються саме об'єктивами і матрицями. У смартфонах, внаслідок їхніх невеликих розмірів і тонкого форм-фактору, немає фізичної можливості використати великі матриці і об'єктиви. Тому характеристики їх камер мають бути гірше, ніж у професійної фотоапаратури.

3. Вже певний час виробники застосовують у смартфоні декілька камер з різними характеристиками об'єктивів і матриць з подальшим комбінуванням цих зображень в єдине вихідне зображення. Кількість камер може бути від 2 до 5 (Huawei P40 Pro Plus). В цих камерах відрізняється роздільна здатність і фізичний розмір матриці, світлосила і фокусна відстань об'єктиву, тип колірних світлофільтрів Байєра.

4. Отже, головні відмінності в камерах смартфона і професійних слід очікувати в тому, що обумовлено матрицею (чутливість, динамічний діапазон, роздільна здатність) і тому, що обумовлено об'єктивом (світлосила,

кут поля зору, чіткість зображення, аберації). Дані параметри слід оцінити теоретично і на практиці.

5. Метою даної роботи є теоретичний аналіз та практичне порівняльне дослідження технічних характеристик професійних фотокамер і камер сучасних смартфонів задля визначення тих граничних умов їхньої експлуатації, в яких вони можуть дати наближені результати зйомки.

6. Дана кваліфікаційна робота магістра виконана на кафедрі Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем ХНУРЕ. На кафедрі МІРЕС проводяться дослідження в таких наукових областях, як виявлення та розпізнавання БПЛА за результатами відеоспостереження [14-19], систем технічного зору роботів [20, 21]. Цілий ряд студентських доповідей [22-25] присвячені тематиці обробки зображень. Отже, тематика даної кваліфікаційної роботи відповідає традиційному науковому напрямку кафедри МІРЕС.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФЕСІЙНИХ ФОТОКАМЕР І КАМЕР СУЧАСНИХ СМАРТФОНІВ

2.1 Оцінка чутливості камер смартфона

Проведемо оцінку чутливості камери смартфона Xiaomi Redmi Note 12 Pro Plus 5G в різних режимах без постобробки. Даний смартфон з'явився на ринку відносно недавно і став досить популярною моделлю в лінійці Xiaomi.

Xiaomi Redmi Note 12 Pro Plus 5G має три задні камери (рис.2.1) [26].



Рисунок 2.1 – Задні камери телефону Redmi Note 12 Pro 5G

На задній панелі знаходяться такі камери:

- основна 200-мегапіксельна камера із широким кутом огляду. Встановлено сенсор Samsung ISOCELL HPX (ISOCELL CMOS) з досить великою діагоналлю (1/1,4)”. Працює він разом з об'єктивом зі світлосилою $F=1,65$.

- додаткова 8-мегапіксельна ширококутна камера (тип сенсора невідомий). Працює вона з об'єктивом зі світлосилою $F=1,9$;

- окрема 2-мегапіксельна камера для макрозйомки. Встановлено сенсор GalaxyCore GC02M1 з діагоналлю (1/5,5)”. Працює макрокамера з об'єктивом зі світлосилою $F=2,4$.

В табл.2.1 наведені детальні технічні характеристики камер телефону Redmi Note 12 Pro Plus 5G [26].

Таблиця 2.1 – Детальні технічні параметри камер телефону Redmi Note 12 Pro Plus 5G

№	Призначення	Об'єктив		Матриця	
		Світлосила	Кут огляду	Мпкс	Діагональ
1	Основна	f/1,7	79°	200	(1/1,4)"
2	Ширококутна	f/2,2	119°	8	н/д
3	Макро	f/2,4	н/д	2	(1/5,5)"

* н/д – не дано виробником

Сенсор формату 1/1,4 дюйма має піксель розміром всього 0,56 мкм – це на 15% менше, ніж у сенсорі HP1. Його компактність дозволяє зменшити товщину виступу блоку камер смартфонів на 20%, а біннінг 4-в-1 та 16-в-1 має допомогти при зйомці в умовах слабкого освітлення (рис.2.2) [26].

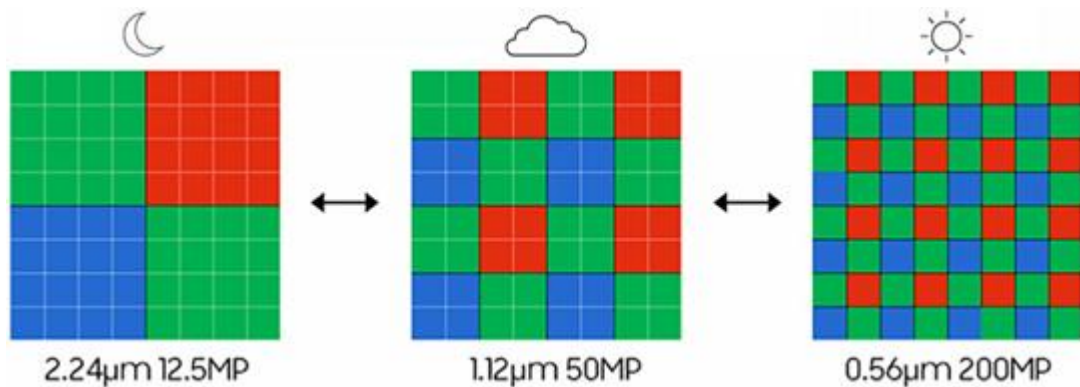


Рисунок 2.2 – Зміна еквівалентної площі пікселя і роздільної здатності зображення при бінінгу

Оцінимо чутливість основної камери смартфона в максимальній роздільній здатності і у режимі біннігу. Порогом чутливості вважатимемо значення відношення сигнал-шум 20 дБ. Енергетична опроміненість матриці може бути описана виразом [7, 8]:

$$E = \frac{N_{\phi} \cdot \bar{W}_{\phi}}{S \cdot T_e \cdot \eta}, \quad (2.1)$$

де N_ϕ – число фотоелектронів, що накопичує піксель за час витримки;

S – площа пікселя, м²;

T_e – час витримки, с;

$\bar{W}_\phi = h\bar{\nu}$ – середня енергія фотону, Дж;

$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постійна Планка;

$\bar{\nu}$ – середня частота видимого діапазону, Гц;

η – квантовий вихід.

Для розрахунку середньоквадратичного рівня шумів світлочутливих матриць зручно користуватися формулою [7, 8]

$$N_{ш} \approx \sqrt{2N_\phi}. \quad (2.2)$$

Коефіцієнт 2 у виразі (2.2) враховує той факт, що тепловий і фотонний шум матриць без додаткового охолодження приблизно однаковий.

В такому разі відношення сигнал-шум

$$\frac{N_\phi}{N_{ш}} = \frac{N_\phi}{\sqrt{2N_\phi}} = 10^{SNR/20}, \quad (2.3)$$

де SNR – межа значення сигнал-шум, дБ.

З формули (2.3)

$$N_\phi = 2 \cdot 10^{SNR/10}. \quad (2.4)$$

Підставляючи (2.4) в формулу (2.1), отримаємо

$$E = \frac{2 \cdot 10^{SNR/10} \cdot \bar{W}_\phi}{S \cdot T_e \cdot \eta}. \quad (2.5)$$

Середня енергія фотонів у видимому діапазоні

$$\bar{W}_\phi = h\bar{\nu} = h \frac{c}{\bar{\lambda}}, \quad (2.6)$$

де $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світлових хвиль;

$\bar{\lambda} = 555$ нм – середина видимого діапазону хвиль.

Враховуючи, що постійна Планка $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, формула (2.6)

запишеться як

$$\bar{W}_\phi = h \frac{c}{\bar{\lambda}} = 6,626 \cdot 10^{-34} \frac{3 \cdot 10^8}{555 \cdot 10^{-9}} = 3,58 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}. \quad (2.7)$$

Підставляючи вираз (2.7) в формулу (2.5), отримаємо

$$E = \frac{7,2 \cdot 10^{0,1 \cdot SNR - 19}}{S \cdot T_e \cdot \eta}, \text{ [Вт/м}^2\text{]}. \quad (2.8)$$

Вираз дає значення енергетичної опроміненості на матричному перетворювачі, необхідного для отримання потрібного відношення сигнал-шум SNR . З врахуванням формули (1.8) даному значенню відповідатиме освітленість:

$$E = \frac{1,74 \cdot 10^{0,1 \cdot SNR - 16}}{S \cdot T_e \cdot \eta}, \text{ [лк]}. \quad (2.9)$$

чи з урахуванням $S = d^2$, де d – розмір пікселя:

$$E = \frac{1,74 \cdot 10^{0,1 \cdot SNR - 16}}{d^2 \cdot T_e \cdot \eta}, \text{ [лк]}. \quad (2.10)$$

При розрахунку чутливості контролюють освітленість на об'єкті зйомки E_0 . У світлочутливій площині матриці освітленість буде меншою в порівнянні з E_0 , вона обчислюється за виразом

$$E = \frac{E_0 \cdot \rho \cdot \tau}{4 \cdot F^2}, \text{ [лк]}, \quad (2.11)$$

де E_0 – освітленість на об'єкті зйомки, лк;

ρ – коефіцієнт відбиття світла об'єктом;

τ – коефіцієнт світлопропускання об'єктиву;

F – діафрагмове число об'єктиву.

З формули (2.11)

$$E_0 = \frac{4 \cdot F^2 \cdot E}{\rho \cdot \tau}, \text{ [лк]}. \quad (2.12)$$

Підставляючи формулу (2.10) у вираз (2.12), отримаємо:

$$E_0 = \frac{7 \cdot F^2 \cdot 10^{0,1 \cdot SNR - 16}}{\rho \cdot \tau \cdot d^2 \cdot T_e \cdot \eta}, \text{ [лк]}. \quad (2.13)$$

При граничному значенні $SNR=30$ дБ, $d = 2,24$ мкм, $F = 1,7$, $\rho = 0,75$, $\tau = 0,85$, $T_e = 1/30$ с, $\eta = 0,8$ розрахункова величина

$$E_o = \frac{7 \cdot 1,7^2 \cdot 10^{0,1 \cdot 30 - 16}}{0,75 \cdot 0,85 \cdot 2,24^2 \cdot (1/30) \cdot 0,8} = 23,7 \cdot [\text{лк}]. \quad (2.14)$$

При граничному значенні $SNR=20$ дБ (стандартне значення для камер відеоспостереження) розрахунок по виразу (2.13) дає значення $E_o = 2,4$ лк.

В цілому, розраховані значення відповідають чутливості поширених сучасних кольорових відеокамер. Розрахунки потрібних освітленостей наведені в табл.2.2 для роздільної здатності камери 12,5 Мпікс (з бінінгом), і 200 Мпікс (без бінінгу), і різних відношень сигнал-шум (20 дБ, 30 дБ, 40 дБ, 50 дБ).

Таблиця 2.2 – Результати оцінок потрібних освітленостей на об'єкті

SNR, дБ	20		30		40		50	
Мпікс	12,5	200	12,5	200	12,5	200	12,5	200
E_o , лк	2,4	38	23,7	380	237	3800	2370	38000

З табл. 2.2 видно, що зйомки в режимі 200 Мпікс з витримкою 1/30 с можливі тільки при денному освітленні. При $E_o > 10000$ лк можна отримати значення $SNR > 45$ дБ. Навіть студійне освітлення з $E_o \approx 1000$ лк не зможе дати зображення високої якості, можна отримати тільки значення $SNR=35$ дБ.

Якщо мова йде про фото нерухомих об'єктів, то буде можливість збільшити витримку T_e . Зробимо оцінки вплив різних факторів на відношення сигнал-шум. Для того виразимо значення SNR з виразу (2.13):

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{E_o \cdot \rho \cdot \tau \cdot d^2 \cdot T_e \cdot \eta}{7 \cdot F^2} \right) + 160, \quad (2.15)$$

або, якщо підставити величину d одразу в мкм

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{E_o \cdot \rho \cdot \tau \cdot d_{\text{МКМ}}^2 \cdot T_e \cdot \eta}{7 \cdot F^2} \right) + 40. \quad (2.16)$$

На рис.2.2 наведені графіки залежності відношення сигнал-шум SNR в зображенні від освітленості на об'єкті E_o для випадку з бінінгом (12,5 Мпікс, $d = 2,24$ мкм) і без нього (200 Мпікс, $d = 0,56$ мкм) при часу витримки $T_e = 1/30$ с. Дана витримка відповідає режиму зйомки відео.

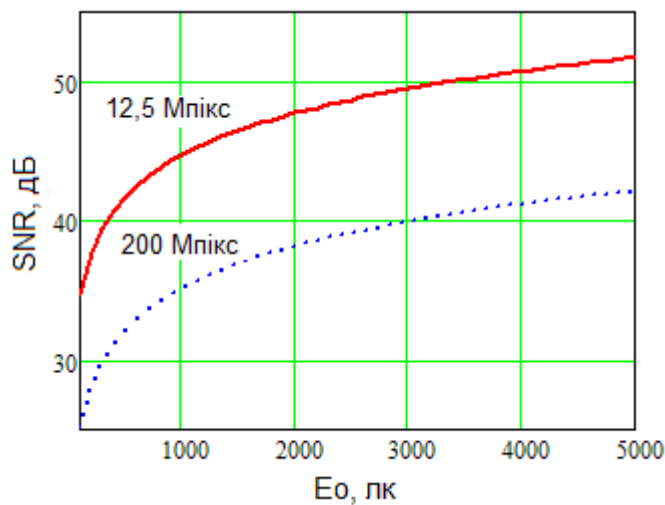


Рисунок 2.2 – Графіки відношення сигнал-шум SNR в залежності від освітленості E_o в режимах 200 Мпікс і 12,5 Мпікс при експозиції $T_e = 1/30$ с

Аналіз залежностей на рис.2.2 показує, що режим 200 Мпікс можна використовувати лише при денному сонячному світлі. У студійних умовах, при освітленості $E_o = 1000$ лк і витримці $T_e = 1/30$ с значення сигнал-шум для даного режиму лише $SNR = 36$ дБ. По якості зображення це задовільний результат для аматорського фото, але недостатній для професійних фотографій.

Значення сигнал-шум 45 дБ при цій витримці досяжні лише за освітленості 10000 лк (зимовий день), а 50 дБ – за освітленості 30000 лк (похмурий літній день). Отже, можна стверджувати, що роздільна здатність 200 Мпікс фактично є рекламним ходом, і повністю реалізувати роздільну

здатність в цьому режимі можна тільки при зйомках надворі вдень. Натомість в режимі об'єднання пікселів 16-в-1 при роздільній здатності 12,5 Мпікс значення сигнал-шум досягає значення $SNR=45$ дБ при $E_o=1000$ лк (студійне освітлення) і $SNR=50$ дБ при $E_o=3000$ лк (зйомка у хмарну погоду).

Покращити значення сигнал-шум в режимі фотографії можна при збільшенні часу витримки. На рис.2.3 наведені графіки залежності значень сигнал-шум SNR в зображенні від витримки T_e для чіткостей 200 Мпікс і 12,5 Мпікс при освітленості на об'єкті $E_o=1000$ лк. Дане значення освітленості відповідає зйомкам при студійному неперервному світлі.

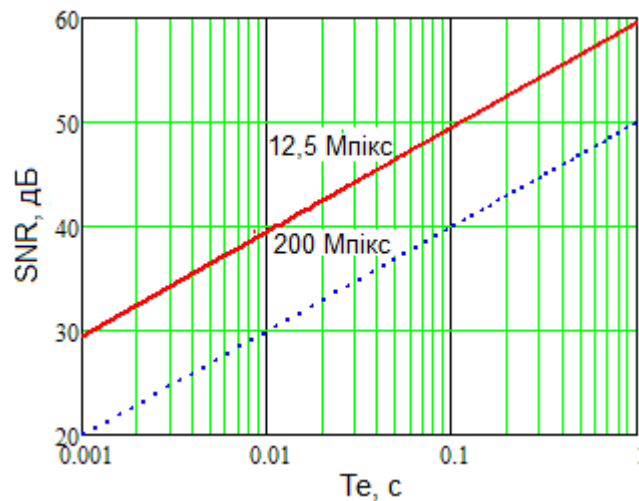


Рисунок 2.3 – Графіки відношення сигнал-шум SNR в залежності від часу витримки T_e у режимах 200 Мпікс і 12,5 Мпікс за освітленості $E_o=1000$ лк

Аналіз залежностей на рис.2.3 показує, що при студійному світлі 1000 лк якісні фото з роздільною здатністю 200 Мпікс можна отримати лише при досить великому значенні часу витримки $T_e=1$ с. Тільки тоді відношення сигнал-шум досягне $SNR=50$ дБ. Зрозуміло, що даний режим накладає підвищені вимоги до стабільного положення об'єкта і камери під час зйомки. Смартфон має міцно стояти на штативі, а запуск затвора треба проводити дистанційно з пульта керування.

Інколи у зйомці треба знімати швидкі процеси, наприклад бризки, краплі, воду, що тече, цукор або зерна кави, які сиплюються. В даному випадку треба ставити малі значення витримки, щоб «заморозити» зображення, $T_e < 0,001$ с. З графіків на рис.2.2 слідує, що навіть в режимі 12,5 Мпікс можна очікувати досить помітні шуми ($SNR < 30$ дБ). Треба провести додаткове дослідження даного режиму у практичній частині кваліфікаційної роботи.

Отримані в роботі графіки можна використовувати фотографам, що займаються зйомкою на смартфоні, для правильного вибору експозаміри (комбінація освітленості і витримки). Виведені інженерні формули для оцінки чутливості і відношення сигнал-шум можна застосовувати при плануванні фото- і відеозйомки на камеру смартфона.

2.2 Оцінка чутливості професійної камери

Проведемо оцінку чутливості професійної камери Canon EOS M50 Mark II. Дана камера з'явилася на ринку відносно недавно і стала досить популярною бездзеркальною кроп-камерою моделлю в лінійці Canon.

Canon EOS M50 Mark II має кроп-камеру (рис.2.4) [27].



Рисунок 2.4 – Матриця камери Canon EOS M50 Mark II

У більшості інструкцій можна знайти інформацію про фізичний розмір фотоматриці, і про її лінійну роздільну здатність, тобто, кількість пікселів, що уміщаються на матриці в одному ряду по горизонталі або по вертикалі.

Матриця цифрового фотоапарата Canon EOS M50 Mark II має розміри $a \cdot b = 22,3 \times 14,9$ мм або $N_z \cdot N_g = 6000 \times 4000$ пікселів. Щоб знайти розмір одного пікселя, достатньо взяти цифри для будь-якої зі сторін, розділити міліметри на пікселі та помножити отриманий результат на 1000, щоб перевести результат мікрометри (мікрони). Отримуємо формулу:

$$d = 10^3 \frac{a}{N_z} = 10^3 \frac{b}{N_g}, \quad (2.17)$$

де d – розмір пікселя у мікрометрах;

a, b – лінійний розмір матриці в міліметрах по одній із сторін;

N_z, N_g – кількість пікселів з відповідної сторони.

Для розглянутої камери Canon EOS M50 Mark II розрахунок буде таким:

$$d = 10^3 \frac{22,3}{6000} = 10^3 \frac{14,9}{4000} \approx 3,7 \text{ мкм}, \quad (2.18)$$

В табл.2.3 наведені технічні характеристики «кітового» (комплектного) об'єктиву камери Canon EOS M50 Mark II – EF 15-45 IS STM та портретного об'єктиву Canon EF 50mm f/1.8 STM.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики об'єктивів камери Canon EOS M50 Mark II

№	Об'єктив	Світлосила	Фокусна відстань, мм	Кут огляду
1	Кітовий	f/3,5...f/6,3	15...45	84°...33°
2	Портретний	f/1,8	50	46°

При граничному значенні $SNR=30$ дБ, $d=3,7$ мкм, $F=1,8$, $\rho=0,75$, $\tau=0,85$, $T_e=1/30$ с, $\eta=0,8$ розрахункова величина

$$E_o = \frac{7 \cdot 1,8^2 \cdot 10^{0,1 \cdot 30 - 16}}{0,75 \cdot 0,85 \cdot 3,7^2 \cdot (1/30) \cdot 0,8} = 9,7 \cdot [\text{лк}]. \quad (2.19)$$

При граничному значенні $SNR=20$ дБ (стандартне значення для камер відеоспостереження) розрахунок по виразу (2.13) дає значення $E_o = 0,97$ лк.

Розрахунки потрібних освітленостей для «кітового» (комплектного) об'єктиву (середня світлосила $f/4,9$) та портретного об'єктиву (світлосила $f/1,8$) наведені в табл.2.4.

Таблиця 2.4 – Результати оцінок потрібних освітленостей на об'єкті

SNR, дБ	20		30		40		50	
Об'єктив	f/1,8	f/4,9	f/1,8	f/4,9	f/1,8	f/4,9	f/1,8	f/4,9
E_o , лк	0,97	7,22	9,7	72,2	97	722	970	7220

З табл. 2.4 видно, що зйомки з комплектним об'єктивом з витримкою $1/30$ з високою якістю знімку можливі тільки при денному освітленні або при застосуванні імпульсного світла. При $E_o > 7500$ лк можна отримати значення $SNR > 50$ дБ. Неперервне студійне освітлення з $E_o \approx 1000$ лк не зможе дати зображення високої якості, можна отримати тільки значення $SNR=45$ дБ.

Якісне зображення з високим відношенням сигнал-шум можна отримати лише при використанні світлосильного об'єктиву, з діафрагмовим числом менше $f/2,0$. Неперервне студійне освітлення з $E_o \approx 1000$ лк дасть при цьому відношення сигнал-шум $SNR=50$ дБ.

На рис.2.5 наведені графіки залежності відношення сигнал-шум SNR в зображенні від освітленості на об'єкті E_o для «кітового» (комплектного) об'єктиву (середня світлосила $f/4,9$) та портретного об'єктиву (світлосила $f/1,8$) при часі витримки $T_e = 1/30$ с. Дана витримка відповідає режиму зйомки відео.

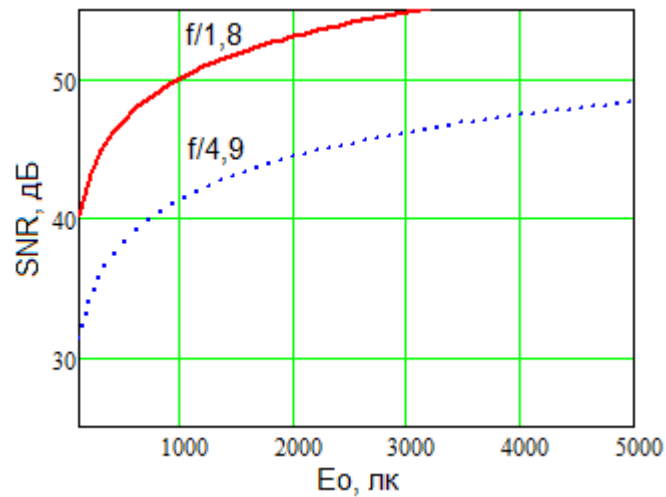


Рисунок 2.5 – Графіки відношення сигнал-шум SNR для «кітового» (комплектного) об'єктива (середня світлосила $f/4,9$) та портретного об'єктива (світлосила $f/1,8$) при експозиції $T_e = 1/30$ с

Аналіз залежностей на рис.2.5 показує, що комплектний об'єктив можна використовувати лише при денному сонячному світлі. У студійних умовах, при освітленості $E_o = 1000$ лк і витримці $T_e = 1/30$ с значення сигнал-шум для даного об'єктива $SNR = 42$ дБ. По якості зображення це задовільний результат для аматорського фото, але недостатній для професійних фотографій.

Значення сигнал-шум 45 дБ для даного об'єктива досяжні лише за освітленості 2500 лк (похмурий зимовий день), а 50 дБ – за освітленості 7000 лк (зимовий день). Отже, можна стверджувати, що комплектний об'єктив неприродний для отримання професійних фото і дає майже такий результат, як і камера смартфона. Тобто повністю реалізувати можливості професійної камери з комплектним об'єктивом немає можливості. Натомість при використанні світлосильного об'єктива з фіксованою фокусною відстанню значення сигнал-шум досягає значення $SNR = 50$ дБ при $E_o = 1000$ лк (студійне освітлення) і $SNR = 54$ дБ при $E_o = 3000$ лк (зйомка у хмарну погоду).

Покращити значення сигнал-шум в режимі фотографії можна при збільшенні часу витримки. На рис.2.6 наведені графіки залежності значень

сигнал-шум SNR в зображенні від витримки T_e для «кітового» (комплектного) об'єктиву (середня світлосила $f/4,9$) та портретного об'єктиву (світлосила $f/1,8$) при освітленості на об'єкті $E_o=1000$ лк. Дане значення освітленості відповідає зйомкам при студійному неперервному світлі.

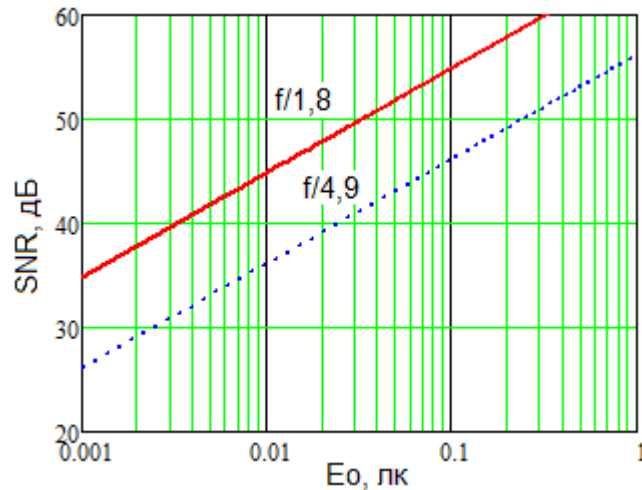


Рисунок 2.6 – Графіки відношення сигнал-шум SNR в залежності від часу витримки T_e для «кітового» (комплектного) об'єктиву (середня світлосила $f/4,9$) та портретного об'єктиву (світлосила $f/1,8$) за освітленості $E_o=1000$ лк

Аналіз залежностей на рис.2.3 показує, що при студійному світлі 1000 лк якісні фото з комплектним об'єктивом можна отримати лише при досить великому значенні часу витримки $T_e=0,2$ с. Тільки тоді відношення сигнал-шум досягне $SNR=50$ дБ. Зрозуміло, що даний режим накладає підвищені вимоги до стабільного положення об'єкта і камери під час зйомки. Камера має міцно стояти на штативі, а спуск затвора треба проводити дистанційно з пульта керування.

Інколи у зйомці треба знімати швидкі процеси, наприклад бризки, краплі, воду, що тече, цукор або зерна кави, які сиплюються. В даному випадку треба ставити малі значення витримки, щоб «заморозити» зображення, $T_e < 0,001$ с. З графіків на рис.2.6 слідує, що навіть при використанні світлосильних об'єктивів можна очікувати досить помітні шуми ($SNR < 36$ дБ).

Треба провести додаткове дослідження даного режиму у практичній частині кваліфікаційної роботи.

Отримані в роботі графіки можна використовувати фотографам, що займаються зйомкою на кроп-камери, для правильного вибору експопари (комбінація освітленості і витримки). Виведені інженерні формули для оцінки чутливості і відношення сигнал-шум можна застосовувати при плануванні фото- і відеозйомки на професійні камери.

2.3 Оцінки динамічного діапазону

Якщо вважати, що дві камери відрізняються розміром пікселя і світлосилою об'єктиву, то різниця у відношенні сигнал-шум при інших рівних умовах (освітленості, часу витримки, квантовому виході, ISO, постобробці), буде виражатися формулою:

$$\Delta SNR = 10 \lg \left(\frac{d_{2MKM}^2 \cdot F_1^2}{d_{1MKM}^2 F_2^2} \right) = 20 \lg \left(\frac{d_{2MKM} \cdot F_1}{d_{1MKM} F_2} \right), \text{ [дБ]}. \quad (2.20)$$

В табл.2.5 наведено виграш у відношенні сигнал-шум при використанні замість смартфона кроп-камери з комплектним об'єктивом, кроп-камери з портретним об'єктивом і повнокадрової камери з портретним об'єктивом.

Таблиця 2.5 – Виграш у відношенні сигнал-шум при використанні різних камер

Камера	Смартфон	Кроп f/4.9	Кроп f/1.8	FullFrame f/1.8
ΔSNR , дБ	0	-4,8	+3,9	+8,1

Крім кращої світлочутливості, професійна камера повинна мати ширший динамічний діапазон. Це означатиме, що краще пророблятимуться напівтони, перехід від одного кольору до іншого більш плавний, ніж на

камерах смартфона. Меншою буде ймовірність «пересвітів», тобто перевантаження камери світлом.

Динамічний діапазон будь-якої камери знизу обмежено шумом, зверху – пересвітом матриці (рис.2.7).

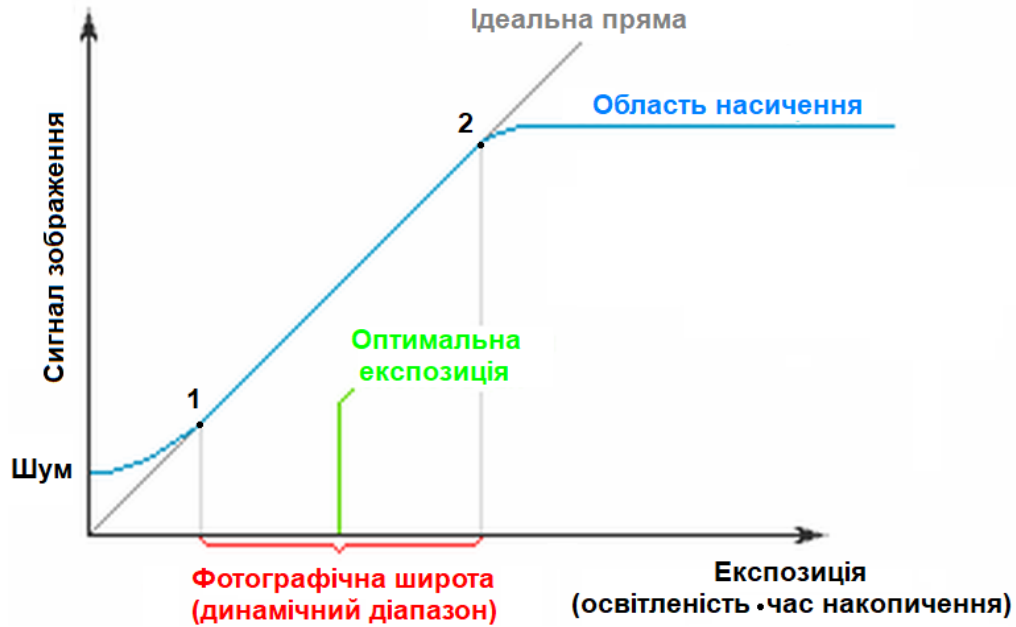


Рисунок 2.7 – Визначення динамічного діапазону камер

Динамічний діапазон можна вимірювати в різних одиницях [9]:

$$D = \frac{Exp_{\max}}{Exp_{\min}}, \text{ [відн. од.]}, \quad (2.20)$$

$$D = \lg \frac{Exp_{\max}}{Exp_{\min}}, \text{ [D-од.]}, \quad (2.21)$$

$$D = \lg_2 \frac{Exp_{\max}}{Exp_{\min}}, \text{ [f-stop]}, \quad (2.22)$$

$$D = 10 \lg \frac{Exp_{\max}}{Exp_{\min}}, \text{ [дБ]}. \quad (2.23)$$

Найпоширенішими серед фотографів є D -одиниці і f -stop-и.

Якщо наближено поширити формулу (2.20) на величину максимальної експозиції, отримаємо

$$\Delta E_{\max} = 20 \lg \left(\frac{d_{2\text{мкм}}}{d_{1\text{мкм}}} \right), \text{ [дБ]}. \quad (2.24)$$

Тоді приріст динамічного діапазону

$$\Delta D = 20 \lg \left(\frac{d_{2\text{мкм}} \cdot F_1}{d_{1\text{мкм}} F_2} \right) + 20 \lg \left(\frac{d_{2\text{мкм}}}{d_{1\text{мкм}}} \right) = 20 \lg \left(\frac{d_{2\text{мкм}}^2 \cdot F_1}{d_{1\text{мкм}}^2 F_2} \right), \text{ [дБ]}, \quad (2.25)$$

або в D-одиницях

$$\Delta D = \lg \left(\frac{d_{2\text{мкм}}^2 \cdot F_1}{d_{1\text{мкм}}^2 F_2} \right), \text{ [D-од.]}. \quad (2.26)$$

В табл.2.6 наведено вираш у динамічному діапазоні при використанні замість смартфона кроп-камери з комплектним об'єктивом, кроп-камери з портретним об'єктивом і повнокадрової камери з портретним об'єктивом.

Таблиця 2.6 – Виграш у динамічному діапазоні при використанні різних камер

Камера	Смартфон	Кроп f/4.9	Кроп f/1.8	FullFrame f/1.8
ΔD , дБ	0	-0,48	+8,2	+16,6
ΔD , D-од	0	-0,024	+0,41	+0,83

Отримані в табл.2.5 і табл.2.6 покращення світлочутливості і динамічного діапазону достатньо вагомі лише для камер зі світлосильним об'єктивом. Використання комплектного об'єктиву з професійною камерою не покращує її характеристики у порівнянні зі смартфоном, а в деяких

випадках – навпаки, погіршує. Вагома перевага у світлочутливості і динамічному діапазоні може бути у повнокадрової камери зв світлочутливим об'єктивом. Але зважаючи на ціну повнокадрових камер, ці недоліки для фотографа-початківця можуть бути не сильно значущими.

Отже, камера сучасного смартфона може буде кращим вибором для фотографа-початківця.

2.4 Висновки по розділу 2

В розділі 2 виведено зручні інженерні формули для оцінки чутливості фото- і відеокамер, відношення сигнал-шум і динамічного діапазону. В результаті розрахунків отримані графіки відношення сигнал-шум SNR від освітленості E_o і витримки T_e . Дані графіки отримані для смартфона Redmi Note 12 Pro Plus 5G в режимах 200 Мпікс і 12,5 Мпікс, а також для бездзеркальної кроп-камери Canon EOS m50 Mark II в парі з комплектним об'єктивом і в парі зі світлосильним портретним об'єктивом.

Аналіз отриманий залежностей показує, що режим смартфона 200 Мпікс можна використовувати лише при денному сонячному світлі. Навіть у студійних умовах значення сигнал-шум для даного режиму лише 36 дБ. Це задовільний результат для аматорського фото, але недостатній для професійних фотографій. Натомість в режимі об'єднання пікселів 16-в-1 при роздільній здатності 12,5 Мпікс значення сигнал-шум досягає значення $SNR=45$ дБ при $E_o=1000$ лк (студійне освітлення) і $SNR=50$ дБ при $E_o=3000$ лк (зйомка у хмарну погоду). Отже роздільна здатність в смартфонах більше 12,5 Мпікс на практиці не може бути реалізована.

Щодо професійних фотокамер, то покращення світлочутливості і динамічного діапазону достатньо вагомі лише для камер зі світлосильним об'єктивом. Використання комплектного об'єктиву з професійною камерою не покращує її характеристики у порівнянні зі смартфоном, а в деяких випадках – навпаки, погіршує. Вагома перевага у світлочутливості і

динамічному діапазоні може бути у повнокадрової камери зі світлочутливим об'єктивом (+8 дБ і +16 дБ відповідно). Але зважаючи на ціну повнокадрових камер, ці недоліки для фотографа-початківця можуть бути не сильно значущими.

Отже, камера сучасного смартфона може бути кращим вибором для фотографа-початківця.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФЕСІЙНИХ ФОТОКАМЕР І КАМЕР СУЧАСНИХ СМАРТФОНІВ

3.1 Умови експерименту

Задачею дослідження є отримання числових оцінок відношення сигнал-шум в зображенні і динамічного діапазону смартфона Redmi Note 12 Pro Plus 5G, а також беззеркальної кроп-камери Canon EOS m50 Mark II.

Для порівняння відношення сигнал-шум з розрахунковими потрібно зафіксувати освітленість на об'єкті. Для цього можна використати або апаратний люксметр, або застосунок Luxmeter на смартфоні, попередньо скоригований по апаратному люксметру (рис.3.1).



Рисунок 3.1 – Апаратний люксметр МТ30 (а) і застосунок Luxmeter на смартфоні (б)

Обидва прилади знаходяться поряд під однаковою освітленістю, отже, коефіцієнт корекції показів застосунка Luxmeter на смартфоні складає

$$k_{lx} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{595}{247} = 2,4. \quad (3.1)$$

Перевірка виконувалася в одній з середніх точок графіків, тобто, при $d = 1$ м, $H = 1$ м. Розрахункове значення для даних параметрів $E_g = 2700$ лк, $E_z = 2700$ лк.

Результати вимірювання освітленості після повірки застосунку Luxmeter на смартфоні: $E_z = 2714$ лк, $E_g = 2056$ лк (рис.3.2).

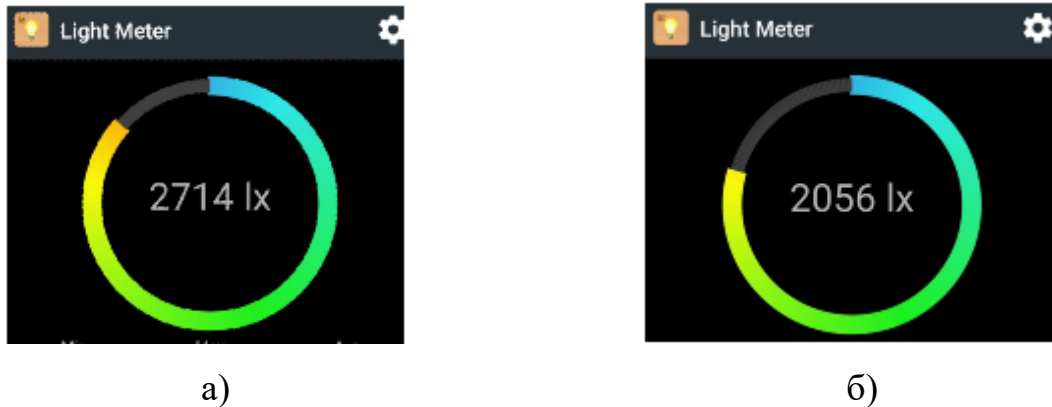


Рисунок 3.2 – Результати вимірювання освітленості після повірки застосунку Luxmeter на смартфоні (а – освітленість в горизонтальній площині, б – освітленість у вертикальній площині)

Якщо освітленість в горизонтальній площині не відрізняється від розрахункового значення, то виміряна вертикальна освітленість менше за розраховану на 24%. Така різниця пояснюється тим, що неможливо було в експерименті витримати точне вертикальне положення смартфона при вимірюваннях освітленості. В іншому, результати вимірювання підтверджують результати розрахунків.

3.2 Вимірювання відношення сигнал-шум

Виконаємо експеримент з визначення відношення сигнал-шум у зображенні. Для цього зробимо декілька знімків однорідного білого фону без текстури (офісний білий папір) при різних значеннях освітленості (рис.3.3). Освітленість можна змінювати відстанню від паперу до світильника та числом включених ламп.

На рис.3.4 показано декілька знімків, отриманих в результаті описаного експерименту. Можна помітити присутність градієнтів яскравості по причині нерівномірної освітленості листа паперу.



Рисунок 3.3 – Експеримент з вимірювання відношення сигнал-шум у зображеннях

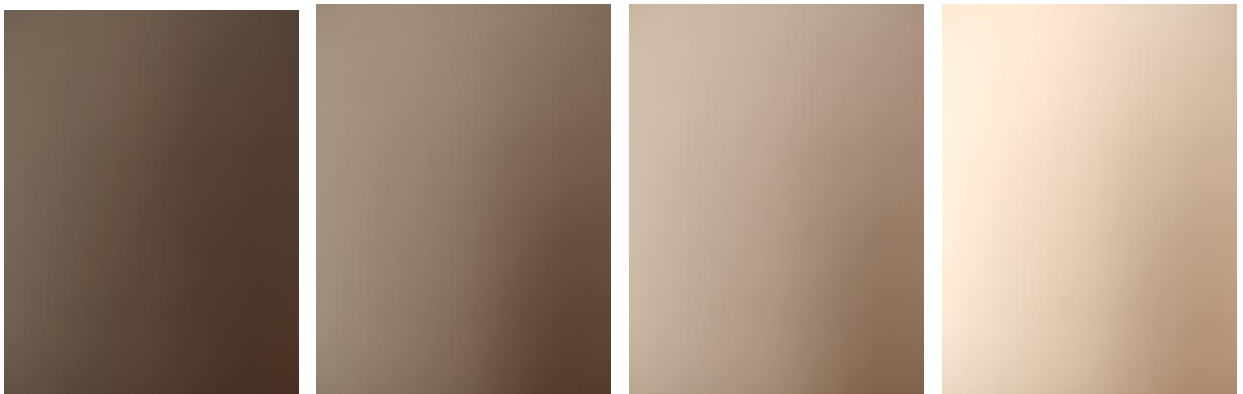


Рисунок 3.3 – Присутність градієнтів яскравості по причині нерівномірного освітлення листа паперу

Для усунення впливу даних градієнтів на вимірювання відношення сигнал-шум проведено просторову фільтрацію шляхом застосування фільтру зрізу нижніх частот (Low Cut Filter). Для зменшення ефекту Гібса внаслідок різкого обмеження спектру оберемо функцію фільтру $1 - \cos^2$:

$$K(k_x, k_y) = 1 - \cos^2\left(\frac{k_x}{k_{x\max}} \frac{\pi}{2}\right) \cos^2\left(\frac{k_y}{k_{y\max}} \frac{\pi}{2}\right), \quad (3.2)$$

де k_x, k_y – є просторові частоти по вісях x, y ;

$k_{x \max}, k_{y \max}$ – ширина смуги зрізу нижніх частот.

Фільтрація не має торкатися постійної складової, отже

$$K(0,0) = 1. \quad (3.3)$$

На рис. 3.5 наведено тривимірний графік функції фільтрації $K(k_x, k_y)$ при $k_{x \max} = 24, k_{y \max} = 18$. Дані значення вибрані для роздільної здатності кадрів смартфона 4000x3000. Для роздільної здатності кадрів професійної камери 6000x4000 обираємо $k_{x \max} = 36, k_{y \max} = 27$.

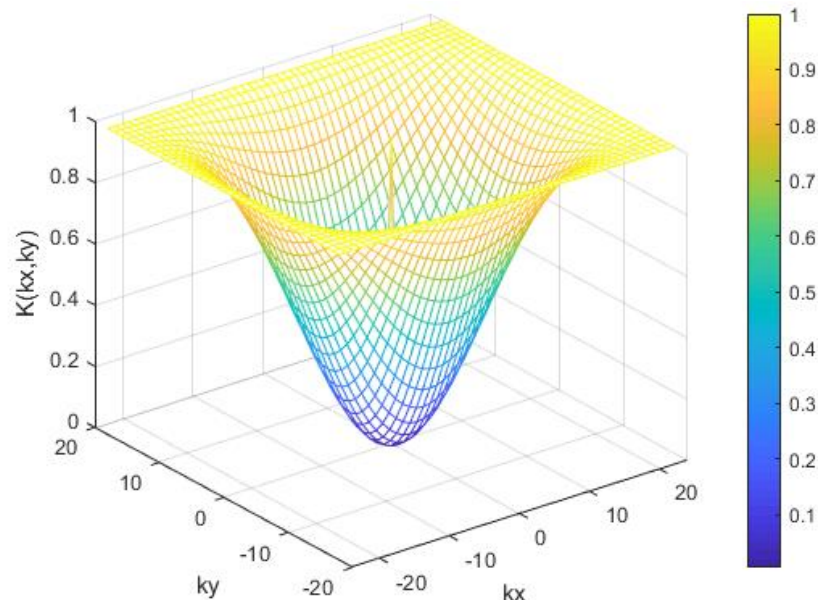


Рисунок 3.5 – Графік функції фільтрації просторового спектру

$$K(k_x, k_y) \text{ при } k_{x \max} = 24, k_{y \max} = 18$$

На рис.3.6 наведено результат фільтрації зображення з метою усунення градієнтів. При відсутності градієнтів є збільшується контраст і виділяється шумова складова.

На рис. 3.7 показано залежність відношення сигнал-шум від освітленості по результатам експерименту (синя верхня крива) та по результатам теоретичних розрахунків (червона нижня крива) для камери

смартфону Redmi Note 12 Pro Plus 5G. На графіках помітно більше відношення сигнал-шум в експерименті у порівнянні з розрахунковими значеннями. Даний вираз більше при освітленостях до 1000 лк.

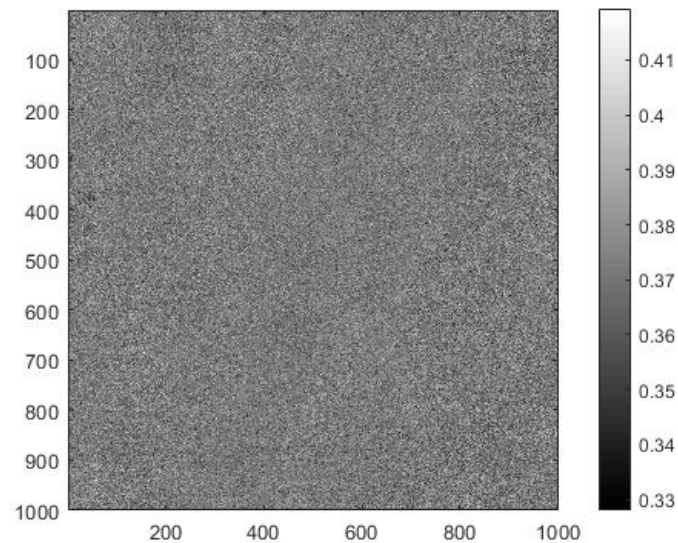


Рисунок 3.6 – Результат фільтрації зображення для усунення градієнтів

Отриману відмінність теоретичних розрахунків і експериментальних оцінок можна пояснити наявністю у смартфоні антишумової обробки зображень, яка, природно, має максимальну дію на зображеннях, в яких відсутні дрібні деталі.

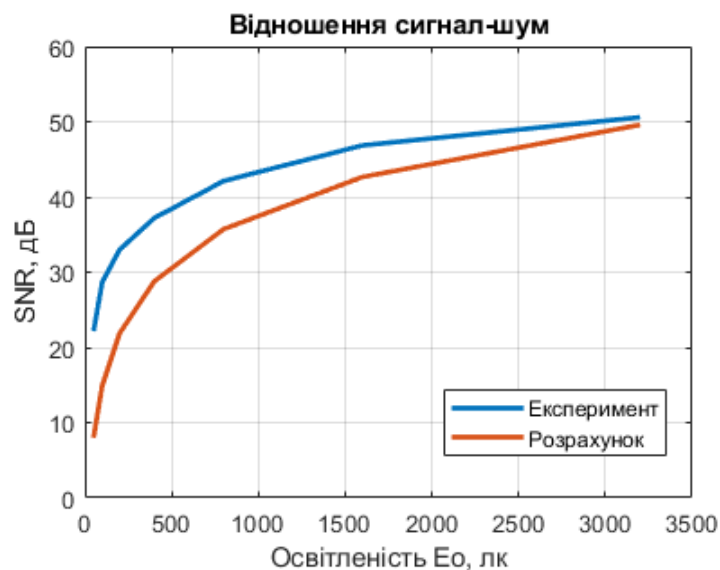


Рисунок 3.7 – Залежність відношення сигнал-шум від освітленості для смартфона Redmi Note 12 Pro Plus 5G

В даному експерименті саме було використано такі зображення.

На рис. 3.8 показано залежність відношення сигнал-шум від освітленості по результатам експерименту (синя нижня крива) та по результатам теоретичних розрахунків (червона верхня крива) для дзеркальної кроп-камери Canon EOS m50 Mark II.

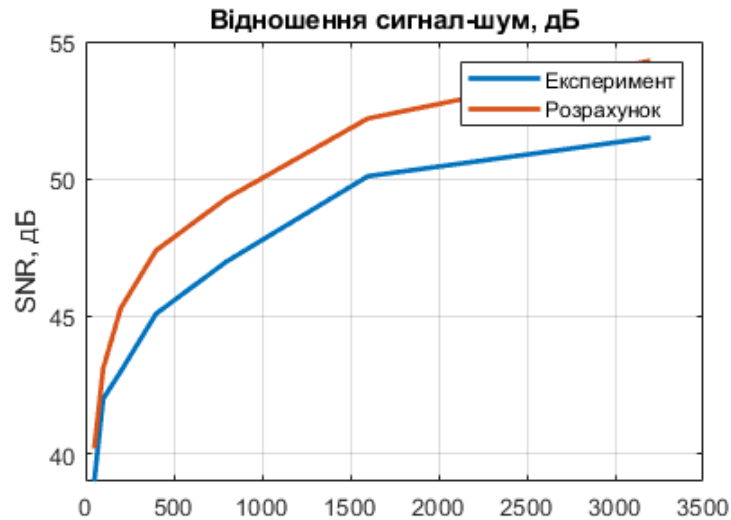


Рисунок 3.9 – Залежність відношення сигнал-шум від освітленості для камери Canon EOS m50 Mark II

На графіках помітно менше відношення сигнал-шум в експерименті у порівнянні з розрахунковими значеннями. Даний вигреш на 1-2 дБ більше при освітленостях більше 100 лк. Така різниця може бути пояснена тим, що насправді квантовий вихід та коефіцієнт світлопропускання об'єктиву у камери були менше, чим припущення в розрахунках. Крім того, шумоподавлення камери під час експерименту було відключене.

Нижче надано текст скрипта в MATLAB для проведеного експерименту.

```
clear all; close all

sn=zeros(7,1);

for n=1:7
    I=imread(['c:\snr4\' , num2str(n) , '.jpg']);
    Y(:, :)=I(:, :, 1);
    Y=im2double(Y);
```

```

y=fft2(Y); y=fftshift(y);
c1=2001; c2=1501;
M=y(c1,c2);

size1=24; size2=18;

for i=c1-size1:c1+size1
    for j=c2-size2:c2+size2
        K=1-((cos(0.5*pi.*(i-c1)/size1).^2).*cos(0.5*pi.*(j-c2)/size2)).^2);
        y(i,j)=K*y(i,j);
    end
end

y(c1,c2)=M;
y=fftshift(y);
Y=ifft2(y);

Y=real(Y);
Y1(:, :)=Y(1500:2500,1000:2000);

M=rms(Y1, 'all');
S=mean(std(Y1));
sn(n)=10*log(M/S)

end

E=[50 100 200 400 800 1600 3200];

for n=1:7
    sn1(n)=10*log((E(n)*0.75*0.85*(2.1^2)*0.5*0.8)/(7*1.9^2));
end

plot(E, sn, E, sn1, "LineWidth", 2)
title('Відношення сигнал-шум')
xlabel('Освітленість E0, лк')
ylabel('SNR, дБ')
grid on
legend('Експеримент', 'Розрахунок')

imagesc(Y1)
colormap gray
colorbar

```

3.3 Дослідження динамічного діапазону

Як показано в розділі 1, динамічний діапазон камери можна визначити зі світлової характеристики, як різницю між рівнем насичення і рівнем шуму. Світлова характеристика – це залежність рівня сигналу яскравості від експозиції. Експозиція залежить від експопари – освітленість матриці (або діафрагма) і витримка.

Отже існує 2 основних метода вимірювання динамічного діапазону камери:

- зміна освітленості на матриці при фіксованій витримці;
- зміна витримки при фіксованій освітленості на матриці.

Перший спосіб потребує використання спеціального інструменту – сенситометричного клину. Приклад такого інструменту Step Tablet від фірми Kodak показаний на рис.3.10.



Рисунок 3.10 – Сенситометричний клин Kodak Step Tablet

Другий спосіб нам більш доступний, тому будемо використовувати зміну витримки при фіксованій освітленості на матриці. В такому випадку світлова характеристика буде являти собою залежність рівня сигналу яскравості Y в % від чорного (0%) до білого (100%) від логарифму експозиції $\log H$. Експозиція в нашому випадку регулюється витримкою, і може бути виражена відносними одиницями

$$H = \frac{T}{T_0}, \quad (3.4)$$

де T – поточна витримка;

T_0 – максимальна витримка в експерименті, при якій сигнал яскравості $Y = 100\%$.

Отже, в нашому випадку треба отримати залежність

$$\bar{Y}(\%) = f(\lg(T/T_0)), \quad (3.5)$$

де \bar{Y} – середня яскравість по кадру.

На рис.3.11 показані світлові характеристики камери Canon EOS m50 Mark II (верхня зелена лінія) і камери смартфона Redmi Note 12 Plus 5 G (нижня синя лінія).

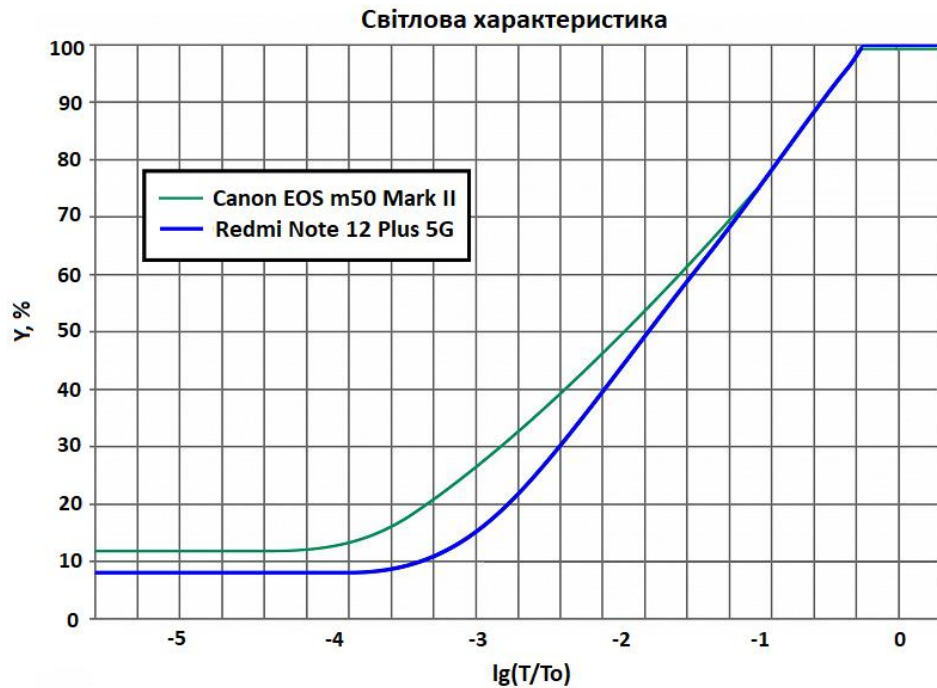


Рисунок 3.11 – Світлові характеристики камери Canon EOS m50 Mark II (верхня зелена) і камери смартфона Redmi Note 12 Plus 5 G (нижня синя)

З рис.3.11 динамічний діапазон камери Canon EOS m50 Mark II можна оцінити як $D_1 = 4,1$ D-одиниць, камери смартфона Redmi Note 12 Plus 5 G – як $D_2 = 3,6$ D-одиниць. Різниця динамічних діапазонів

$$\Delta D = D_2 - D_1 = 4,1 - 3,6 = 0,5 \text{ D-одиниць.} \quad (3.6)$$

В табл.2.5 розраховане значення $\Delta D = +0,41$ D-одиниця. Отже, в цілому, теоретичні оцінки відповідають отриманому експериментальному результату. Погрішності можуть бути викликані тим, що світлові характеристики в області чорного змінюються дуже повільно, і дуже важко точно визначити нижню межу динамічного діапазону.

3.4 Висновки по розділу 3

В даному розділі проведено експеримент з визначення відношення сигнал-шум у кадрах смартфона Redmi Note 12 Plus 5G і камери Canon EOS m50 Mark2. Для цього зроблено ряд кадрів рівномірно освітленого білого фону при різній освітленості. Освітленість контролювалася додатком люксметру на смартфоні, повіреному по апаратному люксметру.

Для усунення впливу нерівномірності освітленості на оцінку відношення сигнал-шум виконано просторову фільтрацію фільтром зрізу нижніх частот. Для зменшення коливань Гібса обрано плавну функцію обрізання НЧ $1 - \cos^2$. В результаті обробки кадрів в MATLAB обчислено експериментальну залежність сигнал-шум від освітленості.

У випадку смартфона помітно більше відношення сигнал-шум в експерименті (на 8-9 дБ) у порівнянні з розрахунковими значеннями. Даний вигравш більше при освітленостях до 1000 лк. Отриману відмінність теоретичних розрахунків і експериментальних оцінок можна пояснити наявністю у смартфоні антишумової обробки зображень, яка, природно, має максимальну дію на зображеннях, в яких відсутні дрібні деталі.

На графіках для камери навпаки – помітно менше відношення сигнал-шум в експерименті у порівнянні з розрахунковими значеннями. Даний вигравш на 1-2 дБ більше при освітленостях більше 100 лк. Така різниця може бути пояснена тим, що насправді квантовий вихід та коефіцієнт світлопропускання об'єктиву у камери були менше, чим припущення в розрахунках. Крім того, шумоподавлення камери під час експерименту було відключене.

Виміряно світлові характеристики і динамічний діапазон камери смартфона і професійної кроп-камери. Світлова характеристика отримана як залежність середньої яскравості рівномірно освітленого кадру від логарифму експозиції. Відносне значення експозиції задавалося зміною витримки при фіксованій освітленості і діафрагмі.

Динамічний діапазон камери Canon EOS m50 Mark II можна оцінити як 4,1 D-одиниць, камери смартфона Redmi Note 12 Plus 5 G – як 3,6 D-одиниць. Різниця динамічних діапазонів складає 0,5 D-одиниць при теоретичних оцінках 0,41. Отже, в цілому, теоретичні оцінки відповідають отриманому експериментальному результату. Погрішності можуть бути викликані тим, що світлові характеристики в області чорного змінюються дуже повільно, і дуже важко точно визначити нижню межу динамічного діапазону.

ВИСНОВКИ

За останні два десятиліття камери смартфонів пройшли довгий шлях від примітивних «затичок» з мильною картинкою до пристроїв, якість знімків яких може суперничати з професійними фотоапаратами.

Цілком серйозно на професійних форумах, сайтах для медіамайкерів виникають дискусії про використання флагманських смартфонів як альтернативи професійній фото- та відеоапаратурі. Серед переваг відзначають менші габарити, більшу автономність роботи, інколи більшу функціональність, наприклад електронну стабілізацію відео, легшу інтеграцію з Інтернетом і додатками з постобробки. При цьому вважається, що якість фото і відео майже наблизилася до професійної фото- та відеоапаратури.

Метою даної роботи є теоретичний аналіз та практичне порівняльне дослідження технічних характеристик професійних фотокамер і камер сучасних смартфонів задля визначення тих граничних умов їхньої експлуатації, в яких вони можуть дати наближені результати зйомки.

Розглянута будова, принцип дії та складена електрична структурна схема цифрової фото- або відеокамери. Камера є приймачем світла, отже як і у будь-якому приймачеві, найбільш відповідальними є ланки, що розташовані ближче до входу. У камери це об'єктив і світлочутлива матриця. Саме від них в першу чергу залежать якісні показники зображення. Постобробка в камері або на комп'ютері має за мету зменшити ті спотворення або шуми, що виникли в цих перших двох ланках.

Камери смартфонів і професійні камери відрізняються саме об'єктивами і матрицями. У смартфонах, внаслідок їхніх невеликих розмірів і тонкого форм-фактору, немає фізичної можливості використати великі матриці і об'єктиви. Тому характеристики їх камер мають бути гірше, ніж у професійної фотоапаратури.

Отже, головні відмінності в камерах смартфона і професійних слід очікувати в тому, що обумовлено матрицею (чутливість, динамічний діапазон, роздільна здатність) і тому, що обумовлено об'єктивом (світлосила, кут поля зору, чіткість зображення, аберації). Дані параметри слід оцінити теоретично і на практиці.

В другому розділі виведено зручні інженерні формули для оцінки чутливості фото- і відеокамер, відношення сигнал-шум і динамічного діапазону. В результаті розрахунків отримані графіки відношення сигнал-шум SNR від освітленості E_o і витримки T_e . Дані графіки отримані для смартфона Redmi Note 12 Pro Plus 5G в режимах 200 Мпікс і 12,5 Мпікс, а також для бездзеркальної кроп-камери Canon EOS m50 Mark II в парі з комплектним об'єктивом і в парі зі світлосильним портретним об'єктивом.

Аналіз отриманих залежностей показує, що режим смартфона 200 Мпікс можна використовувати лише при денному сонячному світлі. Навіть у студійних умовах значення сигнал-шум для даного режиму лише 36 дБ. Це задовільний результат для аматорського фото, але недостатній для професійних фотографій. Натомість в режимі об'єднання пікселів 16-в-1 при роздільній здатності 12,5 Мпікс значення сигнал-шум досягає значення $SNR=45$ дБ при $E_o=1000$ лк (студійне освітлення) і $SNR=50$ дБ при $E_o=3000$ лк (зйомка у хмарну погоду). Отже роздільна здатність в смартфонах більше 12,5 Мпікс на практиці не може бути реалізована.

Щодо професійних фотокамер, то покращення світлочутливості і динамічного діапазону достатньо вагомі лише для камер зі світлосильним об'єктивом. Використання комплектного об'єктиву з професійною камерою не покращує її характеристики у порівнянні зі смартфоном, а в деяких випадках – навпаки, погіршує. Вагома перевага у світлочутливості і динамічному діапазоні може бути у повнокадрової камери зі світлочутливим об'єктивом (+8 дБ і +16 дБ відповідно). Але зважаючи на ціну повнокадрових камер, ці недоліки для фотографа-початківця можуть бути не сильно значущими.

В третьому розділі проведено експеримент з визначення відношення сигнал-шум у кадрах смартфона Redmi Note 12 Plus 5G і камери Canon EOS m50 Mark2. Для цього зроблено ряд кадрів рівномірно освітленого білого фону при різній освітленості. Освітленість контролювалася додатком люксметру на смартфоні, повіреному по апаратному люксметру.

Для усунення впливу нерівномірності освітленості на оцінку відношення сигнал-шум виконано просторову фільтрацію фільтром зрізу нижніх частот. Для зменшення коливань Гібса обрано плавну функцію обрізання НЧ $1 - \cos^2$. В результаті обробки кадрів в MATLAB обчислено експериментальну залежність сигнал-шум від освітленості.

У випадку смартфона помітно більше відношення сигнал-шум в експерименті (на 8-9 дБ) у порівнянні з розрахунковими значеннями. Даний вигравш більше при освітленостях до 1000 лк. Отриману відмінність теоретичних розрахунків і експериментальних оцінок можна пояснити наявністю у смартфоні антишумової обробки зображень, яка, природно, має максимальну дію на зображеннях, в яких відсутні дрібні деталі.

На графіках для камери навпаки – помітно менше відношення сигнал-шум в експерименті у порівнянні з розрахунковими значеннями. Даний вигравш на 1-2 дБ більше при освітленостях більше 100 лк. Така різниця може бути пояснена тим, що насправді квантовий вихід та коефіцієнт світлопропускання об'єктиву у камери були менше, чим припущення в розрахунках. Крім того, шумоподавлення камери під час експерименту було відключене.

Виміряно світлові характеристики і динамічний діапазон камери смартфона і професійної кроп-камери. Світлова характеристика отримана як залежність середньої яскравості рівномірно освітленого кадру від логарифму експозиції. Відносне значення експозиції задавалося зміною витримки при фіксованій освітленості і діафрагмі.

Динамічний діапазон камери Canon EOS m50 Mark II можна оцінити як 4,1 D-одиниць, камери смартфона Redmi Note 12 Plus 5 G – як 3,6 D-одиниць.

Різниця динамічних діапазонів складає 0,5 D-одиниць при теоретичних оцінках 0,41. Отже, в цілому, теоретичні оцінки відповідають отриманому експериментальному результату. Погрішності можуть бути викликані тим, що світлові характеристики в області чорного змінюються дуже повільно, і дуже важко точно визначити нижню межу динамічного діапазону.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. The Evolution of Camera Phones, Visualized // Visual Content Editor, August 11, 2022. [Електронний ресурс]. URL: <https://simpleghar.com/the-evolution-of-camera-phones-visualized> (дата звернення 12.12.2023).
2. Morio Onoe. Digital Still Cameras: The Changing Face of Imaging // Photonics Spectra, March 2009. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.photonics.com/Articles/Digital Still Cameras The Changing Face of/p4/a25131> (дата звернення 12.12.2023).
3. Saraju P. Mohanty. A secure digital camera architecture for integrated real-time digital rights management // Journal of Systems Architecture, Vol. 55, Issues 10–12, October–December 2009. – pp. 468-480.
4. A. Yadav, P. Yadav. Digital Image Processing. University Science Press, 2009.
5. Melanie Cofield. Digital Imaging Basics. Information Technology Lab School of Information. The University of Texas at Austin, Summer 2005.
6. D. Sugimura, T. Mikami, H. Yamashita, and T. Hamamoto. Enhancing Color Images of Extremely Low Light Scenes Based on RGB/NIR Images Acquisition With Different Exposure Times // IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 24, No. 11, November 2015.
7. Understanding the Digital Image Sensor // LUCID Builds Innovative Cameras and Components, April 14, 2022. [Електронний ресурс]. URL: <https://thinklucid.com/tech-briefs/understanding-digital-image-sensors/> (дата звернення 12.12.2023).
8. M. Williams. What is the Difference Between a CCD and CMOS Camera Sensor? // PetaPixel, August 04, 2021. [Електронний ресурс]. URL: <https://petapixel.com/what-is-ccd-cmos-sensor/> (дата звернення 12.12.2023).
9. Junichi Nakamura, Brian J. Thompson, Kenji Toyoda, Takeshi Koyama. Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras. New-York: Taylor and Francis, 2005.

10. Al Judge. Understanding DSLR Lenses: An Illustrated Guidebook. Paperback – July 3, 2013.
11. M. Laikin. Lens Design. 3rd edition. CRC Press, 2001. – 504 p.
12. D. Malacara. Handbook of Optical Engineering. New-York: Taylor and Francis, 1996. – 960 p.
13. Brian W. Keelan, Handbook of Image Quality: Characterization and Prediction. New-York: Taylor and Francis, 2002.
14. Zubkov O.V., Sheiko S.O., Oleynikov V.M., Kartashov V.M., Babkin S.I. Investigation of Efficiency of Detection and Recognition of Drone Images from Video Stream of Stationary Video Camera / Telecommunications and Radio Engineering, 2021, 80(3), pp. 23–37.
15. Koryttsev, S. Sheiko, V. Kartashov, O. Zubkov, V. Oleynikov, I. Selieznov, M. Anohin. Practical Aspects of Range Determination and Tracking of Small Drones by Their Video Observation // 2020 International Scientific-Practical Conference. Problems of Infocommunications. Science and Technology. Kharkiv, Ukraine. October 6-9, 2020. – 5 p.
16. V. Kartashov, V. Oleynikov, O. Zubkov, S. Sheiko. Optical detection of unmanned air vehicles on a video stream in a real-time // The Fourth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2019), 9–13 September 2019, Odessa, Ukraine, 4 p.
17. В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.А. Шейко, В.Н. Олейников, О.В. Зубков, С.И. Бабкин. Оптико-электронные методы обнаружения воздушных объектов и измерения их координат // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 153 – 159.
18. О.В. Зубков, С.А. Шейко, В.Н. Олейников, В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.И. Бабкин. Исследование эффективности детектирования и распознавания изображений дронов по видеопотоку // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 136 – 146.

19. И.В. Корытцев, С.А. Шейко, В.М. Карташов, О.В. Зубков, В.Н. Олейников, С.И. Бабкин, И.С. Селезнев. Обработка сигналов при пеленгации и определении дальности до малоразмерных БПЛА в оптическом и инфракрасном диапазонах // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 125 – 134.
20. Zubkov O., Sheiko S., Oleynikov V., Kartashov V. Investigation of the neural networks effectiveness in recognizing moving drones. International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies, 2021, 2, pp. 119–122.
21. Sytnik O., Kartashov V. Technical vision model of the visual systems for industry application // Examining Optoelectronics in Machine Vision and Applications in Industry 4.0, 2021, pp. 288–310.
22. Довгаль К.С. Особливості роботи та використання програм тривимірного простору // 24-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2021. – с. 67 – 68.
23. Тимченко Г.О. Оцінка дальностей виявлення, розпізнавання та ідентифікації БПЛА в оптико-електронному каналі // 25-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2021. – с. 45 – 46.
24. Ключенков Р.О. Дослідження адаптивних методів подавлення шуму в відеозображеннях // 24-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2020. – с. 111 – 112.
25. Кац Д.В. Ефективність методів віднімання фону в задачах виявлення малих БПЛА // 24-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2020. – с. 101 – 102.

26. Specifications on Xiaomi Redmi Note 12 Pro 5G. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.kimovil.com/en/xiaomi-redmi-note-12-pro/camera> (дата звернення: 21.11.2023).

27. Mirrorless cameras Canon EOS M50 Mark II specifications. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.canon-europe.com/cameras/eos-m50-mark-ii/specifications/> (дата звернення: 21.11.2023).

28. Методичні вказівки з виконання атестаційної магістерської роботи за спеціальністю 8.05090102 «Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення». Освітньо-кваліфікаційний рівень – магістр / Упоряд. В.М. Карташов, В.А. Тихонов, І.В. Савченко – Харків: ХНУРЕ, 2012. – 68 с.