

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)

Дослідження шумових характеристик фото- та відеознімальної апаратури.

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи МІМ-21-1
Шегай В.В.
(прізвище, ініціали)

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

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва освітньої програми)

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

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Володимир КАРТАШОВ
(підпис)

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 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Шегаю Василю Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження шумових характеристик фото-
та відеознімальної апаратури.

затверджена наказом по університету від " 24 " 10 2022 р. № 1384 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 07.12.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи Тип досліджуваних матриць: ПЗЗ, КМОП. Діагоналі досліджуваних матриць (не менше): від (1/2)" до 1". Діапазон зміни температури матиці (не менше): 40°C. Обґрунтувати умови експерименту, дослідити закони розподілу шуму, їх просторовий розподіл в кадрі, просторові спектри шуму, залежність характеристик шуму від температури. Виявити особливості характеристик, які можуть бути використані для вдосконалення алгоритмів шумоподавлення. Розробити і дослідити вдосконалені алгоритми подавлення шумів матриць.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Вступ

1. Принципи роботи та характеристики матричних фотоелектричних перетворювачів.

2. Дослідження шумових характеристик матричних перетворювачів світло-сигнал.

3. Дослідження методів подавлення шуму матричних перетворювачів світло-сигнал.

Висновки

Перелік посилань

Додатки

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

1. Характеристики камер (1 аркуш А4).
2. Постановка задачі (1 аркуш А4).
3. Умови експерименту (1 аркуш А4).
4. Гістограми розподілу шуму (1 аркуш А4).
5. Аналіз темнових кадрів (1 аркуш А4).
6. Дослідження залежності шумів від температури (1 аркуш А4).
7. Аналіз спектрів шумів (1 аркуш А4).
8. Подавлення теплового шуму (1 аркуш А4).
9. Фільтрація структурного шуму (1 аркуш А4).
10. 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	Обґрунтування експерименту	14.09.22–27.09.22	
3	Дослідження шумових характеристик	28.09.22–11.10.22	
4	Дослідження залежностей від температури	12.10.22–25.10.22	
5	Дослідження методів подавлення шуму	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 _____ Василь ШЕГАЙ _____
(підпис)

Керівник роботи _____ Денис ГОРЕЛОВ _____
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 66 сторінок, 36 рисунків, 33 джерела.

ЗОБРАЖЕННЯ, КАДР, КМОП, МАТРИЦЯ, ОСВІТЛЕНІСТЬ, ПЗС, СВЕТОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, СВІТЛОВИЙ ПОТІК, СТРУКТУРНИЙ ШУМ, ТЕПЛОВИЙ ШУМ, ЧУТЛИВІСТЬ

Об'єкт дослідження – процес утворення шуму в світлочутливих матричних перетворювачах.

Мета роботи – виявлення і кількісна оцінка складових шуму, властивих виключно для матричних перетворювачів, а також вдосконалення методів шумозаглушення з урахуванням цих складових.

Методи дослідження – теоретичний аналіз, натурний експеримент, статистичний аналіз результатів.

Задачі дослідження: теоретичний аналіз і обґрунтування умов експерименту, експериментальне дослідження законів розподілу шуму фотокамер, їх просторового розподілу в кадрі, просторових спектрів шуму, залежно характеристик шуму від температури, виявлення особливостей, які можуть бути використані для вдосконалення алгоритмів шумоподавлення, розробка і дослідження вдосконалених алгоритмів подавлення шумів матриць.

ABSTRACT

Explanatory note to the master's qualification work: 66 pages, 36 figures, 33 sources.

IMAGE, FRAME, CMOS, MATRIX, ILLUMINATION, CCD, LIGHT CHARACTERISTIC, LIGHT STREAM, STRUCTURED NOISE, HEAT NOISE, SENSITIVITY

The object of research is the process of noise formation in photosensitive matrix transducers.

The purpose of the work – identifying and quantifying the components of the noise inherent exclusively matrix transducers, as well as the improvement of noise reduction methods, taking into account these components..

Research methods – theoretical analysis, field experiment, statistical analysis of the results.

Research objectives: theoretical analysis and justification of experimental conditions, experimental study of the noise distribution laws of cameras, their spatial distribution in a frame, spatial noise spectra, temperature dependence of noise characteristics, identification of features that can be used to improve noise reduction algorithms, development and research of advanced algorithms noise suppression matrix.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	8
Вступ.....	9
1 ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТРИЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ.....	10
1.1 Суть процесу фото- та відеозйомки. Світлотехнічні величини.....	10
1.2 Історія появи та розвитку фотоелектричних перетворювачів.....	15
1.3 Фізичні принципи роботи матричних перетворювачів.....	17
1.4 Характеристики матричних перетворювачів.....	22
1.5 Шуми матричних перетворювачів.....	25
1.6 Висновки по розділу 1.....	27
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ШУМОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СВІТЛО-СИГНАЛ.....	29
2.1 Постановка задачі.....	29
2.2 Теоретичний аналіз шумових характеристик фоточутливих матриць.....	30
2.3 Експериментальне дослідження законів розподілу шуму фото- та відеокамер.....	34
2.4 Експериментальне дослідження просторових характеристик шумів матриць.....	40
2.5 Дослідження залежності шумових характеристик камер за різної температури.....	45
2.6 Висновки по розділу 2.....	47
3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПОДАВЛЕННЯ ШУМУ МАТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СВІТЛО-СИГНАЛ.....	49
3.1 Подавлення теплового шуму.....	49
3.2 Фільтрування шумів зчитування.....	53
3.3 Висновки по розділу 2.....	57

Висновки.....	59
Перелік джерел посилань.....	63
ДОДАТКИ.....	67
Додаток А. Графічний матеріал.....	68
Додаток Б. Відомість кваліфікаційної роботи.....	78

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АЧТ – абсолютно чорне тіло;

ВК – відеокамера

Д – димер;

ДД – динамічний діапазон;

ДО – датчик освітленості;

ІВ – джерело світла;

ІТ – випробувальна таблиця;

К – комутатор;

КМОП – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

КСС – крива сили світла;

МЧХ – модуляційно-частотна характеристика;

ПК – 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

Однією із фундаментальних проблем мультимедіа є проблема зорового сприйняття. Виникнувши дуже давно, вона є актуальною і в даний час, бо зображення є природним засобом спілкування людини та машини у будь-яких системах обробки, аналізу та контролю.

Комп'ютерна графіка поділяється на три основні напрямки: візуалізація, обробка зображень та розпізнавання образів. Візуалізація – це створення зображення на основі якогось опису (моделі). Головне завдання розпізнавання образів – отримання семантичного опису зображених об'єктів. Обробка зображень відповідає за перетворення (фільтрування) зображень. Розвиток сучасних засобів комп'ютерної техніки та інформаційних технологій сприяє широкому впровадженню у практику систем автоматичної обробки зображень.

Першорядним завданням такої системи є покращення якості зображення. Проблема шумоподавлення є однією з найактуальніших і найпоширеніших проблем у галузі обробки зображень. Найпоширенішими видами шумів є Гауссів та імпульсний шуми, а також їх комбінація. Завданням обробки зображення може бути як поліпшення (відновлення, реставрація) зображення за певним критерієм, так і спеціальне перетворення, що кардинально змінює зображення. В останньому випадку обробка зображень може бути проміжним етапом для подальшого розпізнавання зображення (наприклад, виділення контуру об'єкта).

Методи обробки зображення можуть суттєво відрізнятися в залежності від того, яким шляхом зображення було отримано – синтезовано системою машинної графіки, шляхом оцифрування чорно-білої, кольорової фотографії або відео, або шляхом фото-або відеозйомки. Якщо зображення було отримано за допомогою зйомки, на них присутній шум. Найчастіше шумоподавлення служить для покращення візуального сприйняття, але може також використовуватися для якихось спеціалізованих цілей – наприклад, у

медицині для збільшення чіткості зображення на рентгенівських знімках, як передобробка для подальшого розпізнавання і т.ін.

Також шумоподавлення відіграє важливу роль при стисканні зображень. При стисненні сильний шум може бути прийнятий за деталі зображення, і це може негативно вплинути на результуючу якість стисненого зображення.

Джерела шуму можуть бути різними: неідеальне обладнання для захоплення зображення, погані умови зйомки – наприклад, сильні шуми, що виникають під час нічної фото/відеозйомки, власні шуми активних компонентів.

Часто до подавлення шуму матричних перетворювачів світло-сигнал підходять, традиційно вважаючи, що це гаусовий білий шум. Аналіз деяких робіт дає підстави вважати, що це припущення неправильне і є значні складові шуму матриці, відмінні від нормального.

У даній кваліфікаційній роботі проводиться дослідження шумових характеристик матричних перетворювачів фото- та відеокамер, виявлення складових, відмінних від нормального білого шуму, визначення їх числових характеристик, а також розробка методів подавлення цих складових шуму, характерних виключно для матричних світлоперетворювачів.

1 ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТРИЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

1.1 Суть процесу фото- та відеозйомки. Світлотехнічні величини

Суть процесу фото- та відеозйомки полягає у реєстрації світла певного джерела, відбитого від об'єкта зйомки (рис.1.1). У зв'язку з цим у характеристиках фото- та відеокамер, безперервних або імпульсних джерел світла обов'язково присутні світлотехнічні величини. Розглянемо фізичну сутність основних світлотехнічних величин.

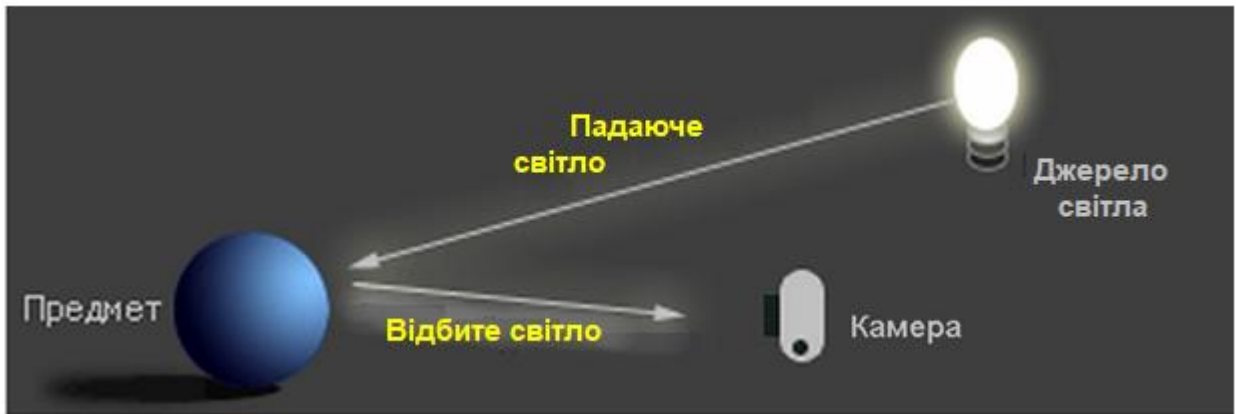


Рисунок 1.1 – Процес фото- и видеосъёмки

Світловий потік – характеризує потужність видимого випромінювання з її впливу очей людини у спеціальних одиницях – люменах [лм], і є важливою характеристикою ламп. Звичайна лампа розжарювання потужністю 100 Вт випромінює променистий потік $\Phi_{\lambda}(\lambda)$ не тільки у видимому діапазоні довжин хвиль, але й у інфрачервоному (рис.1.2). У видимий діапазон довжин хвиль потрапляє невелика частина потужності, що випромінюється, яку і характеризує світловий потік [1]:

$$\Phi_{cv}(\lambda) = V_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda}(\lambda) \cdot k_{\theta}(\lambda) d\lambda, \quad (1.1)$$

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

$k_g(\lambda)$ – крива відносної видимості ока, яка характеризує чутливість органу зору до випромінювань різних довжин хвиль.

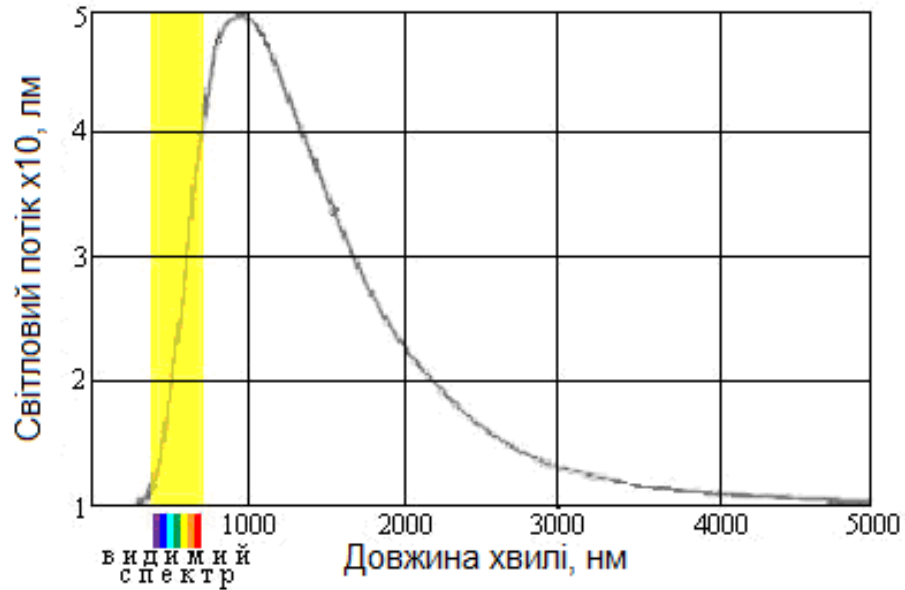


Рисунок 1.2 – Спектр випромінювання лампи розжарювання

Звичайна лампа розжарювання потужністю 100 Вт має світловий потік 1300 Лм, а металогалогенна лампа потужністю 70 Вт – 6000 лм. Така різниця проявляється через різний спектр випромінювання [1].

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

$$I = \frac{\Phi_{св.}}{\omega}. \quad (1.2)$$

Тобто при однаковому світловому потоці джерела більшої сили світла можна досягти шляхом фокусування в обмежений простір. Одиниця вимірювання сили світла – кандела [кд].

Розподіл сили світла у просторі (крива сили світла, КСС) – одна з найважливіших характеристик освітлювальних приладів, необхідних для розрахунку освітлення.

На рис.1.3 показаний приклад КСС для освітлювального приладу "Зоря-2000" [1]. Крива 1 відповідає вузькому (сфокусованому) променю), крива 2 – широкому (розфокусованому) променю.

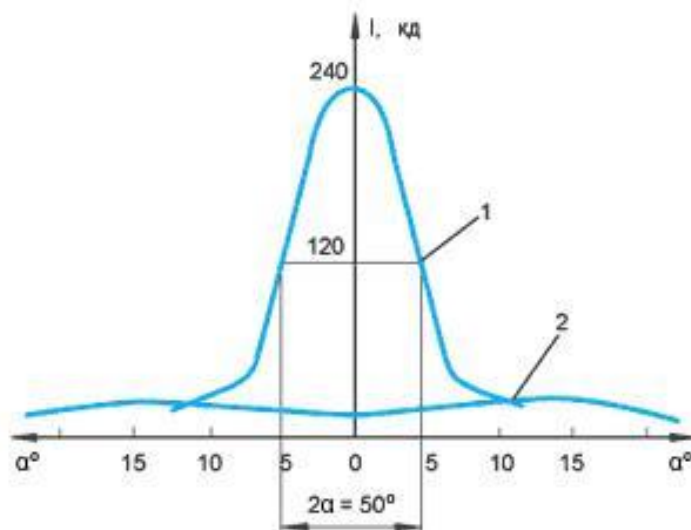


Рисунок 1.3 – Крива сили світла освітлювального приладу «Зоря-2000»
(1 – вузький промінь, 2 – широкий промінь)

Освітленість – це поверхнева щільність світлового потоку $\Phi_{св}$, що падає на майданчик заданої величини S [1]:

$$E = \frac{\Phi_{св}}{S}. \quad (1.3)$$

Одиниця освітленості – люкс [лк]. Одна з найголовніших величин у нормах освітлення при фото- та відеозйомці. Діапазон рівнів освітленості складає при штучному освітленні від 1 до 20 лк на вулиці та від 20 до 5000 лк у приміщенні. В природних умовах освітленість $E \approx 1$ лк у повний місяць, 5000 – 10000 лк вдень при суцільній хмарності та до 100000 Лк у ясний сонячний день.

Колірна температура – це температура нагрівання абсолютно чорного тіла (АЧТ), коли воно випромінюватиме певний променистий потік. Залежність між спектральною щільністю променистого потоку $\Phi_{\lambda}(\lambda)$, довжиною хвилі λ та температурою АЧТ T_k вперше вивів німецький фізик М. Планк у 1900 р. Ця залежність була названа формулою Планка [1].

З формули Планка можна отримати закон зміщення Вина:

$$\lambda_{\max} [\text{мкм}] = 2896 / T_K [K], \quad (1.4)$$

де λ_{\max} – довжина хвилі, що відповідає максимуму кривої спектральної щільності променистого потоку, мкм;

T_K – колірна температура, К.

Отже, у разі підвищення температури АЧТ максимум потужності випромінювання зміщується, проходячи через видиму область спектра, у бік коротких довжин хвиль. Наведені дані на рис.1.4 ілюструють усунення розрахункового максимуму спектра АЧТ [1].

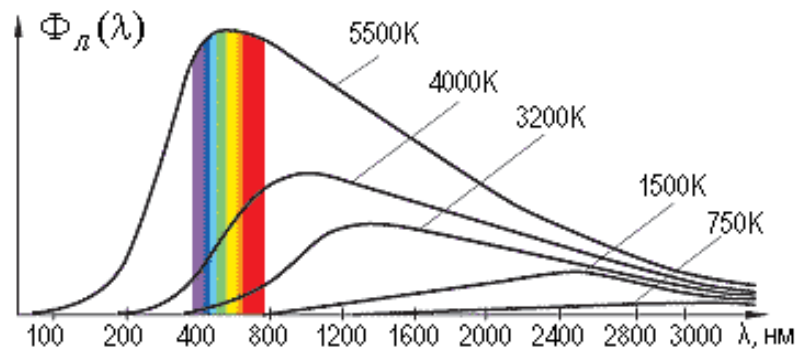


Рисунок 1.4 – Спектральний розподіл променистої енергії АЧТ $\Phi_L(\lambda)$ за різної T_K

Індекс передачі кольору (R_a) – одна з основних колірних характеристик якості джерел світла. Характеризує ступінь відтворення кольорів різних матеріалів при їх освітленні лампою порівняно з еталонним джерелом світла із суцільним спектром. Найвище значення $R_a=100$. Найгірші за кольором натрієві лампи високого тиску мають $R_a=25$. Згідно з нормами дуже хороша передача кольору (ступінь 1) відповідає значенням $R_a=80$ і більше, хороша (ступінь 2) – R_a від 60 до 79, задовільна (ступінь 3) – R_a від 40 до 59 і недостатня (ступінь 4) – від 20 до 39.

1.2 Історія появи та розвитку фотоелектричних перетворювачів

Прилади із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) належать до класу твердотільних напівпровідникових приймачів [3-8].

Першими приймачами такого типу були фотодіоди. Першим прикладом їхньої роботи є вдала реєстрація за допомогою фотодіода явища сонячного затемнення, яке спостерігалось берлінськими вченими в Єгипті в 1911 [6].

Основний недолік світлодіодів – одноканальність – не дозволив їм знайти широке застосування. З кінця 1930-х років серед світлоприймачів почали з'являтися телевізійні трубки, що завоювали до кінця 1970-х лідируючу позицію в цій галузі [6].

Було розроблено порівняно багато приладів різних типів: ортисони, ізокони, секони, відікони, плюмбікони (у телевізійному мовленні трубки із зворотним пучком), кремнікони та суперкремнікони, дисектори (спеціалізовані трубки з підвищеною квантовою ефективністю) тощо. Усі вони мали низку серйозних недоліків: великі розміри, низьку квантову ефективність (на рівні 5-10%), малий динамічний діапазон тощо. [4-6]

Кардинальна зміна ситуації сталася з появою напівпровідникових твердотільних приймачів нового покоління. Квантова ефективність сучасних напівпровідникових приймачів випромінювання сягає 95-98%, тобто. кожен фотон, що падає на прилад, реєструється системою майже зі 100% ймовірністю. [9]

У 1970 році були створені перші прилади із зарядовим зв'язком, в яких технологія твердотільних приймачів виявилася особливо успішною.

Спочатку ПЗЗ застосовувалися як ефективніші багатоканальні замітники фотодіодів, матриць фотодіодів. З найбільшим успіхом ПЗЗ-матриці реєстрували слабкі світлові потоки в таких галузях як мікробіофізика, хімічна фізика, ядерна фізика, астрофізика.

З 1975 року ПЗЗ почали активно впроваджуватися як телевізійні світлоприймачі. А 1989 року ПЗЗ-детектори застосовувалися вже майже 97% усіх телевізійних приймачів. Для порівняння, 10 роками раніше ПЗЗ були представлені лише двома відсотками. [6]

Довгий час широкому застосуванню ПЗЗ-приймачів у телевізійній техніці перешкоджали недоліки у технологіях виготовлення світлочутливих елементів – кристалічних основ необхідного розміру. Світлоприймальна область була неоднорідна по квантовому виходу, спостерігалася помітна геометрична нестабільність (плаваюча низька роздільна здатність), були різні шуми як на малих масштабах (від пікселя до пікселя), так і на великих просторових масштабах (на шкалах 10...100 піксел).

Тільки з розвитком та вдосконаленням технології створення ПЗЗ та з суттєвим стрибком у розвитку супутніх електронних засобів і, насамперед, зі збільшенням потужностей та швидкодії АЦП, стало можливим ширше застосування ПЗЗ. [3-8]

Поставивши на конвеєр виробництво спочатку дорогих чіпів, багато фірм домоглися різкого зниження їхньої собівартості. Здешевлення телевізійних камер на основі ПЗЗ, зменшення їх габаритів та ваги, низьке енергоспоживання, простота та надійність в експлуатації дозволили застосовувати їх не лише у професійних студіях, наукових дослідженнях, дорогих системах військового призначення. Сьогодні телекамери на основі ПЗЗ-матриць можна зустріти в різних областях виробництва, в різних сферах послуг, сервісу, в системах охорони, в побуті. Поява мініатюрних телекамер із застосуванням ПЗЗ-матриць з розмірами пікселя в кілька мікрон дали можливість застосовувати їх у мікрохірургії, мікробіології, мікровідеооптиці, що призвело до створення спеціальної мікровідеотехніки.

Сьогодні серійне виробництво ПЗС-матриць здійснюється кількома фірмами: Texas Instruments, Thompson, Loral Fairchild, Ford Aerospace, SONY, Panasonic, Samsung, Philips, Hitachi Kodak. [10]

1.3 Фізичні принципи роботи матричних перетворювачів

Спрощено пристрій із зарядовим зв'язком можна розглядати як матрицю близько розташованих МДП-конденсаторів. Електричний сигнал у них представлений не струмом чи напругою, як у більшості інших твердотільних приладах, а зарядом. За відповідної послідовності тактових імпульсів напруги на електродах МДП-конденсаторів зарядові пакети можна переносити між сусідніми елементами приладу. Тому такі прилади і названі приладами з перенесенням заряду або із зарядним зв'язком (ПЗЗ).

На рис. 1.5 показано структуру одного елемента, лінійного трифазного ПЗЗ у режимі накопичення. [11]

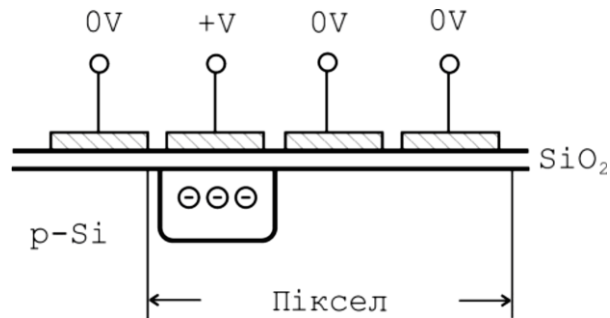


Рисунок 1.5 – Елемент (піксель) трифазного ПЗЗ

Структура складається з шару кремнію р-типу (підкладка), ізолюючого шару двоокису кремнію та набору пластин-електродів. Один з електродів зміщений більш позитивно, ніж решта двох, і саме під ним відбувається накопичення заряду, а дірки будуть відтіснені вглиб кристала. Це означає, що під електродом формується потенційна яма.

В основі роботи матричних перетворювачів лежить явище внутрішнього фотоефекту. Коли кремнію поглинається фотон, то генерується пара носіїв заряду – електрон і дірка. Електростатичне поле в області пікселя "розтягує" цю пару, витісняючи дірку всередину кремнію. Неосновні носії заряду, електрони, накопичуватимуться в потенційній ямі під електродом, до якого підведено позитивний потенціал. Тут вони можуть зберігатися досить

тривалий час, оскільки дірок у збідненій ділянці немає і електрони не рекомбінують.

Носії, згенеровані за межами збідненої області, повільно рухаються – дифундують і, як правило, рекомбінують з гратами, перш ніж потраплять під дію градієнта поля збідненої області. Носії, згенеровані поблизу збідненої області, можуть дифундувати убік і можуть потрапити під сусідній електрод. У червоному та інфрачервоному діапазонах довжин хвиль ПЗЗ мають дозвіл гірше, ніж у видимому діапазоні, так як червоні фотони проникають глибше в кристал кремнію і розмивається зарядовий пакет. [11]

Заряд, накопичений під одним електродом, у будь-який момент може бути перенесений під сусідній електрод, якщо його потенціал буде збільшений, тоді як потенціал першого електрода буде зменшено [11] (рис.1.6).

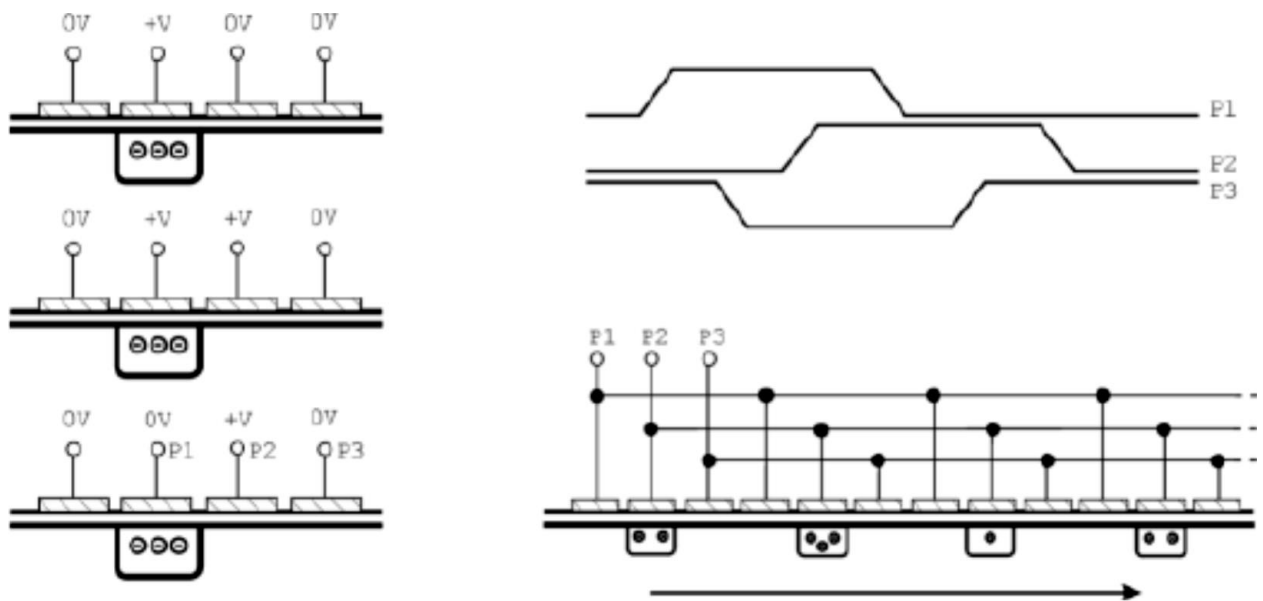


Рисунок 1.6 – Перенесення зарядів у трифазному ПЗЗ

Перенесення у трифазному ПЗЗ можна виконати в одному з двох напрямків. Всі зарядові пакети лінійки пікселів переносяться в той же бік одночасно. Двовимірний масив (матрицю) пікселів одержують за допомогою стоп-каналів, що розділяють електродну структуру ПЗЗ на стовпці. Стоп канали – це вузькі області, які формуються спеціальними технологічними

прийомами в приповерхневій області, які перешкоджають розтіканню заряду під сусідні стовпці. [11]

Матричні перетворювачі класифікуються за типом зчитування.

1. Повнокадрові ПЗЗ матриці: двовимірний масив фотострумів ПЗЗ-матриці одночасно зміщується вниз на один рядок, причому відбувається це тільки після того, як заряди попереднього рядка з розташованого «в самому низу» послідовного регістру зсуву пішли на підсилювач (рис.1.7).

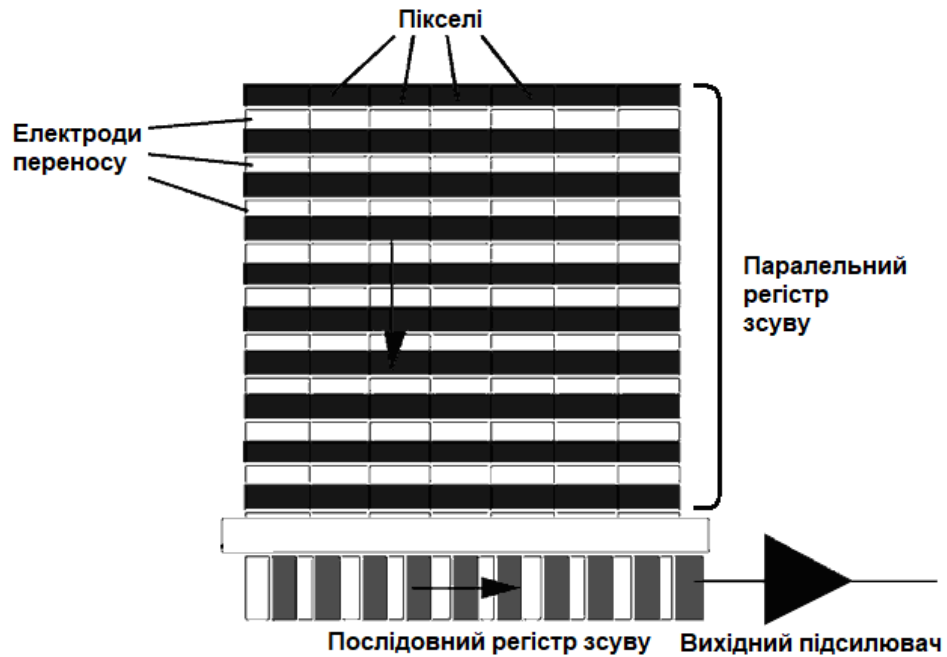


Рисунок 1.7 –Повнокадрова ПЗЗ матриця

Швидкість зчитування кадру у такій схемі обмежена швидкістю роботи як паралельного, і послідовного регістрів зсуву. Також очевидно, що щоб уникнути "змаза" необхідно перекривати світловий потік, що йде з об'єктива, до завершення процесу зчитування, тому інтервал між експонуванням також залежить від швидкості зчитування [12].

2. Матриці з буферизацією кадру: заряди паралельного регістру не надходять рядково на вхід послідовного, а накопичуються у буферному паралельному регістрі (рис. 1.8). Даний регістр розташований під основним паралельним регістром зсуву, фотоструми рядково переміщуються в буферний регістр і вже з нього надходять на вхід послідовного регістру

зсуву. Поверхня буферного регістру покрита непрозорою (частіше металевою) панеллю [12].



Рисунок 1.8 – ПЗЗ матриця з буферизацією кадру

Найбільш істотним недоліком матриць з буферизацією кадру є «маршрут» фотострумів, що подовжився, який негативно позначається на збереженні їх величин. Також помітно зростає вартість пристрою рахунок буферного регістру. [12]

3. Матриці з буферизацією стовпців: буферний паралельний регістр зсуву немає єдиним блоком під основним паралельним регістром, його стовпці «перетасовані» між стовпцями основного регістру (рис.1.9). В результаті поряд з кожним стовпцем основного регістру знаходиться стовпець буфера, а відразу ж після експонування фотоструми переміщуються не «згори вниз», а по горизонталі, і всього за один робочий цикл потрапляють у буферний регістр, повністю звільняючи потенційні ями для наступного експонування. [12]

Потрапили в буферний регістр заряди зазвичай зчитуються через послідовний регістр зсуву, тобто «згори донизу». Оскільки скидання

фотострумів у буферний регістр відбувається всього за один цикл, навіть за відсутності механічного затвора не спостерігається «змаза» заряду як у повнокадровій матриці.

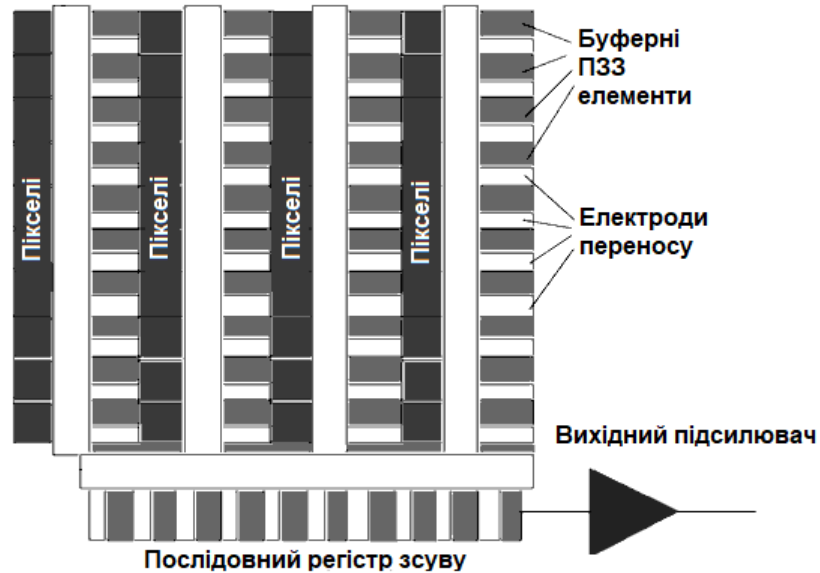


Рисунок 1.9 – ПЗС матриця з буферизацією стовпців

Час експонування для кожного кадру здебільшого за тривалістю відповідає інтервалу, що витрачається на повне зчитування буферного паралельного регістру. Завдяки цьому з'являється можливість створити відеосигнал з високою частотою кадрів – не менше 30 кадрів/с. [12]

4. Активно-піксельні матриці (КМОП): кожен із масиву пікселів має висновки на сітку металевих провідників, що дозволяє тактовим, зчитуючим та вихідним сигналам проходити по всіх осередках. Висновки даної сітки приєднані до зчитувальних та декодуючих елементів, які розташовуються поза масивом пікселів. Така архітектура дозволяє зчитувати дані з усього масиву пікселів, з деяких частин цього масиву та окремих пікселів з використанням простої XY адресації, що неможливо в ПЗС-матрицях. Структура КМОП-сенсора представлена рис.1.10. [12]

Таким чином, активний піксель є одиничний елемент твердотільної решітки, що має фотоелектричну функцію передавальної при дії світлового електромагнітного випромінювання.

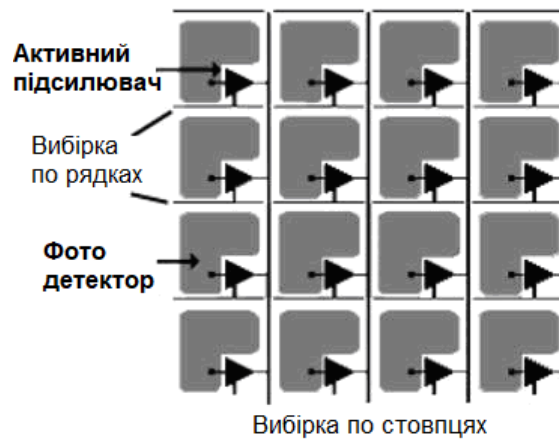


Рисунок 1.10 – КМОП матриця

При цьому у кожного пікселя з'являвся свій транзисторний підсилювач зчитування (readout amplifier transistor), що дозволяє "перетворювати" заряд на напругу безпосередньо на пікселі. Підсилюючі схеми можуть бути розташовані в будь-якому місці чіпа, а не тільки на світлочутливій області. Це дозволяє створювати кілька каскадів посилення по всьому сенсору. Так, наприклад, у темних умовах підсилювачі можуть «витягувати» зображення цілком, а в інших випадках можуть посилювати лише певні кольори або області зображення.

1.4 Характеристики матричних перетворювачів

1. Квантова ефективність – це відношення числа зареєстрованих зарядів до фотонів, що потрапили на світлочутливу область кристала. [12]

По квантовій ефективності твердотільні матричні перетворювачі не мають рівних. Для порівняння, з кожних 100 фотонів, що потрапляють у зіницю ока, тільки один сприймається сітківкою (квантовий вихід дорівнює 1%), найкращі фотоемульсії мають квантову ефективність 2-3%, електровакуумні прилади (ФЕУ) – до 20%, у ПЗЗ цей параметр може досягати 95% при типовому значенні від 4% (низькоякісні ПЗЗ) до 50% (типова відеокамера західного складання).

2. Спектральна характеристика – це залежність квантової ефективності від довжини хвилі світлового випромінювання, що реєструється. Приклад спектральних характеристик різних типів матриць показаний на рис.1.11. [12]

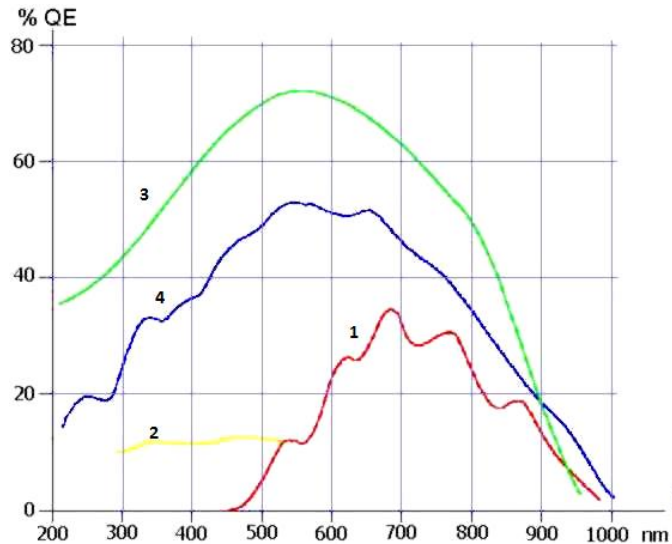


Рисунок 1.11 – Спектральні характеристики абсолютної квантової ефективності: 1 – звичайного ПЗЗ, 2 – ПЗЗ з люмінофорним покриттям, 3 – з освітленням з зворотного боку підкладки; 4 – з віртуальною фазою

Ширина діапазону довжин хвиль, на які реагує око, набагато вже, ніж у ПЗЗ. Також обмежений спектральний діапазон у фотокатодів традиційних вакуумних телекамер і фотоемулсій. ПЗЗ реагують на світло з довжиною хвиль від одиниць ангстрем (гама та рентгенівське випромінювання) до 1100 нм (ІЧ-випромінювання). [12]

Цей величезний діапазон набагато більший за спектральний діапазон будь-якого іншого детектора, відомого до теперішнього часу.

3. Чутливість – мінімальна освітленість об'єкта (або поверхні матриці), за якої забезпечується зйомка із заданим ставленням сигнал-шум. ($E_{\min} = 2 \dots 5$ Лк, с/ш = 20 ... 30 дБ).

Для збільшення чутливості використовують мікролінзи, щоб збільшити корисну площу світлочувливих елементів. Для підвищення чутливості

застосовують охолодження матриць (елементи з ефектом Пельтьє). При зменшенні температури на 6-70 теплові шуми зменшуються вдвічі.

Для усунення пікселів (hot pixels), що шумлять, з усіх кадрів віднімають маску, зроблену при закритому об'єктиві. [12]

Світлова характеристика - Залежність напруги сигналу від освітленості (рис.1.12). Показник нелінійності твердотільних матричних перетворювачів $\gamma = 1$ на робочій ділянці 1-2.

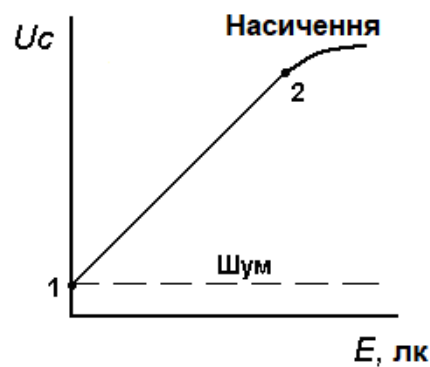


Рисунок 1.12 – Світлова характеристика світлочувливих матриць

Динамічний діапазон (ДД) – відношення максимальної та мінімальної освітленості на лінійній ділянці. Насичення (блюмінг) пов'язане з обмеженням розміру потенційної ями розміром комірки. Для збільшення ДД застосовують дренаж (відведення зайвих електронів на підкладку) – вертикальний та бічний (рис.1.13). [12]

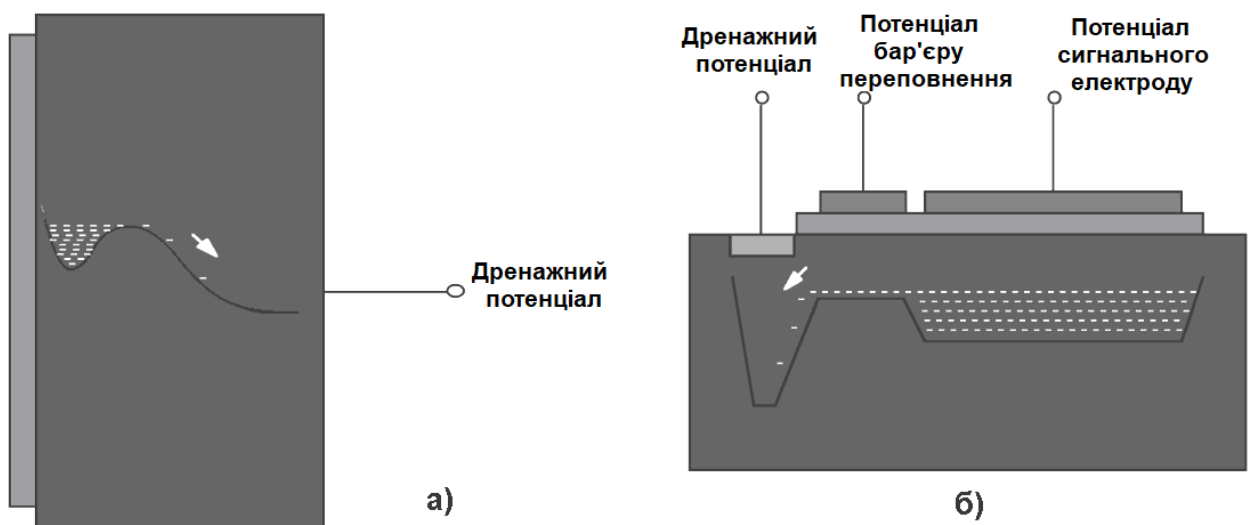


Рисунок 1.13 – Вертикальний (а) та бічний (б) дренаж електронів

1.5 Шуми матричних перетворювачів

Шумом називають будь-яке джерело невизначеності сигналу. Можна виділити такі типи шумів ПЗЗ.

1. Фотонний шум. Є наслідком дискретної природи світла. Будь-який дискретний процес підпорядковується закону (статистиці) Пуассона. Потік фотонів також дотримується цієї статистики. Відповідно до неї, якщо S – кількість фотонів, що падають на світлочутливу частину приймача за одиницю часу, фотонний шум дорівнює [12]

$$N = \sqrt{S}. \quad (1.5)$$

Таким чином, відношення сигнал/шум (S/N – signal-to-noise ratio) для вихідного сигналу дорівнює [12]

$$S/N = S/\sqrt{S} = \sqrt{S}. \quad (1.6)$$

2. Шум темного сигналу Якщо на вхід матриці не подавати світловий сигнал (наприклад, щільно закрити світлонепроникною кришкою об'єктив відеокамери), то на виході системи отримаємо так звані "темнові" кадри, інакше його називають шум-сніжок. Основною складовою темного сигналу є термоелектронна емісія. Чим нижча температура, тим нижчий і темновий сигнал. Термоелектронна емісія також підпорядковується статистиці Пуассона та її шум дорівнює $\sqrt{N_t}$, де N_t – середня кількість термічно згенерованих електронів у загальному сигналі. [12]

Если в відеокамерах ПЗС применяются без активного охлаждения, то темновой шум оказывается одним из основных источников шума.

3. Шум перенесення. Під час перенесення зарядового пакету по елементах ПЗЗ деяка частина електронів втрачається. Вона захоплюється на

дефектах та домішках, що існують у кристалі. Ця неефективність переносу випадковим чином змінюється як функція кількості зарядів (M), що переносяться, числа переносів (m) і неефективності окремого акту переносу (ε). Якщо припустити, що кожен пакет переноситься незалежно, то шум перенесення можна уявити наступним виразом [12]:

$$\sigma = \sqrt{2mM\varepsilon}. \quad (1.7)$$

Приклад: для неефективності перенесення 10^{-5} , 300 переносів і числа електронів в пакеті 10^5 шум перенесення складе 25 електронів.

4. Шум зчитування. Коли сигнал, накопичений в елементі ПЗЗ, виводиться з матриці, перетворюється на напругу та посилюється, у кожному елементі з'являється додатковий шум, що називається шумом зчитування. Шум зчитування можна представити як деякий базовий рівень шуму, який присутній навіть у зображенні з нульовим рівнем експозиції, коли матриця знаходиться в повній темряві і шум темного сигналу дорівнює нулю. Типовий шум зчитування для добрих зразків ПЗЗ становить 15...20 електронів. У найкращих зразках ПЗС, що виготовляються корпорацією Ford Aerospace за технологією Skipper, досягнуто шуму зчитування менше 1 електрона і неефективність перенесення становить 10^{-6} . [12]

5. Шум скидання або kTC -шум. Перед введенням у вузол сигнального заряду необхідно вивести попередній заряд. Для цього використовується транзистор скидання. Електричний рівень скидання залежить тільки від температури та ємності детектуючого вузла, що вносить шум [12]:

$$\sigma_r = \sqrt{kTC} / q. \quad (1.8)$$

де k – постійна Больцмана.

Для типового значення ємності рівної 0,1 пф при кімнатній температурі шум скидання складе близько 130 електронів. kTC -шум може бути повністю

пригнічений спеціальним методом обробки сигналу: подвійною корельованою вибіркою (ДКВ). Метод ДКВ ефективно усуває і низькочастотні сигнали, які зазвичай вносяться ланцюгами живлення.

Параметр, що описує відносну величину шуму, часто вимірюється в децибелах. При співвідношенні сигнал/шум [3,4]:

50 дБ і більше на моніторі буде видно чисту картинку без видимих ознак шуму,

40 дБ – іноді помітні миготливі точки,

30 дБ – "сніг" по всьому екрану,

20 дБ - зображення майже неприйнятно, хоча великі контрастні об'єкти через суцільну "снігову" пелену розглянути ще можна.

У даних, наведених в описах камер, вказуються значення сигнал/шум для оптимальних умов, наприклад, при освітленості на матриці 10 люкс і при вимкненому автоматичному регулюванні посилення та гамма-корекції. У міру зменшення освітленості сигнал стає меншим, а шум, внаслідок дії АРУ та гамма-корекції, більше.

1.6 Висновки по розділу 1

Параметри телевізійних систем загалом залежать від кожного вузла тракту передачі сигналу зображення. Але, як і в кожній радіоелектронній системі, найбільш відповідальною ланкою є початкове – матричний перетворювач світло-сигнал. Від світлочутливої матриці залежить рівень шуму, чутливість, динамічний діапазон, роздільна здатність камери.

Зазвичай до придушення шуму матричних перетворювачів світло-сигнал підходять, зазвичай вважаючи, що це гаусів білий шум. Аналіз деяких робіт дає підстави вважати, що це припущення неправильне і є значні складові шуму матриці, що відрізняються від нормального.

Метою кваліфікаційної роботи є виявлення та кількісна оцінка складових шуму, властивих виключно матричним перетворювачам, а також удосконалення методів шумоподавлення з урахуванням цих складових.

Завданнями роботи є: теоретичний аналіз та обґрунтування умов експерименту, експериментальне дослідження законів розподілу шуму фотокамер, їх просторового розподілу в кадрі, просторових спектрів шуму, залежності характеристик шуму від температури, виявлення особливостей, які можуть бути використані для вдосконалення алгоритмів шумозаглушення, розробка та дослідження удосконалених алгоритмів придушення шумів матриць.

Дана кваліфікаційна робота виконується на кафедрі Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем ХНУРЕ. На кафедрі ведуться наукові дослідження, які стосуються технічного зору роботів [19,20], а також виявлення і визначення координат БПЛА за результатами відео- [13-18] і акустичного [21-24] спостереження. Дослідження в даній кваліфікаційній роботі відповідають науковим дослідженням кафедри МІРЕС.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ШУМОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СВІТЛО-СИГНАЛ

2.1 Постановка задачі

Найважливішим параметром цифрових фото- та відеокамер, телескопів та інших пристроїв реєстрації зображень є їх чутливість. Чутливість – це мінімальна освітленість на об'єкті зйомки чи матриці, коли камера дає зображення з деяким пороговим ставленням сигнал-шум. Розмір цього порогового відношення залежить від призначення реєструючого пристрою. Так, наприклад, для камер відеоспостереження пороговим ставленням сигнал-шум вважають 20...24 дБ, для телевізійних камер – трохи більше – 30...34 дБ [3-5].

Шуми світлочутливих матриць обмежують чутливість камер. Знання статистичних характеристик шумів дозволяє вдосконалювати алгоритми обробки зображень з метою їхньої фільтрації або виявлення та розпізнавання об'єктів.

Цікавим є той факт, що у різних наукових працях різні автори не мають єдиної думки щодо закону розподілу шумів фотоелектричних перетворювачів. Найчастіше зустрічаються згадка двох законів розподілу шумів матричних перетворювачів [6-9, 25-27]:

- закону розподілу Пуассона;
- закону розподілу Гауса.

Причому вибір того чи іншого закону розподілу, найчастіше, автори роблять із міркувань спрощення подальших математичних викладок. У той самий час у науковому друку мало робіт із практичному дослідженню шумів матричних перетворювачів із точним і докладним описом умов натурального експерименту.

Завданням даного розділу є дослідження шумів матричних перетворювачів різних камер за різних вихідних умов з метою виявлення

загальних закономірностей, а також відмінностей у шумових характеристиках матриць.

2.2 Теоретичний аналіз шумових характеристик фоточутливих матриць

Як показано в роботах [3–8] відношення сигналу до шуму в телевізійному датчику на ПЗЗ за відсутності фонового засвічення доцільно оцінювати за формулою

$$q = \frac{N_c}{\sqrt{N_{\text{фш}}^2 + N_{\text{ПЗЗ}}^2}}, \quad (2.1)$$

де N_c – число сигнальних фотоелектронів, які відповідають корисному сигналу;

$N_{\text{ПЗЗ}}$ – середньоквадратичне відхилення шуму ПЗЗ-матриці (власні шуми ПЗЗ-сенсора та відеотракту);

$N_{\text{фш}}$ – СКВ фотонного шуму потоку випромінювання зображення об'єкта.

Фотонний шум підпорядковується закону Пуассона, відповідно до якого він приймається рівним квадратного кореня від кількості сигнальних фотоелектронів, тобто

$$N_{\text{фш}} = \sqrt{N_c}, \quad (2.2)$$

Власні шуми ПЗЗ-сенсора обумовлені багатьма факторами:

- тепловими шумами у напівпровіднику,
- шумами перенесення зарядів,
- шумами вихідного пристрою перетворювача заряду в напругу на виході ПЗЗ та ін.

Оскільки перелічені фактори є випадковими та незалежними один від одного, то при визначенні шумів ПЗЗ слід підсумовувати їх дисперсії:

$$N_{ПЗЗ} = \sqrt{N_{тш}^2 + N_{ш.пер}^2 + N_{ш.вих}^2}, \quad (2.3)$$

де $N_{тш}$ – кількість шумових фотоелектронів, обумовлених тепловими шумами у напівпровіднику;

$N_{ш.пер}$ – кількість шумових фотоелектронів, обумовлених шумами перенесення зарядів;

$N_{ш.вих}$ – кількість шумових фотоелектронів, обумовлених шумами вихідного пристрою.

Велика кількість незалежних факторів, що впливають на шуми ПЗЗ, призводить багатьох авторів до висновку, що результуючий закон розподілу ймовірності є нормальним (центральна гранична теорема).

Проте, центральна гранична теорема теорії ймовірностей правильна у разі, коли сума досить великої кількості слабо залежних випадкових величин мають приблизно однакові масштаби, тобто. жоден із доданків не домінує, не вносить у суму визначального вкладу.

Розглянемо докладніше складові шумів ПЗЗ-матриць і числові межі, у яких можуть перебувати.

Тепловий шум – це результат спонтанної генерації електронно-діркових пар. Теоретична величина теплового шуму для кремнію (якщо брати до уваги лише пряму генерацію через заборонену зону) вкрай мала, і насправді тепловий шум у ПЗЗ (як і зворотні струми у звичайних кремнієвих приладах) визначається двостадійною генерацією через проміжні енергетичні рівні в забороненій зоні [11].

Чим менша концентрація цих рівнів, тим менший тепловий шум. Це визначається якістю вихідного кремнію, чистотою реактивів та ступенем досконалості технології.

В даний час типові значення теплового шуму для кращих західних ПЗЗ становлять при кімнатній температурі кілька сотень електронів на комірку за секунду [11].

І якщо для мовного та побутового ТБ (час накопичення 20 мс або 40 мс) такий тепловий шум непомітний, то для наукових застосувань, де реєструються потоки в десяток фотонів на елемент, навіть такий низький тепловий шум неприйнятний [11].

Як і будь-який термодинамічний процес, тепловий шум залежить від абсолютної температури. Вважають, що при зменшенні температури на кожні 7-8 градусів він зменшується вдвічі [11].

Для глибокого охолодження (в астрономічних системах) використовують азотні кріостати, де матриці охолоджуються до -100°C .

Для більш простих систем застосовується термоелектронне охолодження з використанням батарей Пельтьє, які здатні забезпечити перепад 70°C при подачі напруги 5-6 В, так що температура кристала при кімнатній зовнішній виявляється близько -40°C . Тепловий шум при цьому зменшується до ~ 1 електрона на комірку за секунду [11].

Шум перенесення. Під час перенесення зарядового пакета за елементами ПЗЗ деяка частина електронів втрачається. Вона захоплюється на дефектах та домішках, що існують у кристалі.

Якщо припустити, що кожен пакет переноситься незалежно, то шум перенесення можна представити наступним виразом [11]:

$$N_{ш.пер} = \sqrt{2mN_c\varepsilon}. \quad (2.4)$$

де N_c – кількість зарядів, що переносяться;

m – кількість переносів;

ε – неефективність одного переносу.

З виразу (2.4) випливає, що відношення сигнал – шум перенесення визначається як

$$N_c / N_{ш.пер} = \sqrt{N_c / 2m \cdot \varepsilon} . \quad (2.5)$$

На рис.2.1 показані графіки залежності відношення сигнал – шум перенесення від числа переносів при різних поєднаннях величин N_c і ε .

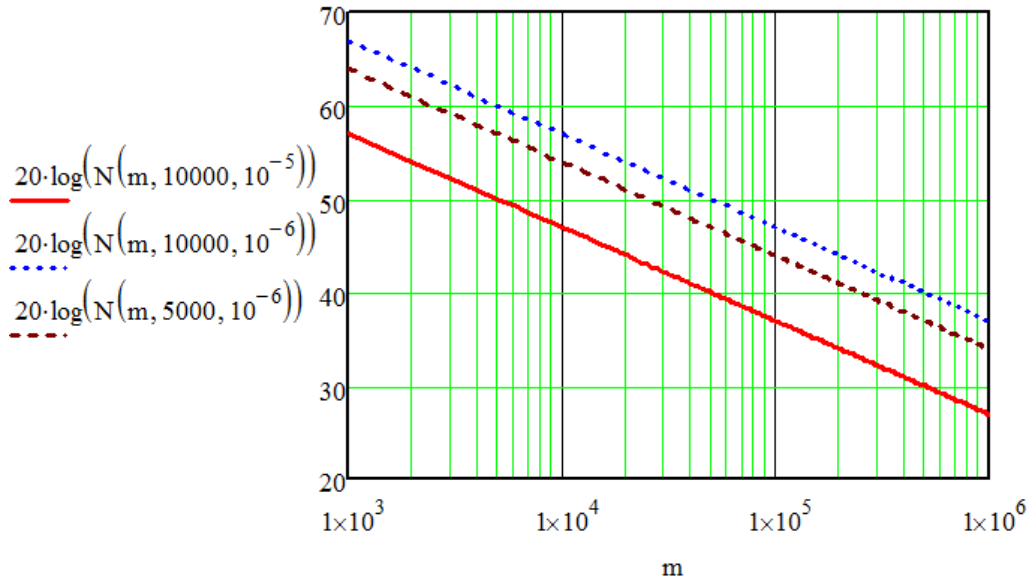


Рисунок 2.1 – Графіки залежності відношення сигнал – шум перенесення від числа переносів при різних поєднаннях величин N_c і ε

Як видно із рис. 2.1, відношення сигнал – шум перенесення може змінюватися у великих межах. При великій кількості переносів у матрицях з великою роздільною здатністю і великою неефективністю одного переносу цей шум може бути порівняним або навіть переважати над іншими складовими шуму.

Шуми вихідного пристрою складаються з шумів зчитування заряду (т.зв. шуми скидання) та шумів відеопідсилювача. Шум скидання може бути повністю пригнічений спеціальним методом обробки сигналу: подвійною корельованою вибіркою (ДКВ). Метод ДКВ ефективно усуває і низькочастотні сигнали, які зазвичай вносяться ланцюгами живлення.

Шум вхідного підсилювача залежить від налаштувань чутливості камери. У професійних камерах шуми підсилювача за мінімального значення ISO100 еквівалентні шумових електронів. Максимальна чутливість у

напівпрофесійних камер може досягати ISO3200, а у професійних – ISO36000 [27]. Пропорційно зростають і шуми підсилювача.

Таким чином, у реальних фото- та відеопристроях шумові характеристики матричних перетворювачів визначаються складним поєднанням декількох факторів, кожен з яких, за певних умов, може превалювати над іншими. Це потребує додаткових досліджень із проведенням натурного експерименту.

2.3 Експериментальне дослідження законів розподілу шуму фото- та відеокамер

Дослідження шумових характеристик проводилося для двох фотокамер:

- Olympus SP-600UZ (ПЗЗ-сенсор з діагоналлю (1/2,33)", 12 млн. ефективних пікселів, максимальна чутливість ISO1600);
- Камера смартфона Xiaomi Redmi 8 (КМОП-сенсор з діагоналлю (1/2,8)", 12 млн. ефективних пікселів, максимальна чутливість ISO800).

Порівняльні випробування проводились у максимально наближених умовах.

1) Для зменшення впливу шумів вхідного пристрою чутливість встановлювалася на мінімальне значення ISO100.

2) Темнові кадри робилися при закритому об'єктиві. Щоб уникнути засвіток від світла, що проникає в щілини корпусу камер, зйомка проводилася в темній кімнаті, LCD-екран фотокамери вимикався, яскравість підсвічування смартфона встановлювалася на мінімум.

3) Кадри робилися одночасно і при однаковій температурі.

4) Режими додаткової обробки зображень були вимкнені.

На першому етапі отримано по 50 темнових кадрів кожної камери при температурі 24°C. На рис.2.2 показаний приклад гістограм сигналів

яскравості (Luminance) та основних кольорів RGB для темного кадру фотокамери Olympus SP-600UZ.

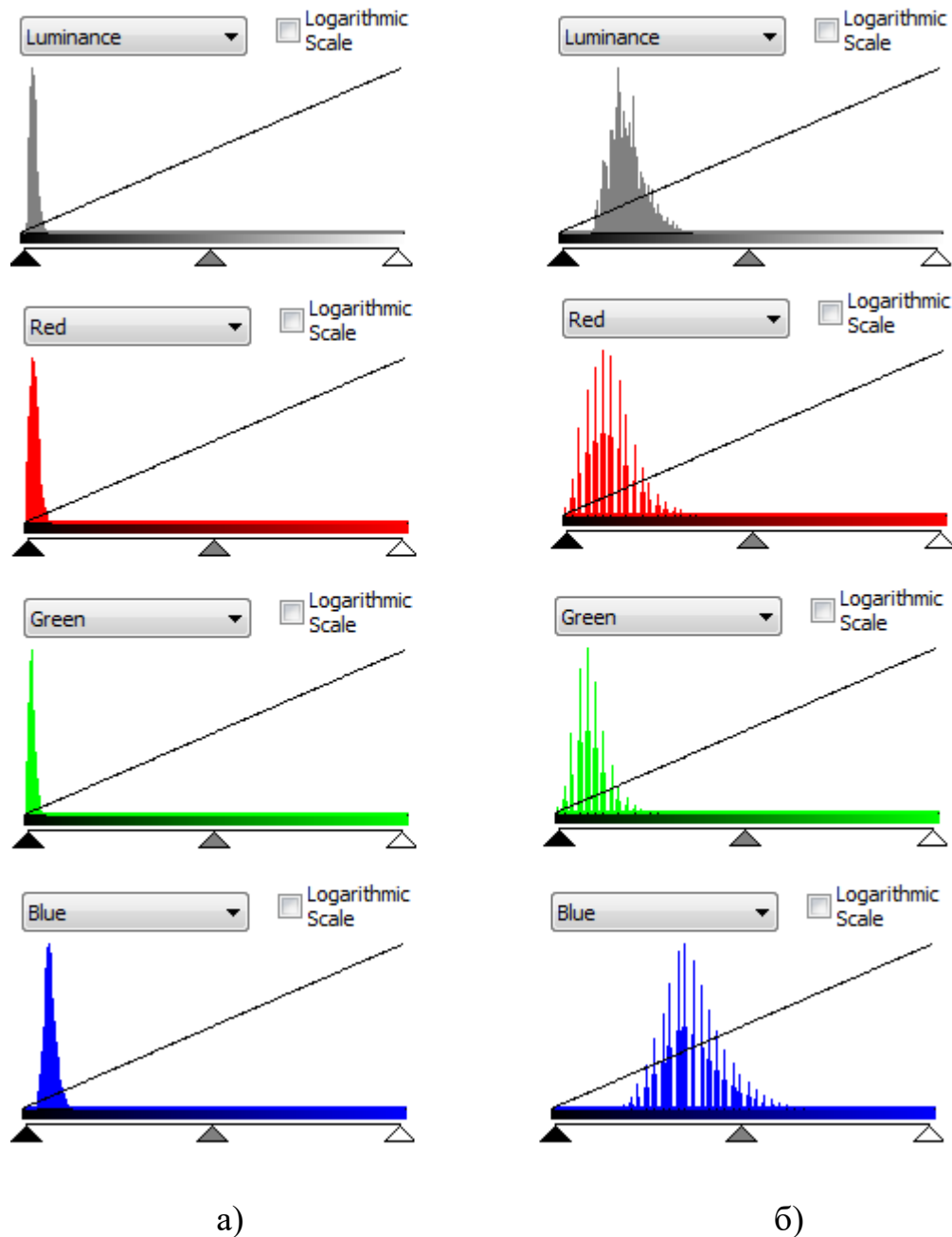


Рисунок 2.2 – Гістограми сигналів яскравості (Luminance) та основних кольорів RGB для темного кадру фотокамери Olympus SP-600UZ до корекції контрастності (а) та після корекції (б)

Оскільки всі шуми зосереджені на малих рівнях, для зручності візуального аналізу було збільшено контрастність зображення у 10 разів в усіх каналах.

На рис.2.3 та рис 2.4 показані приклади темнових кадрів камер Olympus SP-600UZ та Xiaomi Redmi 8 зі збільшеною контрастністю.



Рисунок 2.3 – Темновий кадр камери Olympus SP-600UZ

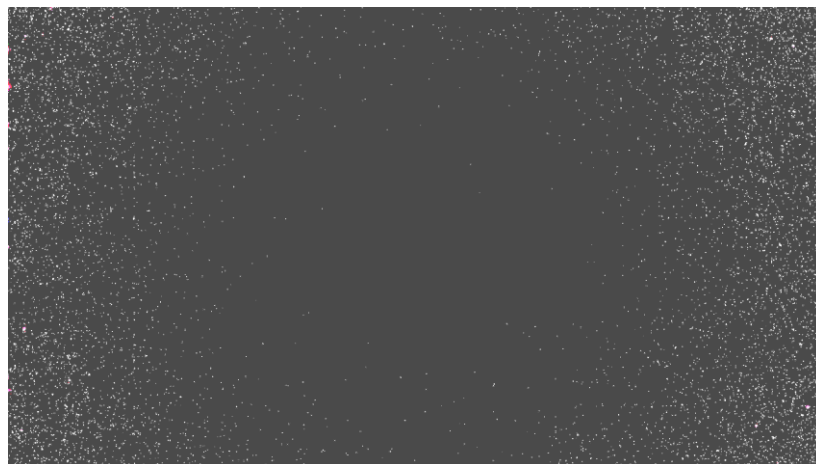


Рисунок 2.4 – Темновий кадр камери Xiaomi Redmi 8

Аналізуючи гістограми шумів на рис.2.2, можна назвати такі особливості.

1) Гістограми шумів асиметричні, отже, шуми матриць розподілені за нормальним законом.

2) Шуми у каналах основних кольорів RGB мають різні статистичні характеристики. Оскільки пікселі цих каналів ідентичні, а розрізнення кольору відбувається завдяки нанесенню кольорових світлофільтрів на пікселі, таку відмінність можна пояснити роботою системи балансу білого в камері.

3) При збільшенні розмаїття гістограма стає (порізаною). Тобто. для детальнішого дослідження статистики потрібно усереднення за деякою кількістю темнових кадрів.

Аналізуючи темнові кадри на рис.2.3, рис.2.4, можна назвати такі особливості.

1) Шуми матриць розподілені по кадру нерівномірно. Більший шум посідає краї кадру, менший – центр кадру. Очевидно, це можна пояснити технологічними особливостями виробництва матриць.

2) У камері Olympus SP-600UZ переважають кольорові шуми, у камері Xiaomi Redmi 8 – чорно-білі шуми. Це можна пояснити більш ефективною роботою системи шумоподавлення в каналі кольорових сигналів, на що звертають особливу увагу розробники мобільних телефонів.

Для дослідження законів розподілу ймовірності одержано гістограми розподілу шумів у каналі яскравості. Дослідження проведено у середовищі MATLAB, тексти програм наведено у додатку А.

На рис. 2.5 показані гістограми розподілу шуму камери Olympus SP-600UZ, а на рис.2.6 – гістограми розподілу шуму камери смартфона Xiaomi Redmi 8. Гістограми отримані по 50 темнових кадрів, отриманих за температури 24°C.

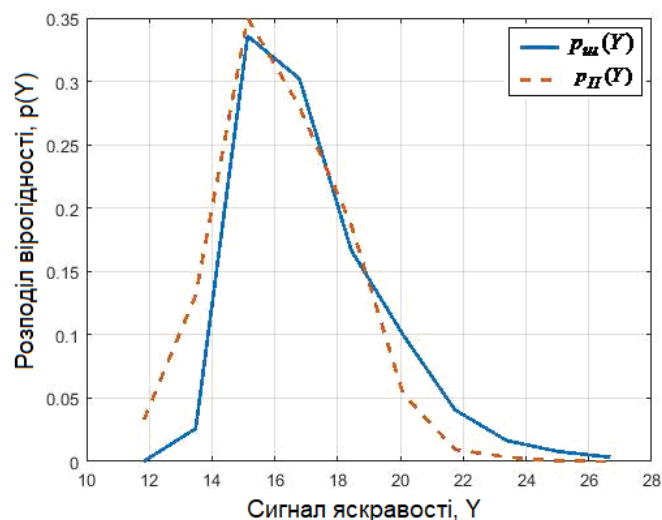


Рисунок 2.5 – Гістограми розподілу шуму у каналі яскравості камери Olympus SP-600UZ

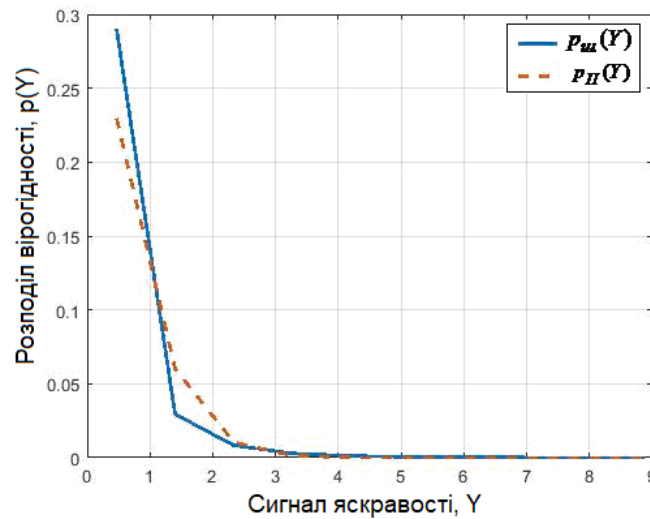


Рисунок 2.6 – Гістограми розподілу шуму у каналі яскравості камери Xiaomi Redmi 8

Сигнал яскравості в обох камерах представлений з розрядністю 8 біт, максимальне значення, що відповідає рівню білого

$$Y_{\max} = 2^8 - 1 = 255.$$

Пунктирною лінією на рис.2.5, рис.2.6 показані функції розподілу ймовірності Пуассону $p_{II}(Y)$, якими можна апроксимувати дані розподілу шуму. Функція ймовірності розподілу Пуассону описується виразом:

$$p_{II}(Y) = \frac{e^{-\lambda} \cdot \lambda^Y}{Y!}, \quad (2.6)$$

де Y – значення шуму у каналі яскравості;

λ – математичне сподівання.

Для гістограми розподілу шуму в каналі яскравості камери Olympus SP-600UZ (рис.2.4) оцінене значення математичного очікування $\lambda = 4$ для Xiaomi Redmi 8 – $\lambda = 1$. Крім того, можна відзначити, що у всіх темнових знімках камери Olympus SP-600UZ є постійна добавка – темновий струм з рівнем близько 10...12 одиниць. Таким чином, виходячи з гістограм, можна

стверджувати, що в камері Olympus SP-600UZ не здійснюється компенсація середнього темного струму.

Візуально закон розподілу шуму $p_{ш}(Y)$ добре узгоджується із законом розподілу Пуассона, графіки якого зображені на рис. 2.4 – рис.2.5 пунктирною лінією. Найбільш поширеним чисельним критерієм згоди законів розподілу є критерій хі-квадрат (Пірсона) [29], при якому за відносний захід розходження теоретичного p_k та експериментального v_k розподілів приймають величину

$$\chi^2 = m_1 \sum_{k=1}^i \frac{(p_{yrk} - p_k)^2}{p_k}, \quad (2.7)$$

де i – кількість інтервалів угруповання результатів спостережень (у нашому випадку обрано $i = 20$);

m_1 – обсяг вибірки.

Гіпотеза, що експериментальний та теоретичний закони розподілу не узгоджуються, вірна з ймовірністю

$$P_{\chi^2} = \int_{\chi^2}^{\infty} p_{\chi^2}(x) dx, \quad (2.8)$$

де $p_{\chi^2}(x) = \frac{1}{2\Gamma(i/2)} \cdot (x/2)^{(i/2)-1} \exp(-x/2)$ – закон розподілу

ймовірності хі-квадрат.

Чисельні оцінки свідчать, що у вибірках обсягом понад 15 кадрів (по 12 Мпікс.) величина $P(\chi^2) \approx 10\%$ і не зменшується із збільшенням обсягу вибірки. Це говорить про задовільне узгодження закону розподілу шуму із законом розподілу Пуассона.

2.4 Експериментальне дослідження просторових характеристик шумів матриць

Для дослідження просторових характеристик шумів матриць на першому етапі проведено усереднення темнових кадрів на вибірку об'ємом 50 штук. Отримано гістограми розподілу шуму для усереднених темнових кадрів. На рис.2.7 (а) показана гістограма розподілу шуму для усередненого темного кадру камери Olympus SP-600UZ, на рис.2.6(б) – для усередненого темного кадру камери Xiaomi Redmi 8.

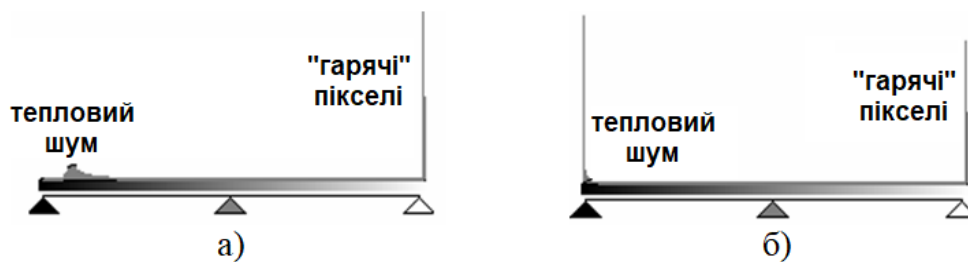


Рисунок 2.7 – Гістограми розподілу шуму для усередненого темного кадру камери Olympus SP-600UZ (а) та камери Xiaomi Redmi 8 (б)

Як випливає з рис.2.7, гістограми усереднених кадрів роздвоюються: вони з'являється пік праворуч лише на рівні білого. Появу цього піку можна пояснити наявністю у матриці т.зв. "гарячих" пікселів (hot pixels).

У кожній матриці присутні пікселі, у яких рівні темнового струму, так і теплового шуму помітно більше, ніж у сусідніх пікселях. Це призводить до появи кожної матриці властивого тільки їй шуму фіксованого розподілу (fixed pattern noise). Цей шум проявляється у вигляді розкиданих по всьому кадру пікселів стороннього кольору, яскравість яких пов'язана з витримкою. Чим довше триває експонування, тим різкіше виділяються на знімку крапки з паразитними зарядами. Найбільш помітні пікселі називаються гарячими (hot pixels).

Оскільки від кадру до кадру «гарячі» пікселі не змінюють своє розташування, то гістограмах усереднених кадрів (рис.2.8) і самих усереднених кадрах (рис.2.9) вони стають помітними.

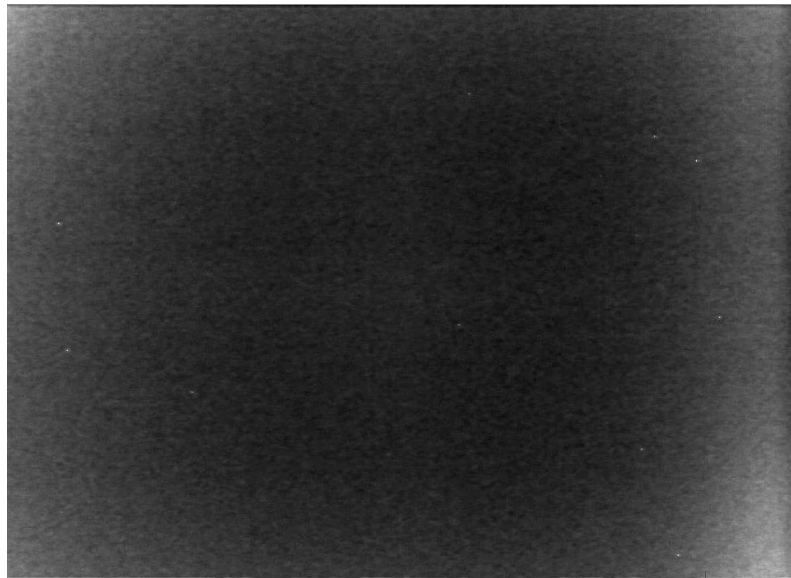


Рисунок 2.8 – Середній темновий кадр матриці та фіксований розподіл шуму (білі точки) камери Olympus SP-600UZ



Рисунок 2.9 – Середній темновий кадр матриці та фіксований розподіл шуму (білі точки) камери Xiaomi Redmi 8

З аналізу усереднених темнових кадрів на рис.2.8, рис.2.9, можна назвати нерівномірний розподіл шумів по кадру. Досліджуємо просторові діапазони шумів матриць.

Просторовий спектр шуму матриці виходив шляхом двовимірного перетворення Фур'є від темного кадру:

$$S_L(k_x, k_y) = \frac{1}{XY} \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} L(x, y) \exp[-j(2\pi/X)xk_x - j(2\pi/Y)yk_y], \quad (2.9)$$

де $L(x, y)$ – відліки сигналу яскравості темного кадру,

x, y – просторові координати,

X, Y – розміри кадру в пікселях,

$k_x = 0, 1, \dots, X - 1, k_y = 0, 1, \dots, Y - 1$ – просторові частоти по координатним

осям x, y .

На рис. 2.10 у напівтоновому вигляді показаний двовимірний спектр усередненого темного кадру камери Olympus SP-600UZ на рис. 2.11 – двовимірний спектр усередненого темного кадру камери Xiaomi Redmi 8. Для покращення сприйняття півтонів спектри показані в логарифмічному масштабі, як $\lg[S_L(k_x, k_y)]$.

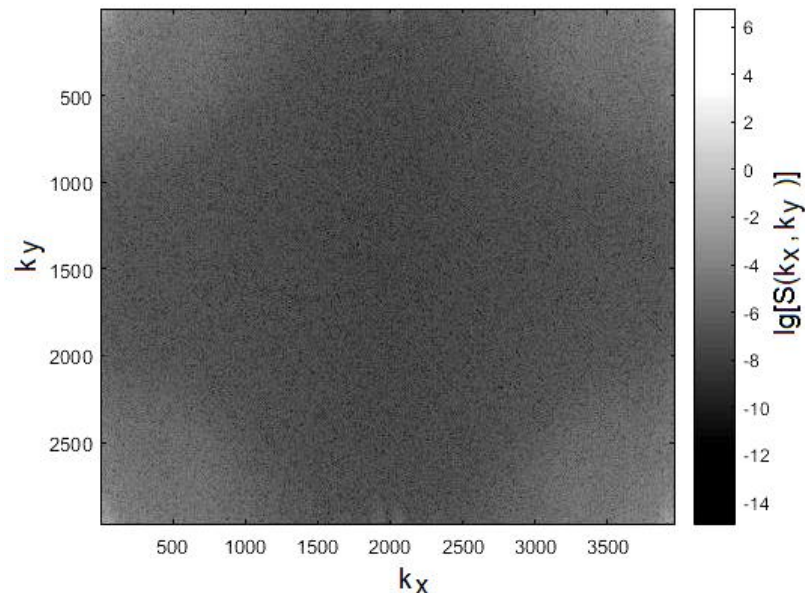


Рисунок 2.10 – Двовимірний спектр усередненого темного кадру камери Olympus SP-600UZ

Аналізуючи просторові спектри шуму камер, показані на рис. 2.10, рис.2.11, можна назвати таке.

Спектр шуму обох камер нерівномірний. Найбільша інтенсивність шуму спостерігається області низьких просторових частот, тобто. на великих деталях. Таким чином, шум камер не є білим, як це стверджується у багатьох джерелах [3-10].

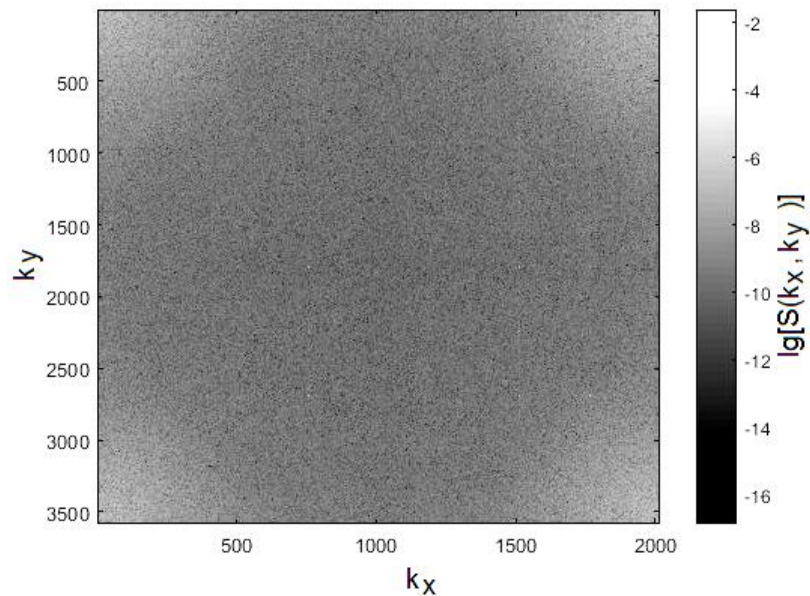


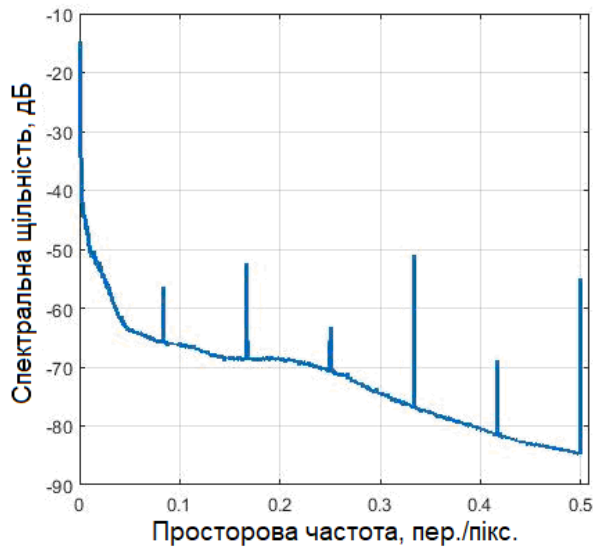
Рисунок 2.11 – Двовимірний спектр усередненого темного кадру камери Xiaomi Redmi 8

Причому інтенсивність шуму на низьких та верхніх частотах відрізняється більш ніж 10 порядків. Відомо [3-5], що крупноструктурні шуми помітніші людському зору, ніж дрібноструктурні. Тому завдання фільтрації низькочастотних шумів матриці є особливо актуальним. Для більш детального аналізу отримані перерізи двовимірного спектру шуму при $k_x = 0$ (рис.2.10, а, рис. 2.11, а) і при $k_y = 0$ (рис.2.10, б, рис. 2.11, б).

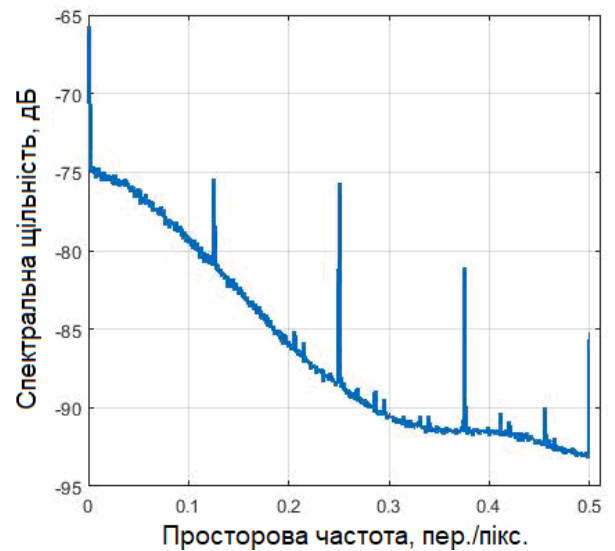
Осі просторових частот проградуїровані у частках частоти дискретизації k_x/X і k_y/Y від постійної складової 0 до половини частоти дискретизації 0,5, що відповідає граничному значенню теореми Котельникова. Вісь ординат проградуїрована в дБ, як

$$20 \lg [S_L(k_x, k_y) / XY].$$

При аналізі перерізів просторових спектрів шуму камер показаних на рис. 2.12, рис.2.13, було відзначено цікава особливість. У діапазоні шуму є гармоніки, розташовані вздовж частотних осей k_x, k_y зі строго незмінним кроком.

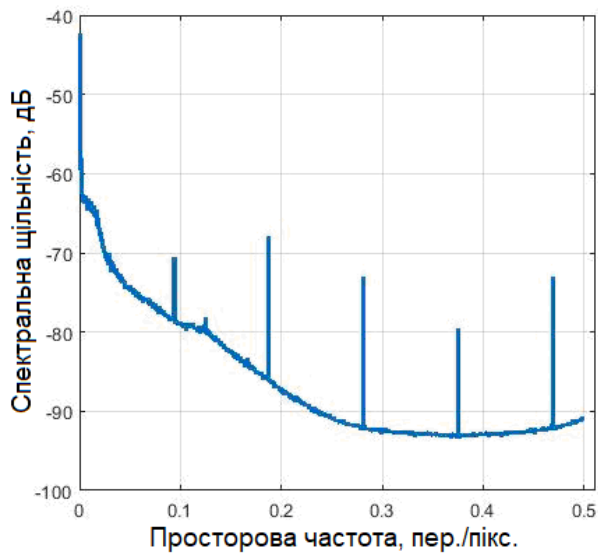


а)

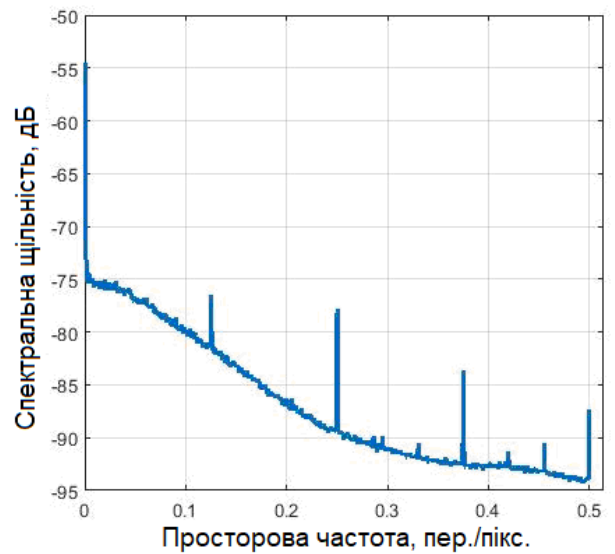


б)

Рисунок 2.12 – Переріз просторового спектру усередині темного кадру камери Olympus SP-600UZ при $k_x = 0$ (а) і $k_y = 0$ (б)



а)



б)

Рисунок 2.13 – Переріз просторового спектру усередині темного кадру камери Xiaomi Redmi 8 при $k_x = 0$ (а) і $k_y = 0$ (б)

Крок цих гармонік як вздовж осі k_x так і вздовж осі k_y різний і взагалі не збігається у різних камер. Очевидно, наявність цих гармонік можна пояснити просочуванням сигналів синхронізації і тактування матриць в кола сигналів зображення.

У зв'язку з виявленими особливостями можна запропонувати для шумоподавлення в камерах метод спектрального віднімання, добре відомий і широко застосовується для звукових сигналів. Пригнічення структурного шуму методом спектрального віднімання досліджено у розділі 3.

Цей спосіб має на увазі стаціонарність шуму матриці. Стаціонарність означає, що властивості шуму (потужність, спектральний склад) змінюються у часі, тобто. від кадру до кадру. Нестационарність шуму камери може виявлятися за умов зміни температурних умов, унаслідок чого змінюються характеристики теплових шумів. Для врахування цього фактора було досліджено шумові характеристики камер за різної температури.

2.5 Дослідження залежності шумових характеристик камер за різної температури

Було досліджено закони розподілу шуму камер Olympus SP-600UZ та Xiaomi Redmi 8 залежно від температури. Дослідження були проведені за трьох значень температури: 4°C, 24°C, 44°C. Температура 24°C відповідала кімнатній, 44°C – отримана в електричній духовці з термостатом, 4°C – в основній камері холодильника.

Контроль температури проводився окремим побутовим термометром, тривалість нагрівання або остигання камер дорівнювала одній годині для виходу всіх вузлів, включаючи матриці, на заданий температурний режим.

На рис. 2.12 показані гістограми розподілу шуму у каналі яскравості камери Olympus SP-600UZ, а на рис. 2.13 – камери Xiaomi Redmi 8 при трьох значеннях температури: 4°C, 24°C, 44°C.

Як впливає з експериментально отриманих гістограм, представлених на рис.2.14 та рис.2.15, зі зміною температури матриць закон розподілу залишається тим самим – законом Пуассона. Зі збільшенням температури матриць збільшується середнє значення темного струму та його дисперсія.

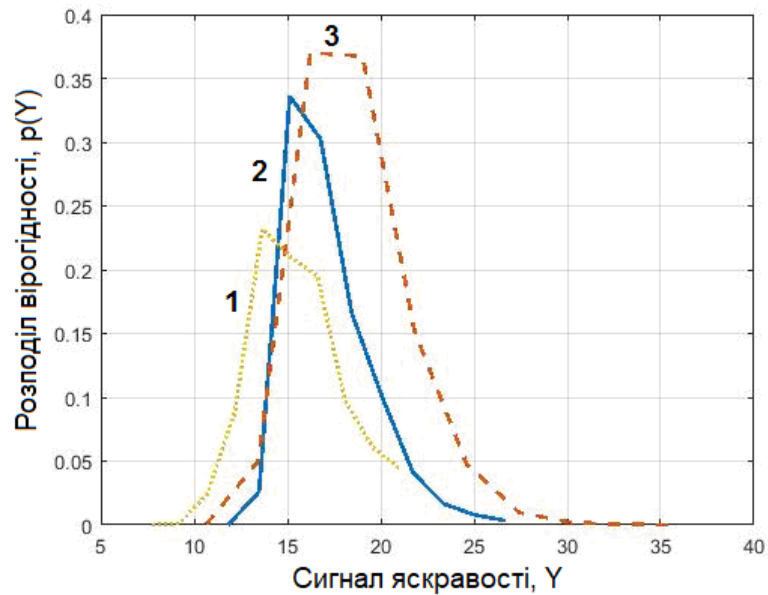


Рисунок 2.14 – Гістограми розподілу шуму в каналі яскравості камери Olympus SP-600UZ при трьох значеннях температури: 4°C (1), 24°C (2), 44°C (3)

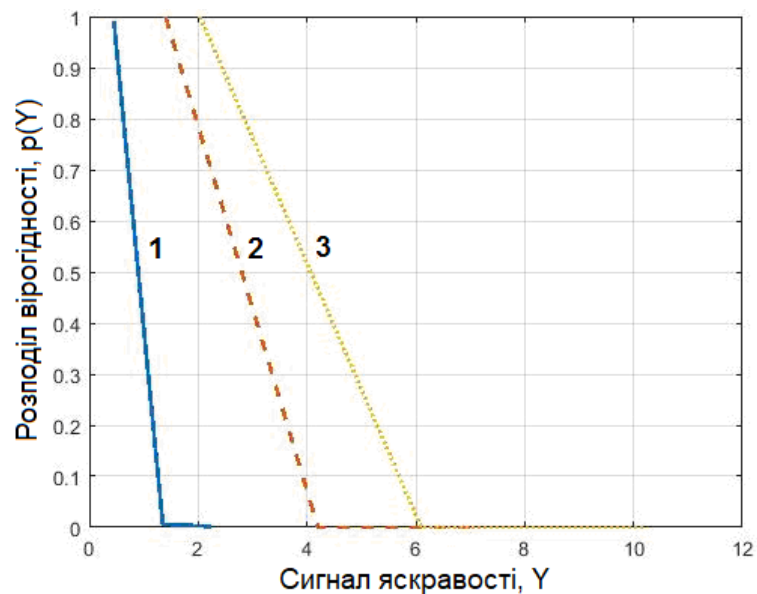


Рисунок 2.15 – Гістограми розподілу шуму в каналі яскравості камери Xiaomi Redmi 8 при трьох значеннях температури: 4°C (1), 24°C (2), 44°C (3)

На рис. 2.16 та 2.17 показані графіки залежності середнього значення темного сигналу (а) та середньоквадратичного відхилення шуму (б) від температури для камер Olympus SP-600UZ та Xiaomi Redmi 8.

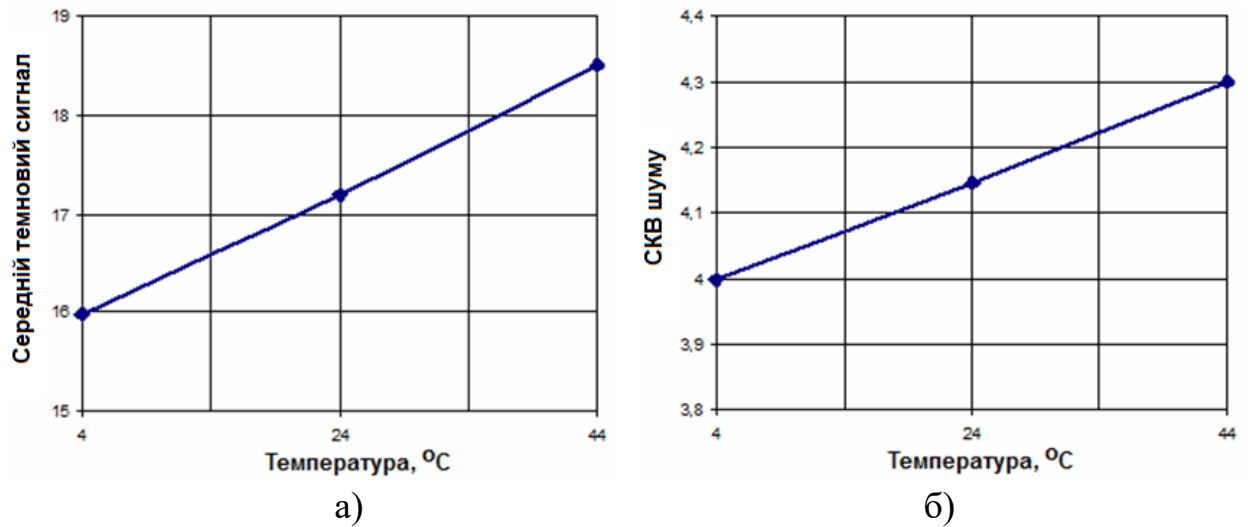


Рисунок 2.16 – Графіки залежності середнього значення темного сигналу (а) та середньоквадратичного відхилення шуму (б) від температури для камери Olympus SP-600UZ

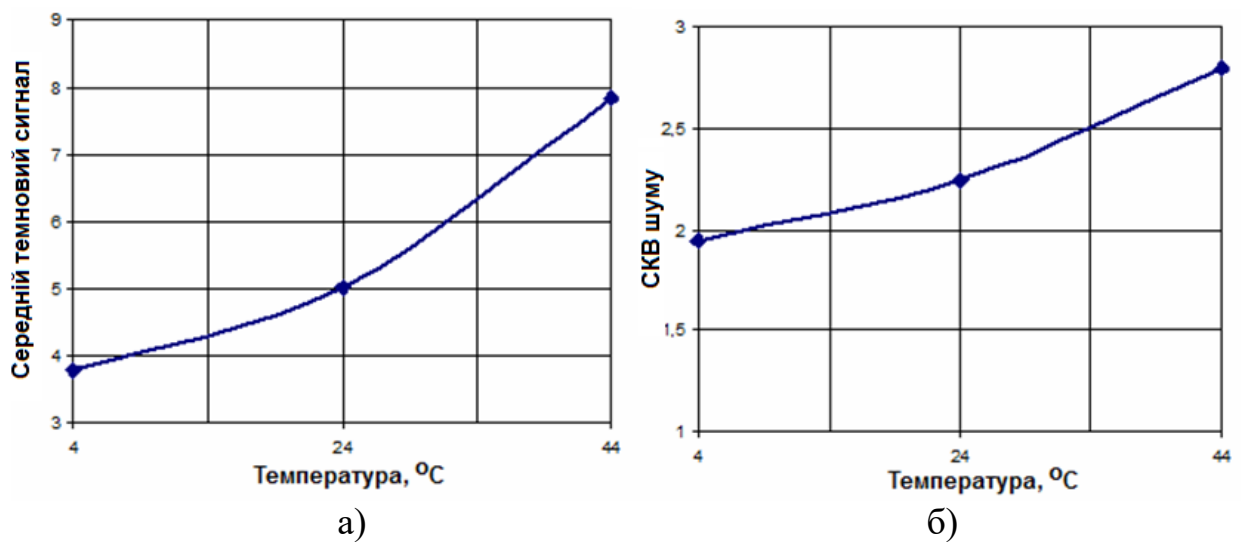


Рисунок 2.17 – Графіки залежності середнього значення темного сигналу (а) та середньоквадратичного відхилення шуму (б) від температури для камери Xiaomi Redmi 8

2.6 Висновки по розділу 2

Аналізуючи графіки, представлені на рис.2.16, рис.2.17, можна назвати таке.

1) Теплові шуми камери змінюються з температурою лінійно або приблизно лінійно.

2) Зростання теплових шумів для кожної камери індивідуальне. Так середньоквадратичне відхилення шуму камери Olympus SP-600UZ має швидкість зміни приблизно $0,1/10^{\circ}\text{C}$, то для камери Xiaomi Redmi 8 близько $0,3/10^{\circ}\text{C}$.

3) Середньоквадратичне відхилення шуму приблизно дорівнює кореню квадратному із середнього значення темного сигналу, що підтверджує висновок про статистику розподілу шуму за законом Пуассона.

Отже, завдання, поставлені у розділі 2, вважатимемо виконаними.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПОДАВЛЕННЯ ШУМУ МАТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СВІТЛО-СИГНАЛ

3.1 Подавлення теплового шуму

Тепловий шум пов'язаний із нагріванням сенсора. Найчастіше виявляється при тривалій відеозйомці, коли сенсор нагрівається, а також на довгих витримках при фотозйомці. Особливо виявляються «гарячі» пікселі, які у звичайних умовах не видно.

Традиційно середнє значення теплового шуму подавлюють з використанням затемнених рядків і стовпців, якими обчислюють середній темновий сигнал \bar{s}_m і віднімають його з усіх пікселів кадру:

$$s_1(x, y) = s(x, y) - \bar{s}_m. \quad (3.1)$$

Якщо $s_1(x, y) < 0$, то значення, що вийшло, прирівнюють до нуля. Робота фільтра, що описується виразом (3.1), продемонстрована на рис. 3.1.

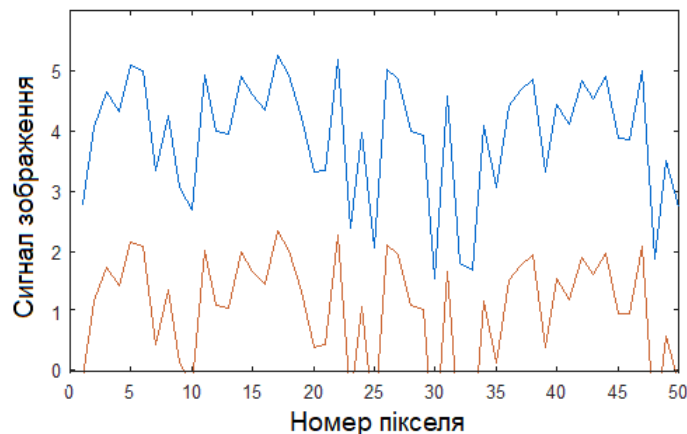


Рисунок 3.1 – Приклад роботи фільтра подавлення теплового шуму за середнім темновим сигналом

Дія такого шумоподавлювача помітна на темних кадрах камери смартфона Xiaomi Redmi 8 (рис.3.2).

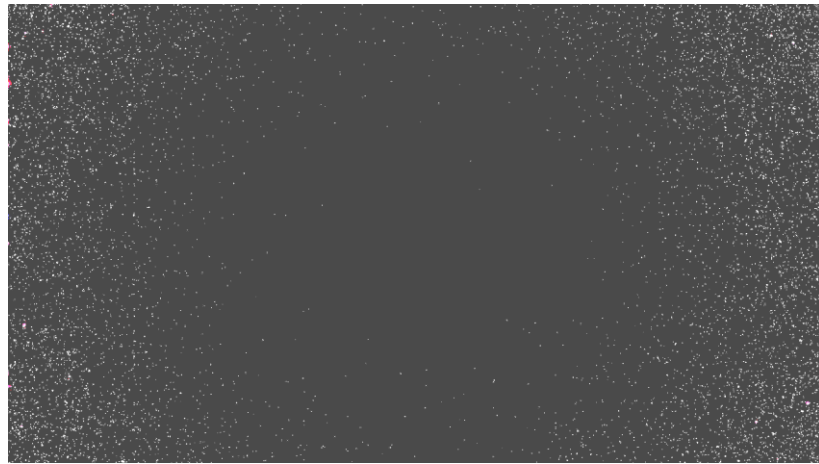


Рисунок 3.2 – Темновий кадр камери Xiaomi Redmi 8

Привертають увагу чорні області між шумними точками, що з обнуленням тих пікселів, де після віднімання середнього вийшли значення менше нуля.

У розділі 2 виявлено, що розподіл теплового шуму по матриці є нерівномірним. Очевидно, це можна пов'язати з нагріванням підсилювача сигналу матриці чи іншого електронного обв'язування. Цей ефект видно як світіння у певній частині кадру, зазвичай, на краях (рис.3.3 – рис.3.4).

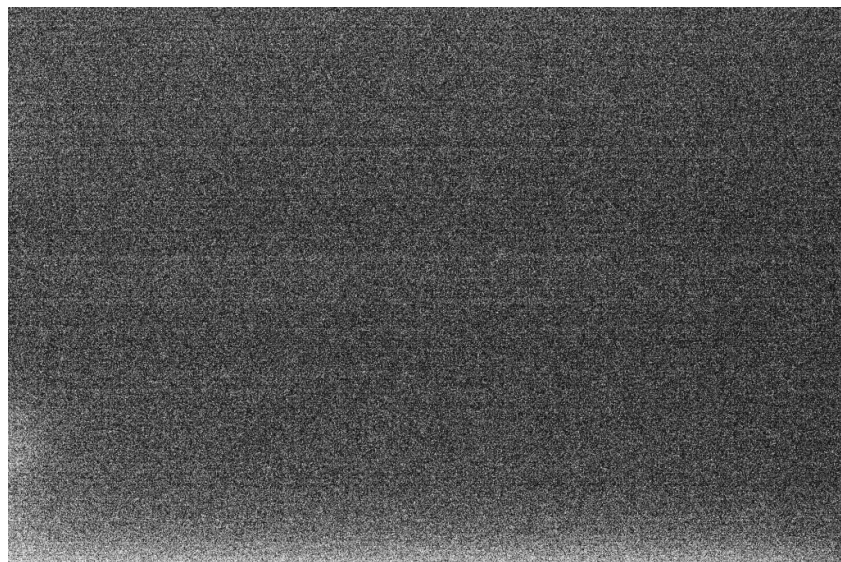


Рисунок 3.3 – Темновий кадр камери Nikon D800
(світіння в нижній частині кадру)

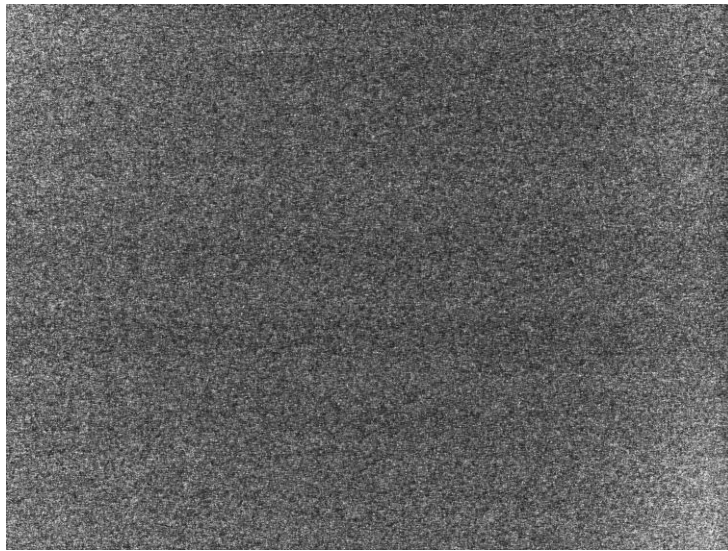


Рисунок 3.4 – Темновий кадр камери Olympus SP-600UZ
(світіння в лівій та правій частинах кадру)

Для більш ефективного подавлення теплового шуму пропонується проводити віднімання середнього теплового сигналу з урахуванням маски, що враховує нерівномірність нагрівання матриці:

$$s_1(x, y) = s(x, y) - \bar{s}_m \cdot M(x, y), \quad (3.2)$$

якщо $s_1(x, y) < 0$, то $s_1(x, y) = 0$.

Для обчислення маски $M(x, y)$ можна виконати віконну фільтрацію темного кадру $s_m(x, y)$:

$$M(x, y) = \frac{1}{XY} \sum_{i=-(X-1)}^{(X-1)} \sum_{j=-(Y-1)}^{(Y-1)} K(j, j) \cdot s_m(x+i, y+j), \quad (3.3)$$

де X, Y – розміри фільтруючого вікна,

$K(j, j)$ – коефіцієнти фільтра.

Практичні дослідження запропонованого методу проведено у середовищі MATLAB. У якості вихідних зображень використані темнові кадри камер Nikon D800 (рис.3.3) і Olympus SP-600UZ (рис.3.4).

Маска формувалася відповідно до виразу (3.3). У якості вікна $K(j, j)$ використано гаусове розмиття, розмір вікна становив 1/10 від розміру кадру по висоті. Нижче наведено текст програми фільтрації теплового шуму з маскою, написаний в середовищі MATLAB.

```
clear, close all
X = imread('n.bmp'); %загрузка темного кадру
X = im2double(X); %перетворення у формат подвійної точності
I=0.3*X(:, :, 1)+0.59*X(:, :, 2)+0.11*X(:, :, 3); %сигнал яскравості
figure, imshow(I)
title('Початкове зображення');
T=100; %розмір вікна
K = gauss(T,T) / T^2;
M = imfilter(I,K);
figure, imshow(M)
title('Маска');
I2=I-0.7*M; %віднімання маски
figure, imshow(I2);
title('Зображення після фільтрації')
```

Нижче наведено приклади роботи програми фільтрації теплового шуму камер Nikon D800 (рис.3.5) та Olympus SP-600UZ (рис.3.6).

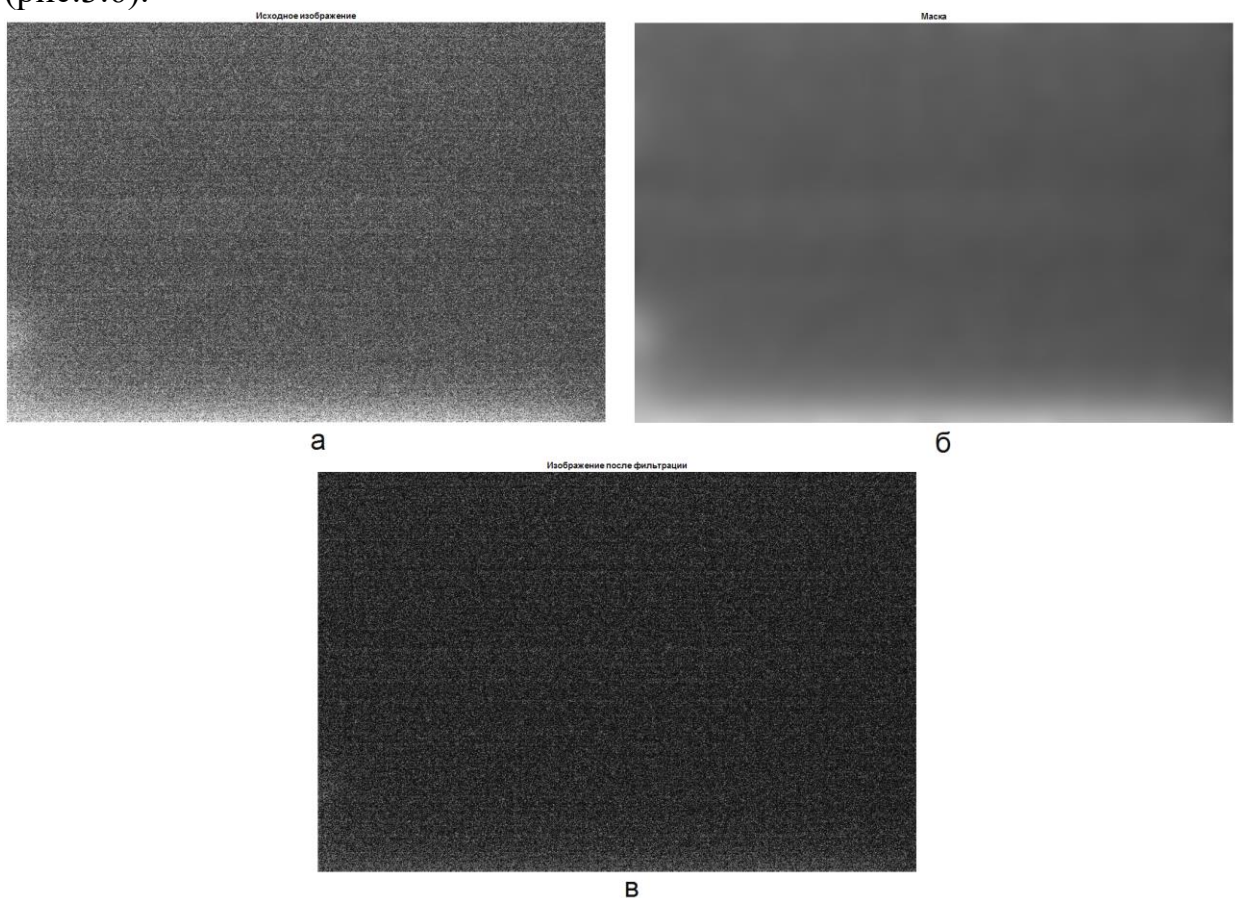


Рисунок 3.5 – Результати роботи програми фільтрації теплового шуму камери Nikon D800 (а – вихідний кадр, б – маска, результат фільтрації)

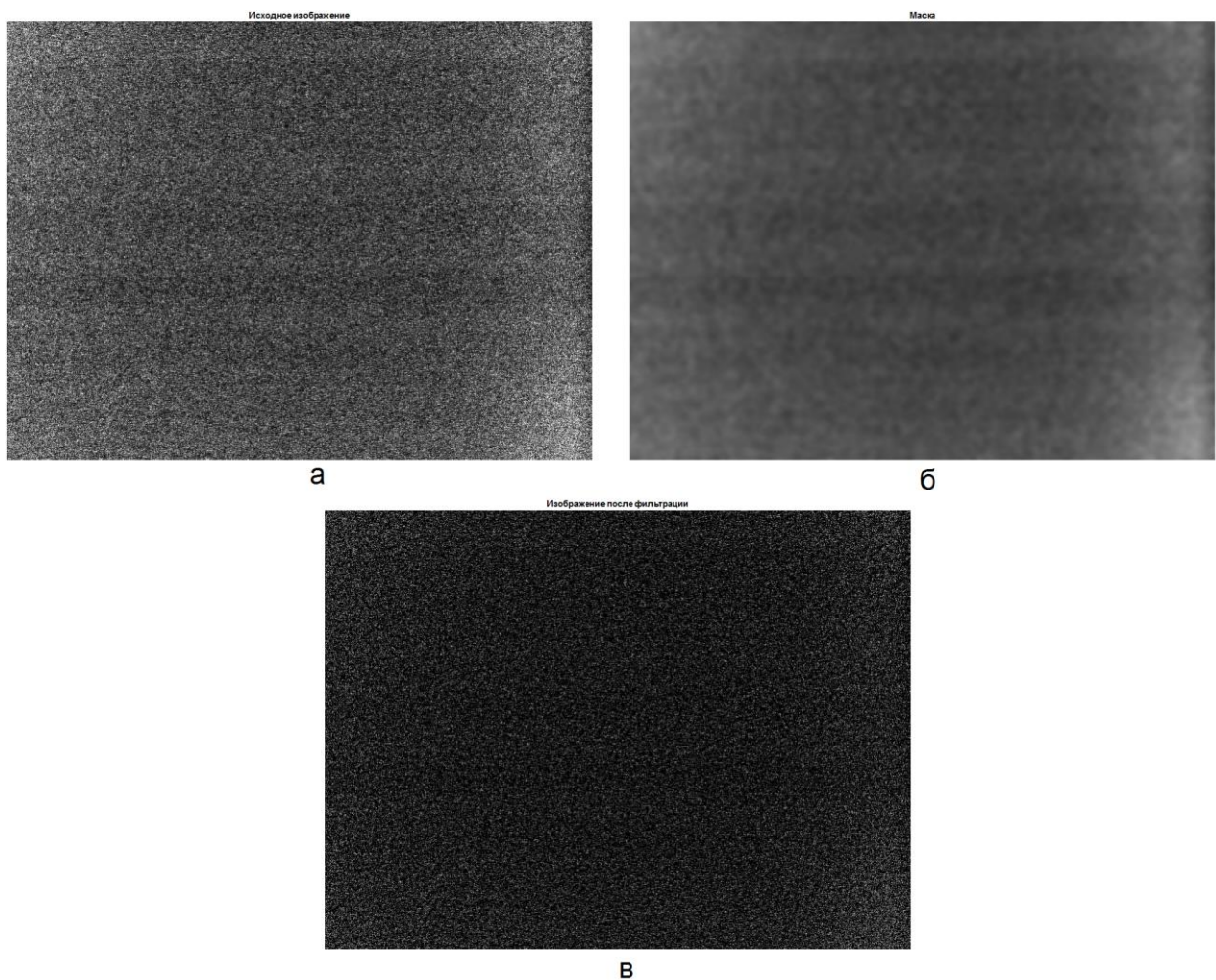


Рисунок 3.6 – Результати роботи програми фільтрації теплового шуму камери Olympus SP-600UZ (а – вихідний кадр, б – маска, в – результат фільтрації)

Як випливає з отриманих результатів, фільтрація теплового шуму матриць з використанням маски, що враховує нерівномірність нагріву, дозволяє позбутися від шумового світіння в місцях підвищеної температури матриці.

3.2 Фільтрування шумів зчитування

Шум зчитування залежить від електронного обв'язування матриці. Це процес вимірювання кількості світла, що потрапив на піксель, і переведення цього значення в цифровий вигляд. Цей шум стосується як якості пікселів, так і якості АЦП та втрат на електричній обв'язці.

Один із різновидів шуму читання – це структурний шум (бандинг). Його варто виділити на окрему категорію оскільки він візуально може відрізнятися від інших видів шуму. На рис. 3.7 показаний приклад кадру з яскраво вираженим структурним шумом.

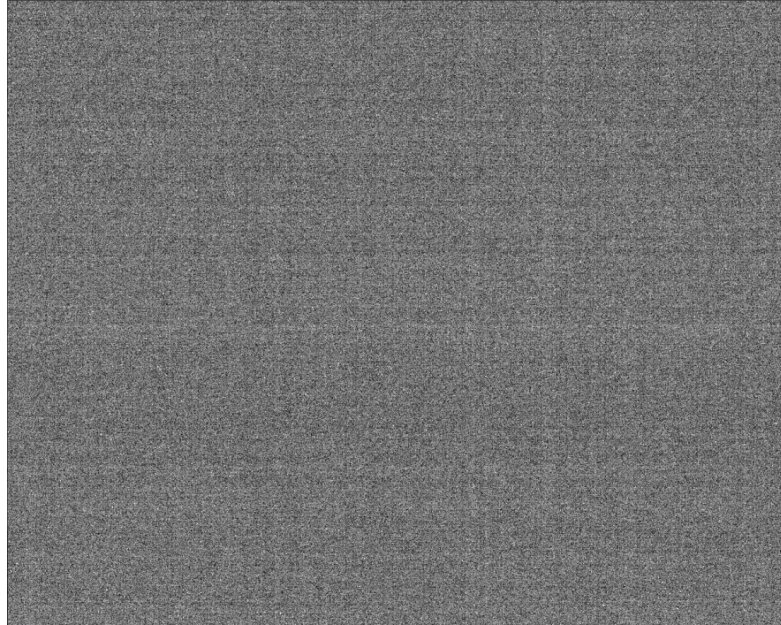


Рисунок 3.7 – Темновий кадр із структурним шумом

Людське око легко розрізняє візерунки і тому можна помітити малюнки, що повторюються, у вигляді вертикальних і горизонтальних ліній на загальній картині шумів.

Дослідження просторових спектрів шумів матриць, проведені розділ 2, показали, що спектр шуму камер нерівномірний. Найбільша інтенсивність шуму спостерігається області низьких просторових частот, тобто. на великих деталях. Також у спектрі шуму присутні гармоніки, що розташовуються вздовж частотних осей k_x, k_y зі строго постійним кроком. Причому крок цих гармонік як вздовж осі k_x так і вздовж осі k_y різний і не збігається в різних камер. Це і є проявом структурного шуму.

У зв'язку з виявленими особливостями можна запропонувати для придушення структурного шуму в камерах метод спектрального віднімання,

який добре відомий і широко застосовується в даний час для звукових сигналів.

В основі методу спектрального віднімання покладено припущення, що в середньому спектр шуму не змінюється в часі. Його слід задати один раз (наприклад, за допомогою усереднення деякої кількості кадрів, що містить тільки шуми), після чого з ним проводиться спектральне віднімання для всіх наступних кадрів.

Стаціонарність означає, що властивості шуму (потужність, спектральний склад) змінюються у часі, тобто, від кадру до кадру. Адитивність означає, що шум $n_t(x, y)$ підсумовується з "чистим" сигналом $s_t(x, y)$ и не залежить від нього.

Запишемо вираз для сигналу яскравості зашумленого кадру у відео

$$L_t(x, y) = s_t(x, y) + n_t(x, y), \quad (3.4)$$

де t – номер кадру,

$s_t(x, y)$ – "чистий" сигнал,

$n_t(x, y)$ – шум.

Для подавлення адитивних стаціонарних шумів використовується алгоритм спектрального віднімання. Він складається з наступних стадій:

1. Розкладання сигналу за допомогою двовимірного швидкого перетворення Фур'є (FFT), що компактно локалізує енергію сигналу за просторовими частотами.

2. Складання відніманого зліпка шуму (noise footprint). Зліпок шуму виходить усередненням кадрів амплітуд спектру, взятих із заздалегідь підготовлених шумових кадрів, що не містять зображення.

$$footprint(k_x, k_y) = \sum_{t=1}^K N_t(k_x, k_y), \quad (3.5)$$

де $N_t(k_x, k_y)$ – спектр шуму для кадру з номером t ,

k_x, k_y – індекси перетворення Фур'є, що відповідають просторовій частоті,

t – номер поточного кадру,

K – кількість шумових кадрів.

3. "Віднімання" (в узагальненому сенсі) амплітудного спектру шуму з амплітудного спектра сигналу.

Віднімання амплітудних спектрів здійснюється за формулою:

$$l'_t(k_x, k_y) = \max \left\{ l_t(k_x, k_y) - k \cdot \text{footprint}(k_x, k_y), 0 \right\} \quad (3.6)$$

де $l_t(k_x, k_y)$ – амплітудний спектр зашумленого зображення,

$\text{footprint}(k_x, k_y)$ – "зліпок" амплітудного спектру шуму,

$l'_t(k_x, k_y)$ – амплітудний спектр результуючого очищеного сигналу,

k – коефіцієнт придушення.

4. Зворотнє двовимірне перетворення FFT – синтез результуючого зображення.

Цей спосіб має на увазі стаціонарність шуму матриці. Стаціонарність означає, що властивості шуму (потужність, спектральний склад) змінюються у часі, тобто. від кадру до кадру. Нестационарність шуму камери може виявлятися в умовах зміни температурних умов, що потребує врахування температури.

Нижче наведено текст програми фільтрації структурного шуму з маскою, написаний у MATLAB.

```
clear,close all

X = imread('n2.bmp'); % завантаження темного кадру
X = im2double(X); % перетворення у формат подвійної точності
I=0.3*X(:,:,1)+0.59*X(:,:,2)+0.11*X(:,:,3); % сигнал яскравості

i=fftn(I);
a=abs(i);
```

```

i2=max(i-0.5*a,0);
I2=real(ifftn(i2));

figure,imshow(I)
title('Початкове зображення');

figure, imshow(I2);
title('Зображення після фільтрації');
colorbar

```

Нижче на рис.3.8 показані приклади роботи програми фільтрації структурного шуму камер.

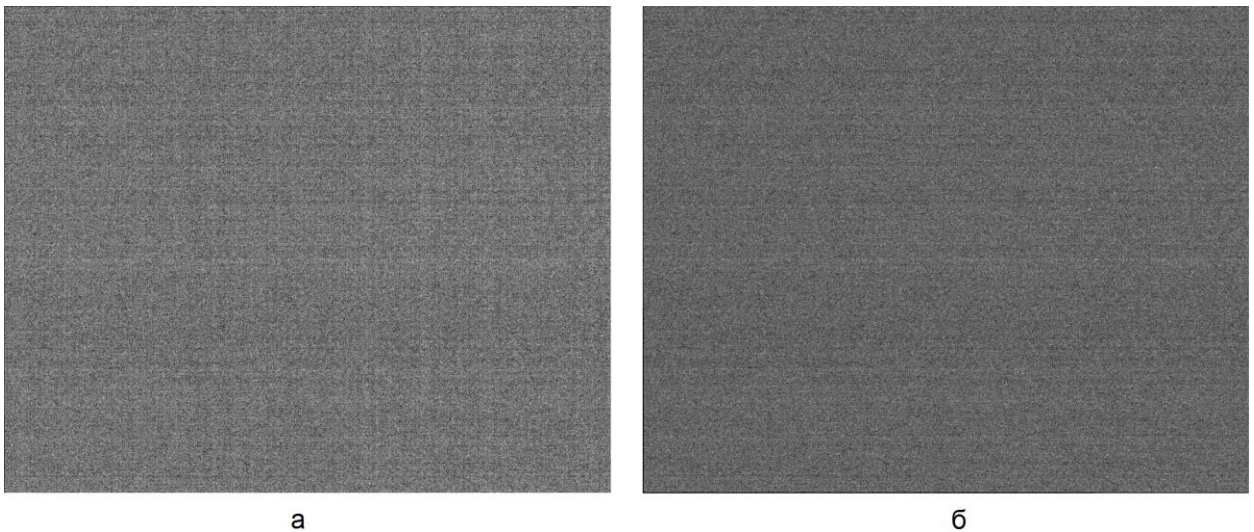


Рисунок 3.8 – Результати роботи програми фільтрації структурного шуму (а – вихідний кадр, б – результат фільтрації)

У цьому експерименті експериментально підібраний коефіцієнт придушення $k=0,5$. За менших коефіцієнтів придушення відбувається неповне придушення структурного шуму. При високих коефіцієнтах придушення відбувається придушення частин корисного зображення.

Отже, завдання дослідження виконано.

3.3 Висновки по розділу 2

У зв'язку з виявленими особливостями запропоновано два вдосконалення методів подавлення шумів матриці. Традиційно середнє значення теплового шуму подавляють з використанням затемнених рядків і

стовпців, якими обчислюють середній темновий сигнал і віднімають його з усіх пікселів кадру. При цьому вважають, що тепловий шум у всіх пікселях матриці однаковий. Для ефективнішого подавлення теплового шуму запропоновано проводити віднімання середнього темного сигналу з урахуванням маски, що враховує нерівномірність нагріву матриці. Маска отримана із застосуванням фільтрації темного кадру з гаусовим вікном розміром $1/10$ висоти кадру.

Як показали дослідження в середовищі MATLAB, облік нерівномірності нагріву дозволяє позбутися шумового свічення в місцях підвищеної температури матриці.

Для подавлення структурного шуму запропонований метод спектрального віднімання, що добре відомий і широко застосовується для звукових сигналів. Метод полягає у відніманні усередненого "зліпка" амплітудного спектру шуму для всіх кадрів, що знімаються.

За результатами досліджень у середовищі MATLAB, застосування методу спектрального віднімання суттєво зменшило великоструктурні шуми та гармонійні складові шуму матриць, що виявляються у вигляді горизонтальних та вертикальних ліній.

Таким чином, завдання досліджень виконані, мета досліджень досягнута.

ВИСНОВКИ

Параметри телевізійних систем в цілому залежать від кожного вузла тракту передачі сигналу зображення. Але, як і в кожній радіоелектронній системі, найбільш відповідальною ланкою є початкова – матричний перетворювач світло-сигнал. Від світлочутливої матриці залежить рівень шуму, чутливість, динамічний діапазон, роздільна здатність камери.

Зазвичай до подавлення шуму матричних перетворювачів світло-сигнал підходять, вважаючи, що це гаусовий білий шум. Аналіз деяких робіт дає підстави вважати, що це припущення неправильне і є значні складові шуму матриці, відмінні від нормального.

Метою кваліфікаційної роботи є виявлення та кількісна оцінка складових шуму, властивих виключно матричним перетворювачам, а також удосконалення методів подавлення шуму з урахуванням цих складових.

Задачами роботи є: теоретичний аналіз та обґрунтування умов експерименту, експериментальне дослідження законів розподілу шуму фотокамер, їх просторового розподілу в кадрі, просторових спектрів шуму, залежності характеристик шуму від температури, виявлення особливостей, які можуть бути використані для вдосконалення алгоритмів шумоподавлення, розробка та дослідження удосконалених алгоритмів подавлення шумів матриць.

Дослідження шумових характеристик проводилося для двох аматорських фотокамер: Olympus SP-600UZ та камера смартфона Xiaomi Redmi 8. Вони мають ПЗЗ-сенсор та КМОП-сенсор з діагоналлю (1/2,5)" по 12 мегапікселів. Порівняльні випробування проводилися в максимально наближених умовах: чутливість встановлювалася на мінімальне значення ISO100, темнові кадри робилися при закритому об'єктиві в один і той же час, при однаковій температурі, щоб уникнути паразитних засвіток, зйомка проводилася в темній кімнаті, LCD-екран фотокамери відключався, у

смартфона встановлювалася найменша яскравість. Режими додаткової обробки зображень було вимкнено.

Отримано по 50 темнових кадрів кожної камери при температурі 24°C. Аналіз гістограм розподілу шумів у каналах RGB показав, що гістограми шумів асиметричні, шуми матриць розподілені за нормальним законом. Тобто центральна гранична теорема для шуму камер у даному випадку непридатна, оскільки вона передбачає приблизно однаковий вклад всіх шумів у результуючий шум. Шуми у каналах основних кольорів RGB мають різні статистичні характеристики. Таку відмінність можна пояснити роботою системи балансу білого.

Детальне дослідження законів розподілу вірогідності шумів у каналі яскравості показали, що шум камери добре апроксимується законом Пуассона як без компенсації середнього темного сигналу (в камері Olympus SP-600UZ) так і з його компенсацією (в камері Xiaomi Redmi 8). На вибірках обсягом понад 15 кадрів величина довірчої вірогідності неузгодження законів розподілу за критерієм χ^2 -квадрат становить близько 10% і не зменшується зі збільшенням обсягу вибірки. Це говорить про задовільне узгодження закону розподілу шуму із законом Пуассона.

Аналізуючи самі темнові кадри з підвищеною контрастністю можна назвати що шуми матриць розподілені по кадру нерівномірно. Більший шум спостерігається на краях кадру, менший – у центрі кадру. Це можна пояснити нерівномірним нагріванням поверхні матриці через вплив електроніки кіл обв'язування, підсилення і т.д.

Гістограми усереднених кадрів роздвоюються: у них з'являється пік праворуч на рівні білого. Появу цього піку можна пояснити наявністю у матриці так званих " гарячих " пікселів, тобто тих, у яких рівні теплового шуму помітно більші, ніж у сусідніх пікселях. Це призводить до появи у кожній матриці властивого тільки їй шуму фіксованого розподілу. Оскільки від кадру до кадру гарячі пікселі не змінюють своє розташування, то на

гістограмах усереднених кадрів і на самих усереднених кадрах вони стають помітними.

Досліджено закони розподілу шуму камер в залежності від температури. Дослідження проведено для трьох значень температури: 4°C, 24°C, 44°C. Температура 24°C відповідала кімнатній, 44°C – отримана в електричній духовці з термостатом, 4°C – в основній камері холодильника. Контроль температури проводився окремим побутовим термометром, тривалість нагрівання або остигання камер дорівнювала одній годині для виходу всіх вузлів, включаючи матриці, на заданий температурний режим.

Як впливає з експериментально отриманих гістограм, зі зміною температури матриць закон розподілу залишається тим самим – законом Пуассона. Зі збільшенням температури матриць збільшується середнє значення темного струму та його дисперсія. Графіки залежності середнього значення темного сигналу і СКВ шуму від температури добре апроксимуються лінійним законом. Зростання теплових шумів для кожної камери індивідуальне і відрізняється в цьому експерименті в 3 рази. СКВ шуму приблизно дорівнює кореню квадратному із середнього значення темного сигналу, що підтверджує висновок про статистику розподілу шуму за законом Пуассона.

Досліджено просторові характеристики шумів матриць. Просторовий діапазон шуму матриці знайдено шляхом двовимірного перетворення Фур'є від усередненого темного кадру. Для покращення сприйняття напівтонів модуль спектру показаний у логарифмічному масштабі. Спектр шуму камер нерівномірний. Найбільша інтенсивність шуму спостерігається області низьких просторових частот, тобто на великих деталях. Таким чином, шум камер не є білим, як це стверджується у багатьох джерелах. Крупноструктурні шуми помітніші людському зору, ніж дрібноструктурні. Тому завдання фільтрації низькочастотних шумів матриці є особливо актуальним.

При аналізі перерізів просторових спектрів шуму камер було відзначено цікаву особливість. У спектрі шуму є гармоніки, розташовані вздовж частотних осей зі строго незмінним кроком. Крок гармонік як вздовж осі так і вздовж осі різний і не збігається в різних камерах. Очевидно, наявність цих гармонік можна пояснити просочуванням сигналів синхронізації і тактування матриць в колі сигналів зображення. Такий ефект викликає візерунки на зашумленому зображенні і в деяких джерелах називається структурним шумом.

У зв'язку з виявленими особливостями запропоновано два вдосконалення методів подавлення шумів матриці. Традиційно середнє значення теплового шуму подавляють з використанням затемнених рядків і стовпців, якими обчислюють середній темновий сигнал і віднімають його з усіх пікселів кадру. При цьому вважають, що тепловий шум у всіх пікселях матриці однаковий. Для ефективнішого подавлення теплового шуму запропоновано проводити віднімання середнього темнового сигналу з урахуванням маски, що враховує нерівномірність нагріву матриці. Маска отримана із застосуванням фільтрації темнового кадру з гаусовим вікном розміром $1/10$ висоти кадру.

Як показали дослідження в середовищі MATLAB, врахування нерівномірності нагріву дозволяє позбутися шумового свічення в місцях підвищеної температури матриці.

Для подавлення структурного шуму запропонований метод спектрального віднімання, що добре відомий і широко застосовується для звукових сигналів. Метод полягає у відніманні усередненого "зліпка" амплітудного спектру шуму для всіх кадрів, що знімаються.

За результатами досліджень у середовищі MATLAB, застосування методу спектрального віднімання суттєво зменшило великоструктурні шуми та гармонійні складові шуму матриць, що виявляються у вигляді горизонтальних та вертикальних ліній.

Таким чином, завдання досліджень виконані, мета досліджень досягнута.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Знак, 2006. — 972с.
2. Д.С. Волосов. Фотографическая оптика. — 2-е изд. — М.: «Искусство», 1978. — 543 с.
3. Быков Р.Е. Основы телевидения и видеотехники: учебник для вузов / Р.Е. Быков. — М.: Горячая линия – Телеком, 2006. — 399 с.
4. Телевидение: учебник для вузов / В.Е. Джакония [и др.]; под ред. В.Е. Джакония. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 2004. — 616 с.
5. Грязин Г.Н. Системы прикладного телевидения: учеб. пособие для вузов. — СПб.: Политехника, 2001. — 277 с.
6. Ю.Р. Носов, В.А. Шилин. Основы физики приборов с зарядовой связью. — М.: Наука, 1986. — 318 с.
7. Приборы с зарядовой связью / Под ред. М. Хоувза, Д. Моргана. — М.: Энергоиздат, 1981. — 372 с.
8. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: учеб. пособие для вузов / М.М. Мирошников. — Л.: Машиностроение, 1977. — 600 с.
9. Казанцев Г.Д. Измерительное телевидение: учеб. пособие для вузов / Г.Д. Казанцев, М.И. Курячий, И.Н. Пустынский. — М.: Высшая школа, 1994. — 288 с.
10. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов / Ю.Г. Якушенков. — М.: Логос, 2004. — 472 с.
11. Неизвестный С.Н., Никулин О.Ю. Приборы с зарядовой связью. Устройство и основные принципы работы / Специальная техника. 1999. № 4. С. 12-16.
12. Неизвестный С.Н., Никулин О.Ю. Приборы с зарядовой связью. Основные характеристики ПЗС / Специальная техника. 1999. № 5. С. 19-15.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

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

20. 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.

21. В.Н. Олейников, О.В. Зубков, В.М. Карташов, И.В. Коротцев, 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.

22. 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 Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2020. 4 p.

23. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Zubkov O.V., Koryttsev 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.

24. 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.

25. Королев А.Н., Гарцуев А.И., Исследование точности позиционирования изображения на ПЗС матрице, Измерительная техника, май, 2004, №5, с. 20-22.

26. Уваров Н. Секреты высокой чувствительности ТВ камер // Алгоритмы безопасности, 2002 г. – №6. – С. 14 - 18.

27. Князев М.Г. Расчёт пороговых значений потока излучения и освещённости для ПЗС матриц Kodak KAI-1003M, Kodak KAI-1020 и Philips FTF3020M / М.Г. Князев, А.В. Бондаренко, И.В. Докучаев // Цифровая обработка сигнала. – 2006. – №3. – С. 49–56.

28. Березин В.В. Твердотельная революция в телевидении: телевизионные системы на основе приборов с зарядовой связью, систем на кристалле и видеосистем на кристалле / В.В. Березин, А.А. Умбиталиев, Ш.С. Фалмин и др.; под ред. А.А. Умбиталиева и А.К. Цыцулина. – М.: Радио и связь, 2006. – 300 с.

29. Пустынский И.Н. Уточнение зависимости освещённости оптического изображения от освещённости объекта в телевизионных датчиках // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – №1. – С. 36–39.

30. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.

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

32. 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.

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