

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)

Апаратно-програмний комплекс для дослідження характеристик.
фото- і відеокамер.
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи СТМм-21-1
Єфименко А.К.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Системи, технології і
комп'ютерні засоби мультимедіа
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Ситнік О.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Володимир КАРТАШОВ
(підпис)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Системи, технології і комп'ютерні засоби мультимедіа
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Єфименку Андрію Костянтиновичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Апаратно-програмний комплекс для дослідження характеристик фото- і відеокамер.

затверджена наказом по університету від " 21 " 11 2022 р. № 1503 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 14.12.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи Максимальна роздільна здатність – еквівалент 8 Мп. Формати кадру 4/3, 16/9. Максимальна освітленість 1200 лк. Мінімальна освітленість 10 лк. Колірна температура джерел світла: 2900 та 6000 К. Досліджувані параметри: похибка балансу білого, рівень шуму (в % від повного розмаху), світлова характеристика, перехідна характеристика, частотно-контрастна характеристика, рівень хроматичних аберацій. Використання – в науково-навчальній лабораторії.

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

1. Аналітичний огляд літератури за тематикою роботи.

2. Розробка методики досліджень характеристик фото- і відеоапаратури.

3. Розробка програмної частини комплексу і проведення досліджень.

Висновки

Перелік посилань

Додатки

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

1. Тестування фото- і відеокамер (1 аркуш А4).
2. Постановка задачі (1 аркуш А4).
3. Конфігурація навчального варіанту (1 аркуш А4).
4. Конфігурація наукового варіанту (1 аркуш А4).
5. Розрахунок апаратної частини (1 аркуш А4).
6. Оцінка похибки балансу білого (1 аркуш А4).
7. Оцінка рівня шуму і світлової характеристики (1 аркуш А4).
8. Оцінка перехідної характеристики і МЧХ (1 аркуш А4).
9. Висновки (1 аркуш А4).

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	01.09.22–13.09.22	
2	Розробка методики досліджень	14.09.22–27.09.22	
3	Визначення параметрів апаратної частини	28.09.22–11.10.22	
4	Розробка програмної частини комплексу	12.10.22–25.10.22	
5	Експериментальні дослідження	26.10.22–10.11.22	
6	Графічна частина роботи	11.11.22–25.11.22	
7	Перевірка керівником	26.11.22–02.12.22	
8	Перевірка на академічний плагіат	03.12.22	
9	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	04.12.22–07.12.22	

Дата видачі завдання 01.09.2022 р.

Студент (підпис) Андрій ЄФИМЕНКО

Керівник роботи (підпис) Олег СИТНИК

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 86 сторінок, 42 рисунка, 15 таблиць, 29 джерел.

АБЕРАЦІЇ, ВІДЕОАПАРАТУРА, ЛАБОРАТОРНИЙ КОМПЛЕКС,
ОБ'ЄКТИВ, СВІТЛОВА ХАРАКТЕРИСТИКА, РІВЕНЬ ШУМУ,
ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНА ХАРАКТЕРИСТИКА, ЧІТКІСТЬ

Об'єкт дослідження – процес вимірювання параметрів фото- і відеоапаратури.

Мета дослідження – перевірка можливостей об'єктивного дослідження характеристик фото- і відеоапаратури за допомогою лабораторного комплексу, що складається з набору випробувальних таблиць, непрозорою камери з регульованою освітленістю всередині і змінною кольоровою температурою джерел світла, персонального комп'ютера і програмного забезпечення в середовищі MATLAB.

В атестаційній роботі проведено аналіз принципів побудови відеоапаратури, її характеристик і їх впливу на зображення, розроблена методика досліджень. Розроблено і розрахована конфігурація апаратної частини комплексу, проведено обґрунтування вибору її складових частин. Розроблено програмне забезпечення в середовищі MATLAB для обчислення характеристик телевізійної апаратури (помилки балансу білого в градусах Кельвіна і Майредах, рівень шуму в % від повного розмаху і світлову характеристику, перехідну і частотно-контрастну характеристику). Виконано експериментальні вимірювання та проведена налагодження програмного забезпечення.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 86 pages, 42 figures, 15 tables, 29 sources.

ABERRATIONS, VIDEO EQUIPMENT, LABORATORY COMPLEX, LENS, LIGHT CHARACTERISTIC, NOISE LEVEL, FREQUENCY-CONTRAST CHARACTERISTIC, ACCURACY

The object of study is the process of measuring the parameters of photo and video equipment.

The purpose of the study is to check the capabilities of an objective study of the characteristics of photographic and video equipment using a laboratory complex consisting of a set of test tables, an opaque camera with adjustable illumination inside and variable color temperature of light sources, a personal computer and software in MATLAB.

In the attestation work, an analysis of the principles of the construction of video equipment, its characteristics and their influence on the image was carried out, and a research methodology was developed. The configuration of the hardware of the complex has been developed and calculated, the justification of the choice of its component parts has been carried out. Developed software in the MATLAB environment for calculating the characteristics of television equipment (white balance errors in degrees Kelvin and Miredah, the noise level in% of full magnitude and light characteristic, transient and frequency-contrast characteristic). Experimental measurements were performed and software was debugged.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	8
Вступ.....	9
1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДУВАННЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ЗОБРАЖЕНЬ.....	11
1.1 Параметри систем передачі зображень.....	11
1.2 Світлотехнічні величини.....	18
1.3 Структурна схема цифрових відеокамер.....	22
1.4 Об'єктиви відеокамер.....	23
1.5 Матричні перетворювачі світло-сигнал.....	26
1.6 Отримання інформації про колір у відеокамерах.....	34
1.7 Висновки по розділу 1.....	37
2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТО- І ВІДЕОАПАРАТУРИ.....	39
2.1 Методика навчальних досліджень фото- та відеоапаратури.....	39
2.2 Науковий варіант лабораторного комплексу.....	42
2.3 Вибір зображень випробувальних таблиць.....	43
2.4 Вимірювання колірної температури та середньоквадратичного рівня шуму.....	45
2.5 Вимірювання чіткості та частотно-контрастної характеристики.....	48
2.6 Вимірювання перехідної характеристики та хроматичних аберацій.....	49
2.7 Вимірювання динамічного діапазону.....	51
2.8 Розрахунок геометричних розмірів випробувальних таблиць та непрозорі камери.....	54
2.9 Висновки по розділу 2.....	56
3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСУ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	58

3.1 Загальний алгоритм програми.....	58
3.2 Розробка підпрограми введення зображень.....	60
3.3 Обчислення помилки встановлення балансу білого, відносного рівня шуму, світлової характеристики.....	62
3.3.1 Підпрограма для обчислення помилки встановлення балансу білого.....	62
3.3.2 Підпрограма для обчислення відносного рівня шуму.....	66
3.3.3 Підпрограма для обчислення світлових характеристик.....	72
3.3.4 Підпрограма для розрахунку перехідної характеристики.....	74
3.3.5 Підпрограма розрахунку модуляційно-частотної характеристики.....	77
3.4 Висновки по розділу 3.....	79
Висновки.....	80
Перелік джерел посилань.....	84
ДОДАТКИ.....	87
Додаток А. Графічний матеріал.....	88
Додаток Б. Відомість кваліфікаційної роботи.....	97

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АЧТ – абсолютно чорне тіло;
ВК – відеокамера
Д – димер;
ДД – динамічний діапазон;
ДО – датчик освітленості;
ДС – джерело світла;
ВТ – випробувальна таблиця;
К – комутатор;
КМОП – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
КСС – крива сили світла;
МЧХ – модуляційно-частотна характеристика;
НК – непрозора камера;
ПЗЗ – прилад із зарядовим зв'язком;
ПХ – перехідна характеристика;
ПЕОМ - персональна ЕОМ;
РН – регулятор напруги;
CCD – Charge-Coupled Device (див. ПЗЗ);
CMOS – Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (див. КМОП);
JPEG – Joint Photographic Experts Group;
Lx – люксометр;
USB – Universal Serial Bus.

ВСТУП

Телевізійна система – це сукупність оптичних, електронних та радіотехнічних пристроїв, які приймають та передають на відстань інформацію про зображення рухомих, найчастіше, кольорових об'єктів. Зображення об'єкта перетворюється на електричні сигнали, які передаються каналом зв'язку і у місці прийому перетворюється знову на оптичне зображення.

Параметри систем передачі зображень загалом залежать від кожного вузла тракту передачі сигналу зображення. Однак, як і в кожній радіоелектронній системі, найбільш відповідальною ланкою є початкова камера.

В даний час питанню дослідження характеристик фото- та відеокамер приділяють велику увагу як фірми-виробники, так і спеціалізовані видання, які здійснюють тестування новинок. Такі огляди часто зустрічаються в Інтернеті. У "якісних" оглядах відеокамер одну з ключових ролей грає дослідження наступних параметрів: чутливість, наявність і рівень шумів в умовах недостатньої освітленості, деталізація зображення, що дозволяє здатність і правильність передачі кольору.

Для професійного вибору відеоапаратури лише спостережень і тестових кадрів недостатньо. Найбільш об'єктивним є порівняння двох відеокамер під час зйомки в однакових умовах. Для цього створюють спеціальні вимірювальні установки. Стандартних рішень для таких вимірів немає.

Лабораторний комплекс, що розробляється, являє собою набір випробувальних таблиць, непрозору камеру з регульованими джерелами світла, як за освітленістю, так і за колірною температурою. Це дозволяє спільно з комп'ютером без великих фінансових вкладень організувати вимірювальну лабораторію для фото- та відеоапаратури. Лабораторія може використовуватися як у навчальних, так і наукових цілях. Можливості

лабораторного комплексу обмежені такими факторами: якістю виготовлення випробувальних таблиць, ступенем перенесення кольорів застосованих джерел світла, реалізацією відповідних підпрограм обробки результатів. Обмеження стосуються вимірювання максимальної чіткості зображень та помилки встановлення балансу білого. При використанні високоякісних випробувальних таблиць та джерел світла вимірювальні можливості лабораторії, що проектується, автоматично розширюються до професійних.

Для створення програмної частини вибрано середовище MATLAB. Текст програми в МАТЛАБ не буде для студентів «чорною скринькою», вони повинні будуть змінювати її вихідний текст і вчитися думати як програмісти. На відміну від програми, написаної, наприклад, C++, і має готовий інтерфейс.

Питання забезпечення навчально-наукових лабораторій як нашого університету, так і всіх вищих навчальних закладів загалом, вимірювальним обладнанням нині стоїть досить гостро. Тому створення такого комплексу є актуальним завданням, його можливості можна використовувати, за відповідного доопрацювання, у всіх дисциплінах телевізійного циклу.

1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДУВАННЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ЗОБРАЖЕНЬ

1.1 Параметри систем передачі зображень

Стандарт телевізійного мовлення описує правила кодування сигналу зображення, звукового супроводу та додаткових даних передачі по каналу зв'язку [1,2].

Формат розкладання – характеристика стандарту телевізійного мовлення та відеозапису, що визначає кількість рядків зображення, частоту зміни кадрів (полів), а також режим розгортки. Стандарти розкладання відносяться не тільки до ТБ, але й до комп'ютерної графіки та цифрових відеоінтерфейсів [1,2].

Від формату розкладання залежить чіткість одержуваного зображення та ширина смуги частот, що займає телевізійні канали.

Параметри формату розкладання [1,2].

1. Формат кадру – у телебаченні під форматом розуміють відношення ширини зображення до його висоти.

У всіх системах телебачення стандартної чіткості співвідношення сторін кадру складає 4:3. Це відповідає «академічному формату» та добре вписується у звичайний формат кінематографа 1,37:1.

Усі стандарти телебачення високої чіткості спочатку розроблялися із співвідношенням сторін кадру 16:9 (Wide), що дозволяє найкраще вписати в екран більшість форматів телевізійного та кінематографічного зображення.

Деякі сучасні екрани мають формат 21:9 (UltraWide), що дуже близько до широкоформатного кінематографу (2,35:1).

При розбіжності формату зображення та формату екрана вдаються до різних хитрощів, пов'язаних з неповним використанням екрана, або до неповного виведення зображення на екран.

2. Кількість рядків (елементів) зображення.

Основними стандартами розкладання прийнято вважати:

- європейський 625/50 (затверджений МККР у 1952 році),
- американський 525/60 (прийнятий США 1941 року).

У першому ТВ сигнал передає 625 рядків при 50 полях на секунду, другий 525 рядків при 60 полях на секунду черезрядкова розгортка (interlacing).

Ці стандарти розкладання діють і сьогодні, але з'явилися вони в епоху електронно-променевих трубок (ЕЛТ) та несуть слід тих технологій. Сигнали цих стандартів містять область гасіння, тому кількість рядків у них перевищує кількість рядків, які реально відображаються на екрані.

У європейському стандарті із 625 переданих рядків активних – 575, в американському стандарті із 525 рядків активних – 483. Тому в комп'ютерній графіці цим стандартам розкладання відповідає дозвіл 576i (480i в американському стандарті).

Розрізнення основних форматів ТВ зображень показані в табл.1.1.

Таблиця 1.1 – Роздільна здатність основних форматів ТВ зображень

Параметр	Стандарт			
	SMPTE 274M (FullHD)	SMPTE S17.392 (HD)	ITU-R BT.601 (SD)	ITU-R BT.601 (SD)
Число активних рядків	1080	720	480	576
Число активних елементів в рядку	1920	1280	720	720

Кількість елементів розкладання є єдиним параметром, визначальним чіткість.

Чіткість – якість відтворення дрібних деталей. Вимірюється в кількості ліній, що розрізняються окремо по вертикалі і по горизонталі. Навіть при достатній кількості елементів розкладання, чіткість може бути гіршою через

вплив об'єктива камери, завал частотної характеристики відеотракту, вплив системи стиснення відеоінформації.

Вибір числа рядків Z у повному кадрі.

Очевидно, слід виходити із параметрів нашого зору. Телеглядач повинен розрізняти окремі рядки (елементи) ТБ зображення. Прийнято вважати, що гранична кутова роздільна здатність людського зору $\alpha_{zp} \approx 1'$. При розробці стандартів телебачення звичайної чіткості (SD) прийнято було вважати, що телеглядач знаходиться від телевізора на відстані п'ять висот екрану – при цьому все зображення на сітківці очі потрапляє в область жовтої плями. Тоді, кут ясного зору по вертикалі при форматі $p = 4/3$, $\alpha_{ячн} = 12^\circ$ (рис.1.1).

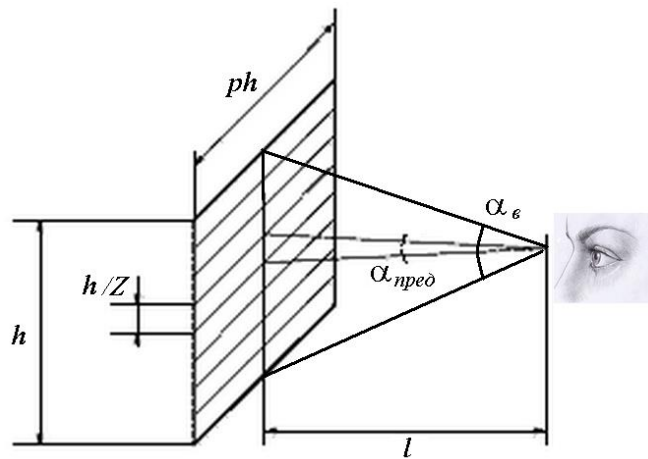


Рисунок 1.1 – До вибору числа рядків розкладення

Очевидно, що

$$Z = \frac{\alpha_{ячн}}{\alpha_{zp}} = \frac{12^\circ}{1'} = 720. \quad (1.1)$$

Як відомо, у системах звичайної чіткості Z вибрано дещо меншим. Це можна робити принаймні з двох причин. По-перше, для досягнення $\alpha_{zp} \approx 1'$ людина має напружувати зір, що явно не відповідає режиму перегляду

телепередач. По-друге, в телебаченні передають предмети, що рухаються, які ми бачимо менш чітко, ніж нерухомі.

З іншого боку, це вигідно, оскільки телевізійна система вийшла простіше та дешевше.

Однак з погляду сприйняття візуальної інформації формат SD не є оптимальним. Глядач, розглядаючи ТВ зображення, несвідомо порівнює його з навколишніми предметами. Тому, при досить великих розмірах ТВ екрану зображення, що відтворюється, стає більш реальним.

Експериментально встановлено, що більше зображення на більшій відстані створює сильніше враження, ніж зображення на меншій відстані. Практично подвоєння розмірів зображення еквівалентно поліпшення його якості на один бал за семибальною шкалою оцінок.

При розробці систем ТВЧ передбачалося, що спостереження зображення здійснюватиметься з відстані, що не перевищує , що відповідає вертикальному куту зору

$$\alpha_{\theta} = 2 \arctan\left(\frac{h/2}{l}\right) = 2 \arctan\left(\frac{1/2}{3}\right) \approx 20^{\circ}. \quad (1.2)$$

При цьому кількість рядків у форматі ТВЧ має дорівнювати

$$Z_{ТВЧ} = \frac{\alpha_{\theta}}{\alpha_{пред}} = \frac{20^{\circ}}{1^{\circ}} = 1200. \quad (1.3)$$

Розглядати ТВ зображення зблизька ($l < 2h$) не рекомендується. Це тим, що з малих відстаней спостереження глядач неспроможна охопити поглядом весь екран і встигає простежувати швидкі руху (зі швидкістю 20...30 град./с) об'єктів у ТВ кадрі. Сприйняття ТВ зображень у таких умовах може спричинити стомлення.

3. Число кадрів в секунду має бути таким, щоб рух об'єктів у кадрі сприймався злитим, що не складається з окремих фаз.

З досвіду кінематографу відомо, що глядач сприймає рух цілком задовільно, якщо n_k лежить у межах 16...18 к/с. У сучасному звуковому кіно $n_k=24$ к/с. У ті роки, коли розроблялися перші стандарти електронного телебачення, вважалося корисним (для полегшення боротьби з так званими фоновими перешкодами) мати n_k цілочисленно кратним частоті мережі живлення. Тож у європейських стандартах зазвичай $n_k=25$ к/с (у стандарті США $n_k=30$ к/с).

Нині стандарти високої чіткості допускають використання $n_k=50$ к/с (60 к/с). Підвищення частоти зміни кадрів до таких значень виправдане під час передачі динамічних сцен (наприклад, спортивних змагань).

4. Тип розгортки.

Розгортки у стандартах розкладання поділяються на два типи:

- черезрядкова – interlacing (i),
- прогресивна – progressive (p).

Черезрядкова розгортка також з'явилася в епоху CRT і збереглася як варіант у сучасних стандартах через забезпечення наступності та сумісності при поступовому переході до сучасних екранів (плазмових, LCD, світлодіодних).

Якщо відображати на CRT зображення з частотою кадрової розгортки $F_k=25$ Гц, зображення на телеекрані блиматиме. Причина лежить у властивостях нашого зору.

Критична частота мерехтіння нелінійно залежить від яскравості та для яскравостей порядку 50...100 кд/м² лежить у районі 48...50 Гц. Наближена формула для критичної частоти

$$F_{кр} = 10 \lg L + 30 . \quad (1.4)$$

Дане явище не має жодного відношення до злитості передачі руху. Близько за недостатньої частоти кадрів буде будь-яке, в т.ч. нерухоме зображення, навіть найпростіше біле поле.

Якщо вирішити задачу усунення миготіння «в лоб», збільшивши в 2 рази частоту кадрів, одночасно отримаємо розширення в 2 рази ширини спектра сигналу і, відповідно, смуги пропускання каналу зв'язку, а смугу потрібно платити. Збільшення кількості інформації в одиницю часу, що об'єктивно призводить до поліпшення злитості передачі руху, суб'єктивно не сприймається телеглядачем, оскільки і за 25 к/с рух відтворювалося цілком задовільно.

Обхідний шлях можна знайти, якщо знову звернутися до досвіду кінематографа, де кожен кадр демонструється глядачеві двічі. У телебаченні застосовують схожий прийом, розбиваючи кадр на два напівкадри (поля) через рядок і передаючи ці напівкадри по черзі. При цьому число повних кадрів за секунду n_k залишається незмінною (у нашому стандарті 25 к/с), а частота кадрової розгортки і, отже, частота миготіння яскравості збільшуються вдвічі при тій же верхній граничній частоті $F_{в.гр.}$.

Деінтерлейсинг.

При виведенні ТБ зображень із черезрядковою розгорткою на екрані з прогресивною розгорткою виникає ефект «гребінки». Він пов'язаний з тим, що зображення окремих полів отримані з інтервалом часу, що дорівнює

$$\Delta T_i = \frac{1}{2 \cdot n_k}. \quad (1.5)$$

При $n_k = 50$ к/с значення $\Delta T_i = 20$ мс. За цей час об'єкт, що рухається, в кадрі встигає переміститися на помітну відстань.

Тобто. фази руху фіксуються у двох напівкадрах у різні моменти часу, які потім при поєднанні матимуть нестиковку зображення парних та непарних рядків (рис.1.2).

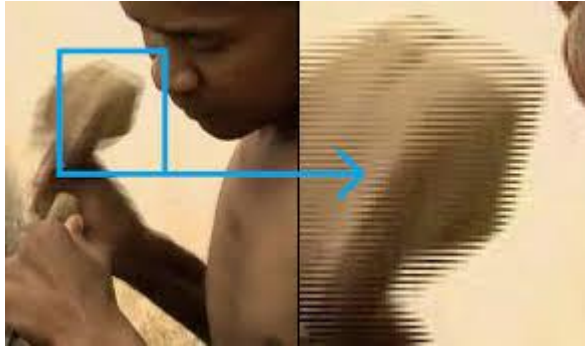


Рисунок 1.2 – Проявлення інтерлейсингу

Певний час в рамках Європейської Ради EBU велася дискусія щодо переваги стандарту 720p в порівнянні зі стандартом 1080i. Вона ґрунтувалася на твердженні, що рядкова розгортка з числом рядків 720 дає кращу суб'єктивну якість зображення, ніж черезрядкова розгортка з числом рядків 1080 (особливо при передачі рухомих зображень).

Щоб позбавитися ефекту «гребінки» застосовуються різні математичні методи, які називаються деінтерлейсингом.

Найпростіші технології деінтерлейсингу:

- дублювання рядків одного з полів (втрата чіткості, похилі лінії стають ступінчастими);
- Blend Fields Deinterlace: змішування в певній пропорції інтерполованого поточного напівкадра з інтерполірованим попереднім (втрати тимчасового та просторового дозволу, «ефекту привида» (англ. Blend): за об'єктом, що швидко рухається, видно напівпрозорий «привид»);
- Bob deinterlacing: отримання повного кадру шляхом інтерполяції рядками одного з полів (зменшується вертикальна чіткість у 2 рази).

Адаптивний деінтерлейсинг – це сімейство алгоритмів, які визначають за послідовністю кадрів, є статичним або динамічним зображенням. Для пікселів, які нерухомі, напівкадри просто поєднуються без змішування. У динамічних картинках напівкадри змішуються разом. Може також застосовуватися компенсація руху – для об'єктів, що рухаються, деінтерлейсер намагається заповнити відсутню інформацію інформацією

звідти, де цей об'єкт знаходиться на попередньому/наступному кадрі. Адаптивні алгоритми дають кращу деталізацію зображення, але потребують більше обчислень. Крім того, на компресованому черезрядковому відео деінтерлейсери з компенсацією руху схильні до створення неіснуючих деталей (артефактів).

1.2 Світлотехнічні величини

Сутність процесу відеозйомки є у реєстрації світла певного джерела, відбитого від об'єкта зйомки (рис.1.3). Тому у характеристиках відеокамер та джерел світла обов'язково присутні світлотехнічні величини. Розглянемо головні світлотехнічні величини.

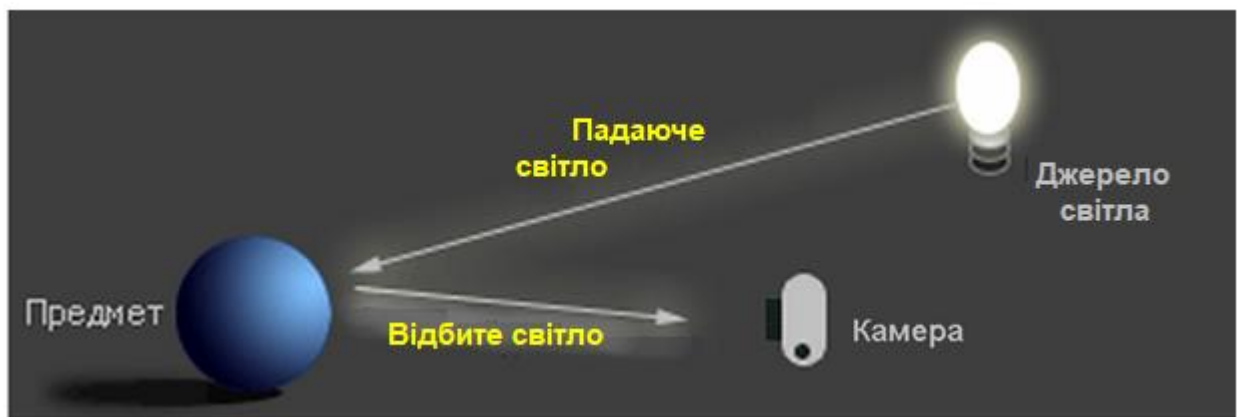


Рисунок 1.3 – Процес відеозйомки

Світловий потік – показує потужність видимого випромінювання з його впливу на очі людини у спеціальних одиницях – люменах [лм], це є важливою характеристикою ламп. Класична лампа розжарювання потужністю 100 Вт генерує променистий потік $\Phi_{\lambda}(\lambda)$ не тільки у видимому діапазоні хвиль, але і у інфрачервоному діапазоні (рис.1.4). У видимий діапазон хвиль потрапляє досить невелика частина потужності, що випромінюється, що і характеризує світловий потік [1]:

$$\Phi_{cv}(\lambda) = V_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda}(\lambda) \cdot k_{\epsilon}(\lambda) d\lambda, \quad (1.6)$$

де V_0 – постійний коефіцієнт пропорційності ($V_0=683$ лм/Вт);

$k_e(\lambda)$ – крива відносної видимості зору, що характеризує чутливість людського зору до випромінювань з різними довжинами хвиль.

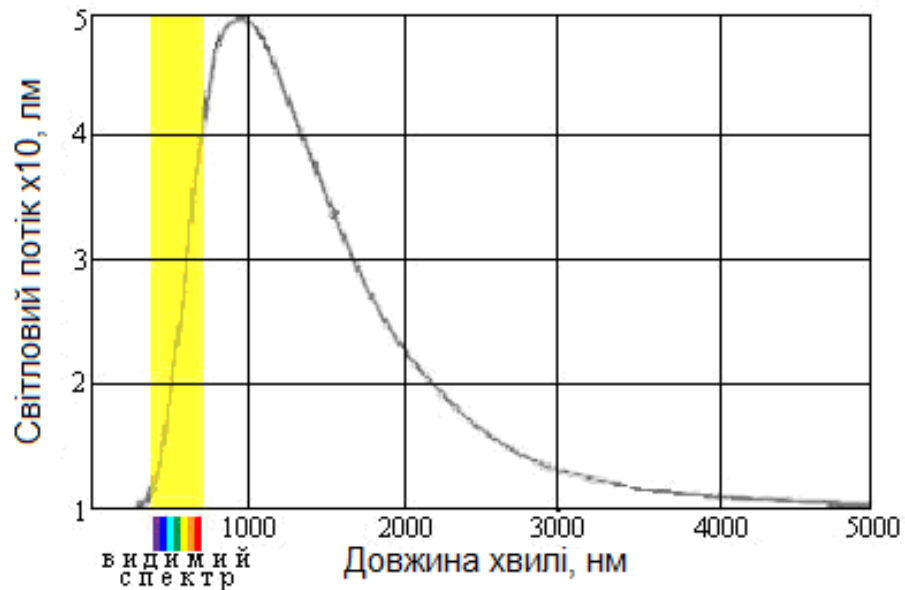


Рисунок 1.4 – Спектр випромінювання лампи розжарювання

Класична лампа розжарювання потужністю 100 Вт має потік світла 1300 Лм, а металогалогенова лампа потужністю 70 Вт відповідно 6000 лм. Ця різниця проявляється по причині різного спектра випромінювання [1].

Сила світла – це просторова щільність світлового потоку, що обмежена тілесним кутом ω [1]:

$$I = \frac{\Phi_{св}}{\omega}. \quad (1.7)$$

Тобто при однаковому потоці джерела світла більшу силу світла можна досягти шляхом фокусування випромінювання в обмежений простір. Одиницею вимірювання сили світла є кандела [кд].

Розподілення сили світла у просторі (т.зв. крива сили світла, КСС) – є однією з найважливіших характеристик приладів освітлювання, необхідних для розрахунку освітлення.

На рис.1.5 показано приклад КСС для освітлювального пристрою "Зоря-2000" [1]. Крива 1 відповідає вузькій діаграмі (сфокусованому променю), крива 2 – широкій діаграмі (розфокусованому променю).

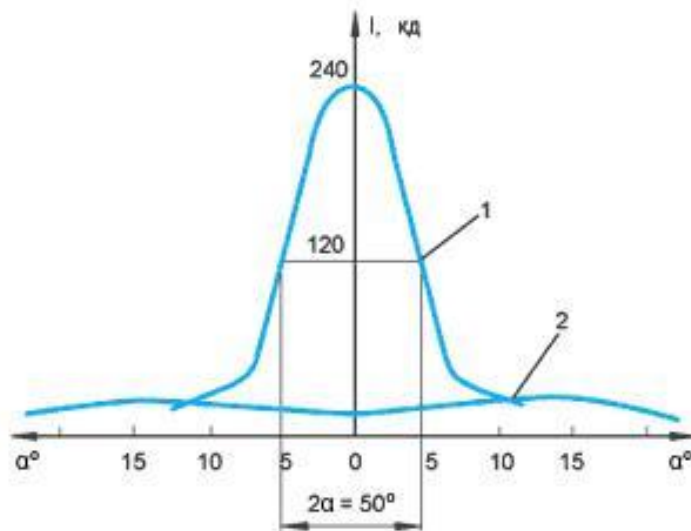


Рисунок 1.5 – Крива сили світла освітлювального пристрою «Зоря-2000»
(1 – вузька діаграма, 2 – широка діаграма)

Освітленість – це поверхнева щільність потоку світла Φ_{cv} , який падає на площину заданої величини S [3]:

$$E = \frac{\Phi_{cv}}{S}. \quad (1.8)$$

Одиницею освітленості є люкс [лк]. Одна з основних величин у нормах освітлення при відеозйомці. Діапазон значень освітленості відповідає при штучному освітленні 1 ... 20 лк надворі та 20 ... 5000 лк у приміщенні. В природних умовах освітленість $E \approx 1$ лк при повному місяці, та 5000 лк ... 10000 лк вдень при загальній хмарності та до 100 тис. лк у ясний сонячний день.

Колірна температура – це температура, до якого треба нагріти абсолютно чорне тіло (АЧТ), щоби воно випромінювало певний променистий потік. Залежність між щільністю спектру променистого потоку $\Phi_\lambda(\lambda)$,

довжиною хвилі λ та температурою АЧТ T_K уперше вивів фізик М. Планк (Німеччина) у 1900 р. Дана залежність називається формулою Планка [3].

З формули Планка можна вивести закон зміщення Вина:

$$\lambda_{\max} [\text{мкм}] = 2896 / T_{\text{ув}} [K], \quad (1.9)$$

де $\lambda_{\max}$ – довжина хвилі, яка відповідає максимуму кривої щільності спектру променистого потоку, мкм;

T_K – кольорова температура, К.

Отже, у випадку підвищення температури АЧТ максимум потужності випромінювання зміщується, проходячи крізь видиму область спектра, вбік більш коротких довжин хвиль. Наведені результати на рис.1.6 ілюструють усунення максимуму розрахункового спектра АЧТ [3].

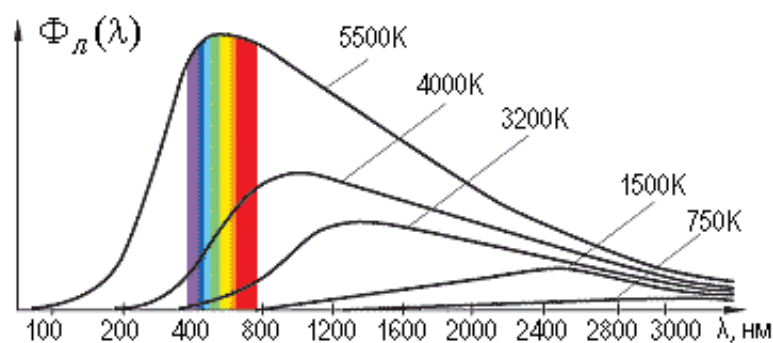


Рисунок 1.6 – Спектральний розподіл променистої енергії АЧТ $\Phi_{\lambda}(\lambda)$ за різної T_K

Індекс кольоропередачі (R_a) – одна з головних характеристик якості кольору джерел світла. Характеризує відсоток відтворення кольорів різних матеріалів при їхньому освітленні лампою у порівнянні з еталонним джерелом світла із суцільним спектром. Найбільше значення $R_a=100$. Найгірші по кольору натрієві лампи високого тиску мають $R_a=25$. Відповідно нормам дуже гарна передача кольору (ступінь 1) відповідає

- систем експозаміру та розрахунку експопари (експозиції та діафрагми);
- мікропроцесорів інтерфейсу, обробки сигналу та автоматики;
- відеопроцесора (блок аналогової обробки, АЦП);
- карток пам'яті;
- ламп-спалахів;
- акумуляторів і т.д.

1.4 Об'єктиви відеокамер

Об'єктив – оптична система, звернена до об'єкта спостереження або зйомки та формує його зображення [4-6]. Зазвичай об'єктив складається з набору лінз (у деяких об'єктивах – із дзеркал), розрахованих для взаємної компенсації аберацій (спотворень) та зібраних у єдину систему усередині оправы.

Об'єктиви мають такі характеристики.

Фокусна відстань – відстань від оптичного центру до площини сенсора за умови, що об'єктив наведений на нескінченність. Одиниця виміру – міліметри.

Від фокусної відстані f залежить кут поля зору об'єктива α [4]:

$$\alpha = 2 \arctg \frac{d}{2f}, \quad (1.10)$$

де d – діагональний розмір світлочутливої матриці

Фокусна відстань 50 мм називається «нормальною», тому що для «повнокадрової» 35-мм камери та об'єктиву з фокусною відстанню 50 мм горизонтальний кут зору становить $39,6^\circ$, вертикальний – $27,0^\circ$, а діагональний – $46,8^\circ$, що близько параметрів людського зору [5,6] (рис.1.8).

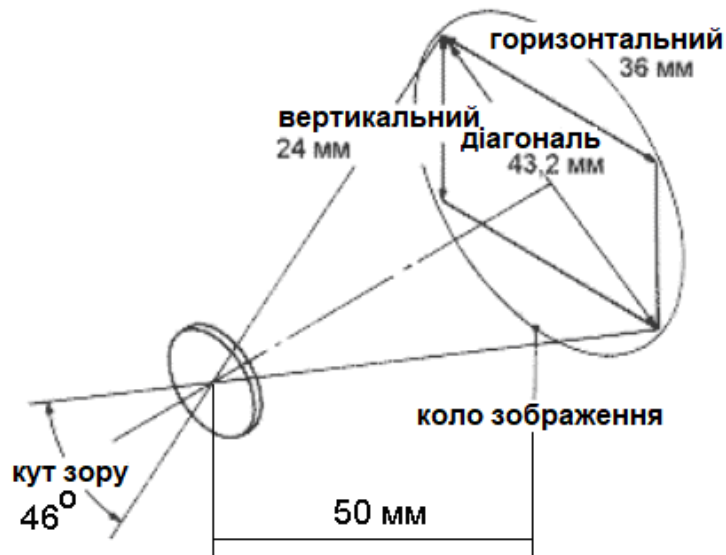


Рисунок 1.8 – Об'єктив з «нормальною» фокусною відстанню

Об'єктиви з фокусною відстанню менше 50 мм називаються короткофокусними або ширококутними, а понад 50 мм – довгофокусними або телеоб'єктивами.

Об'єктиви зі змінною фокусною відстанню називаються варіооб'єктивами, що дає змогу "вилучати" або "наближати" об'єкти зйомки (zoom). Відношення більшої фокусної відстані до меншої називається кратністю збільшення.

Відносний отвір об'єктива – оптичний захід світлопропускання об'єктива. Розрізняють геометричне та ефективне відносні отвори. Геометричним отвором вважається відношення діаметра вхідної зіниці об'єктива d до його задньої фокусної відстані f [4-6]:

$$O = \frac{d}{f}. \quad (1.11)$$

Ефективний відносний отвір завжди менший, ніж геометричний, оскільки враховує втрати світла при його проходженні через скло та розсіювання на кордонах з повітрям та деталями оправ.

Залежність світлопропускання об'єктива від відносного отвору показано на рис.1.9.

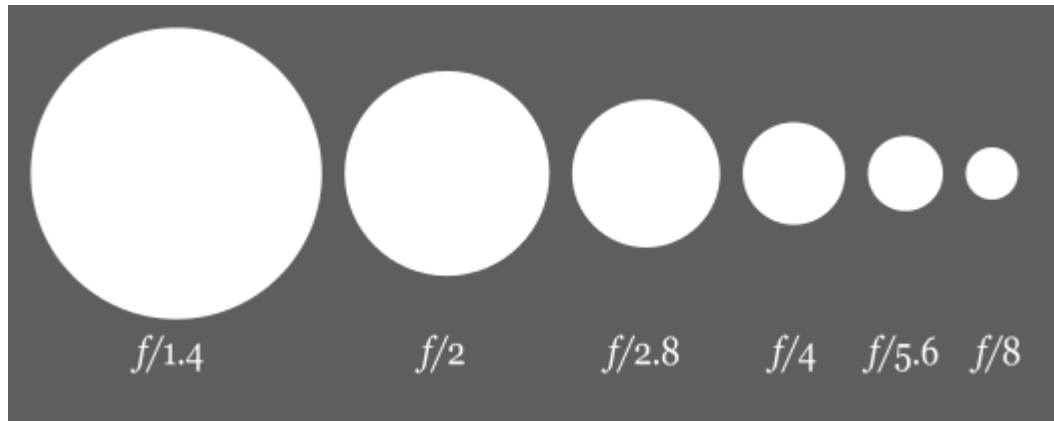


Рисунок 1.9 – Залежність світлопропускання об'єктива від відносного отвору

Світлосила – величина, що характеризує співвідношення освітленості дійсного зображення, що дається оптичною системою у фокальній площині і яскравості об'єкта, що відображається [4-6]. Світлосила пропорційна квадрату відносного отвору оптичної системи та визначає її світлову ефективність.

У практичній фотографії та кінематографії використовується спрощене повсякденне поняття світлосили об'єктива, якою називають максимальний відносний отвір, одержуваний при повністю відкритій діафрагмі, і при якому можна досягти найбільшого світлопропускання об'єктива.

Діафрагмове число обчислюється як відношення фокусної відстані об'єктива f до діаметра його вхідної зіниці d та позначається цифрою. Діафрагмове число є величиною, зворотною відносному отвору:

$$F = \frac{f}{d} = \frac{1}{O}. \quad (1.12)$$

Цей параметр є найбільш зручним для розмітки шкал діафрагми, оскільки не містить дробів [4-6]. Кожне поділ такої шкали відповідає зміні світлосили вдвічі, а відносного отвори в $\sqrt{2}$ раз.

Роздільна здатність об'єктива – характеристика об'єктива, що відображає його властивості передачі точного зображення.

Роздільна здатність оцінюється за кількістю відтворених штрихів на 1 мм зображення, яке здатний спроектувати на світлочутливий елемент (плівку або матрицю цифрової камери). При цьому об'єктива, що знімається, повинен знаходитися у фокусі. Вимірювання роздільної здатності проводять за допомогою спеціальних світів.

Аберація оптичної системи – помилка або похибка зображення в оптичній системі, що викликається відхиленням променя від того напрямку, яким він мав би йти в ідеальній оптичній системі. Аберацию характеризують різного виду порушення у структурі пучків променів, що виходять із оптичної системи.

Аберації поділяють на монохроматичні (сферичні, коматичні, астигматизм, кривизна поля зображення, дисторсія), тобто властиві монохромним пучкам променів, і хроматичні (притаманні пучкам променів із різними довжинами хвиль).

Таким чином, характеристики об'єктивів багато в чому визначають якісні показники відеоапаратури.

1.5 Матричні перетворювачі світло-сигнал

У цифровій відеоапаратурі застосовують твердотільні перетворювачі – матриці на приладах із зарядовим зв'язком (ПЗЗ-матриці), або матриці зі зчитуванням заряду на КМОП-елементах (КМОП-матриці). Незалежно від типу зчитування, принцип роботи світлочутливих матриць ґрунтується на явищі внутрішнього фотоефекту. Завдання кожного елемента – перетворити енергію фотонів на електричний заряд [7-8]

$$q = kE^{\gamma}, \quad (1.13)$$

де E – освітленість,
 k – коефіцієнт пропорційності,
 γ – показник нелінійності (залежить від властивостей напівпровідника).

У загальному вигляді конструкція елемента (пікселя) має такий вигляд (рис.1.10). Кремнієва підкладка р-типу оснащується каналами напівпровідника n-типу. Над каналами створюються електроди з полікристалічного кремнію з ізолюючим прошарком з оксиду кремнію. Після подачі такий електрод позитивного потенціалу, в збідненій зоні під каналом n-типу створюється потенційна яма, призначення якої – притягувати і зберігати електрони (рис.1.10).



Рисунок 1.10 – Структура елемента світлочутливої матриці

Фотон, що проникає у кремній, призводить до генерації електрона, який притягується потенційною ямою і залишається в ній. Більша кількість фотонів (яскраве світло) забезпечує більший заряд ями. Потім треба вважати значення цього заряду, що називається також фотострумом, і посилити його.

Зчитування фотострумів ПЗЗ-елементів здійснюється так званими послідовними регістрами зсуву, які перетворюють рядок зарядів на вході серію імпульсів на виході. Дана серія є аналоговим сигналом, який надалі надходить на підсилювач.

Для передачі зарядових пакетів необхідно і достатньо трьох електродів: одного передавального, одного приймаючого та одного ізолюючого, що розділяє пари приймаючих і передавальних один від одного, причому однойменні електроди таких трійок можуть бути з'єднані один з одним в

єдину тактову шину, що вимагає лише одного зовнішнього виводу (рис.1.11, а). Це і є найпростіший трифазний регістр зсуву на ПЗЗ.

Тактові діаграми роботи такого регістру показано на рис.1.9, б. Видно, що для його нормальної роботи в кожний момент часу принаймні на тактовій шині повинен бути високий потенціал, і принаймні на одній - низький потенціал (потенціал бар'єру).

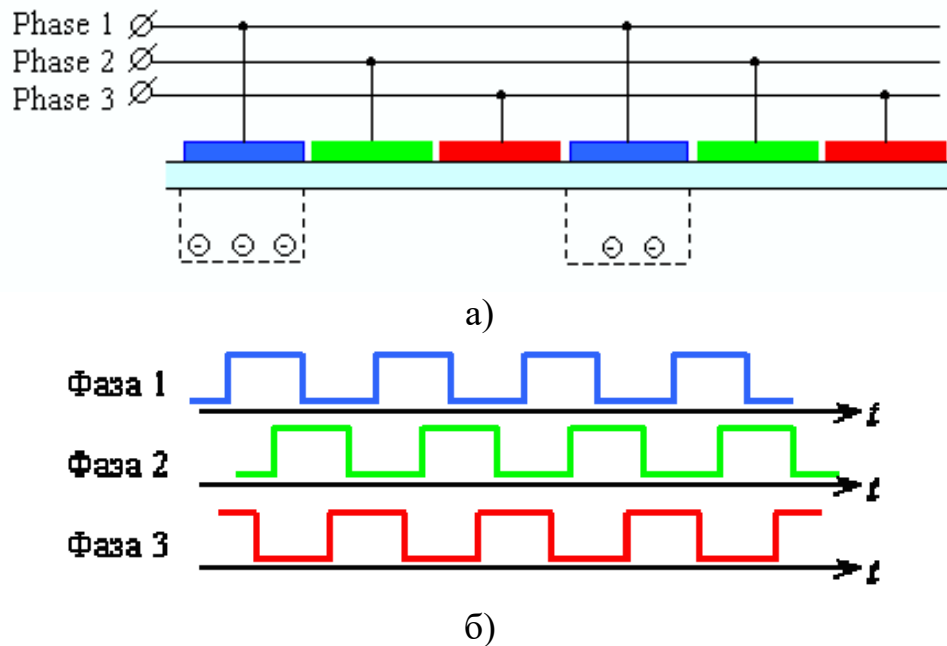


Рисунок 1.11 – Трифазна схема зчитування заряду

При підвищенні потенціалу на одній шині та зниженні його на іншій (попередній) відбувається одночасна передача всіх зарядових пакетів під сусідні затвори, і за повний цикл (один такт на кожній фазній шині) відбувається передача (зсув) зарядових пакетів на один елемент регістра.

Для локалізації зарядових пакетів у поперечному напрямку формуються так звані стоп-канали [7-8] – вузькі смужки з підвищеною концентрацією основної легуючої домішки, що йдуть уздовж каналу перенесення (рис.1.12).

Канал перенесення у бічному напрямку обмежується стоп-каналами.

На повну передачу заряду з однієї ями в іншу потрібен час, так що при високій тактовій частоті (а для ТВ стандарту звичайної чіткості вона становить у регістрі зчитування 13,5 МГц) цього часу може не вистачити.

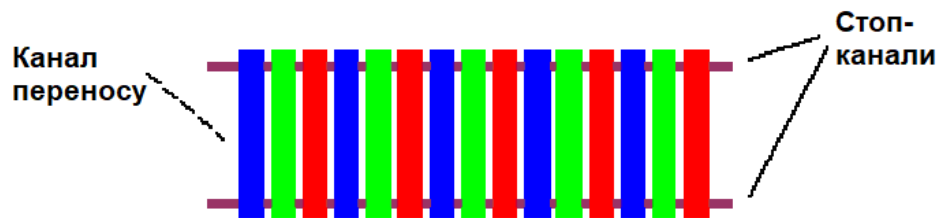


Рисунок 1.12 – Вид на регістр "зверху"

Величина, що показує, яка частина зарядового пакета передалася наступний елемент ПЗЗ, називається ефективністю перенесення ϵ . Часто користуються і пов'язаною з нею величиною ККД перенесення [7-8]

$$\eta = 1 - \epsilon. \quad (1.14)$$

Загальну структуру ПЗЗ-матриці показано на рис.1.13.

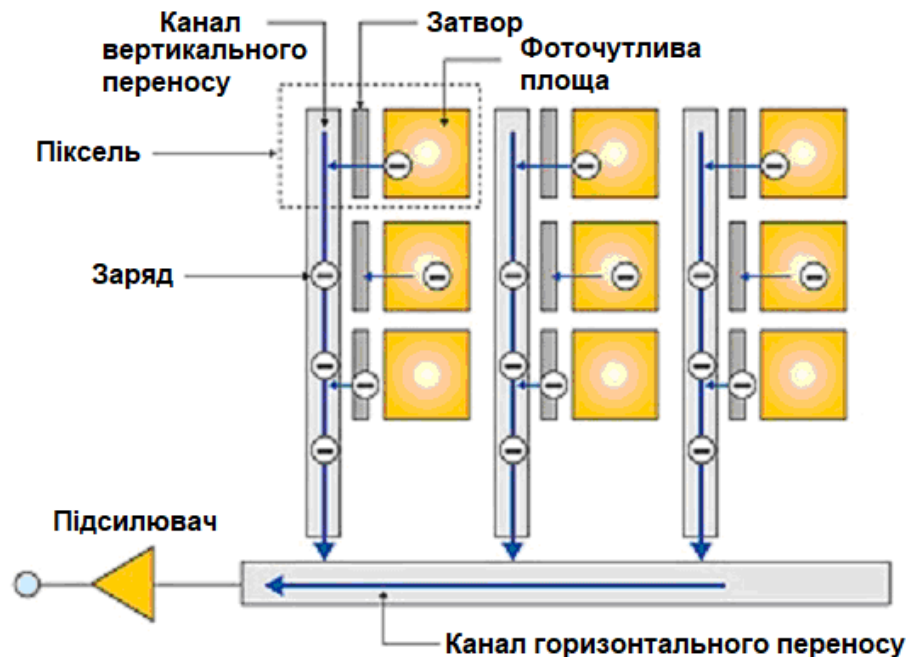


Рисунок 1.13 – Структура ПЗЗ-матриці

Дана схема має назву матриці з буферизацією стовпців (interline CCD-matrix). В ній застосовується буферний паралельний регістр зсуву, ПЗЗ-елементи його приховані під непрозорим для світла покриттям. Стовпці цього буфера "перетасовані" зі стовпцями головного регістру. У результаті

поряд з кожним стовпцем головного регістру знаходиться буферний стовпець, а відразу після експонування фотоструми переміщуються «праворуч вліво») і усього за 1 робочий цикл потрапляють у буферний регістр, звільняючи потенційні ями для наступного циклу експонування.

Заряди з буферного регістру зазвичай зчитуються через послідовний регістр зсуву, тобто «згори вниз». Так як скидання фотострумів у буферний регістр проходить за один цикл, навіть при відсутності механічного затвору не спостерігається розмазування заряду у повнокадровій матриці. А час експозиції для кожного кадру за тривалістю відповідає інтервалу часу, який витрачається на повне зчитування паралельного буферного регістру. Завдяки цьому з'являється можливість отримати відеосигнал з високою частотою кадрів – не менше 30 кадрів за секунду [8].

Загальну структуру КМОП-матриці показано на рис.1.14.

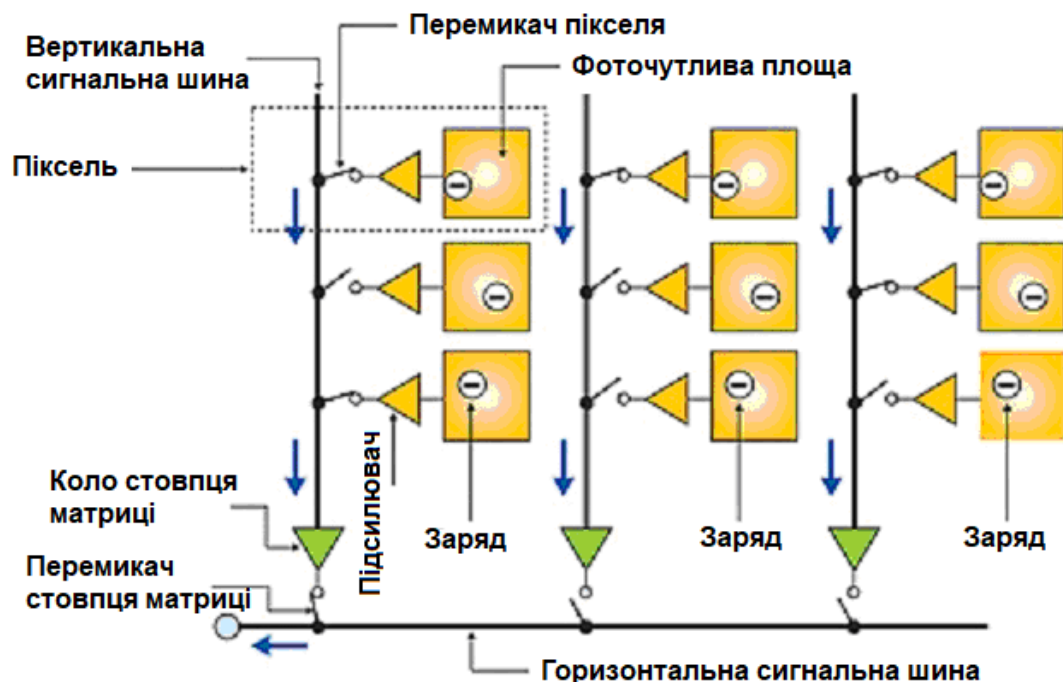


Рисунок 1.14 – Структура КМОП-матриці

В якості ключів в КМОП-матрицях використовуються польові транзистори із ізольованим затвором із каналами різної провідності. Тобто, є можливість довільного доступу до будь-якого заряду елементів.

Переваги технології КМОП [8]:

- низьке енергоспоживання у статичному стані;
- єдність технології з іншими, цифровими елементами апаратури, що дає можливість поєднання на одному кристалі аналогової, цифрової та обробної частини;
- можна зчитувати вибрані групи пікселів (кадроване зчитування);
- можливість застосовувати ту саму матрицю в різних режимах, виробляючи баланс між роздільною здатністю і швидкістю зчитування;
- дешевизна виробництва в порівнянні з ПЗЗ-матрицями, особливо при великих розмірах матриць.

Недоліки КМОП технології [8]:

- світлочутливий елемент осередку займає істотно меншу площу елемента матриці, порівняно з ПЗЗ матрицею з повнокадровим перенесенням;
- у кожного пікселя матриці виявляється своя власна характеристична крива, і виникає проблема розкиду світлочутливості та коефіцієнта розмаїття пікселів матриці;
- наявність на матриці великого в порівнянні з фотодіодом об'єму електронних елементів створює додатковий нагрівання пристрою в процесі зчитування і веде до збільшення теплового шуму.

Параметри ПЗЗ-матриць [7-8].

Чутливість – мінімальна освітленість об'єкта (або поверхні ПЗЗ-матриці), за якої забезпечується зйомка із заданим відношенням сигнал-шум. ($E_{\min} = 2 \dots 5 \text{ Лк}$, $c/\text{ш} = 30 \dots 38 \text{ дБ}$).

Для збільшення чутливості використовують мікролінзи, щоб збільшити корисну площу світлочутливих елементів (рис.1.15).

Для підвищення чутливості застосовують охолодження матриць (елементи з ефектом Пельтьє). При зменшенні температури на $6 \dots 7^{\circ}$ теплові шуми зменшуються вдвічі. Для усунення пікселів (hot pixels), які шумлять, з усіх кадрів віднімають маску, зроблену при закритому об'єктиві.

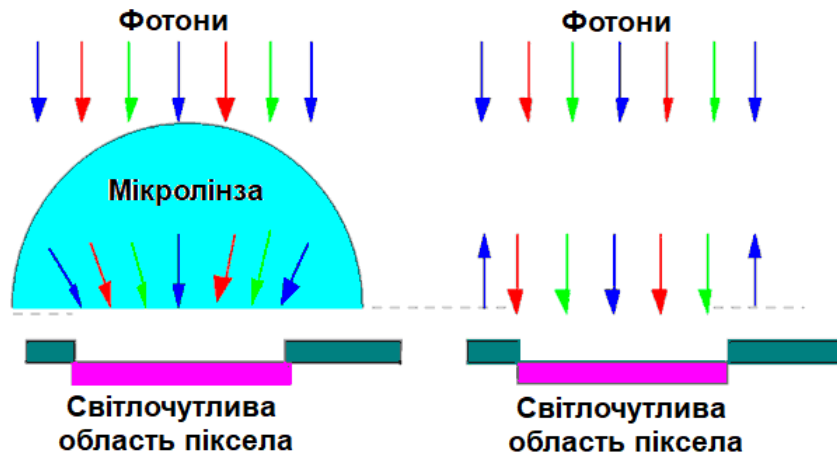


Рисунок 1.15 – Використання мікролінз для покращення чутливості

Світлова характеристика це залежність напруги відеосигналу від освітленості (рис.1.16). Показник ступеня нелінійності матричних твердотільних перетворювачів складає $\gamma = 1$ на робочій ділянці 1-2.

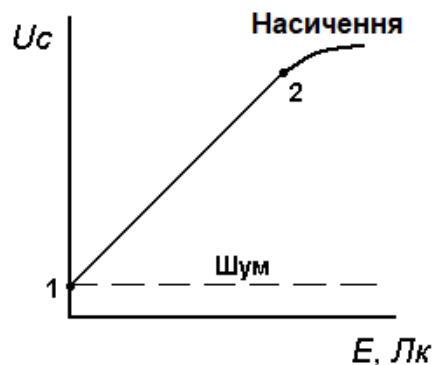


Рисунок 1.16 – Світлова характеристика ПЗЗ і КМОП матриць

Динамічний діапазон це відношення максимальної до мінімальної освітленості на лінійній ділянці (1-2). Явище насичення (блюмінгу) пов'язане з обмеженням розміру потенційної ями розміром осередка. Для збільшення динамічного діапазону застосовують дренаж (відведення зайвих електронів у підкладку) – вертикальний та бічний блюмінг (рис.1.17).

Ознака насичення – вертикальні засвічення під час зйомки яскравих об'єктів. Спектральна характеристика це залежність вихідного сигналу від довжини хвилі світлового випромінювання рівної інтенсивності (рис.1.18).

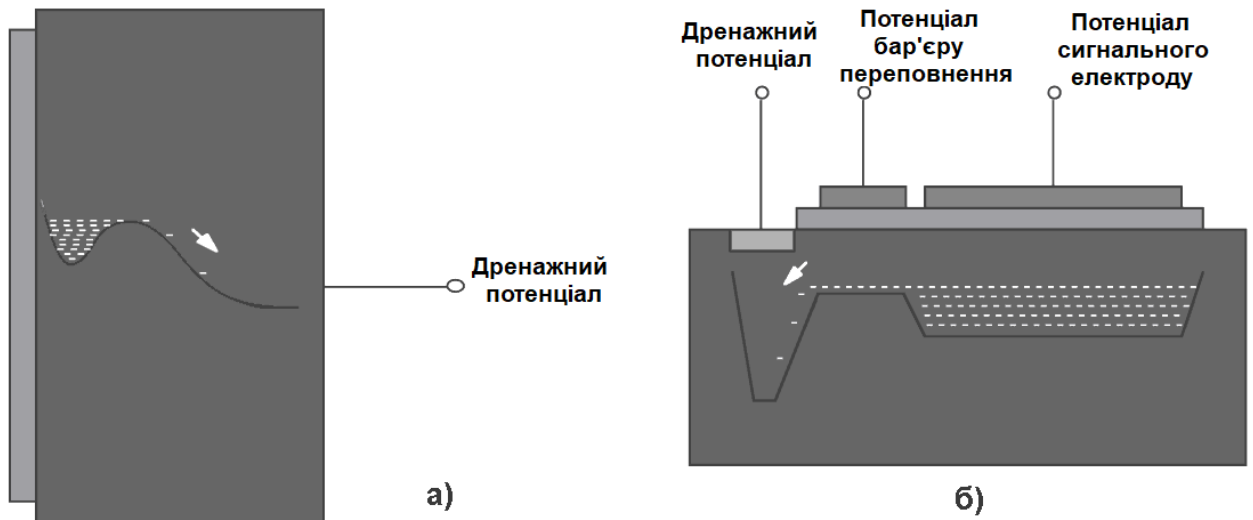


Рисунок 1.17 – Вертикальний (а) та бічний (б) електронний дренаж

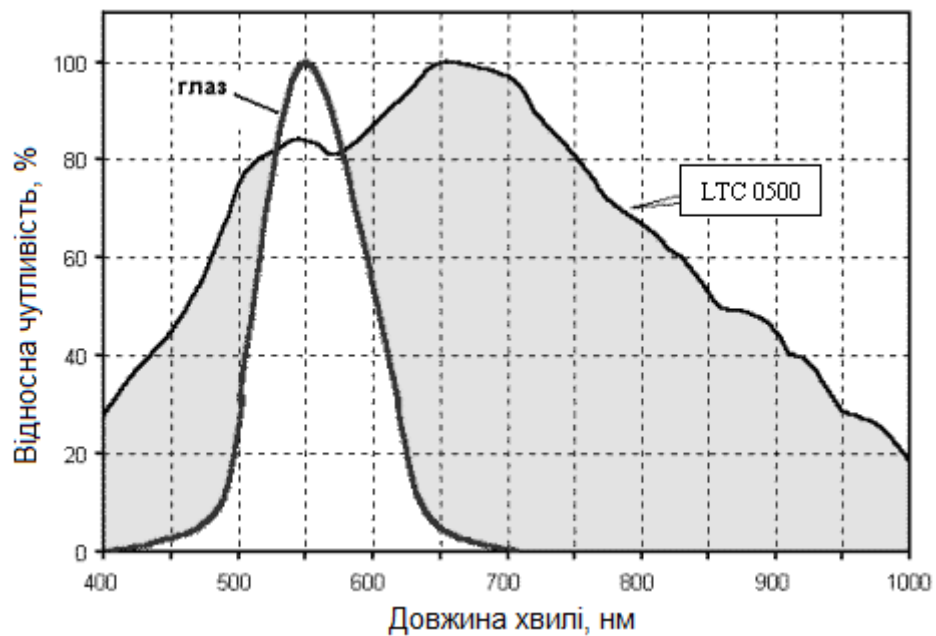


Рисунок 1.18 – Спектральна характеристика відеокамери

У твердотільних матричних перетворювачів спектральна чутливість зрушена до інфрачервоної області. Для вирівнювання чутливості використовують оптичні фільтри.

Роздільна здатність – число світлочутливих осередків (пікселів). Сучасні матриці мають 12 млн. пікселів та більше.

1.6 Отримання інформації про колір у відеокамерах

Колір – величина тривимірна. Отже, він може бути представлений вектором у деякому тривимірному просторі та характеризується трьома параметрами [8]:

- світлота (за змістом – яскравість) – кількість, тобто. довжина вектора;
- колірний тон, який у найпростішому випадку визначається домінуючим у спектрі довжиною хвилі;
- насиченість – процентний вміст кольору в його суміші з білим. Насиченість чистого спектрального тону – 100%, насиченість чистого білого – 0%.

Параметри 2 і 3 разом характеризують якість кольору та мають сумарну назву кольоровість.

Кольори можна змішувати один з одним, що дає кілька тисяч кольорів і відтінків, що розрізняються людським оком. Розрізняють кілька способів змішування кольорів.

Локальне змішування: всі кольори, що змішуються, лягають на одну і ту ж поверхню (застосовується в проекційній техніці і триматричних камерах).

Просторове змішання: кольори (напр., смуги різних кольорів) рознесені у просторі, але відстань поміж них менше роздільної здатності нашого зору. Цей спосіб використовується в телевізійних екранах та одноматричних камерах.

Послідовне у часі змішування кольорів. Якщо частота зміни кольорів перевищує критичну частоту миготіння, наше око бачить деякий сумарний колір (застосовується в проекторах DLP).

Бінокулярне змішування кольорів.

Чотири кольори завжди знаходяться у лінійній залежності. Це означає, що принаймні один з них можна отримати лінійною комбінацією (алгебраїчним підсумовуванням з ваговими коефіцієнтами) трьох решти. Три

кольори можуть бути як лінійно залежними (наприклад, червоний, жовтий, помаранчевий або синій, жовтий, зелений), так і лінійно незалежними, причому лінійно незалежних трійок кольорів існує скільки завгодно.

Перший висновок із цього закону: довільний колір алгебраїчно може бути представлений рівнянням виду [8]

$$d'D = r'R + g'G + b'B, \quad (1.16)$$

де малі літери є вагові коефіцієнти, тобто кількість даного кольору, а великі літери – опорні вектори (орти) R, G, B системи координат.

Найчастіше воліють працювати з кольоровістю, навіщо всі члени рівняння ділять на d' . В отриманому для кольоровості рівнянні

$$D = rR + gG + bB,$$

сума триколірних коефіцієнтів дорівнює одиниці ($r + g + b = 1$).

Якщо йдеться про світлові випромінювання, то коефіцієнти r, g, b можуть бути лише позитивними. Опорних трійок векторів можна підібрати скільки завгодно багато. Щоб уникнути неоднозначності, Міжнародна Комісія з освітленості (МКО) стандартизувала для кольорового телебачення такі довжини хвиль опорних кольорів [8]:

– червоний – $R \Rightarrow \lambda \approx 700 \text{ нм.}$

– зелений – $G \Rightarrow \lambda \approx 546 \text{ нм.}$

– синій – $B \Rightarrow \lambda \approx 435 \text{ нм.}$

ПЗЗ-елементи реєструють яскравість точок створюваного об'єктивом зображення, але не їх колір. Для отримання кольорових зображень застосовуються світлофільтри, які розташовуються над світлочутливою областю кожного елемента сенсора і утворюють своєрідну мозаїку з пікселів.

Тому, крім термінів "чергування елементів" та "інтерполяція кольору", часто використовується визначення "схема з мозаїчним світлофільтром".

Розглянемо, як формується зображення з використанням так званої Байєрівської схеми розміщення елементів. У ній застосовується опорна група з чотирьох елементів у формі квадрата, в якій світлофільтри чергуються в такий спосіб – верхній ряд RG, нижній ряд GB. Однак послідовність ця найчастіше позначається RG-BG (червоний-зелений-синій-зелений), а використовуючи її схема називається адитивною Байєрівською (рис. 1.19).

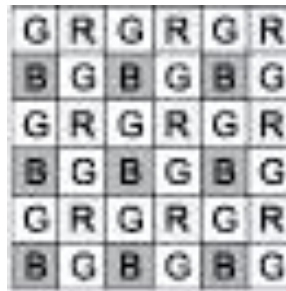


Рисунок 1.19 – Розташування світлофільтрів в адитивній Байєрівській схемі

Вдвічі більше «зелених» елементів служить для точної передачі яскравості і контрастності зображення, і навіть кращої передачі дрібних деталей. Це пояснюється двома обставинами: кращою сприйнятливістю людського зору до зеленого кольору, а також тим, що сигнал зеленого входить із найбільшим коефіцієнтом рівняння для сигналу яскравості:

$$L = 0,3R + 0,59G + 0,11B. \quad (1.17)$$

Щоби ліквідувати ефект мозаїки, необхідно відновити справжній колір у всіх точках зображення. Для цього використовується алгоритм інтерполяції кольору.

Регулярна структура розміщення елементів у деяких випадках призводить до появи муару при передачі зображень з регулярними дрібномасштабними структурами (рис.1.20).



Рисунок 1.20 – Поява муара на зображенні

Можливість появи цього спотворення залежить від складності алгоритму, відповідального за розрахунок кольору. Якщо при розрахунках кожного пікселя використовується сплайн-інтерполяція з урахуванням елементів, розташованих на відстані 10 і більше точок, ймовірність виникнення муара дуже мала. В ідеалі для розрахунку кожної точки бажано використовувати інформацію про всі елементи матриці кольору. Вочевидь, що з таких інтенсивних розрахунків потрібні високопродуктивні мікропроцесори і надвеликі обсяги ОЗУ.

1.7 Висновки по розділу 1

Параметри систем передачі зображень загалом залежать від кожного вузла тракту передачі сигналу. Однак, як і в будь-якій радіоелектронній системі, найбільш відповідальною ланкою є початкова – фото- або відеокамера.

Дослідженню характеристик фото- та відеоапаратури приділяють велику увагу як фірми-виробники, так і спеціалізовані видання, у тому числі наукові. Досліджують чутливість, інтенсивність шумів в умовах недостатньої освітленості, деталізацію зображення, роздільну здатність, правильність передачі кольору та їх залежність від різних факторів. Для цього створюють спеціальні вимірювальні установки. Стандартних рішень для таких вимірювань немає. Водночас питання забезпечення навчально-наукових

лабораторій як нашого університету, так і всіх вузів загалом, вимірювальним обладнанням нині є досить гострим.

В кваліфікаційній роботі розробимо методику дослідження та лабораторний програмно-апаратний комплекс для цих цілей, а також дослідимо можливості щодо вимірювання характеристик фото- та відеоапаратури.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання параметрів фото- та відеоапаратури.

Мета дослідження – перевірка можливостей об'єктивного дослідження характеристик фото- та відеоапаратури за допомогою лабораторного комплексу, що складається з набору випробувальних таблиць, непрозорої камери з регульованою освітленістю всередині та змінюваною колірною температурою джерел світла, персонального комп'ютера та програмного забезпечення в середовищі MATLAB.

Дана кваліфікаційна робота виконується на кафедрі Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем ХНУРЕ. На кафедрі ведуться наукові дослідження, які стосуються технічного зору роботів [9,10], а також виявлення і визначення координат БПЛА за результатами відео- [11-16] і акустичного [17-20] спостереження. Дослідження в даній кваліфікаційній роботі відповідають науковим дослідженням кафедри МІРЕС.

2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТО- І ВІДЕОАПАРАТУРИ

У кваліфікаційній роботі розробляється два варіанти лабораторного комплексу. Перший варіант – навчальний, включає мінімум додаткових пристосувань до персонального комп'ютера і призначений для початкового вивчення параметрів телевізійної апаратури та їх впливу на якість зображення.

Другий варіант – науковий, який дозволяє отримати не лише числові оцінки параметрів відеокамер, але також їхню залежність від умов зйомки, а також дає змогу в однакових умовах порівняти кілька різних камер.

Сформулюємо загальні принципи побудови лабораторного комплексу, який задовольняв би вимогам, що висуюються до нього.

2.1 Методика навчальних досліджень фото- та відеоапаратури

У навчальному варіанті лабораторний комплекс повинен мати:

- випробувальні таблиці з можливістю їхнього оперативного закріплення та заміни;
- цифрову відеокамеру без особливих вимог щодо якості зображення;
- джерело освітлення випробувальних таблиць без особливих вимог до якості кольору (опційно);
- персональний комп'ютер із встановленою системою MATLAB.

З таким набором інструментів можна вирішувати такі завдання, представлені в технічному завданні, а саме вимірювати та обчислювати такі характеристики відеоапаратури:

- чіткість зображення;
- перехідну характеристику;
- частотно-контрастну характеристику;
- амплітудну характеристику.

Освітлення в цьому випадку, швидше за все, буде комбінованим – природним крізь віконні прорізи, штучним загальним та штучним місцевим. Тому вимірювання, пов'язані з точністю кольорової передачі, з визначенням рівня відеoshumu, а також з визначенням динамічного діапазону в простому варіанті не можуть бути виконані точно, оскільки характеристики джерела світла не відомі і не постійні.

Виходячи з цих вимог, апаратно-програмний комплекс, що розробляється, може бути побудований за структурною схемою, показаною на рис.2.1.

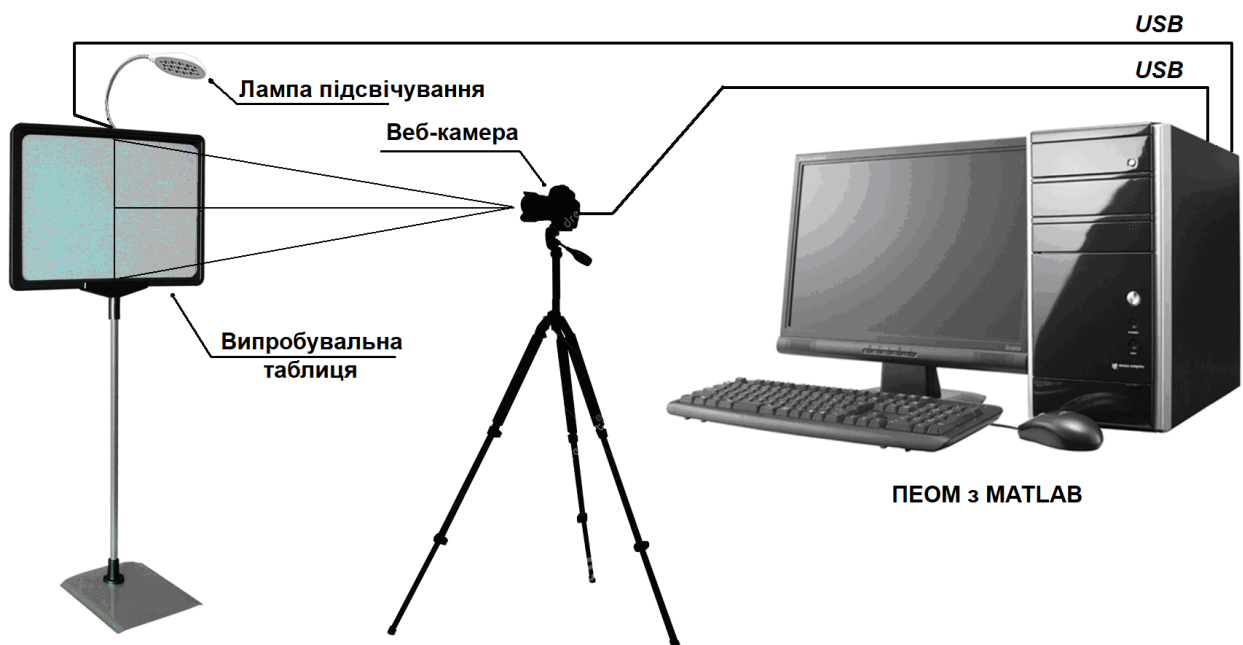


Рисунок 2.1 – Структурна схема навчального варіанта лабораторного комплексу

Випробувальна таблиця розміщується всередині рамки з підставкою, якою можна використовувати тримач для підлоги цінників формату А4 або А3. Ніжка в такій підставці телескопічна, що дозволяє регулювати висоту при налаштуванні кадру, крім того є можливість оперативної зміни випробувальних таблиць.

Як джерело відеосигналу доцільно використовувати недорогу веб-камеру формату SD (роздільна здатність 640x480), що має помітні спотворення зображення і бажано з ручним фокусуванням. Це дасть змогу

наочно продемонструвати студентам різні аберації та спотворення зображень у відеоапаратурі. Веб-камера знаходиться на лабораторному столі на штативі висотою близько 300 мм.

Лампа підсвічування призначена для роботи в умовах недостатнього природного або загального штучного освітлення. Як лампа пропонується використовувати USB-світильник для клавіатури ноутбука і запитувати його за потреби від порту USB комп'ютера.

У табл.2.1 наведено рекомендовані комплектуючі для навчального варіанта лабораторного комплексу та його характеристики.

Таблиця 2.1 – Рекомендовані комплектуючі для навчального варіанту лабораторного комплексу та їх характеристики

№	Найменування	Тип	Характеристики
1	Підставка	Двостороння стійка для інформації та цінників "Маяк-1"	Вид: настільна Вага: 1,1 кг Висота ніжки: від 20 до 100 см Основа: металева, прямокутна 16x20 см Рамка: пластикова із вкладишем Колір: прозорий.
2	Веб-камера	Defender C-110, Sven IC-880	CMOS, 0.3 Мп, підтримка Windows. Інтерфейс підключення USB 2.0. Кут огляду 54 ° по горизонталі. Ручне фокусування. Роздільна здатність камери 640x480. Частота кадрів максимальна – 30 Гц.
3	Штатив	Yuyue FT-0300	Вигляд: настільний штатив. Вага: 53 р. Максимальна висота: 200 мм.
4	Лампа підсвічування	USB Led підсвітка для клавіатури	Тип пристрою: світлодіодна лампа/ Живлення: USB/ Кількість світлодіодів: 28 шт/ Довжина плафона: 11 см. Довжина ніжки: 31 см. Матеріал: пластик, метал.
5	Персональний комп'ютер	Приблизна конфігурація	Процесор Intel Core i5 або AMD 3 ГГц, 4 ядра Графічний адаптер Intel HD Graphics Оперативна пам'ять DIMM DDR3, 4 ГБ Жорсткий диск 1000 Гб HDD Мережений адаптер LAN (1 Гбіт) Оснащення DVD-RW, клавіатура, миша Монітор Samsung SyncMaster BX2335

2.2 Науковий варіант лабораторного комплексу

Науковий варіант лабораторного комплексу (рис.2.2) складається з непрозорої камери (НК), в якій розміщуються випробувальні таблиці (ВТ), джерела світла (ДС1 та ДС2) з різною температурою кольору. Камера має отвір для об'єктива відеокамери (ВК). Глибина непрозорої камери НК повинна бути більшою за мінімальну відстань фокусування відеокамери ВК.

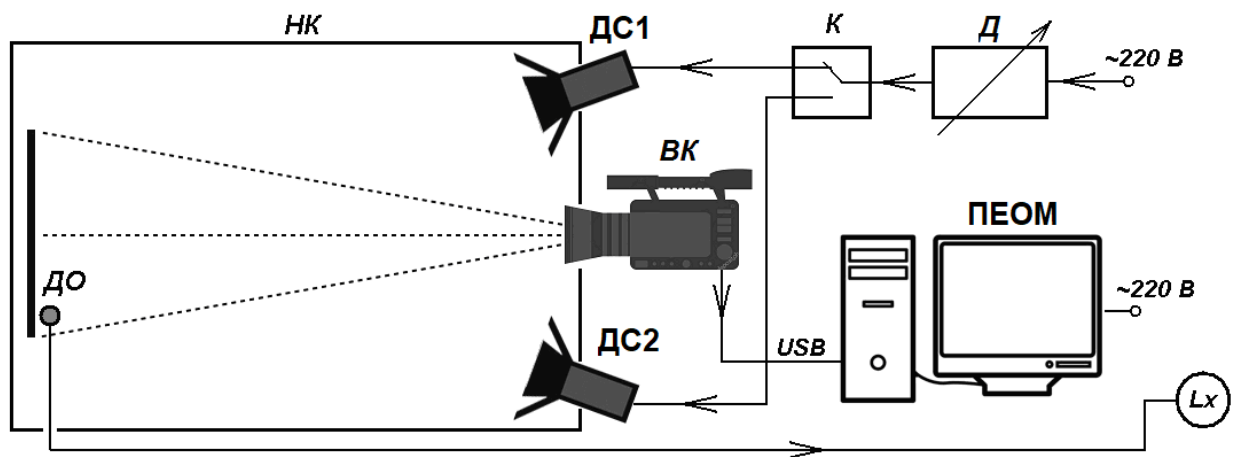


Рисунок 2.2 – Структурна схема наукового варіанта лабораторного комплексу

Застосування непрозорої камери дає можливість отримати необхідне значення освітленості випробувальної таблиці та колірної температури джерела незалежно від зовнішнього освітлення (штучного чи природного). Освітленість вимірюється люксометром (Lx) сигналом датчика освітленості (ДО), а регулюється шляхом подачі різної напруги на джерела світла з диммера (Д). У разі застосування джерел світла та димеру на мережеву напругу 220 В в окремому джерелі живлення немає потреби.

Застосування двох джерел світла дозволяє отримати різну температуру кольору світлового випромінювання, що важливо при тестуванні правильності балансу білого. Вибір джерела світла здійснюється комутатором (К).

Отримані файли стоп-кадрів випробувальних таблиць захоплюються ПЕОМ портом USB і обробляються програмною частиною установки. Для створення програмної частини вибрано середовище MATLAB. Текст програми в MATLAB буде зрозумілим для всіх студентів, у процесі досліджень студенти змінюватимуть її вихідний текст, що сприятиме глибокому розумінню процесу дослідження.

Розрахуємо та визначимо основні вимоги до окремих складових частин комплексу, що розробляється.

2.3 Вибір зображень випробувальних таблиць

Для простого варіанта лабораторного комплексу можна використовувати чорно-білу випробувальну таблицю, що застосовувалася у телебаченні звичайної чіткості. У вітчизняному телебаченні з цією метою використовувалася таблиця ТИТ-0249 (рис.2.3), там, зокрема у США, застосовувалася таблиця EIA-1956 (рис.2.4).

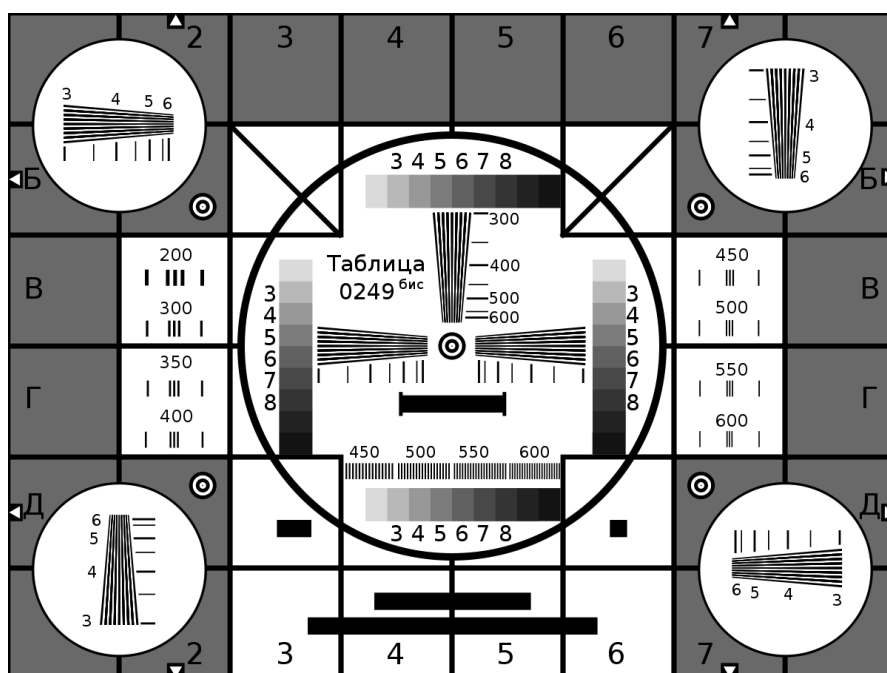


Рисунок 2.3 – Випробувальна таблиця 0249

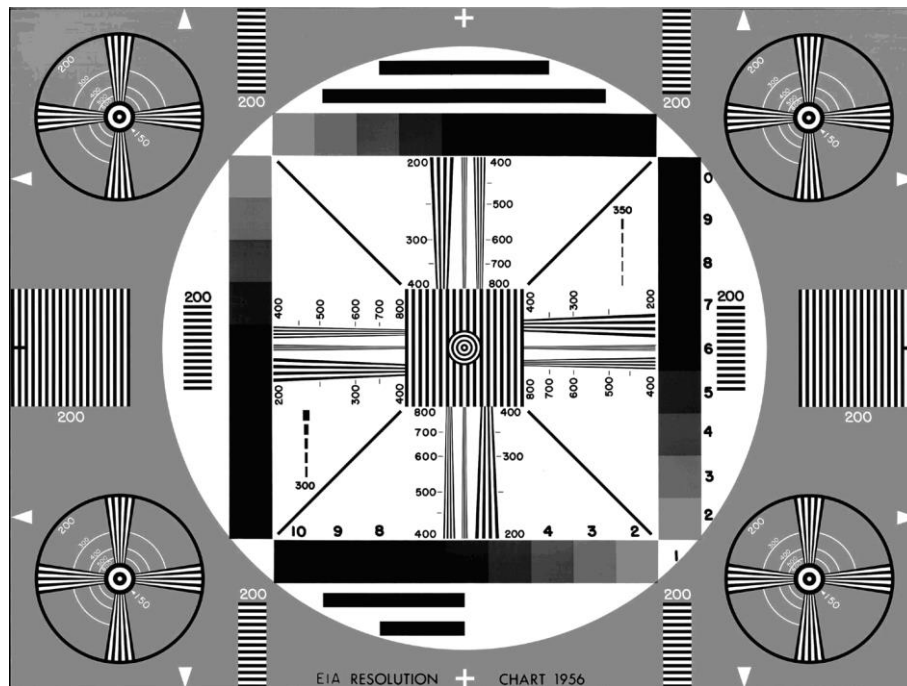


Рисунок 2.4 – Випробувальна таблиця EIA-1956

За даними випробувальних таблиць можна оцінити такі параметри телевізійних систем. За допомогою вертикальної світи, розташованої симетрично зверху і знизу від центру таблиці, можна виміряти роздільну здатність камери безпосередньо в ТВЛ.

Якість роботи апертурного коректора по горизонталі можна оцінити за допомогою горизонтального клина. Для більш точної апаратної оцінки рівня сигналу, що відповідає частоті 200 ТВЛ, у таблиці існує ряд спеціальних зон, заповнених вертикальними та горизонтальними штрихами, з роздільною здатністю, що відповідає 200 ТВЛ. Для оцінки геометричних спотворень і роздільної здатності по краях зображення використовуються чотири комбіновані світи, вписані в концентричні кола, розташовані по краях таблиці. Геометричні спотворення в нашому випадку можуть давати недосконала оптична система веб-камери.

Оцінку динамічного діапазону та роботу систем автоматичної установки експозиції дуже зручно проводити за фрагментами сірого клину, вписаними в центральне коло таблиці.

Кола в центрі та по краях екрана, заповнені вертикальними та горизонтальними клинами, дозволяють досить точно оцінити та відрегулювати фокусуючі системи веб-камери. З інших параметрів тракту з допомогою можна оцінити передачу т.зв. сірого клину – здатності камери або телеприймача коректно відтворювати повний динамічний діапазон сцени та точність налаштування схем гамма-корекції.

Для розширеного варіанта лабораторного комплексу, проведення вимірювань повного переліку параметрів, зазначених у технічному завданні, на додаток до таблиць стандартної чіткості необхідні наступні інструменти:

- еталонний білий лист – для точного настроювання балансу білого;
- таблиця з декількох (найчастіше шести) незабарвлених полів (градацій сірого) – для оцінки рівня відеошумів;
- сенситометричний клин із заднім підсвічуванням – для оцінки амплітудної характеристики та динамічного діапазону камер;
- спеціальна таблиця для визначення перехідної характеристики та розрахунку MTF (Modulation Transfer Function – частотно-контрастної характеристики).

Розглянемо зазначені інструменти, принципи отримання інформації з їх зображень, а також оцінимо можливість їх самостійного виготовлення.

2.4 Вимірювання колірної температури та середньоквадратичного рівня шуму

Для оцінки якості кольору найбільш часто використовують інструментом таблицю GretagMacbeth ColorChecker Chart. Вона являє собою колірну карту з 18 квадратних полів різного кольору, причому використовуються кольори, які найчастіше зустрічаються в реальних зйомках (наприклад – тілесний колір) та шести нейтральних незабарвлених полів різної щільності. Усього таблиця має 24 поля (табл.2.2).

Таблиця 2.2 – Цвета GretagMacbeth ColorChecker Chart

1. dark skin	2. light skin	3. blue sky	4. foliage	5. blue flower	6. bluish green
7. orange	8. purplish blue	9. moderate red	10. purple	11. yellow green	12. orange yellow
13. blue	14. green	15. red	16. yellow	17. magenta	18. cyan
19. white (0.05)	20. neutral (0.23)	21. neutral (0.44)	22. neutral (0.70)	23. neutral (1.05)	24. black (1.50)

Така таблиця є досить дорогою, її ціна становить близько 75 Євро на Ebay у 2022 році. Причиною високої ціни пояснюється складним процесом виготовлення таблиці. Кожне поле друкується індивідуально з використанням ретельно відібраних барвників. Хоча таблиця ColorChecker вже давно стала зразком у всіх вимірах кольору, для навчальної лабораторії придбати її буде важко і не доцільно.

В умовах навчальної лабораторії пропонується використовувати випробувальне зображення у вигляді останнього рядка GretagMacbeth ColorChecker Chart, що є 6 незабарвленими полями різної щільності (рис.2.5).



Рисунок 2.5 – Випробувальне зображення для визначення помилки встановлення колірної температури та відносного рівня шуму

Зображення таблиці GretagMacbeth ColorChecker Chart у високій якості знаходиться в Інтернеті [21], звідки можна вирізати останній рядок, а роздрукувати можна на лазерному принтері, де точність передачі градацій сірого забезпечується принципом отримання градацій сірого. Щоб створити

відчуття сірого кольору, принтери формують цей відтінок, запечатуючи цю область чорною фарбою у відсотковому співвідношенні, що дорівнює відтінку. Утворені внаслідок такого друку чорні точки називають растр (рис.2.6).

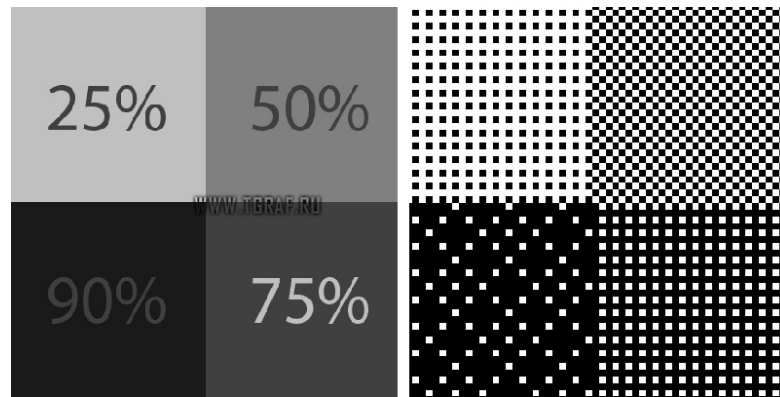


Рисунок 2.6 – Формування відтінків сірого у чорно-білому принтері

Рис.2.6 демонструє як виглядає сірий колір для людського зору та відеокамери (ліворуч) і як цей колір друкує принтер, застосовуючи лише одну чорну фарбу (праворуч збільшення в 100 разів).

Для позначення кольору поліграфії використовують відсоткову шкалу від білого 0% і до чорного 100%. Перехід від 0% до 100% розбито на 256 рівних частин – градацій. Така кількість дозволяє зробити перехід від білого до чорного для сприйняття ока та камери рівномірним.

У дужках у нижньому рядку табл.2.2 вказана оптична щільність зображення квадратних полів під час друку. Оптична щільність – міра ослаблення світла прозорими об'єктами (такими як кристали, скла, фотоплівка) або відображення світла непрозорими об'єктами (такими, як фотографія, метали і т. д.). Оптична щільність обчислюється як десятковий логарифм відношення падаючого потоку випромінювання до потоку випромінювання, що пройшло через об'єкт або відбилося від нього [3]:

$$D = \lg \frac{\Phi_{in}}{\Phi_{out}}. \quad (2.1)$$

Таким чином, для першого нейтрального поля в рис.2.5 $D=0,05$ – оптична густина паперу, а для останнього $D=1,05$ – оптична густина друку разом з папером.

Методика вимірювань точності балансу білого така: проводиться зйомка випробувальної таблиці у необхідні нам умовах освітлення. Баланс білого виставляється або вручну, або автоматично. Нижній ряд таблиці (6 нейтральних полів) має залишатися нейтральним. Якщо це не так, то для кожного поля розраховується помилка колірної температури ΔT_u .

По випробувальному зображенню на рис.2.5 можна оцінити середньоквадратичний рівень шуму. За загальноприйнятою методикою [22] це так:

- обчислюється різниця в яскравості між 1-м (біле) та 6-м (чорне) полями,
- обчислюється середньоквадратичний рівень шуму (окремо для кожного поля та для кожного каналу кольору R, G, B та Y) у відсотках від обчисленої раніше різниці між білим (1) і чорним (6) полем.

2.5 Вимірювання чіткості та частотно-контрастної характеристики

Частотно-контрастна характеристика (Modulation Transfer Function – MTF) – це залежність глибини розмаїття (модуляції сигналу зображення) від просторової частоти ліній, що передаються.

На рис.2.7 показана міра, що представляє собою білі і чорні смуги, що чергуються, наступні зі зростаючою просторовою частотою.



Рисунок 2.7 – Міра для визначення модуляційно-частотної характеристики

Верхня частина є еталонною світлом, нижня – знімок еталонної світи відеокамерою. Помітно, як на знімку падає контраст між чорним і білим у міру збільшення частоти чорних і білих смуг. Це відбувається через спотворення в оптико-електронному тракці відеокамери.

Виразити частоту проходження чорних та білих ліній (сусідні чорна та біла лінії утворюють один цикл) можна в таких одиницях:

- у циклах (тобто парах смуг) на міліметр;
- кількість циклів (пар) на один піксель матриці;
- числа ліній, що уміщаються по вертикальній стороні зображення (Line Width per Picture Height, LW/PH, по суті – ТВЛ по вертикалі);
- число ліній, що уміщаються по горизонтальній стороні зображення (Line Width per Picture Height, LW/PW, по суті - ТВЛ по горизонталі).

Якщо позначити контраст на еталонному зображенні за 1 (100%), то залежність контрасту між чорним і білим від частоти прямування ліній на зображенні називається модуляційно-частотною (MTF) чи частотно-контрастною характеристикою (ЧКХ).

Ця функція містить набагато більше інформації, ніж простий дозвіл в лініях (вимірний, скажімо, за таблицею EIA 1956 або TIT 0249), оскільки показує відгук камери для різних частот.

Важливою величиною є частота за значенням $MTF=0.5$ (відносний контраст 50%) – MTF_{50} . Саме за цим параметром часто порівнюють чіткість (sharpness) зображення різних відеокамер, чим вона більша, тим зображення різкіше.

2.6 Вимірювання перехідної характеристики та хроматичних аберацій

Перехідна характеристика – це реакція лінійної стаціонарної системи на вплив сигналу, що відображається одиничною функцією (поодиноким стрибком, функцією Хевісайда). Випробувальне зображення для визначення перехідної характеристики показано на рис.2.8.



Рисунок 2.8 – Випробувальне зображення визначення перехідної характеристики

Зображення представляє білий листок, розділений на чотири квадранти, два з яких чорні. Просканувавши будь-який рядок чи стовпець зображення, можна отримати ступінчасту одиничну дію (рис.2.9) як сигналу яскравості $Y(n)$, де n – номер пікселя.

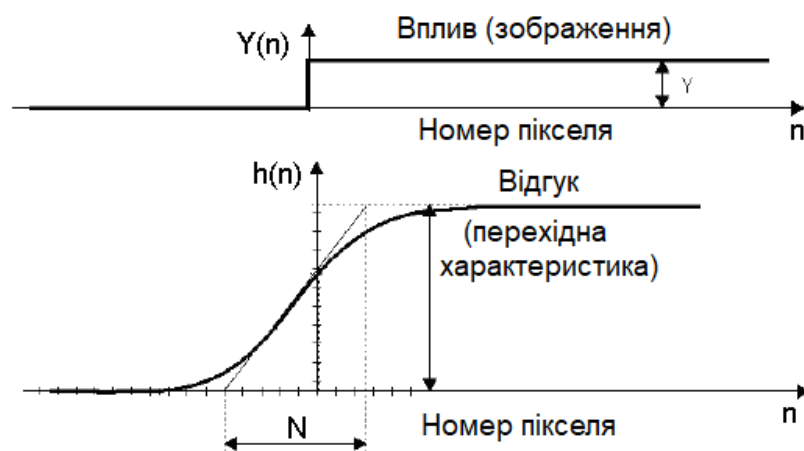


Рисунок 2.9 – Измерение переходной характеристики

Через вплив об'єктива, матричного перетворювача, системи обробки сигнал на виході відеокамери відрізнятиметься від ступінчастого і буде перехідною характеристикою системи. За її виглядом можна судити, як відображатимуться на фотографіях межі об'єктів.

Графік переходу від чорного до білого, побудований окремо кожного R,G,B кольору – т.зв. крайовий профіль (Edge profile) – дозволяє судити про

рівень хроматичних аберацій. У разі наявності хроматичних аберацій крайові профілі каналів R,G,B помітно відрізнятимуться один від одного, що призведе на зображенні до кольорової окантовки на межах об'єктів.

З перехідної характеристики можна одержати частотно-контрастну характеристику (MTF).

Між імпульсною та перехідною характеристиками є тісний зв'язок – імпульсна характеристика є похідною від перехідної характеристики [24]:

$$g(n) = \frac{dh(n)}{dn}. \quad (2.2)$$

Частотна характеристика та імпульсна характеристика лінійної стаціонарної системи пов'язані між собою прямим та зворотним перетвореннями Фур'є. Тому, знаючи функцію $g(n)$, завжди можна визначити частотно-контрастну характеристику $MTF(m)$:

$$MTF(m) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} g(n) e^{-jmn} dn \right|, \quad (2.3)$$

де m – просторова частота.

Через дискретність пікселів матриці при складанні комп'ютерної програми у формулах (2.2), (2.3) потрібно використовувати підсумовування та кінцеві припущення.

2.7 Вимірювання динамічного діапазону

Однією з найважливіших величин, що характеризують відеокамеру, динамічний діапазон. Ця величина показує здатність камери реєструвати півтони як у світлих, так і в темних ділянках сцени, що знімається одночасно. Тобто відеокамера, що володіє широким динамічним діапазоном, зможе на

одній сцені відобразити деталі як у світлах, так і в тінях, тоді як камера з малим динамічним діапазоном покаже на тій же сцені світла білими, а тіні - чорними, без півтонів.

Для оцінки динамічного діапазону використовують сенситометричний клин. Приклад такого інструменту Step Tablet фірми Kodak показано на рис.2.10.



Рисунок 2.10 – Сенситометричний клин Kodak Step Tablet

Динамічний діапазон вимірюється в світлі, для чого необхідна лампа підсвічування, встановлена за сенситометричним клином. Між лампою та клином потрібен дифузор (розсіювач, матове скло), щоб забезпечити рівномірне освітлення клину. Діапазоном оптичних густин світлофільтру становить від 0,05 до 3,05, всього 21 поле.

Зйомка проводиться у темній кімнаті, експозиція на камері виставляється так, щоб найяскравіша частина клина (перше поле) мала рівень яскравості в районі 255 (тобто було переекспоновано, але при цьому наступне поле клина має бути добре помітним і мати рівень яскравості нижче 255). Число роздільно помітних на зображенні полів сенситометричного клина характеризує динамічний діапазон камери.

Нехай на дане поле оптичного клина падає світловий потік Φ_{in} , а після проходження оптичного клина (і поглинання частини світла) світловий потік, що виходить, стає рівним Φ_{out} . Тоді оптична густина даного поля визначиться за формулою

$$D = \lg \frac{\Phi_{in}}{\Phi_{out}}.$$

Розрахуємо фільтр – аналог сенситометричного клина. Прийmemo кількість полів $I = 11$. Тоді крок оптичної щільності полів дорівнюватиме:

$$\Delta D = D_{\max} / (I - 1) = 3 / (11 - 1) = 0,3. \quad (2.4)$$

Розрахуємо значення коефіцієнтів світлопропускання полів клину

$$K = \frac{\Phi_{out}}{\Phi_{in}} = \frac{1}{10^D}. \quad (2.5)$$

Якщо, наприклад, це поле зменшує світловий потік, що проходить через нього, в 1000 разів, то оптична щільність цього поля дорівнює 3.0.

Іноді вимірюють оптичну щільність інших одиницях, званих *f-stops*. Один *f-stop* відповідає

$$\frac{\Phi_{in}}{\Phi_{out}} = 2. \quad (2.6)$$

Між двома одиницями (і *f-stop*) існує співвідношення:

$$D = (f - stops) \cdot \lg 2, \lg 2 \approx 0,3. \quad (2.7)$$

Тобто оптична щільність 3.0 в одиницях *f-stops* приблизно дорівнює 10-ти.

Розраховані значення коефіцієнтів світлопропускання 11 полів наведено у табл.2.3 (K_i).

Виготовити світлофільтр для сенситометричного клина можливо, використовуючи та комбінуючи нейтральні тонувальні плівки із заздалегідь відомим коефіцієнтами світлопропускання.

Таблиця 2.3 – Значення коефіцієнтів світлопропускання 11 полів сенситометричного клина

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D_i	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3
f-stop	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1
$K_i, \%$	50	25	12,5	6,4	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1

2.8 Розрахунок геометричних розмірів випробувальних таблиць та непрозорої камери

У найпростішому варіанті лабораторного комплексу застосована веб-камера з горизонтальним кутом зору $\alpha = 54^\circ$ (табл.2.1). У разі використання підставки формату А4 розміри листа становлять 21 см х 29,7 см. Нехай висота надрукованого зображення таблиці складе $h = 20$ см, тоді при форматі кадру $p = 4/3$ ширина зображення таблиці дорівнює

$$b = p \cdot h = 4 \cdot 20/3 \approx 26,7 \text{ см.} \quad (2.8)$$

Тоді відстань l від об'єктиву веб-камери до випробувальної таблиці, при якому все зображення таблиці увійде по ширині в поле зору камери, становитиме

$$l = \frac{b}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \frac{26,7}{2 \operatorname{tg} \frac{54}{2}} \approx 26 \text{ см.} \quad (2.9)$$

У разі використання підставки формату А3 розміри листа становлять 29,7 х 42 см, а обчислення за формулами (2.8, 2.9) дають результат $l \approx 37$ см.

Нехай є камера з "нормальною" фокусною відстанню $f=50$ мм і "повнокадровій" 36-мм матрицею. Горизонтальний кут зору камери у такому разі становить:

$$\alpha = 2 \arctg \frac{d}{2f} = 2 \arctg \frac{36}{2 \cdot 50} = 40^\circ. \quad (2.10)$$

Розміри аркуша формату А4 дорівнюють 21 см х 29,7 см. Нехай лист розташований в альбомному варіанті, тобто $b=29,7$ см – горизонтальний розмір. Тоді відстань l від об'єктива до випробувальної таблиці, при якому весь лист А4 по ширині увійде до поля зору камери, становитиме

$$l = \frac{b}{2 \tg \frac{\alpha}{2}} = \frac{29,7}{2 \tg \frac{39,6}{2}} \approx 41 \text{ см}. \quad (2.11)$$

Приймемо із запасом глибину непрозорі камери $L=0,5$ м. Конфігурація установки з геометричними розмірами показана на рис.2.11.

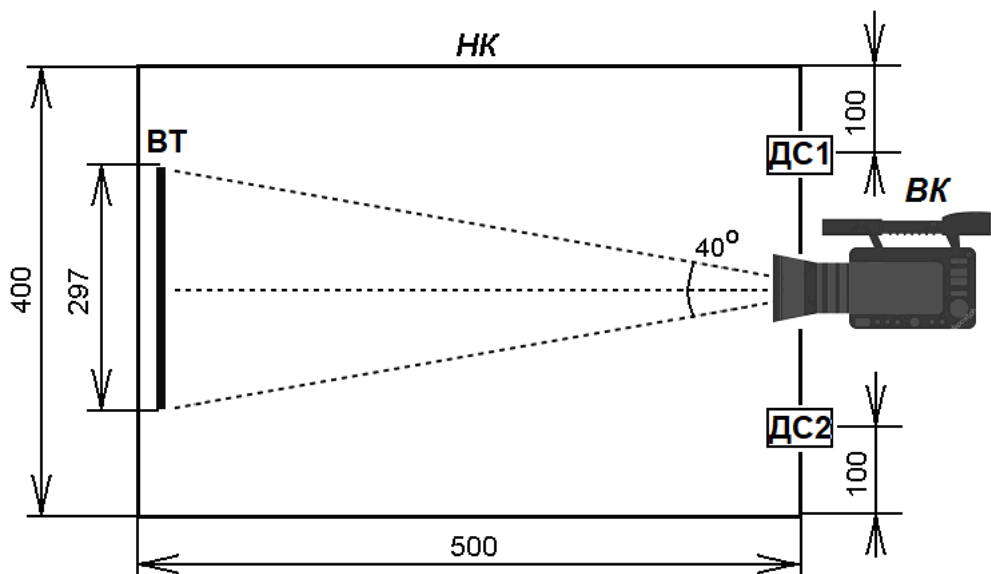


Рисунок 2.11 – Конфігурація непрозорі камери лабораторної установки
(горизонтальний переріз)

Таким чином, розробку структурної схеми лабораторного комплексу та методики вимірювання характеристик відеоапаратури можна вважати закінченою.

2.9 Висновки по розділу 2

У навчальному варіанті комплекс є набір випробувальних таблиць, які розміщуються всередині рамки А4 настільного власника для цінників або реклами. Як джерело відео використана веб-камера формату SD (роздільна здатність 640x480), що має помітні спотворення і ручне фокусування. Це дасть змогу наочно продемонструвати студентам аберації та спотворення у відеоапаратурі. Таблиці на телескопічній підставці та веб-камера на штативі розміщуються на лабораторному столі на висоті близько 30 см і приблизно на такій відстані один від одного.

Науковий варіант лабораторного комплексу є непрозорою камерою з двома регульованими джерелами світла, що дозволяє спільно з комп'ютером при невеликих фінансових вкладеннях організувати вимірювальну лабораторію.

Структурна схема апаратної частини комплексу включає регулятор напруги (диммер) для регулювання світлового потоку, комутатор для підключення однієї з ламп з різною колірною температурою (3000K і 6000K). Для контролю освітленості випробувальних таблиць використаний люксметр (Lx) та датчик освітленості (ДО). Кадри, зняті на фото або відеокамеру, завантажуються в ПЕОМ по порту USB, а програмне забезпечення, розроблене в середовищі MATLAB, розраховує характеристики відеокамери.

Розраховано розміри непрозорої камери. У відеокамери з «нормальною» фокусною відстанню 50 мм та «повнокадровою» 36-мм матрицею горизонтальний кут зору становить близько 400. Щоб лист А4 в альбомній орієнтації повністю увійшов у кадр, відстань від об'єктива має

становити 41 см. З невеликим запасом глибина непрозорої камери обрана рівною 50 см.

При зміні напруги на лампах розжарювання разом зі світловим потоком змінюється колірна температура. Тому як джерела світла краще застосовувати світлодіодні лампи. Для забезпечення максимальної освітленості 1200 лк світловий потік лампи має становити 75 лм. Вибраний конкретний тип ламп, їх світловий потік становить 105 лм при потужності 2 Вт, що споживається. Ступінь кольору 1В – дуже хороша. Для регулювання світлового потоку лампи допускають використання диммера, тобто. тиристорного пристрою з фазовим відсіканням напруги. Такий спосіб не змінить колірну температуру та дозволить у широких межах регулювати освітленість.

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСУ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Загальний алгоритм програми

Для отримання інформації про параметри відеоапаратури при обробці стоп-кадрів випробувальних таблиць доцільно використовувати середовище MATLAB. MATrix LABoratory – інтегроване середовище, що поєднує у собі кошти для числових розрахунків та моделювання. Вона має широкі графічні можливості та має вбудовану мову програмування високого рівня. MATLAB – це мова для технічних обчислень та інтерактивне середовище для розробки алгоритмів, обчислень, аналізу та візуалізації даних. MATLAB знаходить застосування для широкого спектру додатків, включаючи обробку сигналів та зображень, зв'язок, системи управління, тестування обладнання, фінансові розрахунки та медичні дослідження. Набори додаткових інструментів (toolboxes) розширюють можливості середовища MATLAB і дозволяють вирішувати конкретні практичні завдання. Крім того, MATLAB також дозволяє інтегрувати розроблені алгоритми та програми із зовнішніми програмами та мовами програмування, такими як Microsoft Excel, .NET, COM, C/C++, Java, що надалі дасть можливість, за необхідності, створити закінчений програмний продукт.

Відповідно до розробленої структурної схеми та методики вимірювань, загальна програма повинна включати кілька підпрограм:

- підпрограму для завантаження зображень стоп-кадрів у форматі *.jpg та збереження зображення у вигляді масиву даних у форматі *.mat;
- підпрограму для обчислення відносного рівня шуму, світлової характеристики (CX) та помилки балансу білого за зображенням 6-ти незабарвлених нейтральних полів (рис.2.5);

- підпрограму для розрахунку частотно-контрастної характеристики (ЧКГ) щодо зображення таблиці у вигляді вертикальних штрихів різної просторової частоти (рис.2.7);
 - підпрограму для розрахунку перехідної характеристики (ПХ) та хроматичних аберацій (ХА) за зображенням таблиці у вигляді чотирьох квадрантів, два з яких білі, два – чорні (рис.2.8).
 - підпрограму для обробки та відображення результатів вимірювань.
- Загальний алгоритм програми показано на рис. 3.1.

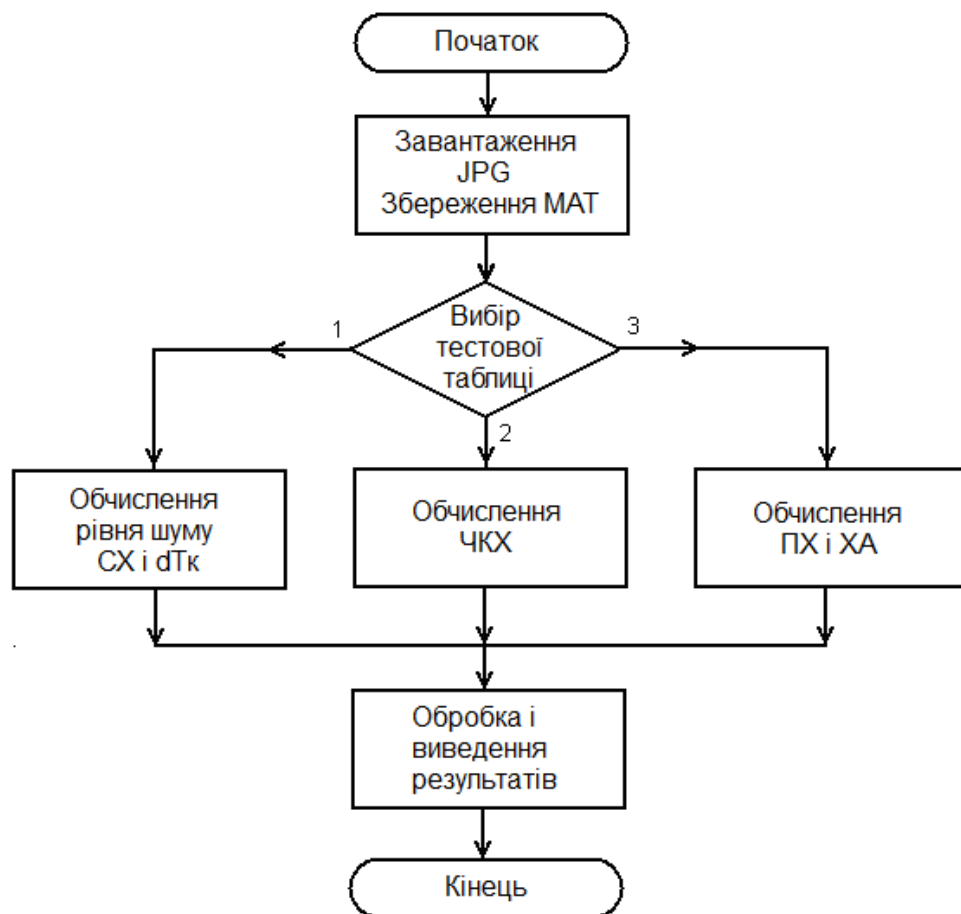


Рисунок 3.1 – Загальний алгоритм програми для досліджень

Розробимо докладно алгоритми, формули для обчислення характеристик відеоапаратури за зображеннями випробувальних таблиць та тексти вказаних підпрограм.

3.2 Розробка підпрограми введення зображень

Підпрограма введення зображень повинна завантажувати вихідні зображення стоп-кадрів у форматі *.jpg та зберігати яскраву та кольоророзносну складову у вигляді масивів даних у форматі *.mat.

JPEG (Joint Photographic Experts Group) – один із популярних графічних форматів, що використовується для зберігання фотозображень. Файли, що містять дані JPEG, мають розширення .jpg, .jfif, .jpe або .jpeg. З них .jpg є найпопулярнішим на всіх платформах.

Алгоритм JPEG дозволяє стискати зображення як із втратами інформації, так і без втрат (режим lossless JPEG). Підтримуються зображення з лінійним розміром не більше $65\,535 \times 65\,535$ пікселів.

При стисненні зображення перетворюється з колірного простору RGB YCrCb. Після перетворення RGB->YCrCb для каналів зображення Cr і Cb, що представляють кольоророзносні сигнали, може виконуватися «субдискретизація» (subsampling [2]), яка полягає в тому, що кожному блоку з 4 пікселів (2x2) каналу Y яскравості ставляться у відповідність усереднені значення Cr та Cb (схема проріджування «4:2:0» [2]). При цьому для кожного блоку 2x2 замість 12 значень (4 Y, 4 Cr і 4 Cb) використовується 6 (4 Y і по одному усередненому Cr і Cb). Якщо до якості відновленого після стиснення зображення пред'являються підвищені вимоги, проріджування може виконуватися лише в одному напрямку – або по вертикалі (схема «4:4:0»), або по горизонталі («4:2:2»), або взагалі не виконуватися взагалі («4:4:4»).

У нашому випадку передбачається використовувати файли *.jpg із глибиною кольору 24 біти. 24-бітна структура складається з трьох байт (тип BYTE), в яких вказується значення компонента моделі YCrCb.

Перед збереженням з трьох масивів YCrCb потрібно вибрати перший, відповідний інформації про яскравість, і останніх, відповідних інформації про колір.

Алгоритм програми введення зображень наведено на рис. 3.2.

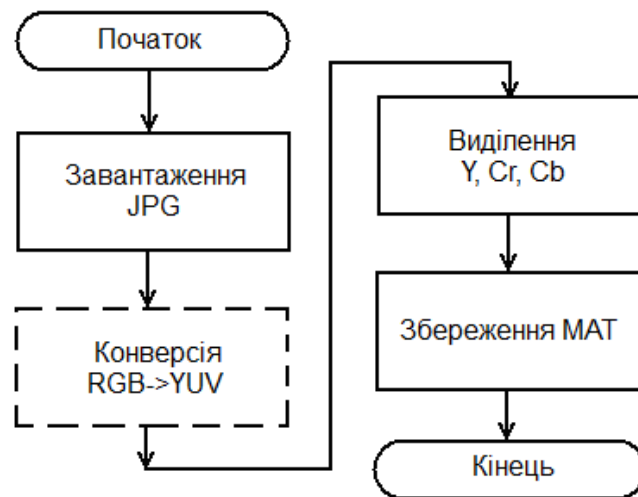


Рисунок 3.2 – Алгоритм підпрограми введення зображень

Нижче наведено текст підпрограми для введення зображень.

```

% завантаження зображення та збереження масивів яскравості та
% кольоровості
clear all
close all
%-----
I1=imread('table1.jpg'); % зчитуємо картинку
%I=rgb2yuv(I1); %переводимо в формат YCrCb
Y=I(:,:,1); %обираємо 1-Y, 2-Cr, 3-Cb
Cr=I(:,:,2);
Cb=I(:,:,3);

colormap(gray)
imagesc(Y) % виведення картинки яскравості (для контролю)
colorbar
save Y; save Cr; save Cb
% збереження масивів яскравості та кольоровості
  
```

У підпрограмі застосовані такі оператори:

- функція `I = imread (filename, fmt)` зчитує з файлу з ім'ям `filename` бінарне, напівтонове або повнокольорове зображення і поміщає його в масив `I`. Якщо MATLAB не може знайти файл з ім'ям `filename`, то шукається файл з ім'ям `filename` і розширенням `fmt`. Параметри `filename` та `fmt` є рядками. Параметр `fmt` у виклику функції може бути опущений, у разі формат файлу автоматично визначиться з його вмісту;

- функція `YUV=rgb2yuv(RGB)` створює кольорове зображення, значення пікселів якого представлені у колірній схемі YCrCb, з вихідного

кольорового зображення у колірній схемі RGB. Результуюче зображення має формат уявлення даних `double`; ця функція застосовується за необхідності та за умовчанням «закоментована» значком %;

– функція `save filename` зберігає всі змінні в робочому просторі MATLAB у файлі MAT. Коли файл `filename` не ввімкнено розширення, файл зберігається з розширенням `*.mat`.

3.3 Обчислення помилки встановлення балансу білого, відносного рівня шуму, світлової характеристики

Для обчислення помилки балансу білого та рівня шуму в атестаційній роботі використовується випробувальне зображення у вигляді 6 нейтральних полів різної оптичної щільності (рис.2.5).

3.3.1 Підпрограма для обчислення помилки встановлення балансу білого

Потрібно визначити колірну температуру зображення стоп-кадра випробувальної таблиці координат RGB. Відомі два методи вирішення цього завдання: пряме обчислення [26] та метод зворотної інтерполяції [27]. Метод прямого розрахунку має більшу точність та меншу обчислювальну складність, тому використовуємо його. Структурну схему алгоритму обчислення колірної температури показано на рис.3.3.



Рисунок 3.3 – Структурна схема алгоритму обчислення колірної температури методом прямого розрахунку

Спочатку здійснюється матричне перетворення з колірного простору RGB в простір XYZ за формулами:

$$\begin{aligned} X &= (-0,14282)R + (1,54924)G + (-0,95641)B; \\ Y &= (-0,32466)R + (1,57837)G + (-0,73191)B; \\ Z &= (-0,68202)R + (0,77073)G + (-0,563221)B. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Потім потрібно позбавитися від складової яскравості, щоб виключити вплив помилки експозиції, і перейти до нормованих координат кольоровості x, y :

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}; \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}. \quad (3.2)$$

На наступному етапі для розрахунку колірної температури застосовують формулу Мак-Камі:

$$T_K = 449 \cdot n^3 + 3525 \cdot n^2 + 6823,3 \cdot n + 5520,33, \quad (3.3)$$

де $n = (x - 0,3320)/(0,1858 - y)$.

Вираз (3.3) дає помилку не більше 2 К в діапазоні кольорових температур, що розраховуються від 2856 К до 6500 К [26], що більш ніж достатньо в нашому випадку.

Вирази (3.1) – (3.3) можуть бути зведені в одну формулу:

$$T_K = 449 \cdot n^3 + 3525 \cdot n^2 + 6823,3 \cdot n + 5520,33, \quad (3.4)$$

$$\text{де } n = \frac{(0,23881)R + (0,25499)G + (-0,058291)B}{(0,11109)R + (-0,85406)G + (-0,52289)B}.$$

При розрахунку опорної колірної температури $T_{K,0}$ за формулою (3.4) приймають $R = G = B = 1$, що відповідає незабарвленим білим деталям.

Тоді помилку встановлення балансу білого можна отримати як різницю колірних температур

$$\Delta T_K = T_K - T_{K,0}. \quad (3.5)$$

Позитивне значення $\Delta T_K > 0$ означає відхилення у бік холодних (синіх) відтінків кольорів, негативне значення $\Delta T_K < 0$ – відхилення у бік теплих (жовтих) відтінків.

Часто у професійних тестах помилку колірної температури визначають у Майредах (Mireds – micro reciprocal degree – зворотні мікроградуси):

$$M = \frac{10^6}{T_{uv}} - \frac{10^6}{T_{uv,0}}. \quad (3.6)$$

Нижче наведено текст підпрограми розрахунку помилки балансу білого.

```
clear all
close all

K=6; % число нейтральних полів
%-----
I1=imread('table1.jpg'); % зчитуємо картинку
I= yuv2rgb (I1);          %переводимо в формат RGB

% вибираємо компоненти 1-R, 2-G, 3-B
R=I(:,:,1); G=I(:,:,2); B=I(:,:,3);

% усереднення по рядках
r=mean(R); g=mean(G); b=mean(B);

size=length(r);          % довжина рядка
step=round(size/K);      % крок між центрами полів
width=round(size/(K+1)); %ширина поля

i=1:width;

% розрахунок опорної колірної температури
n0 = (0.23881+0.25499-0.58291)/(0.11109-0.85406+0.52289);
T0 = 449*n0^3+3525*n0^2+6823.3*n0+5520.33;

% розрахунок колірної температури для поля k
for k=1:K
    % виділяємо масиви в межах n-го поля
    r0(i)=r(round(step/2)+i+(n-1)*step);
```

```

g0(i)=g(round(step/2)+i+(n-1)*step);
b0(i)=b(round(step/2)+i+(n-1)*step);
% обчислюємо середнє
R0=mean(r0); G0=mean(g0); B0=mean(b0);

n = ((0.23881)*R0+(0.25499)*G0+(-0.58291)*B0)/((0.11109)*R+
(-0.85406)*G0+(0.52289)*B0);
T(k) = 449*n^3+3525*n^2+6823.3*n+5520.33;
dT(k)=T(k)-T0; %Кельвіни
M(k)=(10^6)/T(k)-(10^6)/T0; %Майреди
end
dT(k)
M(k)

```

У підпрограмі розрахунку помилки балансу білого зменшення впливу шумів виконані такі дійства:

- усереднення компонент R,G,B по всіх рядках зображення (у припущенні їхньої вихідної ідентичності);
- усереднення компонентів R,G,B у межах кожного поля зображення (ширина поля взята трохи менше вихідної, щоб не допустити перетину з сусідніми полями та чорними межами).

На рис.3.4 показано результат роботи програми обчислення помилки балансу білого.



Рисунок 3.4 – Результат обчислення помилки балансу білого

У верхній частині вікна показані поля з правильними кольорами. У середній частині показано зображення полів, отримане внаслідок зйомки. Внизу показані сірі поля з перебільшеною (наочністю) помилкою балансу білого. Це зроблено шляхом збільшення компонентів кольоровості CrCb в 10 разів. Числові значення помилки балансу білого виведені на екран в одиницях колірної температури (градуси Кельвіна) та Майредах.

3.3.2 Підпрограма для обчислення відносного рівня шуму

За випробувальним зображенням у вигляді 6 нейтральних полів різної оптичної щільності слід оцінити середньоквадратичний рівень шуму. Для цього виконаємо такі дії:

– спочатку розрахуємо різницю середніх сигналів яскравості між 1–м (чисто біле) та 6–м (чисто чорне) полями:

$$\overline{L}_i = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y L_i(x, y)}{X \cdot Y}, \quad \Delta L = \overline{L}_1 - \overline{L}_6 \quad (3.7)$$

де i – номер поля (1 і 6);

– потім розрахуємо середньоквадратичне значення шуму (окремо для кожного поля i для кожного каналу R, G, B і каналу L яркості):

$$\begin{aligned} \overline{R}_i &= \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y R_i(x, y)}{X \cdot Y}, & \sigma_{Ri} &= \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \left(R_i(x, y) - \overline{R}_i \right)^2}{X \cdot Y}}, \\ \overline{G}_i &= \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y G_i(x, y)}{X \cdot Y}, & \sigma_{Gi} &= \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \left(G_i(x, y) - \overline{G}_i \right)^2}{X \cdot Y}}, \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\overline{B}_i = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y B_i(x, y)}{X \cdot Y}, \quad \sigma_{B_i} = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \left(B_i(x, y) - \overline{B}_i \right)^2}{X \cdot Y}},$$

$$\sigma_{L_i} = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \left(L_i(x, y) - \overline{L}_i \right)^2}{X \cdot Y}};$$

– обчислимо відносні рівні шуму у відсотках від знайденої раніше різниці ΔL між сигналами яскравості білого (1) та чорного (6) полів:

$$N_{Ri} = \sigma_{Ri} / \Delta L, \quad N_{Gi} = \sigma_{Gi} / \Delta L, \quad N_{Bi} = \sigma_{Bi} / \Delta L, \quad N_{Li} = \sigma_{Li} / \Delta L. \quad (3.9)$$

Нижче наведено текст підпрограми розрахунку відносного рівня шуму.

```
clear all; close all

K=6; % кількість нейтральних полів
%-----
I1=imread('table1.jpg'); % зчитуємо картинку
I= yuv2rgb (I1);          %переводимо в формат RGB

% вибираємо колірні компоненти 1-R, 2-G, 3-B
R=I(:,:,1); G=I(:,:,2); B=I(:,:,3); L=I(:,:,1);

% усереднюємо по рядках

size=length(I);          % розмір рядка
step=round(size/K);      % крок між центрами полів
width=round(size/(K+1)); % ширина и висота поля

x=1:width; y=1:width;    % координати
i=1:K;                   % номер поля

%выделение массивов r,g,b,l для поля i

r(i,x,y)=R((round(step/2)+x+(n-1)*step), (round(step/2)+y-
(round(width/2)));
g(i,x,y)=G((round(step/2)+x+(n-1)*step), (round(step/2)+y-
(round(width/2)));
b(i,x,y)=B((round(step/2)+x+(n-1)*step), (round(step/2)+y-
(round(width/2)));
l(i,x,y)=L((round(step/2)+x+(n-1)*step), (round(step/2)+y-
(round(width/2)));
```

```

% розрахунок рівня шуму для поля з номером i
for i=1:K

    % розраховуємо середнє
    R0(i)=mean(mean(r(i,:,:))); G0(i)=mean(mean(g(i,:,:)));
    B0(i)=mean(mean(b(i,:,:))); L0(i)=mean(mean(l(i,:,:)));

    % розраховуємо СКВ шуму
    RMSr(i)= sqrt(sum((r(i,:,:)-R0).^2)/(width^2));
    RMSg(i)= sqrt(sum((g(i,:,:)-G0).^2)/(width^2));
    RMSb(i)= sqrt(sum((b(i,:,:)-B0).^2)/(width^2));
    RMSl(i)= sqrt(sum((l(i,:,:)-L0).^2)/(width^2));

end

% розраховуємо рівень шуму

dL=L0(1)-L0(6);
i=1:K; %номер поля

Nr(i)=RMSr(i)/dL; Ng(i)=RMSg(i)/dL;
Nb(i)=RMSb(i)/dL; Nl(i)=RMSl(i)/dL;

plot(i,Nr(i),i,Ng(i),i,Nb(i),i,Nl(i))

```

На рис.3.5 наведено результат роботи програми обчислення відносного рівня шуму.

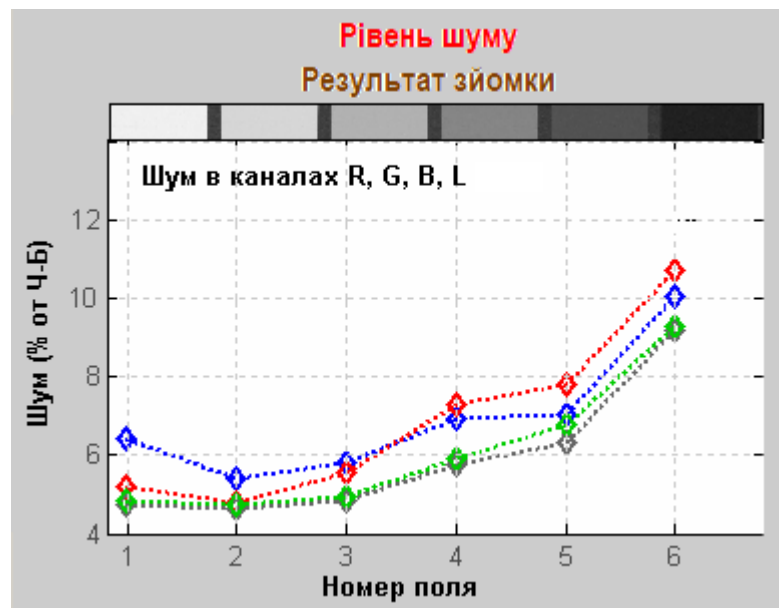


Рисунок 3.5 – Результат обчислення рівня шуму

Як впливає з рис.3.5, відносний рівень шуму в каналах червоного (R) та синього (B) у середньому в 2 рази більше, ніж у каналах зеленого (G) та яскравості (L). Це можна пояснити двома причинами:

– у матриці відеокамери застосовано колірну схему розташування світлофільтрів Байєра, в якій число зелених пікселів (G) у два рази більше, ніж червоних (R) та синіх (B); це дає вдвічі більшу підсумкову світлочутливу площу пікселів G у порівнянні з R і B;

– при обчисленні сигналу яскравості L сигнал зеленого G входить до лінійної суми з найбільшим коефіцієнтом (формула 1.17).

Розрахуємо рівень шуму за теоретичними формулами, щоб зіставити з отриманим експериментальним результатом та підтвердити правильність методики вимірювань та обчислень.

Зйомка здійснювалася при освітленості на об'єкті $E_0 = 400$ лк відеокамерою Sony HDR-CX405, КМОП-матриця якої має діагональ $d = (1/5.8)''$, кількість пікселів матриці $M = 2,29 \cdot 10^6$. Зйомка велася в автоматичному режимі, автоматика відеокамери виставила такі параметри експозиції:

– тривалість витримки $T = 1/25$ с;

– діафрагмове число $F1.8$.

Серед інших вихідних даних поставимо наступні:

– коефіцієнт відображення об'єкта зйомки $\rho = 0,6$.

У світлочутливій площині КМОП-сенсора відеокамери освітленість буде ослаблена, вона розраховується за формулою

$$E_{\text{КМОП}} = \frac{E_0 \cdot \rho \cdot \tau}{4 \cdot F^2}, \quad (3.10)$$

де E_0 – освітленість на об'єкті (400 лк);

ρ – коефіцієнт світловідображення об'єкта (0,6);

τ – коефіцієнт світлопропускання об'єктива (0,8);

F – діафрагмова кількість об'єктива (1,8).

По формулі (3.10)

$$E_{\text{КМОП}} = \frac{400 \cdot 0,6 \cdot 0,8}{4 \cdot 1,8^2} = 22,2 \text{ лк.}$$

Освітленість пов'язана з енергетичною опроміненістю через криву відносної видимості людського ока $k_{\text{в}}(\lambda)$ та коефіцієнт пропорційності $V_0 = 683 \text{ лк м}^2 / \text{Вт}$:

$$E_{\text{КМОП}} [\text{лк}] = V_0 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\text{КМОП}} [\text{Вт} / \text{м}^2](\lambda) \cdot k_{\text{в}}(\lambda) d\lambda. \quad (3.11)$$

Для рівноенергетичного білого джерела світла $k_{\text{в}}(\lambda) = \text{const}$, і формула (3.11) перетворюється на простий вираз:

$$E_{\text{КМОП}} [\text{Вт} / \text{м}^2] = \frac{E_{\text{КМОП}} [\text{Лк}]}{0,355 \cdot V_0} = \frac{22,2}{0,355 \cdot 683} = 92 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} / \text{м}^2. \quad (3.12)$$

Середня кількість фотонів, що утворюють зарядовий пакет за цикл накопичення у пікселі КМОП-сенсора, обчислимо за формулою

$$\bar{N}_{\phi} = \frac{E_{\text{КМОП}} \cdot S \cdot T}{\bar{W}_{\phi}} \cdot \eta, \quad (3.13)$$

де $E_{\text{КМОП}}$ – енергетична опроміненість, Вт / м²;

S – площа одного елемента, м²;

T – час накопичення (1/6 с);

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

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

$\bar{\nu} = c / \bar{\lambda}$ – середня частота випромінювання джерела світла, Гц;

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла;

$\bar{\lambda}$ – середня довжина хвилі видимого діапазону (555 нм);

η – середнє квантового виходу (0,8).

Середня енергія фотонів

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

Корисна площа КМОП-сенсора менша за його геометричну площу за рахунок схем зчитування заряду та їх електричної обв'язки. З урахуванням цього

$$S = \frac{a \cdot b}{M} \cdot K_{BП}, \quad (3.14)$$

де a, b – висота та ширина матриці;

M – число пікселів матриці;

$K_{BП}$ – коефіцієнт використання площі (0,75).

Для матриці формату 16:9 співвідношення сторін та діагоналі підпорядковується закону: $a:b:d = 16:9:18,4$. Тоді

$$a = \frac{16}{18,4} \cdot d = \frac{16}{18,4} \cdot (1/5,8) \cdot 2,54 \cdot 10^{-2} = 3,9 \text{ мм};$$

$$b = \frac{9}{18,4} \cdot d = \frac{9}{18,4} \cdot (1/5,8) \cdot 2,54 \cdot 10^{-2} = 2,2 \text{ мм.}$$

Тоді за формулою (3.14) площа одного пікселя

$$S = \frac{3,9 \cdot 10^{-3} \cdot 2,2 \cdot 10^{-3}}{2,29 \cdot 10^6} \cdot 0,75 = 8 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2.$$

Підставляючи розраховані значення вираз (3.13), отримаємо:

$$\bar{N}_{\phi} = \frac{92 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^{-13} \cdot 1/25}{3,58 \cdot 10^{-19}} \cdot 0,8 = 1,98 \cdot 10^6.$$

Фотоелектронний та тепловий шуми розподілені за законом Пуассона, тому кількість шумових електронів для цих процесів розраховується за формулою

$$N_{ш} = \sqrt{\bar{N}} = \sqrt{1,98 \cdot 10^6} = 1,41 \cdot 10^3. \quad (3.15)$$

где $\bar{N}$ – середня кількість електронів під час накопичення.

Рівень шуму у відсотках розрахуємо за формулою:

$$Noise = \frac{N_{ш}}{\bar{N}_{\phi}} \cdot 100\% = \frac{1,41 \cdot 10^3}{1,98 \cdot 10^6} \cdot 100\% = 7,1\%. \quad (3.16)$$

Отримане значення загалом збігається з експериментальними даними, представленими на рис.3.5.

3.3.3 Підпрограма для обчислення світлових характеристик

За випробувальним зображенням у вигляді 6 незабарвлених полів різної оптичної щільності слід оцінити світлову характеристику тракту зображення. Для цього застосуємо наступний алгоритм, у підпрограмі розрахунку світлової характеристики використані такі дії:

- завантажуюмо тестовий стоп-кадр, виділяємо компоненту яскравості;
- для зменшення впливу шумів усереднюємо компоненти яскравості L по всіх рядках зображення (у припущенні їхньої ідентичності);
- усереднюємо яскравість L у межах кожного поля зображення;
- будуємо графік функції $L(n)$, де n – номер поля.

Нижче наведено текст підпрограми розрахунку амплітудної характеристики.

```
clear all; close all

K=6; % кількість нейтральних полів
%-----
I=imread('table1.jpg'); % зчитуємо картинку
```

```

% вибираємо складову яскравості
L=I(:,:,1);

% усереднюємо по рядках
l=mean(L);

size=length(l); % розмір рядка
step=round(size/K); % крок між центрами полів
width=round(size/(K+1)); % ширина одного поля

i=1:width;

% обчислюємо середнє значення яскравості поля n
for n=1:K

    % виділяємо масив у межах поля n
    l0(i)=r(round(step/2)+i+(n-1)*step);

    % обчислюємо середнє
    L0(n)=mean(l0);
end

n=1:K;
ni=1:0.1:K;

% знаходимо інтерполіований масив
L0i = interp1(n,L0,ni,'cubic');

plot(n,L0/255,ni,L0i/255)

```

На рис.3.6 показан результат роботи підпрограми вичислення світлової характеристики.

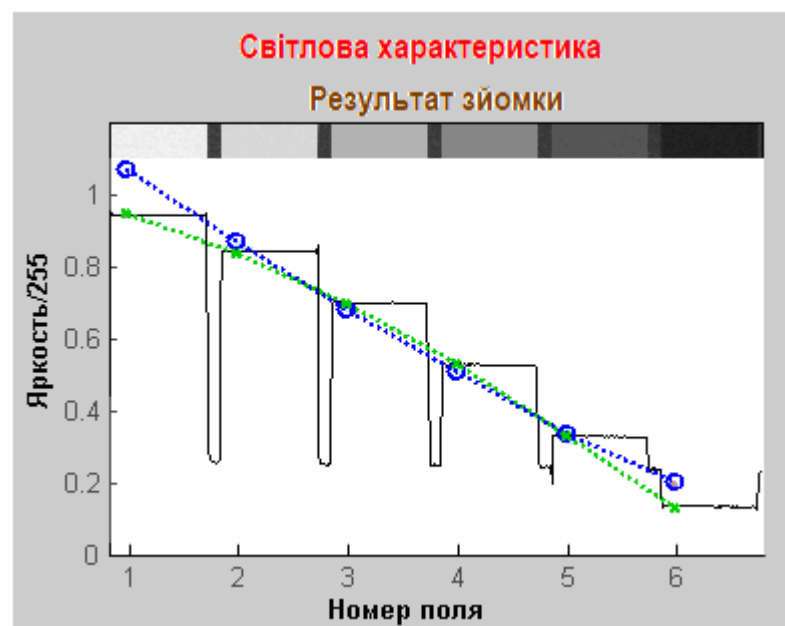


Рисунок 3.6 – Результат обчислення світлової характеристики

На графіку рис 3.6 порівняння також показана ідеально лінійна світлова характеристика. Видно, що експозиція відеокамери налаштована автоматикою так, щоб правильно передавати яскравості в середній частині світлового діапазону, в той час як по краях, в області світла і області тіні, помітні помилки.

3.3.4 Підпрограма для розрахунку перехідної характеристики

За випробувальним зображенням у вигляді 4-х квадрантів, 2 з яких білі, решта 2-чорних (рис.2.8), потрібно оцінити перехідну характеристику тракту зображення відеокамери. Для цього застосуємо наступний алгоритм:

- завантажимо тестовий стоп-кадр, виділимо масиви R, G, B і масив яскравості L;
- виділимо компоненти R,G,B та сигнал яскравості L у довільному рядку зображення (у припущенні їх ідентичності);
- побудуємо графіки перехідних характеристик $h_R(i)$, $h_G(i)$, $h_B(i)$, і $h_L(i)$, де i – номер пікселя, на околиці перехідного процесу (roi – region of interest);
- знайдемо тривалість перехідного процесу шляхом диференціювання

$$g_L(i) = (h_L(i))' \quad (3.17)$$

та знаходження розмірів області по i , в якій $g_L > 0,1$;

- знайдемо частотно-контрастну характеристику через дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) від g_L ;

– при виведенні графіка частотно-контрастної характеристики слід пам'ятати, що в спектрі ДПФ друга половина з N комплексних амплітуд є дзеркальним відображенням першої і не несе додаткової інформації [28-29], а комплексні амплітуди з номером $N/2$ відповідають половині просторової частоти дискретизації $F_s/2$.

Нижче наведено текст підпрограми розрахунку перехідної характеристики.

```
clear all; close all

I1=imread('table1.jpg'); % завантажуюмо стоп-кадр
I= yuv2rgb (I1);          %переводимо в формат RGB

% виділяємо компоненти 1-R, 2-G, 3-B, 1(I1)-L
R=I(:,:,1); G=I(:,:,2); B=I(:,:,3);
L=I1(:,:,1);

size=length(L); % розмір рядка
N=round(size/4); % вибір номера рядка
roi=16;          % розмір цікавої області roi
center=round(size/2); % розрахунок координат центру

for i=1:roi

% виділяємо масиви в межах цікавої для області roi

    r(i)=R(center+i-round(roi/2),N);
    g(i)=G(center+i-round(roi/2),N);
    b(i)=B(center+i-round(roi/2),N);
    l(i)=L(center+i-round(roi/2),N);
end

g=diff(l);
MTF=abs(fft(g));
% обчислюємо тривалість перехідної характеристики
long=0;
for i=1:length(g)
    if g(i)>0.1
        long=long+1;
    end
end

long % виводимо тривалість перехідної характеристики

i=1:roi;
m1=1:length(MTF);
m=m1/length(MTF);

plot(i,L)
figure; plot(i,R,i,G,i,B);
figure; plot(i,R,i,G,i,B);
figure; plot(m,MTF);
```

На рис.3.7,а наведено результат роботи підпрограми розрахунку перехідної характеристики, рис.3.7,б – результат роботи підпрограми розрахунку частотно-контрастної характеристики, але в рис.3.8 – результат роботи підпрограми розрахунку хроматичних аберацій.

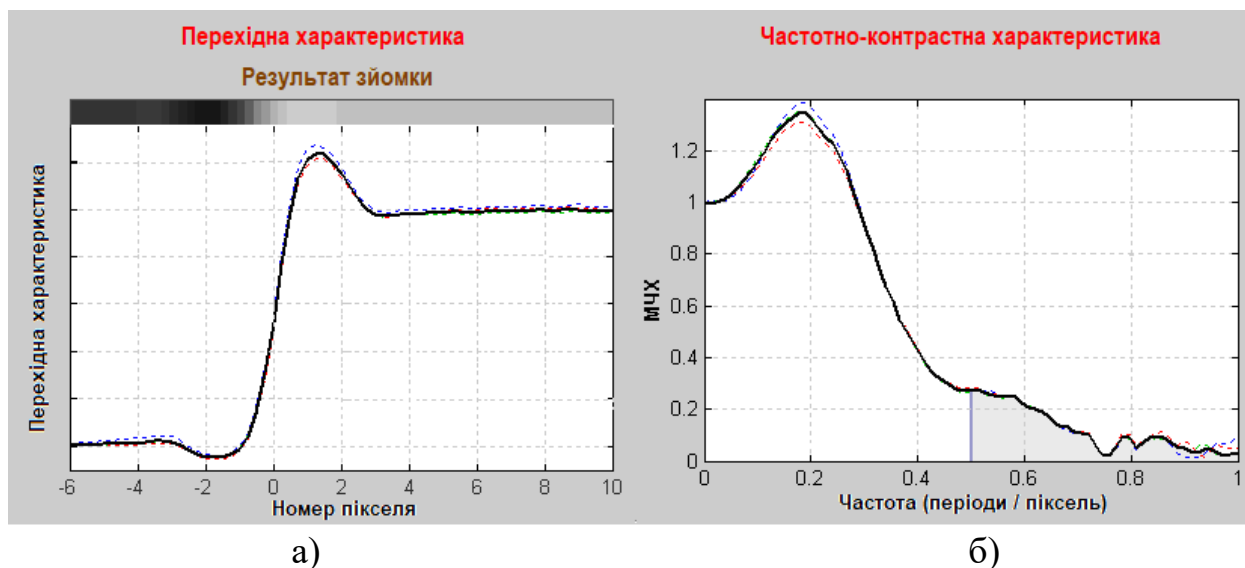


Рисунок 3.7 – Результат розрахунку перехідної характеристики (а)
та частотно-контрастної характеристики (б)

З результатів розрахунку можна зробити такі висновки:

- перехідна характеристика: тривалість переходу близько 1 пікселя; надмірне підкреслення меж об'єктів – до 24%.
- частотно-контрастна характеристика: надмірний підйом близько 40% на частоті 0,2 пер./пікс., ширина ЧКХ за рівнем 0,5 дорівнює 0,34 пер./пікс.

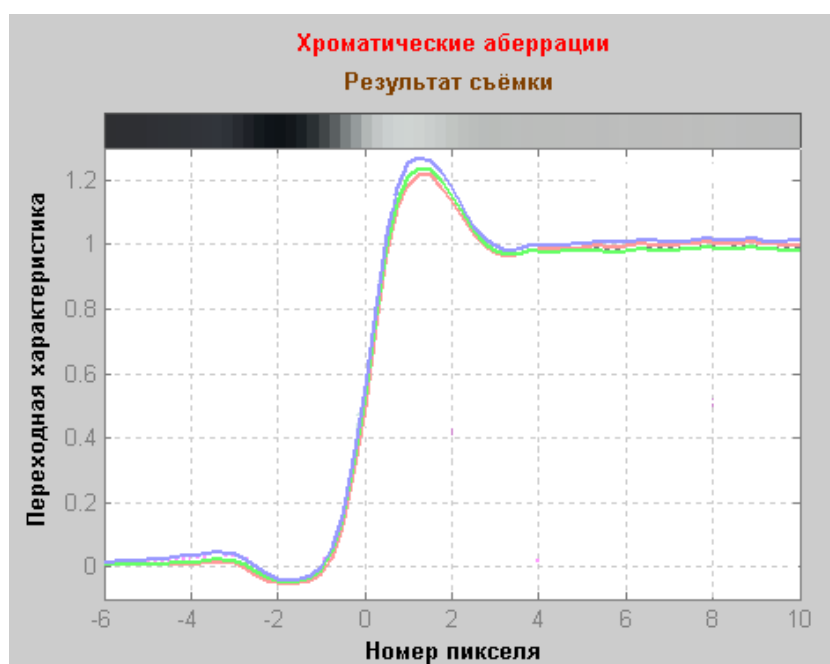


Рисунок 3.8 – Результат обчислення хроматичних аберацій

З результатів розрахунку ХА можна дійти такого висновку:

– параметр $CA(area)=0,245$ пікс.; при $CA<0,5$ хроматична аберація буде непомітною.

Таким чином: розроблений лабораторний комплекс дозволяє виміряти хроматичні аберації, перехідні характеристики та частотно-контрастні характеристики відеокамер.

3.3.5 Підпрограма розрахунку модуляційно-частотної характеристики

За випробувальним зображенням у вигляді мири з вертикальних штрихів з просторовою частотою, що збільшується (рис.2.7), необхідно оцінити модуляційно-частотну характеристику тракту зображення. Для цього застосуємо наступний алгоритм:

- введемо в комп'ютер тестовий стоп-кадр, виділимо складову яскравості L ;
- виділимо сигнал яскравості L у довільному рядку зображення (у припущенні їхньої ідентичності);
- побудуємо графік сигналу яскравості $L(i)$ у логарифмічній шкалі, де i – номер пікселя.

Попередньо розрахуємо мінімальну та максимальну просторові частоти вертикальних штрихів у випробувальній таблиці у припущенні, що на початку рядка період їх зображення на матриці має становити

$$d_1 = 100 \cdot d_{\text{пикс}}, \quad (3.18)$$

а в кінці

$$d_2 = 2 \cdot d_{\text{пикс}}, \quad (3.19)$$

де $d_{\text{пикс}}$ – просторовий крок пікселів на матриці.

Якщо кількість пікселів матриці $M = 2,29 \cdot 10^6$ млн., то при форматі 16:9 кількість пікселів по горизонталі становитиме

$$N_{\text{гор}} = \sqrt{\frac{16}{9} M} = \sqrt{\frac{16}{9} \cdot 2,29 \cdot 10^6} \approx 2000. \quad (3.20)$$

При горизонтальному розмірі випробувальної таблиці $A = 297$ мм одному періоду пікселів на матриці буде відповідати період предметної області (на випробувальній таблиці)

$$D_{\text{пикс}} = \frac{A}{N_{\text{гор}}} = \frac{297}{2000} \approx 0,15 \text{ мм}. \quad (3.21)$$

Тоді на початку рядка період штрихів зображення у таблиці має становити

$$D_1 = 100 \cdot D_{\text{пикс}} = 100 \cdot 0,15 = 15 \text{ мм}, \quad (3.22)$$

а в кінці

$$D_2 = 2 \cdot D_{\text{пикс}} = 2 \cdot 0,15 = 0,3 \text{ мм}. \quad (3.23)$$

На рис.3.9 наведено результат роботи підпрограми розрахунку модуляційно-частотної характеристики.



Рисунок 3.9 – Результат розрахунку модуляційно-частотної характеристики

З наведених результатів можна зробити такий висновок:

– модуляційно-частотна характеристика має надмірний підйом близько 25% на частоті 0,2 пер./пiкс.

3.4 Висновки по розділу 3

Таким чином, розроблена методика та проведені дослідження показали можливість в умовах вузівської лабораторії за мінімальних фінансових вкладень організувати вимірювання характеристик сучасних фото- та відеокамер. Лабораторія може використовуватися як у навчальних, так і наукових цілях.

Можливості лабораторного комплексу обмежені такими факторами: якістю виготовлення випробувальних таблиць, ступенем перенесення кольорів застосованих джерел світла, реалізацією відповідних підпрограм обробки результатів.

Обмеження стосуються вимірювання максимальної чіткості зображень та помилки встановлення балансу білого. При використанні високоякісних випробувальних таблиць та джерел світла вимірювальні можливості лабораторії, що проектується, автоматично розширюються до професійних.

ВИСНОВКИ

Параметри систем передачі зображень загалом залежать від кожного вузла тракту передачі. Однак, як і в будь-якій радіоелектронній системі, найбільш відповідальною ланкою є початкова – фото- або відеокамера.

Дослідженню характеристик фото- та відеоапаратури приділяють велику увагу як фірми-виробники, так і спеціалізовані видання, у тому числі наукові. Досліджують чутливість, інтенсивність шумів в умовах недостатньої освітленості, деталізацію зображення, роздільну здатність, правильність передачі кольору та їх залежність від різних факторів. Для цього створюють спеціальні вимірювальні установки. Стандартних рішень для таких вимірювань немає. Водночас питання забезпечення навчально-наукових лабораторій як нашого університету, так і усіх інших технічних вишів, вимірювальним обладнанням нині є досить гострим.

В кваліфікаційній роботі розроблено методику дослідження та лабораторний програмно-апаратний комплекс для цих цілей, а також досліджено можливості вимірювання характеристик фото- та відеоапаратури.

У навчальному варіанті комплекс є набом тестових таблиць, які розміщуються всередині рамки А4 настільного тримача для цінників або реклами. Як джерело відео використана веб-камера формату SD (640x480), що має помітні спотворення і ручне фокусування. Це дасть змогу наочно продемонструвати студентам аберації та спотворення у відеоапаратурі. Таблиці на телескопічній підставці та веб-камера на штативі розміщуються на лабораторному столі на висоті близько 30 см і приблизно на такій відстані один від одного.

Науковий варіант лабораторного комплексу є непрозорою камерою з двома регульованими джерелами світла, що дозволяє спільно з комп'ютером при невеликих фінансових вкладеннях організувати вимірювальну лабораторію.

Структурна схема апаратної частини комплексу включає регулятор напруги (диммер) для регулювання світлового потоку, комутатор для підключення однієї з ламп з різною колірною температурою (3000K і 6000K). Для контролю освітленості тестових таблиць використаний люксметр (Lx) та датчик освітленості (ДО). Кадри, зняті на фото або відеокамеру, завантажуються в ПЕОМ по USB, а програмне забезпечення, розроблене в середовищі MATLAB, розраховує характеристики відеокамери.

Розраховано розміри непрозорої камери. У відеокамери з «нормальною» фокусною відстанню 50 мм та «повнокадровою» 36-мм матрицею горизонтальний кут зору становить близько 40° . Щоби лист А4 в альбомній орієнтації повністю увійшов у кадр, відстань від об'єктива має становити 41 см. З невеликим запасом глибина непрозорої камери обрана рівною 50 см.

При зміні напруги на лампах розжарювання разом зі світловим потоком змінюється колірна температура. Тому як джерела світла краще застосовувати світлодіодні лампи. Для забезпечення максимальної освітленості 1200 лк світловий потік лампи має становити 75 лм. Вибраний конкретний тип ламп, їх світловий потік становить 105 лм при потужності 2 Вт. Ступінь кольору 1В – дуже хороша. Для регулювання світлового потоку лампи допускають використання диммера, тобто тиристорного пристрою з фазовим відсіканням напруги. Такий спосіб не змінить колірну температуру і дозволить у широких межах регулювати освітленість.

У середовищі MATLAB розроблено підпрограми для розрахунку помилки балансу білого, рівня шуму, світлової характеристики, перехідної та модуляційної характеристик. Для тестування розроблених програм використано тестові чорно-білі таблиці, роздруковані на лазерному принтері. Зйомка проводилася відеокамерою Sony HDR-CX405 з КМОП-матрицею 8 Мп та діагоналлю (1/5,8)".

Визначення колірної температури проводилося за 6 незабарвленими нейтральними полями з градаціями від білого до чорного. Зйомка

проводилася повністю автоматичному режимі при освітленні лампою розжарювання 100 Вт. Колірна температура розраховувалася по компонентам RGB за формулою Мак-Камі, що дає максимальну помилку 2 К в діапазоні від 2500 до 6500 К. За опорну температуру кольору прийнято значення при рівності сигналів RGB.

У вікні результатів показано вихідне зображення, зображення після зйомки та зображення зі збільшеною в 10 разів колірною компонентою для наочної демонстрації помилок балансу білого. Помилка для кожного поля виведена в градусах Кельвіна і укрупнених одиницях – Майредах.

При вимірюванні рівня шуму спочатку розраховані СКВ шуму для кожного поля, які потім віднесені до різниці сигналів яскравостей білого і чорного полів і виражені у відсотках. Зйомка здійснювалася при освітленості близько 400 лк, автоматика камери виставила такі параметри експозиції: витримка $T = 1/25$ с; діафрагмове число $F1.8$.

З отриманих результатів видно, що рівень шуму в каналах червоного та синього приблизно в 2 рази вищий, ніж у каналах зеленого та яскравості. Це можна пояснити тим, що в матриці камери застосовано схему Байєра для розташування світлофільтрів RGB, в якій число зелених пікселів вдвічі більше, ніж червоних і синіх. А при розрахунку яскравості зелений входить у лінійну суму з максимальним коефіцієнтом.

Теоретичний розрахунок дав рівень шуму 7,1% для тих самих вихідних умов, що дуже близько до отриманих експериментальних результатів.

Результат розрахунку амплітудної характеристики показав, що експозиція відеокамери налаштована автоматикою таким чином, щоб правильно передавати яскравості в середній частині світлового діапазону, в той час як по краях, в області світла і тіні, помітні помилки.

За випробувальним зображенням у вигляді різкого стрибка яскравостей визначено перехідну характеристику. На ній видно сплески до 24%, що говорить про надмірне підкреслення меж об'єктів, до чого вдаються багато виробників непрофесійних відеокамер.

Частотно-контрастна характеристика розрахована як модуль дискретного перетворення Фур'є від імпульсної характеристики. Просторова частота позначена у періодах зображення на крок пікселя матриці. ЧКХ має надмірний підйом близько 40% на частоті 0,2 періодів/піксель, ширина ЧКХ за рівнем 0,5 дорівнює 0,34 періодів/піксель.

Оцінка модуляційно-частотної характеристики за тестовим зображенням у вигляді мири з вертикальних штрихів з просторовою частотою, що збільшується, показав аналогічні результати.

Таким чином, розроблена методика та проведені дослідження показали можливість в умовах вузівської лабораторії за мінімальних фінансових вкладень організувати вимірювання характеристик сучасних фото- та відеокамер. Лабораторія може використовуватися як у навчальних, так і наукових цілях. Можливості лабораторного комплексу обмежені такими факторами: якістю виготовлення випробувальних таблиць, ступенем перенесення кольорів застосованих джерел світла, реалізацією відповідних підпрограм обробки результатів. Обмеження стосуються вимірювання максимальної чіткості зображень та помилки встановлення балансу білого. При використанні високоякісних випробувальних таблиць та джерел світла вимірювальні можливості лабораторії автоматично розширюються до професійних.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Телевидение / под ред. В.Е. Джаконии. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 640 с.
2. Пескин А.Е., Труфанов В.Ф. Мировое вещательное телевидение. Стандарты и системы: Справочник. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2004. – 308 с.
3. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Знак, 2006. — 972с.
4. Е.А. Иофис. Фотокинотехника / И. Ю. Шебалин. – М.: «Советская энциклопедия», 1981. – 447 с.
5. Д.С. Волосов. Фотографическая оптика. – 2-е изд. – М.: «Искусство», 1978. – 543 с.
6. Н.Д. Панфилов, А.А. Фомин. Краткий справочник фотолюбителя / Н.Н. Жердецкая. – М.: «Искусство», 1985. – 367 с.
7. Ю.Р. Носов, В.А. Шилин. Основы физики приборов с зарядовой связью. — М.: Наука, 1986. — 318 с.
8. Приборы с зарядовой связью / Под ред. М. Хоувза, Д. Моргана. — М.: Энергоиздат, 1981. — 372 с.
9. I. 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.
10. 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.
11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. В.М. Карташов, В.Н. Олейников, М.М. Колендовская, Л.П. Тимошенко, Н.В. Рыбников, А.И. Капуста. Комплексирование изображений при обнаружении беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 201. – С. 120 – 129.

15. Machine Vision and Navigation / Editors: Sergiyenko, Oleg, Flores-Fuentes, Wendy, Mercorelli, Paolo. Springer, Cham.

16. Ivanov M., Sergiyenko O., Tyrsa V., Mercorelli P., Kartashov V.M., Hernandez W., Sheiko S., Kolendovska M. Individual Scans Fusion in Virtual Knowledge Base for Navigation of Mobile Robotic Group with 3D TVS // IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – P. 3187–3192.

17. В.Н. Олейников, О.В. Зубков, В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.И. Бабкин, С.А. Шейко, И.С. Селезнев. Экспериментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению. Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 199. – С. 29 – 37.

18. V. Kartashov, V. Oleynikov, I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin, I. Selieznov. Use of Acoustic Signature for Detection, Recognition and Direction Finding of Small Unmanned Aerial Vehicles. 2020 IEEE 15th

International Confer-ence on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2020. 4 p.

19. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Zubkov O.V., Korytsev I.V., Babkin S. I., Sheiko S.A., Kolendovskaya M.M. Spatial-temporal Processing of acoustic Signals of Unmanned Aerial Vehicles/ Telecommunications and Radio Engineering. –New York. – 2020. – Vol. 79, №9. – P.769-780.

20. V. Kartashov, V. Oleynikov , I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin. Processing of Wide Band Acoustic Signals During Detection of Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25, 2020. Volume 1 on 2020 IEEE 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). pp. 35-39.

22. Випробувальні таблиці. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.focustestchart.com/chart.html> (Дата звернення 01.12.2022).

23. Методика вимірювань. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.imatest.com> (Дата звернення 01.12.2022).

24. Каталог ламп. [Електронний ресурс]. URL: http://ledlampa.dp.ua/catalog/catalog_lampa_g4.html (Дата звернення 01.12.2022).

25. Дьяконов В. MATLAB: учебный курс. – СПб.: Питер, 2001. – 560 с.

26. Дьяконов, В. MATLAB R2006/2007/2008 + Simulink 5/6/7. Основы применения. Самое подробное описание последних версий MATLAB, новые возможности Simulink / В. Дьяконов. – М.: Солон-Пресс, 2008. – 799 с.

27. Розрахунок колірної температури. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.bruceindbloom.com/> (Дата звернення 01.12.2022).

28. Joe Smith. Calculating Color Temperature and Illuminance using the TAOS TCS3414CS Digital Color Sensor // Intelligent Opto Sensor. Designers Notebook, N.25. – 7 pp.

29. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы / С.И. Баскаков. – М.: Высшая школа, 2000. – 462 с.