

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
КАФЕДРА АЕРОНАВІАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

**ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ**

Завідуювач кафедри

д-р. техн. наук, проф.

В. Ю. Ларін

«—» \_\_\_\_\_ 2022 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**

**(ПОДСЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

**ЗА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЮ ПРОГРАМОЮ**

**«БЕЗПІЛОТНІ АВАЦІЙНІ КОМПЛЕКСИ»**

**Тема: Безпілотний авіаційний комплекс для оцінювання індексів біомаси  
рослин**

**Виконав:**

\_\_\_\_\_ М.Д. Іванов

**Керівник: д-р техн. наук, проф.**

\_\_\_\_\_ В.Ю. Ларін

**Консультант розділу д-р техн. наук, проф**

\_\_\_\_\_ І.В. Остроумов

**Консультант розділу д-р техн. наук, проф**

\_\_\_\_\_ Т.Ф. Шмельова

**Нормоконтролер д-р техн. наук, проф**

\_\_\_\_\_ Т.Ф. Шмельова

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Авіонавігації, Електроніки та Телекомунікацій

Кафедра Авіонавігаційних Систем

Спеціальність: 272 «Авіаційний транспорт»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ларін В.Ю.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 р.

**ЗАВІДАННЯ**

**на виконання дипломної роботи**

Іванов Микола Дмитрович

1. Тема дипломної роботи « Безпілотний авіаційний комплекс для оцінювання

індексів біомаси рослин » затверджена наказом ректора від 20.09.2022 р. №

1594/ст.

2. Термін виконання роботи: з 05.09.2022 по 24.11.2022.

3. Вихідні дані до роботи: дані організації повітряного транспорту (IATA).

4. Зміст пояснювальної записки: Аналіз методології авіаційних дипломних

дипломних робіт, аналіз апаратури для оцінювання індексів біомаси рослин

авіаційного базування, методологічне забезпечення обраних видів

дипломних робіт, обґрунтування конфігурації безпілотних авіаційних

платформ для виконання досліджень; обґрунтування та вибір апаратури

корисного навантаження для реалізації дистанційних досліджень за

допомогою БАК.

5. Перелік обов'язкового графічного (лікустративного) матеріалу:

Спектральний коефіцієнт відбиття для зеленого листя, гістограма аномально

високих значень оцінених NDVI, отік оцінки індексу рослинності із

зображень, зроблених цифровою камерою.

6. Календарний план-графік

№	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Підготовка та написання розділу 1 «Аналіз методів та інструментарію авіаційних дистанційних досліджень індексів біомаси рослин»	22.10.22-11.11.22	Виконав
2	Підготовка та написання розділу 2 «Технічне завдання»	12.10.22-13.11.22	Виконав
3	Підготовка та написання розділу 3 «Теоретичні відомості та моделі»	04.10.22-16.11.22	Виконав
4	Підготовка та написання розділу 4 «Обґрунтування конфігурації авіаційних платформ»	17.10.22-03.10.22	Виконав
5	Підготовка та написання розділу 5 «Автоматизована обробка»	18.10.22-03.10.22	Виконав
6	Підготовка та написання розділу 6 «Охорона праці»	19.10.22-03.10.22	Виконав
7	Підготовка та написання висновків до дипломної роботи	14.10.22-16.11.22	Виконав
9	Оформлення роботи згідно вимог нормоконтролю	07.11.22-18.11.22	Виконав
10	Підготовка презентації та доповіді	15.11.22-24.11.22	Виконав

7. Дата видачі завдання: « 05 » вересня 2022 р.

Керівник дипломної роботи (підпис керівника) (П.І.Б.)  
Ларін Віталій Юрійович

Завдання прийняв до виконання (підпис студента) (П.І.Б.)  
Іванов Микола Дмитрович

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Безпілотний авіаційний комплекс для оцінювання індексів біомаси рослин»: 117 сторінки, 5 таблиць, 43 рисунки, 81 використаних джерела.

Об'єкт дослідження – безпілотний авіаційний комплекс для оцінювання індексів біомаси рослин

Предмет дослідження – реалізація оцінювання індексів біомаси рослин на основі дистанційно-пілотованих та безпілотних авіаційних комплексів.

Мета дослідження: дослідити особливості оцінювання індексів біомаси рослин за допомогою дистанційно-пілотованих та безпілотних авіаційних комплексів дистанційних досліджень.

В дипломній роботі виконано аналіз та обґрунтування конфігурації безпілотних авіаційних комплексів для виконання дистанційного оцінювання індексів біомаси рослин, надані рекомендації по організації польотних місій вказаних безпілотних авіаційних комплексів з урахуванням специфіки функціонування дослідницької апаратури корисного навантаження

ІНДЕКС БІОМАСИ РОСЛИН, ВПЛА, NDVI, ІНФРАЧЕРВОНИЙ СПЕКТР,  
ВИДИМИЙ СПЕКТР, ЦИФРОВА КАМЕРА.

**APKYM ЗAВBAЖEНБ**

## ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ВІДПОВІДНА ЯСКРАВІСТЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ІНДЕКСУ РОСЛИННОСТІ ІЗ ЗОБРАЖЕНЬ ЦИФРОВОЇ КАМЕРИ	10
1.1. Аномально високі індекси рослинності	11
1.2. Метод оцінки індексу рослинності за зображеннями	14
1.3. Відповідне освітлення для оцінки NDVI та результати	18
1.4. Висновок	25
РОЗДІЛ 2. СТРАТЕГІЯ РОЗРОБКИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КАМЕРИ NDVI ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ РОСЛИН НА ВІДКРИТОМУ ПОБИРІ ТА СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ВУДІЛОВАНИХ СИСТЕМАХ	27
2.1. Матеріали та методи	29
2.2. Спектральний відгук одного чипа	33
2.3. Умови вимірювання	39
2.4. Висновок	48
РОЗДІЛ 3. ОТРИМАННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ДІАПАЗОНІВ NDVI З ОДНІЄЇ СТАНДАРТНОЇ ЦИФРОВОЇ КАМЕРИ RGB: МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД	51
3.1. Теоретичний підхід BSOP	54
3.2. Матеріал і методи	57
3.3. Результати	58
3.4. Висновок	61
РОЗДІЛ 4. БАГАТОСПЕКТРАЛЬНЕ ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ НА ОСНОВІ UAV І ОБЧИСЛЕННЯ NDVI ДЛЯ ОЦІНКИ ПІСЛЯ КАТАСТРОФИ	62
4.1. Сенсорна платформа БПЛА	64
4.2. Розрахунок NDVI	72
4.3. Аналіз катастроф	79
4.4. Висновок	82
РОЗДІЛ 5. АВТОМАТИЗОВАНА ОБРОБКА АЕРОНАВІАЦІЙНИХ ДАНИХ ВЕЛИКОЇ РОЗМІРНОСТІ	83

5.1. Вхідні дані.....	84
5.2. Візуалізація траєкторних даних у програмному забезпеченні.....	87
5.3. Інтерполяція траєкторних даних.....	88
5.4. Розрахунок параметрів траєкторії.....	91
<b>РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ НА РОБОЧОМУ МІСЦІ АВІАЦІЙНИХ</b>	
<b>ФАХІВЦІВ.....</b>	
6.1 Розрахунок освітлення приміщення проектувальника апаратури.....	95
6.2 Вимоги щодо електробезпеки, обладнання та організації робочого місця.....	98
6.3. Розрахунок захисного заземлення робочого місця.....	99
6.4. Державні санітарні норми випромінювання в Україні, як заходи захисту навколишнього середовища.....	104
ВИСНОВКИ.....	110
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	111

## ВСТУП

Використання безпілотних авіаційних систем (БПЛА) як мультиспектральних платформ дистанційного зондування набуло популярності протягом багатьох років. Дослідники встановили оптичні камери на БПЛА для різних місій дистанційного зондування, включаючи RGB, NIR та теплові діапазони. Зібрані аерофотознімки у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах можна використовувати для розрахунку NDVI у системах точного землеробства [19]. Подібні системи можна розширити до багатьох сценаріїв навколишнього середовища, включаючи оцінку швидкості випаровування, вмісту азоту та хлорофілу в тканинах культур, вологості ґрунту на поверхні та в кореневій зоні та об'єму листя культур [17]. Багатоспектральне дистанційне зондування на основі БПЛА також ефективно використовувалось в таких сферах, як управління водними ресурсами в реальному часі та розподілене керування зрошенням [27], моніторинг пожеж та пошкоджень при лісових пожежах [4].

Мультиспектральне дистанційне зондування визначається як сукупність відбитих, випущених або розсіяних променів від об'єкта чи області інтересу в кількох діапазонах електромагнітного спектру, включаючи видимий, інфрачервоний, ближній інфрачервоний (NIR), теплові, мікрохвильові та радіохвильові діапазони. Існує багато застосувань для багатоспектрального дистанційного зондування, включаючи моніторинг стану ґрунту, виявлення інвазивної рослинності, картографування росту сільськогосподарських культур, оцінку шкоди від стихійних лих, аналіз взаємодії ґрунту та води тощо. Для багатьох із зазначених вище застосувань розробка багатоспектральних індексів рослинності, таких як нормалізований Індекс різниці рослинності (NDVI) є критичним. Схожі застосування є розортання БПЛА для одночасних пошкоджень при лісових пожежах [4]. Незважаючи на те,



що багато дослідників працювали над багатоспектральним дистанційним зондуванням на основі БПЛА, наукової процедури калібрування та кількісної оцінки похибок у порівнянні з іншими мультиспектральними вимірюваннями (наприклад, наземними чи супутниковими) досі немає. Іншим важливим застосуванням багатоспектрального дистанційного зондування на основі БПЛА є збір даних про катастрофи та оцінка збитків. Катастрофи, особливо пов'язані з кліматичними та погодними коливаннями, можуть завдати серйозної шкоди, включаючи людські жертви, пошкодження структури, втрати врожаю та зміни рослинності/довкілля. Для підготовки до подібних подій у майбутньому дуже важливо розуміти масштаби збитків і змін земель, спричинених цими лихами.

Спектральні індекси рослинності походять від величин у різних діапазонах спектру, переважно у видимій та ближній інфрачервоній областях спектру. Співвідношення енергії видимого та ближнього інфрачервоного Світлового спектра пов'язане з кількістю рослинності, присутньої на землі. Здорова рослина поглинає більшу частину видимого світла та відбиває більшу частину ближнього інфрачервоного світла. З іншого боку, нездорова або рідкісна рослина відбиває більше видимого світла та менше ближнього інфрачервоного світла. Індекси рослинності використовувалися в широкому діапазоні застосувань: наприклад, моніторинг рослинності, кліматичне та гідрологічне моделювання, сільськогосподарська діяльність, дослідження посухи та проблеми зі здоров'ям. Серед багатьох запропонованих індексів рослинності найпоширенішим індексом рослинності є NDVI (нормалізований відмінний індекс рослинності), який складається з нормалізованого співвідношення відбиття ближнього інфрачервоного та видимого червоного завдяки простоті та легкості застосування NDVI. Загальну користь NDVI легко знайти на величезних веб-сайтах у світі. В Австралії «Місячник NDVI Середнє для Австралії» офіційне метеорологічне бюро оприлюднило для всіх як одну з кліматичних карт. В Індії доступні класи землекористування досліджуваної території для крашого використання врожаю NDVI отримані з індійського супутника дистанційного зондування та інших супутників спостереження Землі. На сьогоднішній день NDVI широко використовується для оцінки біомаси вже більше 30 років. Потім це може надати інформацію про низьку ключових земних змінних для глобальних екологічних проблем. Нещодавно технології проксимального дистанційного зондування привернули особливу увагу з появою меншого обладнання, такого як «камера дрона».

## **РОЗДІЛ 1. ВІДПОВІДНА ЯСКРАВІСТЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ІНДЕКСУ РОСЛИННОСТІ ІЗ ЗОБРАЖЕНЬ ЦИФРОВОЇ КАМЕРИ**

Було звернуто увагу людей, що два зображення в ближньому інфрачервоному та видимому червоному діапазонах можуть дати оцінку індексу рослинності за допомогою цифрових камер [10]. Однак було виявлено, що розрахунковий індекс рослинності за допомогою цифрових камер демонструє аномально високі значення понад 0,9 дюйма. NDVI для темних ділянок зображень [11]. Щоб досягти більшої точності оціненого індексу рослинності за зображеннями камери, не можна уникнути належним чином поводитися з тінюваними ділянками зображень. Необхідна оцінка точності оцінки NDVI було зроблено шляхом порівняння з розрахованим NDVI від вимірювання коефіцієнта відбиття за допомогою спектрального радіометра. Основні цілі цього дослідження - з'ясувати причину аномально високих значень у NDVI оцінити на основі зображень із камери та отримати точну оцінку NDVI [2]

### 1.1. Аномально високі індекси рослинності

Рослинність демонструє унікальний підпис у своєму спектрі відбиття, як показано на рис. 1.1. Його спектр відбиття позначає перехідну зону від поглинання хлорофіл у видимій червоній області до розсіювання через внутрішню структуру листя в Nir (ближній інфрачервоній) області. З огляду на ознаку переходу, найбільш широко використовуваний NDVI (нормалізований індекс різниці рослинності) визначається наступним рівнянням. (1.1).

Легенда показує три напрямки вимірювання під сонячним світлом спектральним фотометром, три напрямки з'являться на наступному малюнку 8. р у ближньому інфрачервоному та видимому червоному діапазонах відповідно. Коефіцієнт відбиття сірої стандартної картки спектральним фотометром під сонячним світлом показано пунктирною лінією.

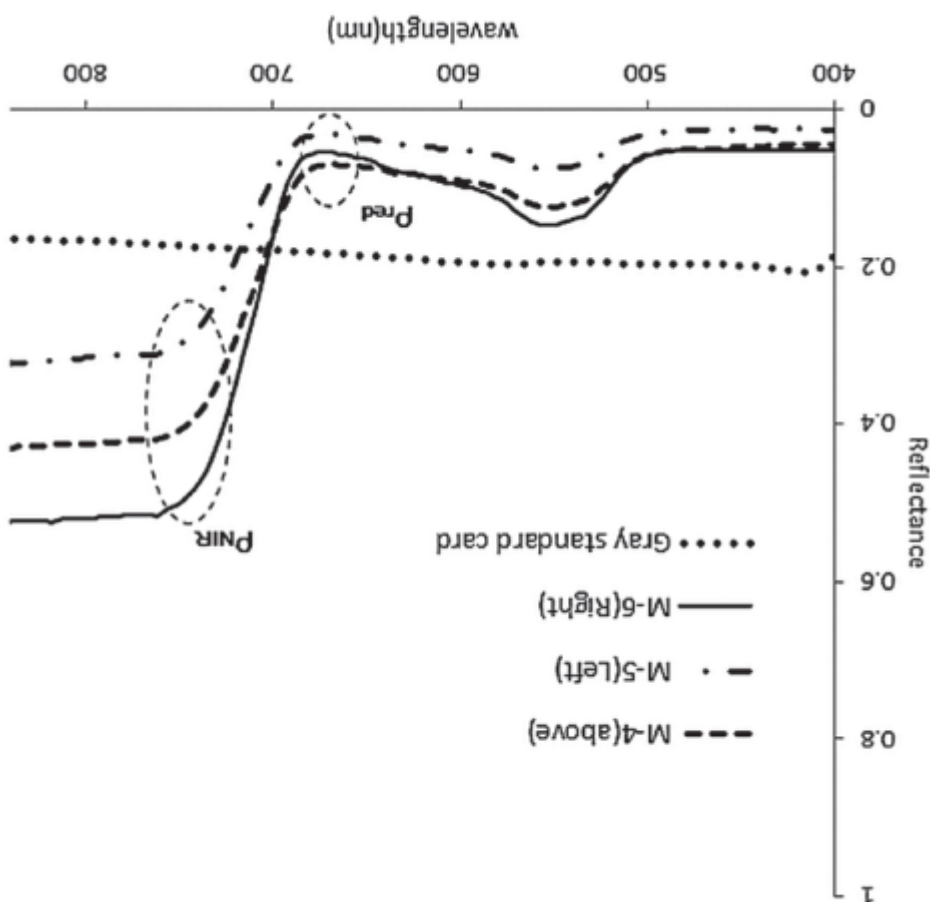
червона смуга відповідно.

це відбиття об'єктів для ближнього інфрачервоного діапазону і і видима

$$NDVI = (p^{Nir} - p^{red}) / (p^{Nir} + p^{red}) \quad (1.1)$$

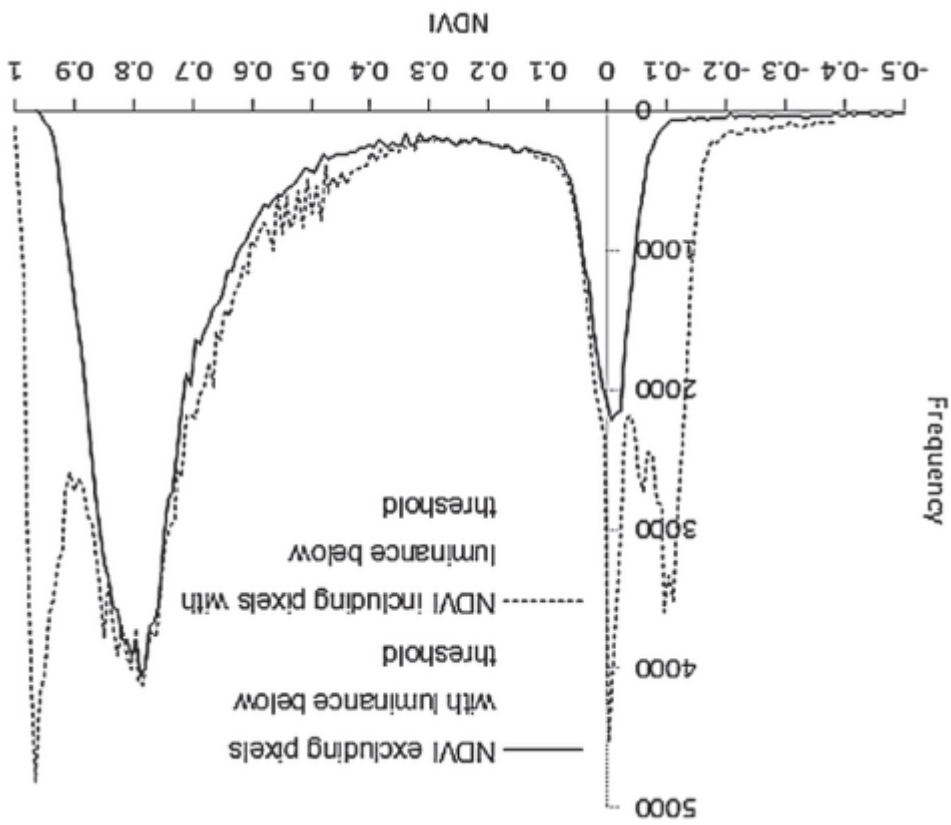
наближається до -1 через їх дуже низький коефіцієнт відбиття в діапазоні Nir. Приблизно 1 для території з густою рослинністю. Для водних поверхонь NDVI від значень, близьких до 0 для посушливих або безплідних територій, до числа в діапазоні від -1 до +1. Для об'єктів на поверхні землі, NDVI коливається. Математичні значення NDVI розраховуються за рівнянням (1) призводять до освітленість тощо через складність прямого вимірювання відбиття. пов'язані з коефіцієнтом відбиття NDVI такі як сьйво, опромінення, якравість, Завичай для виведення часто використовують інші величини, тісно

Рис. 1.1 Спектральний коефіцієнт відбиття для зеленого листа.



Вітність дослідників у галузі дистанційного зондування цитували статтю Дж. Бейра та Д. Герінга про ряд NDVI значення (12). Там сказано, що ан NDVI близьке до 0 відповідає відсутності рослинності, тоді як NDVI близьке до +1 (0,8 - 0,9) вказує на максимумально можливу щільність зеленого листя. Хоча один із цих дослідників дійшов висновку, що по суті значення рослинності мають діапазон від 0,1 до 0,713), видається необхідним для подальшого дослідження. З різноманітних документів і оприлюднених матеріалів на веб-сайтах розумно, що цінності NDVI для рослинності злітають нижче 0,8. Однак автор зауважив, що NDVI оцінені із зображень конкретної камери в ближньому інфрачервоному діапазоні та видимих червоних смугах інді показують аномально високі значення NDVI за певних умов освітлення (11). Аномально високі значення NDVI (>0,9) з'явилися в темних або найтемніших ділянках видимих фотографій. Тут ми повинні звернути особливу увагу на вираз «нормальний або

Рис. 1.2 Гістограма аномально високим значенням NDVI. аномальні



аномальний» щодо NDVI. Оскільки фраза «аномалії NDVI» часто використовується в багатьох наукових статтях як відхилення NDVI значення від довгострокового середнього NDVI. Наприклад, аномалії NDVI, які були більш ніж на одне стандартне відхилення нижче середніх умов за 21 рік, а в 2002 році 95% Північної Америки демонстрували значення нижче середнього NDVI (14). Термін «аномальний або аномальний», використаний у цьому документі, означає це значення NDVI перевищують 0,9. Поширення аномальне NDVI опінієний на основі зображень, чітко проявляється на гістограмі, як на рис. 1.3. Було припущено, що аномальна ситуація може бути спричинена недостатнім освітленням, як і «недоекспозиція» у фотографії.

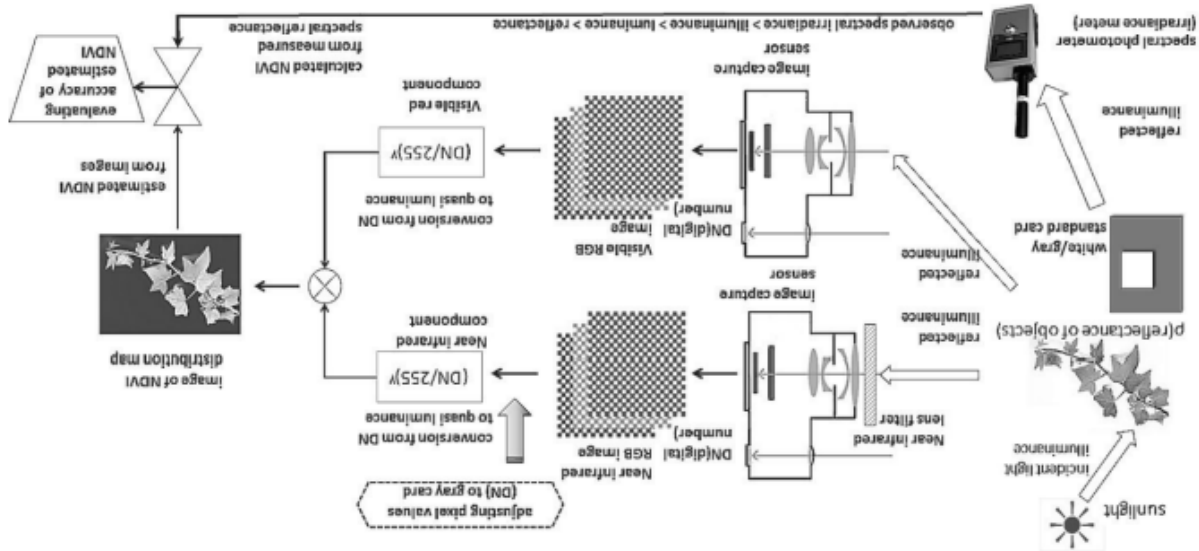


Рис. 1.3 Потік опінки індексу рослинності із зображень, зроблених цифровою камерою.

## 1.2. Метод опінки індексу рослинності за зображеннями

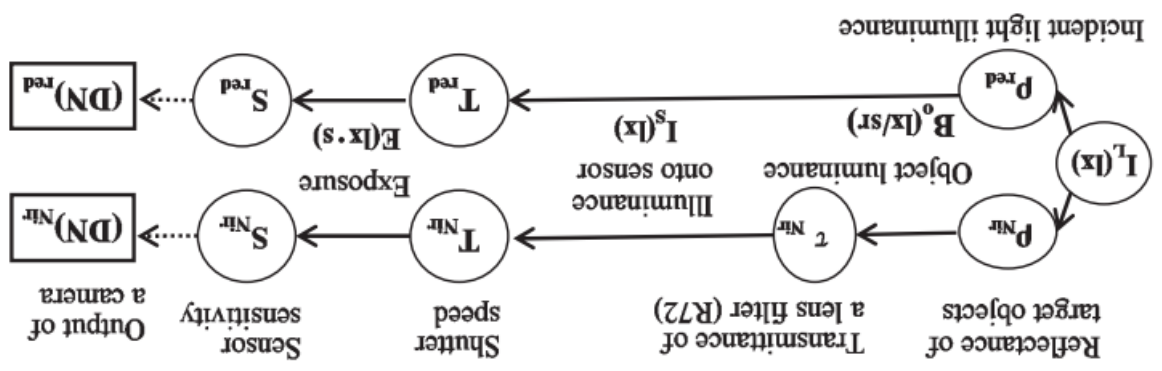
Одним із найбільш використовуваних індексів рослинності є NDVI, щойно згаданий у попередньому розділі. Два типи зображень, отриманих цифровими камерами, необхідні для опінки індексу рослинності із зображень з камери: одне – це смугове фото у видимій області спектра, а інше – це смугове фото в ближньому інфрачервоному діапазоні, зроблене за допомогою інфрачервоного фільтра об'єктива. Хід опінки вегетаційного індексу наведено на рис. 1.3. А також для опінки точності опіненого NDVI із зображень необхідна кількість, що

калібрування даних супутникових датчиків.

дистанційного зондування, які пропонують достатньо наземної правди для км. Щодо дальнього отяду, з'явилися технології проксимального частині атмосфери ресструється на висоті від поверхні землі від 700 км до 450 платформ супутників спостереження Землі спектральна яскравість у верхній При дистанційному зондуванні за допомогою мультиспектрального датчика на пов'язаної з відбиттям, на відміну від оцінки NDVI із зроблених зображень. обчислити з вимірюного коефіцієнта відбиття або певної величини, тісно За допомогою спектрального фотометра, NDVI можна безпосередньо

цифрові камери

Рис. 1.4 Подорож світла від джерела світла до датчика зображення

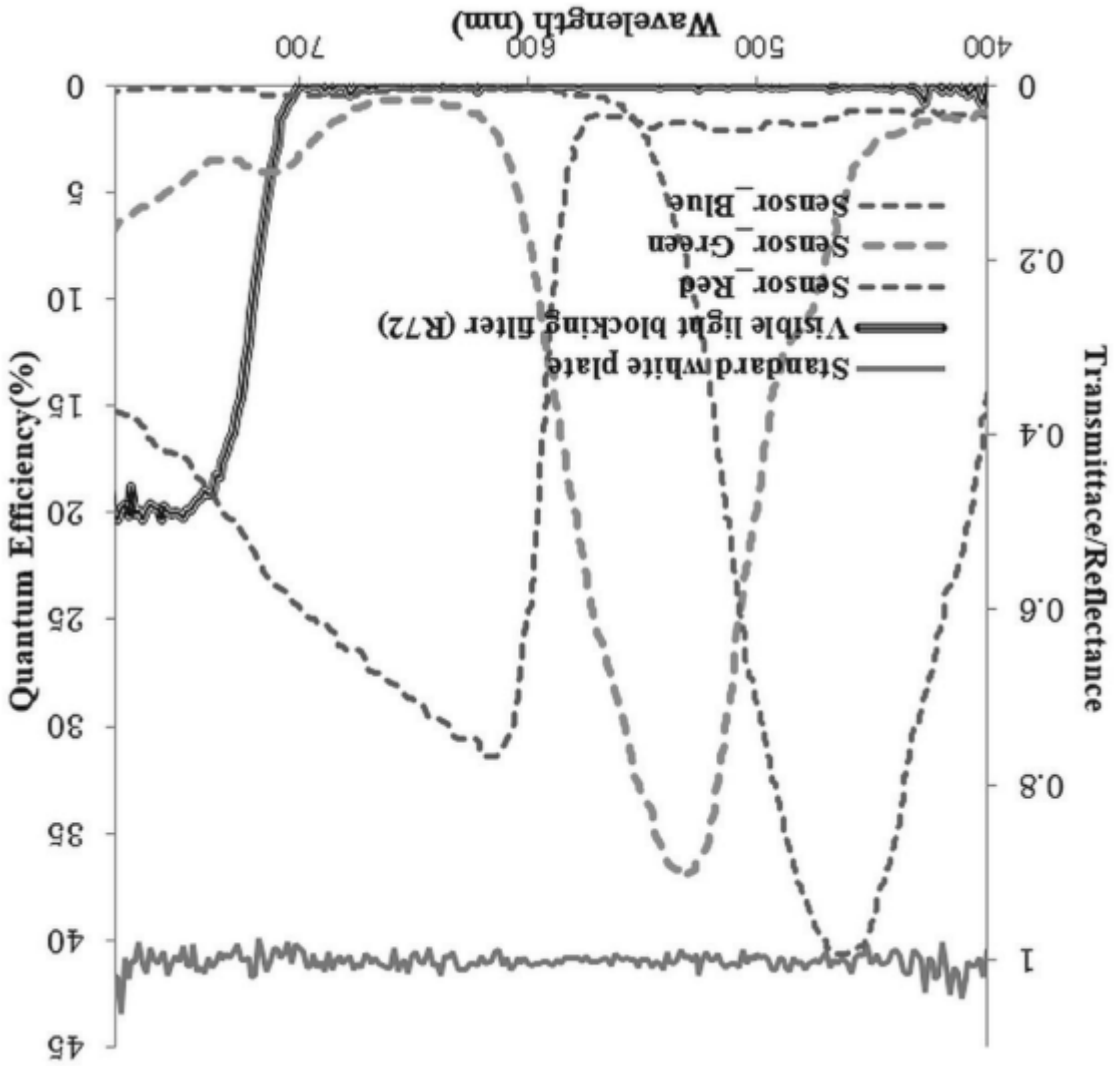


зображення цифрової камери як блок-схему на рис. 1.4.

Однак корисно розглянути шлях світла від падаючого світла до датчика сканде. Отримання різноманітних спектральних/колориметричних величин дуже важливою здатністю об'єктів і вихідним сигналом цифрової камери. критерій для оцінки NDVI. Важливо розуміти взаємозв'язок між стосується коефіцієнта відбиття, вимірюного спектральним фотометром, як

Ми розробили вимірювання розлинності на місці на ближчій відстані, ніж проксимальне дистанційне зондування за допомогою спектрального фотометра, сілськотоподарських цифрових камер і комерційних цифрових камер. Для уточнення оптичних властивостей фільтра, що блокує видиме світло «R72», спектральні криві пропускання «R72» а спектральні характеристики датчика

та вимірювання спектральний коефіцієнт відбиття стандартної білої пластини та пропускання фільтра, що блокує видиме світло, 'R72' спектральним фотометром, 'FieldSpec HI' під штучним сонячним світлом, 'SOLAХ XC-100AF'. Криві спектральних характеристик датчика кольору зображення "KA1-0340"22) як типовий приклад ПЗ3-сенсора показано квантову ефективність (%) правої осі.





ПЗ-камери наведено на рис. 1.5. Основною метою нашого дослідження є розробка методу для більш точної оцінки NDVI із зображень комерційної цифрової камери. Щоб досягти цього, ми вибрали «CANON 710IS» як цифрову камеру вибору, а «Potted Hedera Pittsburg» як рослину з високим рівнем NDVI значення серед батяток випадків. Оскільки розмір і форма листя «дикі гречки» подібні до листків «горщиків хедери», ми порівняли різницю на карті рослинності між вимірами на відкритому повітрі та в приміщенні із зображеннями «дикі гречки».[23].

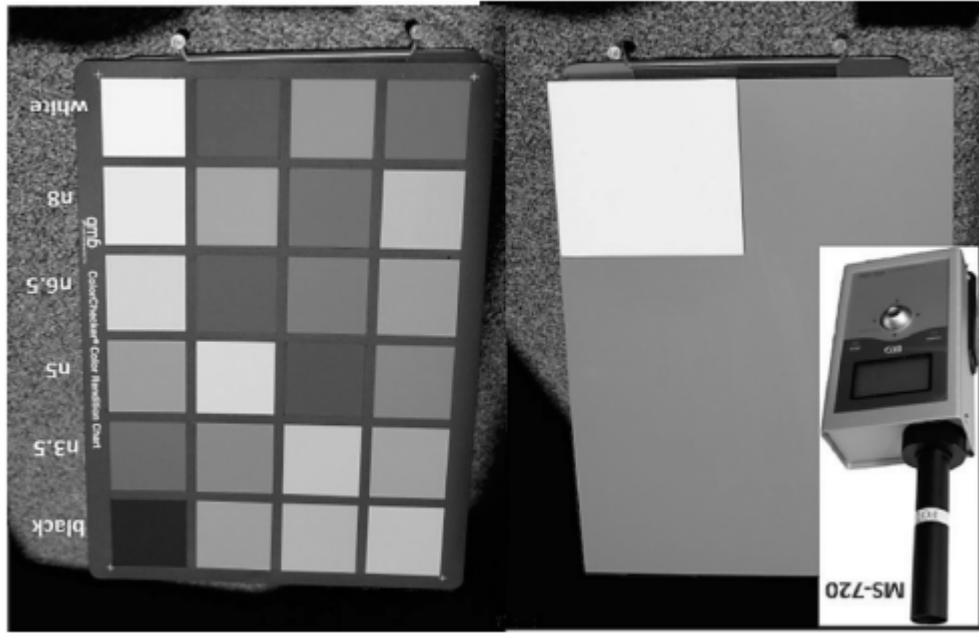


Рис. 1.6 Спектральний фотометр (MS-720), біла еталонна карта, сірий стандарт картка та картка передачі кольору (ColorChecker Classic)(17,18): різні плями сірого кольору призначені для калібрування освітленості фотометра.

Що стосується двох сілських господарських цифрових фотоапаратів, вони відзначили тірші результати оцінки розрахункової карти рослинності зі своїх зображень, ніж результати з «CANON 710IS». Портативний спектральний фотометр «MS-720», показаний на рис. 1.6, використовувався для розрахунку NDVI його вимірного виходу. Хоча вихідна потужність MS-720 - це опромінення (Вт/м<sup>2</sup>) цільових об'єктів вихідний сигнал може бути приблизно перетворений у випромінювання (Вт/м<sup>2</sup>/sr), оскільки поле зору

фотометра становить 10 градусів і є достатньо малим. Тоді співвідношення випромінюваності тісно пов'язане з відбивною здатністю цільових об'єктів. Ми апроксимуємо спектральний вихід датчика цифрової камери за такими рівняннями як DN (цифрове число):

$$(DN)^{Nir} = K \sum_{\lambda} [I^L(\lambda) \cdot \rho^{Nir}(\lambda) \cdot \tau^{Nir}(\lambda) \cdot T^{Nir} \cdot S^{Nir}(\lambda)]$$

$$(DN)^{red} = K \sum_{\lambda} [I^L(\lambda) \cdot \rho^{red}(\lambda) \cdot \tau^{red}(\lambda) \cdot T^{red} \cdot S^{red}(\lambda)] \quad (12)$$

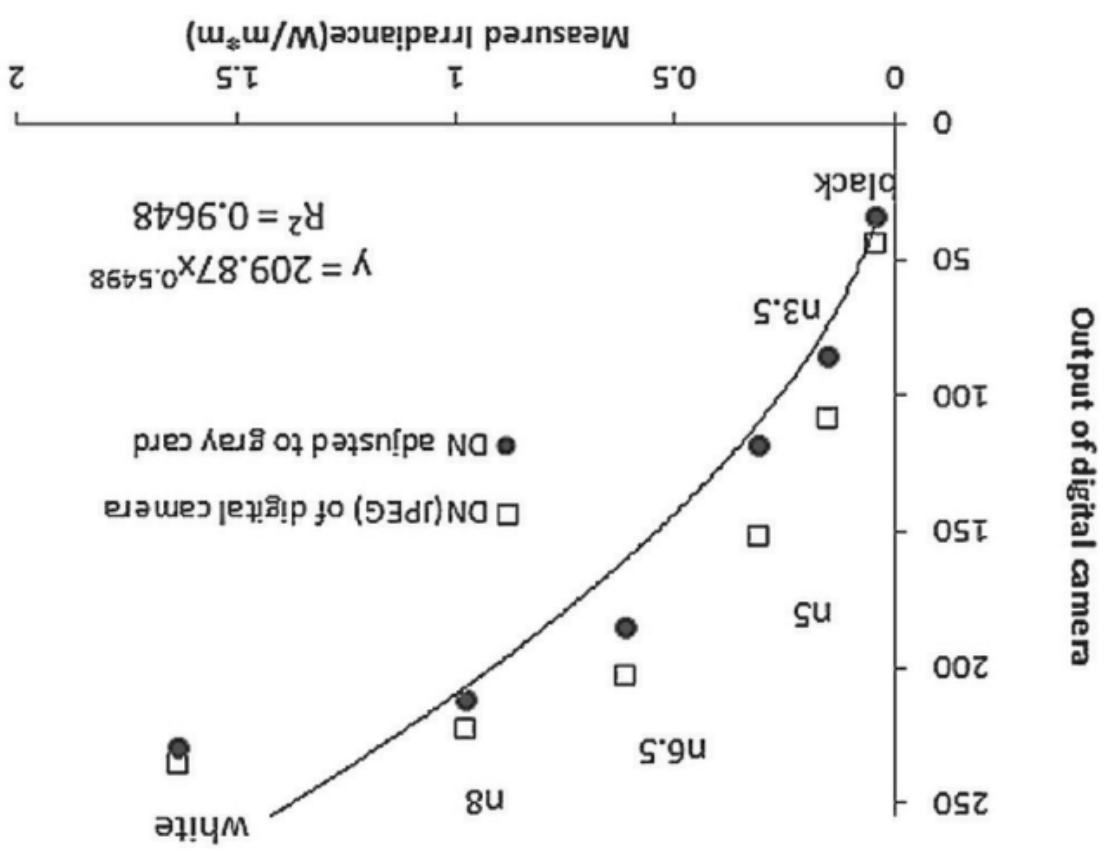
Оскільки відношення опромінення пропорційне коефіцієнту відбиття об'єктів, вимірне опромінення спектральним фотометром з малим полем зору можна використовувати для розрахунку NDVI.

### 1.3. Відповідне освітлення для оцінки NDVI та результатів

Відповідно до відомої статті "Діаграма передачі кольорів"[18], кожен пач характеризується спектральним коефіцієнтом відбиття, присвоєне ім'я; CIE (1931) x, y та Y; Нотація Манселла; і назва ISCC-NBS. Останнім часом на додаток до класичної кольорової діаграми випускаються різні діаграми для калібрування кольорів та інших цілей[17]. Вимірна опроміненість MS-720 точно пропорційний коефіцієнту відбиття світла (% Reflect). Таким чином, лінійність вихідного сигналу MS-720 щодо вхідного світла вважається гарантованою. На основі лінійності MS-720 було виміряно спектральний коефіцієнт відбиття стандартної сірої картки, який зображено пунктирною лінією на рис. 1.6. Коефіцієнт відбиття стандартної сірої картки показує майже 20% довжини хвилі видимого світла.

З іншого боку, значення DN п'ять-зображень, знятих цифровою камерою (наприклад, CANON S110), показують степеневий закон вимірювання фотометром опромінення, як показано на рис. 1.7. Підбираючи криву до DN, налаштованої на сіру картку, її виявилося, що показник степеневого закону дорівнює 1,82 (=1/0,5498). Серед двох зображень, зроблених цифровою камерою, зображення у видимому світлі відображається з трьома напрямками для спектрального вимірювання MS-720 на рис. 1.8. Еліпс оранжевого кольору вказує на цільові області, які використовуються для оцінки NDVI із зображень. На зображенні також показано білу контрольну картку та стандартну сірку картку. Очевидно, що тінисті або найтемніші ділянки видно в різних регіонах на рис. 1.8. Було виявлено, що ці тінисті ділянки та області, які показали аномально високі значення NDVI майже перекриваються.

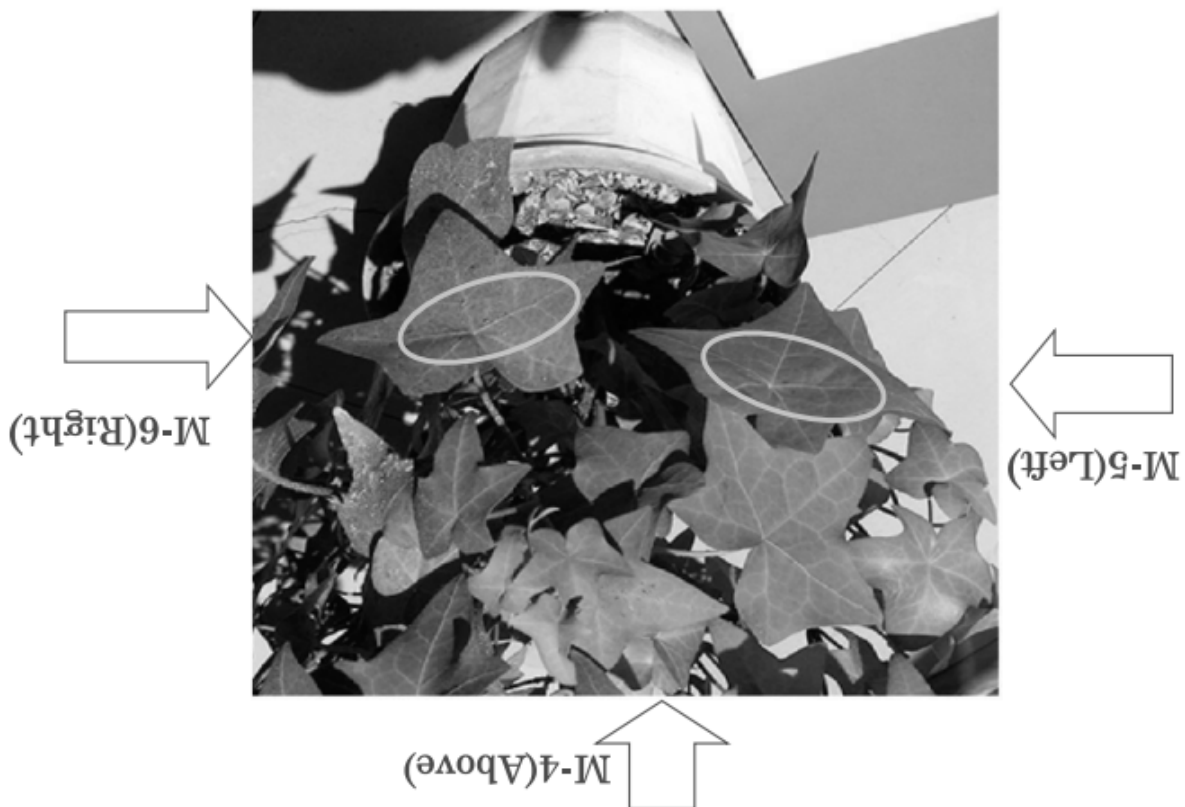
Рис. 1.7 Вихід цифрової камери проти вимірювання опромінення за спектром фотометр.



Оскільки яскравість знятого зображення тісно пов'язана з впливом світла на датчик захоплення зображення на рис. 1.3, можна очікувати, що певна особливість аномального NDVI з'явиться на діаграмі розсіювання між яскравістю зображення та оцінкою NDVI із зображень. Оскільки характеристики діаграм розсіювання вказані на рис. 1.9, чітка область, що демонструє аномально високі значення NDVI ( $>0,9$ ) відображається внизу праворуч на малюнку. Ця зона є ненормальною для отримати ділянки зображення для оцінки NDVI зображені помаранчевим еліпсом висотою 1,5 см і шириною 3 см розрахунковий NDVI, тому його слід виключити для точної оцінки. Потім було виявлено поріг світлового впливу  $F(Lk-s)$  дав порогове значення яскравості для аномального NDVI.

сонячним світлом.

Рис. 1.8 Зображення у видимому світлі, зроблене цифровою камерою під

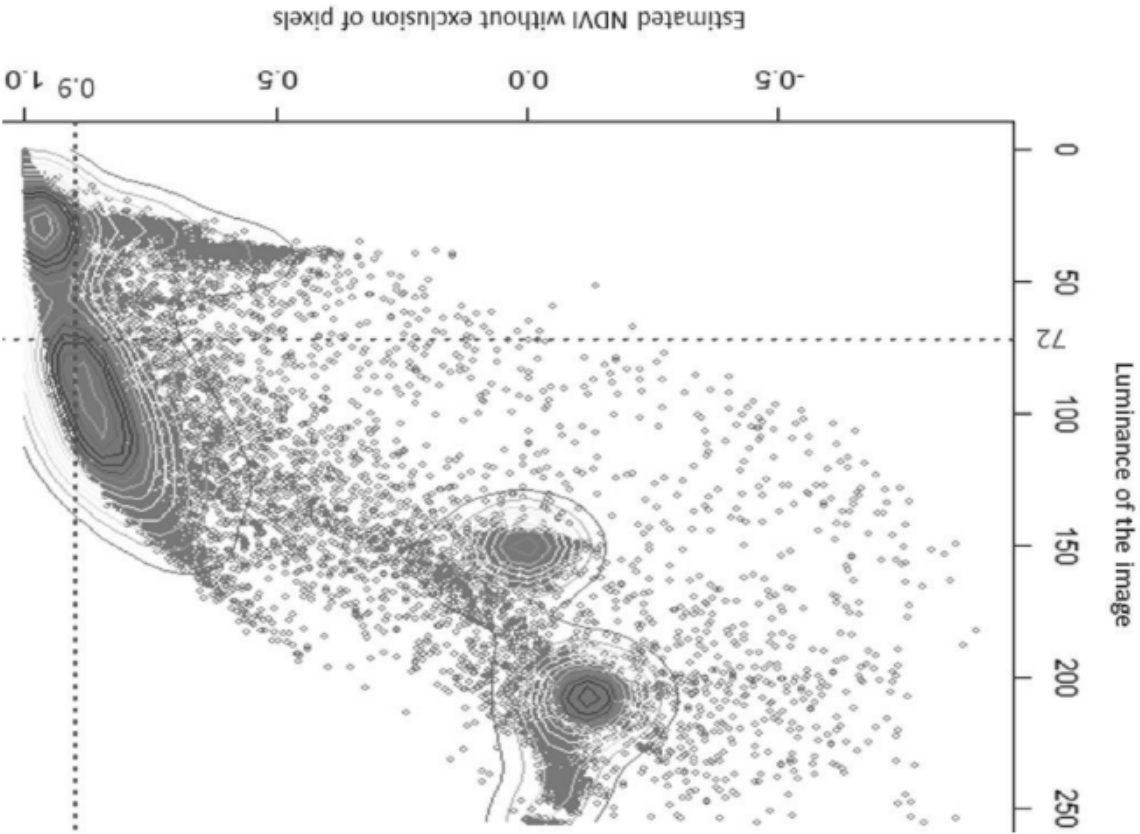


зображень.

точнішу оцінку NDVI від ближнього інфрачервоного та видимого червоного (DN/255) гамма. Відповідна експозиція світла для зйомки фотографій може дати або  $DN > 72$  для гами 2,2, де (DN) перетворено визначається - журналі оцінки NDVI із зображень цифрової камери. Це означає, що  $E(\text{лк}\cdot\text{с}) > 0,033$  області з процесу оцінки NDVI. На рис. 10 показано відповідне освітлення для видимого кольорового зображення використовується для виділення тінювої на основі зображення камери. Таким чином, порогове значення яскравості Він відповідає пороговому значенню DN (=72) яскравості, розрахованому

позначені червоними літерами.

високу щільність агрегованих пікселів і порогову яскравість 72! NDVI,9 випадковим чином від 512x512 до 24 000. Контурні лінії на малюнку показують оціненою NDVI із зображень камери. Кількість нанесених пікселів відбирається Рис. 1.9 Діаграма розсіювання між яскравістю зображення камери та



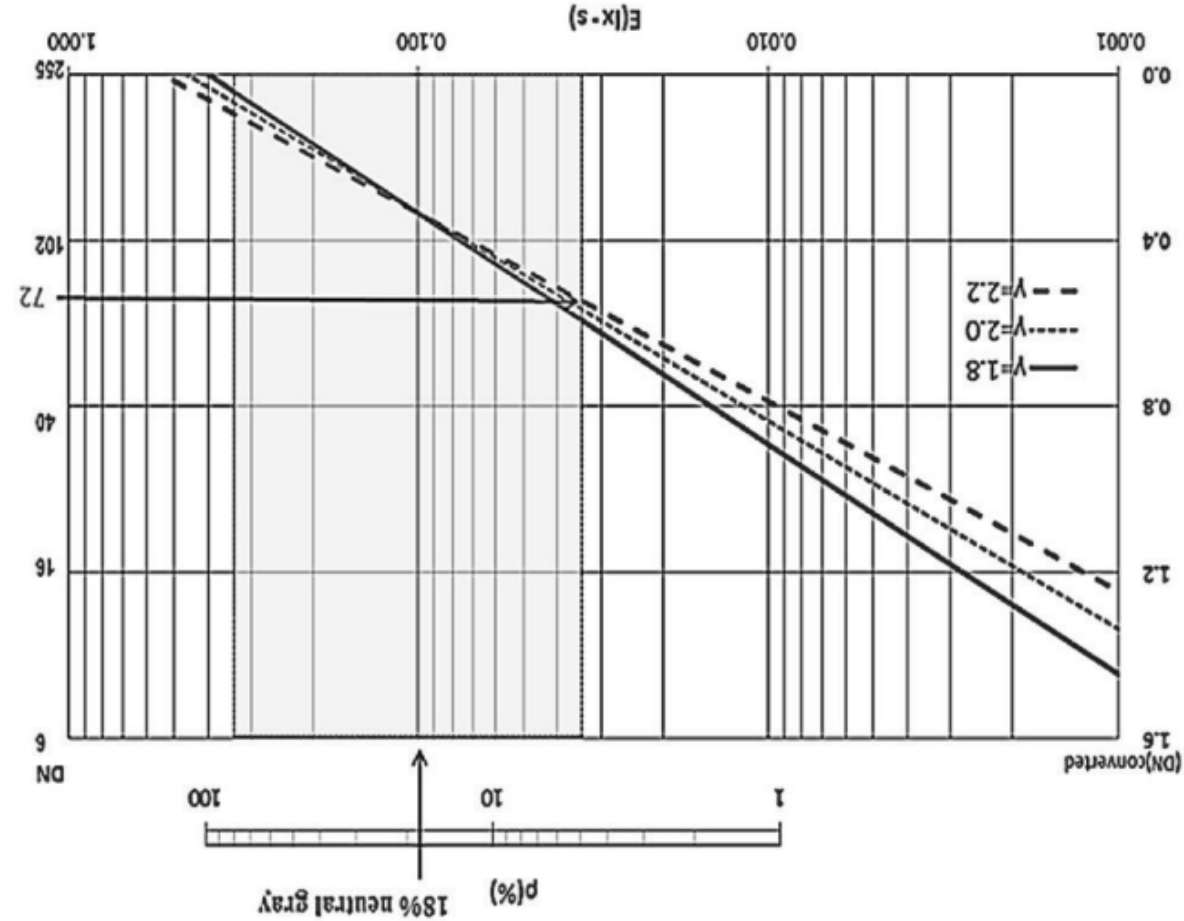


Рис. 1.10 Конвертований вихід зображення цифрової камери проти освітлення датчика зображення камери. Порогове значення виходу DN72 для виключення експозиції пікселів позначено червоною стрілкою. Стандарт сірого також позначається як «18% нейтрального сірого», що відповідає експозиції 0,100(лк·с)[15,16].

Наступне рівняння визначає яскравість  $Y'$  від  $R'$ ,  $G'$  і  $B'$  зображень камери:

$$Y' = 0.2999R' + 0.567G' + 0.114B' \quad (\text{NTSC-TV}), \quad (1.3)$$

де штрих означає гамма-корекцію  $R'$ ,  $G'$ ,  $B'$ . У той час як NDVI розраховується з вимірної величини спектральним фотометром, має обмежену сферу застосування NDVI за оцінками зображень може охоплювати простору сфери, і це одна з переважних переваг. На рис. 1.11 наведена карта розподілу розрахункових NDVI відображається у вигляді кольорових зображень із розділеним рівня.

Показано, що області з аномальними NDVI змінюються залежно від значень гамми. Коли аномалія NDVI визначається відношенням пікселів з NDVI  $>0,9$  до загальної кількості пікселів оціненого NDVI картографічного зображення, проявляється, що аномалія відношення розрахункового NDVI змінюється майже лінійним чином до значень гамми.

Рис. 1.11 Карта поширення аномальних NDVI області, показана чорною зоною. Це показано, що зміна площі пікселів з аномальним NDVI ( $>0,9$ ) залежить від гамма-значень. Верхні три кольорові карти отримані без виключення пікселів з яскравістю, нижчою за порогове значення. Нижні три кольорові карти отримані шляхом виключення пікселів, яскравість яких нижче [72].

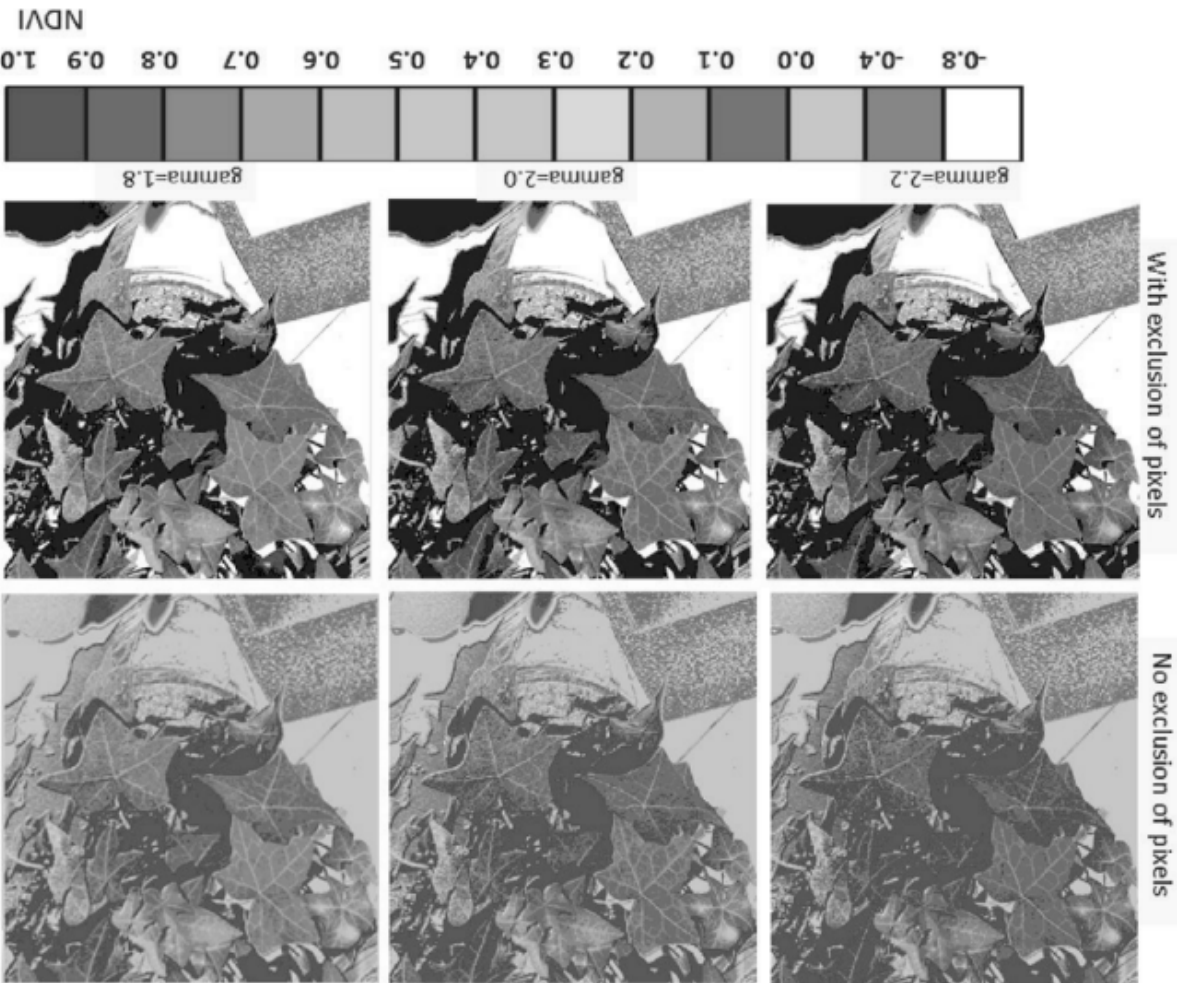
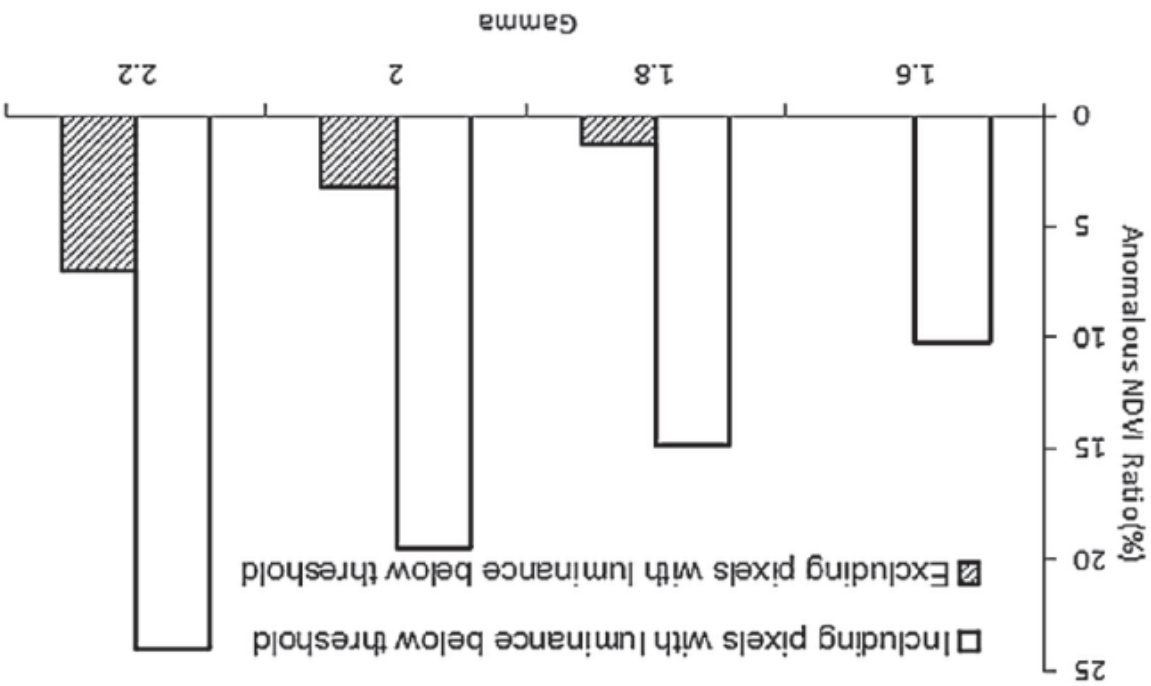


Рис. 1.12 Залежність коефіцієнта аномалії від NDVI на значення гамми



Як видно на рис. 1.12, співвідношення аномалії NDVI залишається 7,0% для гамма=2,2 навіть у разі виключення пікселів з яскравістю нижчий поріг. Для гамма=1,8 аномальна область NDVI зменшується до 1,33. Це значне покращення для оцінки NDVI із зображень камери. Як згадувалося раніше в параграфі, який посиляється на рис. 1.7, показник степеневого закону для кривої становив 1,82. Виявлено, що правильне значення гамми для виходу цифрової камери може бути 1,8, коли ми використовуємо камеру як певний вид фотометра. Для оцінки правильності оцінки NDVI із зображень камери важливо порівняти оцінку NDVI з NDVI розраховується за коефіцієнтом відбиття, вимірним спектральним фотометром. На рис. 1.13 порівняння показано за допомогою абсолютного значення співвідношення різниці між оцінками і розрахованим NDVI. Оцінити точність оцінки NDVI із зображень камери, цільова область, на яку вказує фотометр з відстані приблизно 20 см або близько того, була вибрана на поверхні листка, як показано помаранчевим еліпсом на

рис. 1.8.

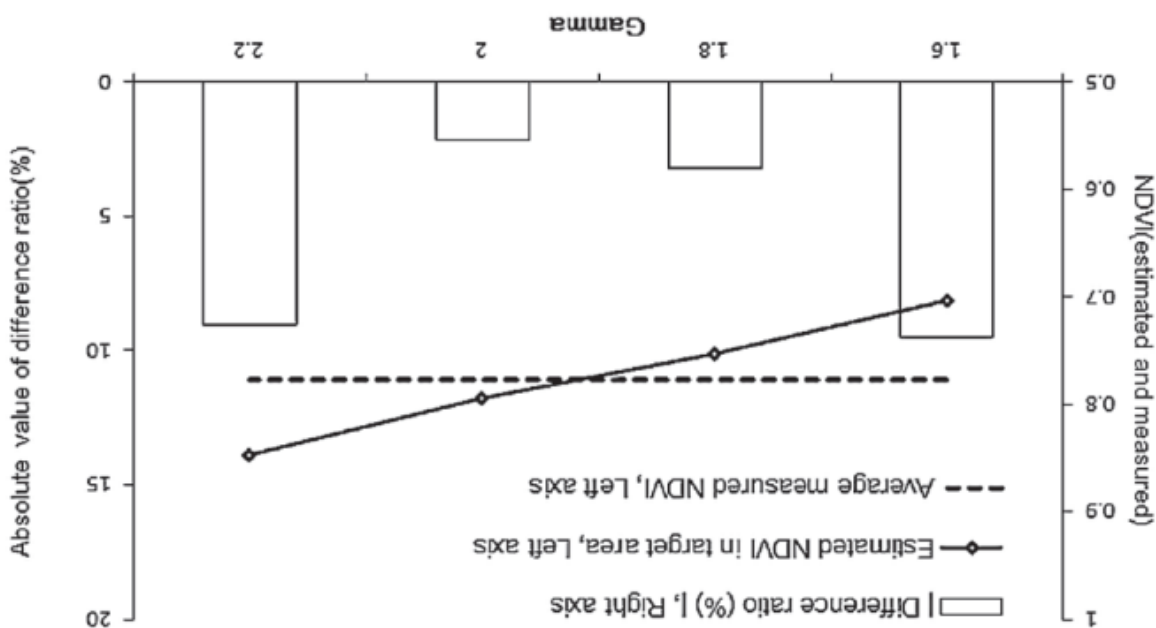


Поточні дослідження показали відмінні характеристики за допомогою методу виключення пікселів з якравістю порогу з оцінки NDVI із конкретних зображень камери. Запропонований критерій відповідного освітлення для NDVI оцінка полягає в тому, що освітленість становить більше

#### 1.4. Висновок

камери. пікселів дає кращі та чудові результати оцінка NDVI із зображень цифрової камери. Для гамми близько 1,8. Можна сказати, що запропонований метод виключення гамма значень. Абсолютне значення коефіцієнта різниці (%) лежить від 2 до 3% вимірюваного NDVI (M-4, M-5 і M-6 на рис. 1.8) змінюється в залежності від чином. Різниця в NDVI між розрахунковими NDVI із зображень і середнього Результат наведено для порівняння на рис. 1.3 і детально пояснено наступним отримано шляхом усереднення NDVI значення в межах цільової області. Взявши відповідну цільову область фотозображення, оцінене NDVI було фотометром: Залежність оцін NDVI на гаммазначеннях показано.

Рис. 1.13 Порівняння розрахункового NDVI із зображень камери с вимірюваний NDVI отримані від опромінення, отриманого спектральним



0,033 (лк · с). Це відповідає тому, що яскравість зображення повинна бути більше 72 з 255 для гами 2,2. Коефіцієнт різниці між розрах NDVI із зображень камери та розрахованого за виміряним коефіцієнтом відбиття залишається в межах приблизно 3%. Для цієї мети використання цифрових камер, як-от деяких фотометрів, може бути рекомендовано встановити гамму на 1,8, а не на 2,2 під час обробки зображення для оцінки NDVI.

Застосовування (розумних) камер для керування процесами, картографування та удосконалення зображення в сільському господарстві стало елементом точного землеробства, що сприяє збереженню ґрунту, пестицидів і робочого часу. Ця техніка додатково зменшує кількість енергії, необхідної з точки зору палива. Хоча дослідницька діяльність у цій галузі зростає, високі ціни на камери відображають низьку адаптацію до застосування в усіх галузях сільського господарства. Розумні недорогі камери, адаптовані для застосування в сільському господарстві, можуть подлати цей недолік. Нормалізований індекс різниці рослинності (NDVI) для кожного пікселя зображення є застосовним алгоритмом для розрізнення інформації про рослини від фону ґрунту, завдяки великій різниці в коефіцієнті відбиття між ближньою інфрачервоною (NIR) і червоною смугою частот оптичного каналу. Завдяки використуються два вирівняних мікросхеми пристроїв із зарядовим зв'язком (CCD) для червоного та ближнього інфрачервоного каналів, але вони дорожчі через потрібне точне оптичне вирівнювання. Тому велика увага приділяється розробці альтернативних конструкцій камер. У цьому дослідженні перевага інтелектуальної однокристальної камери з продуктивністю зображення NDVI продемонстрована з точки зору низької вартості та спрощеної конструкції. Описано необхідні модифікації збірки та пікселів, а також обговорено нові алгоритми для встановлення покращеної якості зображення NDVI для обробки даних. Перевага інтелектуальної конструкції однокристальної камери з продуктивністю зображення NDVI демонструється з точки зору низької вартості та спрощеного дизайну. Описано необхідні модифікації збірки та пікселів, а також обговорено нові алгоритми для встановлення покращеної якості зображення NDVI для обробки даних. Перевага інтелектуальної конструкції однокристальної камери з

## **РОЗДІЛ 2. СТРАТЕГІЯ РОЗРОБКИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КАМЕРИ NDVI ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ РОСЛИН НА ВІДКРИТОМУ ПОВІТРІ ТА СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ВЬУДОВАНИХ СИСТЕМ**

однокристальної камери з продуктивністю зображення NDVI демонструється з точки зору низької вартості та спрощеного дизайну. Описано необхідні модифікації збірки та пікселів, а також обговорено нові алгоритми для встановлення покращеної якості зображення NDVI для обробки даних.

Дослідницька діяльність у сільському господарстві зосереджена на зниженні викидів вуглекислого газу, впливу на навколишнє середовище та витрат. Тому часто використовується точне землеробство, яке об'єднує різноманітну інформацію або бази даних для збільшення співвідношення сільськогосподарських ресурсів до випуску [1–3]. Кількість рослин, рівень охоплення або кількість біомаси [4] завжди визначають за допомогою датчиків, наприклад, для керування онлайн-польовим обприскуванням. Для онлайн-контролю датчик має бути встановлений на тракторі чи самохідному транспортному засобі, а обробка даних має бути доступною та виконуватися швидко для контролю дози обприскування [5]. Рівень покриття або кількості рослин є типовими значеннями, які використовуються для керування польовим обприскуванням. Рівень охоплення можна розрахувати на основі зображення NDVI локальних польових умов [2], а кількість рослин на локальній сцені можна оцінити за допомогою додаткового алгоритму. NDVI — це параметр, який використовується для відокремлення життєво важливих пікселів рослин від пікселів ґрунту на зображенні або для відокремлення життєво важливих рослин від нежиттєво необхідних. Відбиття NIR є високим для життєво важливих рослин і низьким для ґрунту; рослини поглинають більше світла з довжинами хвиль червоного випромінювання, від 620 нм до 660 нм, ніж ґрунт [6,7]. Забезпеченість рослин поживними речовинами впливає на поглинання через активність хлорофілу в смузі переходу від червоного до NIR (660 нм до 740 нм) і, таким чином, відповідає стресу рослин [8]. Відображення в спектрі довжин хвиль нижче 740 нм вищі для рослин, ніж для ґрунту. Тому для NDVI завжди використовується смуга хвиль NIR нижче 780 нм. Таким чином, різниця між NIR і червоним є великою для рослин. У високоякісних заводських камерах, або камерах NDVI, використовуються два або більше чипів CCD;

наприклад, камери DuncanTech MS2100 і MS3100 мають налаштовані позиції пікселів. Оптичний шлях має бути скомпенсований і вирівняний для цього налаштування позицій пікселів, оскільки оптичний шлях довжин хвилей залежить від відхилення. Для порівняння, однокристальна конструкція для камери NDVI не потребує такої складної оптичної конструкції, але вимагає спеціального двосмутового фільтра для червоного та ближнього інфрачервоного діапазонів. Рабател'ята ін.[9] показав основний доступ до NDVI зі стандартними камерами в поєднанні з окремими смутовими фільтрами для червоної смуги та смуги NIR. Тому зросли дослідницькі інтереси щодо структури та дизайну однокристальних камер NDVI. З міркувань вартості, Річта ін. [10] замінили оптичний фільтр у споживчій камері та помітили, що потрібна компенсація експозиції. Просте застосування NDVI для виявлення рослин не є таким ефективним, як очікувалося, тому потрібне точне керування камерою та додаткове покращення NDVI. Лангнерта ін.[11] отримали кращі результати в Difference Index with Red Threshold (DIRT). Еванста ін.[12] удосконалили налаштування камери за допомогою регульованого різкого кристала для визначення NDVI і вимірювань червоного краю. У цьому дослідженні для вивчення цього підходу до надати нову інтелектуальну камеру NDVI порівняно з баточіповою камерою (3-чипова камера CCD, тип MS2100 від DuncanTech Company, Redlake Inc., Сан-Дієго, Каліфорнія, США). Було показано необхідність стандартної NDVI та результати було продемонстровано вдосконалений алгоритм NDVI.

## 2.1. Матеріали та методи

У наступному розділі описано NDVI та його застосування як камери заводу. Перш за все, ми демонструємо якість дороти (15 тис. €) мультиспектральної заводської камери. Для другої дороти однокристальної камери потрібні модифікації алгоритму, щоб застосувати до камери функції NDVI. Дороти датчик без ІЧ-фільтра був поєднаний з оптичним фільтром низьких частот на 645 нм (RG645, SCHOTT AG, 55122 Майнц, Німеччина) або

30

виготовленим на замовлення двосмутовим фільтром (ET620\_60br\_780\_900br від Chroma Technology GmbH (Ольхінг, Німеччина). Фільтр низьких частот пропускає довжини хвиль вище 645 нм (менша енергія) і блокує довжини хвиль нижче 645 нм (вища енергія). Двосмутовий фільтр пропускає довжини хвиль від 620 до 660 нм і від 780 до 900 нм. Ця повторна збірка увімкнула раніше заблоковану чутливість мікросхеми до ближнього інфрачервоного випромінювання та вимкнула чутливість до синього та зеленого у видимій смужі. З цією зміною синій і зелений канали вимірювали лише інтенсивність NIR, а червоний канал вимірював суму інтенсивностей сигналу червоного та NIR. Комбінація сигналів у червоних пікселях відрізняється від комбінації червоного сигналу та використовує синій та NIR-канали для розміщення сигналів NDVI. Ця комбінація є недоліком з точки зору насиченості пікселів, але є прийнятним компромісом для спрощеного налаштування. Використовуючи камеру з цифровим датчиком зображення, усі параметри камери можна налаштувати за допомогою програмного забезпечення, а налаштування камери можна виконати для оптимізації програми NDVI, але не кольорового зображення. Тому у використуванні камери має бути виконано автоматичний баланс білого, оскільки цей процес марний після модифікації оптичного фільтра. Подібним чином слід вимкнути автоматичне регулювання посилення та експозиції. Типова автоматична настройка часто оптимізована для зеленого кольору та ігнорує насиченість у червоному каналі, яку слід враховувати через зміну інтенсивності випромінювання в колішньому «зеленому» каналі. Що стосується моделі Байєра та повного контролю посилення пікселів, можна регулювати динамічний діапазон для нового каналу NIR і червоного. За допомогою адаптованої форми подібний NDVI можна обчислити на основі необроблених інтенсивностей пікселів Байєра, враховуючи, що дебаєрування або демозаїзація також виконано. Було обговорено ці результати та показано недоліки стандартного NDVI. Результати продемонстрували необхідність розширеного алгоритму NDVI, 2.1. NDVI NDVI

полегшує розрізнення рослин з пікселів ґрунту в цифровій камері та може використовуватися кількісно для отримання інформації про активність хлорофілу в рослині. Це можна використовувати для подальшого аналізу, але не можна виконати просто за допомогою зеленого каналу камери RGB. NDVI працює завдяки високому поглинанню в червоній смугі молекулами хлорофілу та підвищеному відображенню в смугі NIR. На малюнку 1 показано різницю між типовим спектром ґрунту та спектром рослин. Щоб отримати різницю сигналу незалежно від інтенсивності, сигнал нормалізується сумою червоного каналу та каналу NIR для обчислення NDVI, Раята ін.[13] пише Джонста ін.[14]:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (2.1)$$

NDVI використовувався в мультиспектральній камері (3-чипова камера CCD), типу MS2100, щоб відрізнити рослинний матеріал від фону ґрунту. Ця камера, виготовлена на замовлення, вимірює інтенсивність відбиття в червоному, інфрачервоному та зеленому діапазонах довжин хвиль і є основним компонентом системи машинного зору для запису бур'янів за допомогою датчиків [15]. Камерою керували за допомогою спеціального програмного забезпечення керування «DT», а розмір зображення становить  $659 \text{ Н} \times 494 \text{ В}$ . Обробка зображення проводилася за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (SYMACON GmbH, Варлен, Німеччина) і включає ерозію окремих пікселів. Програмне забезпечення для обробки зображень і контролю було запущено на пілозахисному промисловому комп'ютері, такому як PC-4 HE (PK Computer GmbH, Епштейн, Німеччина). Для визначення рівня покриття рослин використовувалася лише червоний (пікова довжина хвилі: 670 нм, розмір смуги пропускання: 22 нм) та інфрачервоний (пікова довжина хвилі: 800 нм, розмір смуги пропускання: 65 нм) використовувалася інтенсивність відбиття цієї камери з 3 мікросхемами.

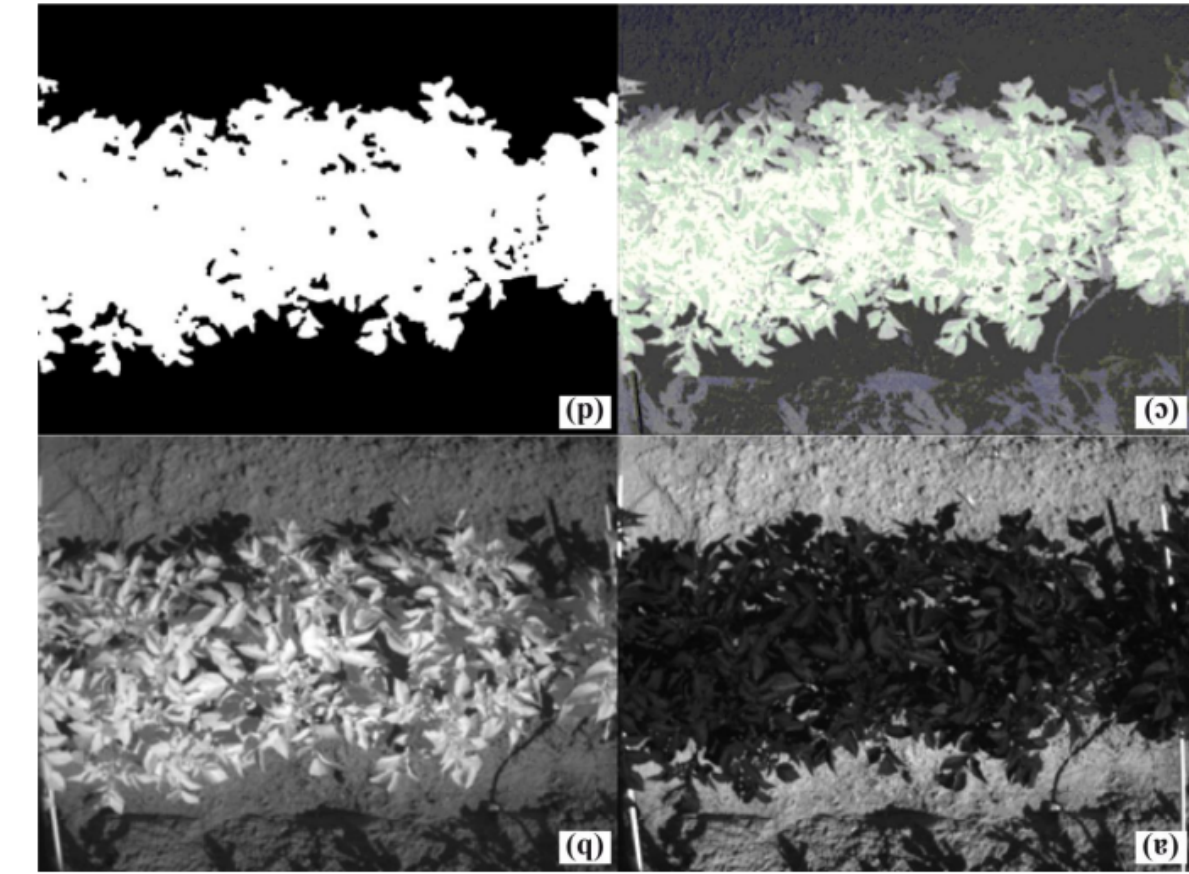


Рис 2.1. Рослини картоплі виявлені за допомогою мультиспектральної камери. Червоний канал (а), а канал NIR (b) були використані для розрахунку NDVI (в) і двійкові зображення (d) через порогове значення.

На рисунку 2.1 (a,b) показано приклади зображень рослин картоплі та ґрунту в червоному та ближньому інфрачервоному діапазонах. На основі цих зображень можна обчислити піксельну картинку NDVI. На рис 14 показані результати, і весь рослинний матеріал демонструє високі рівні інтенсивності; тіньові області на ґрунті знаходяться на середньому рівні, а ґрунт темний. Однак інтенсивність постійно зростає від темного ґрунту до яскравого рослинного рівня. Тому вибір правильного ручного порогоу для бінарного зображення не є тривіальним. Покращений NDVI або інший алгоритм, як-от колірний кут, може подолати цю проблему. Ця ситуація є критичною для рослин у тіньовій області, що відображає нашу потребу встановити покращений NDVI для нашої конструкції камери. Потім двійкове зображення можна



використовувати для вимірювання рівня рослинного покриття або, за допомогою використання вимірювання, кількості рослин або листя.

## 2.2. Спектральний відтук одного чіпа

Щоб розробити одночипову камеру для рослин, корисну для застосування в сільському господарстві, необхідно враховувати якість зображення за найгірших умов роботи. Щоб отримати такий рівень якості, необхідні різні алгоритми для багатоспектрального підходу щодо дизайну мікросхеми RGB. Крім того, загальний шлях від якості до цифрового зображення непростий [16]

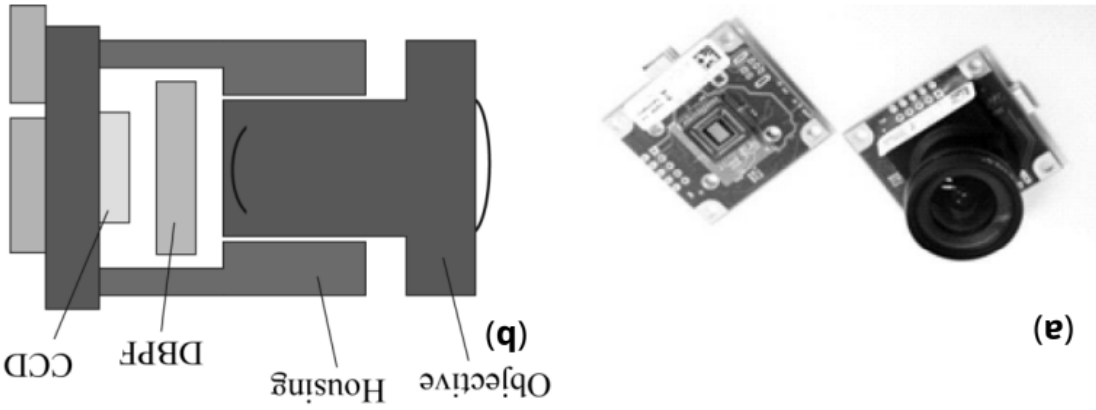
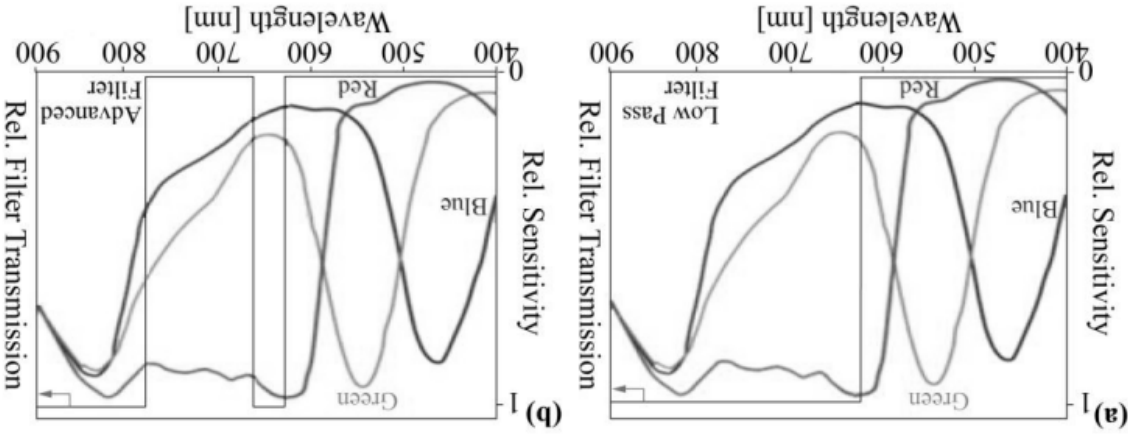


Рис. 2.2(а) Камера IDS USB UI-1226LE-M/-C і (б) план устанівки з реалізованим двосмутовим фільтром (DBPF).

Щоб оцінити можливість прийнятної одночипової камери, ми використали камеру IDS (рис. 2.2) із CMOS-датчиком зображення Aptina (Aptina Imaging Corporation, Сан-Хосе, Каліфорнія, США) на мікросхемі MT9V032STC із пікселями  $752 \text{ H} \times 480 \text{ V}$ .

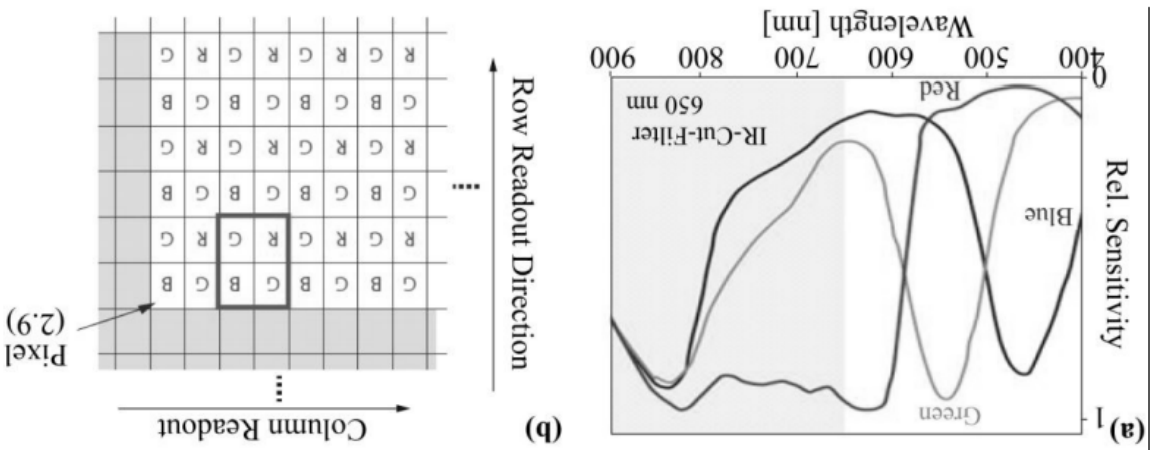
Замість IR-Cut-Filter (Малюнок 2.3(а)) фільтр низьких частот умикає чутливість NIR та вимикає зелену та синю чутливість чіпа (Рис. 2.4(а)). Ця єдина мікросхема RGB має асиметричний колірний візерунок. Зелені пікселі представлені вдвічі більше, ніж червоні та сині пікселі (рис. 2.3(б)). Тому фільтри.

Рис. 2.4(а) Увімкнення мікросхеми RGB CMOS для чутливості до червоного та NIR через ідеальні низькі частоти (b) або ідеальні двосмугові



Цей тип датчика має перевагу в тому, що після вимкнення ІЧ-фільтра всі пікселі стають чутливими в режимі NIR (Малюнок 2.3(а)), який необхідний для хороших зображень RGB. Для цього типу камери ІЧ-фільтр можна зняти після відкриття корпусу тримача об'єктива.

Рис. 2.3(а) Спектральний відгук датчика зображення MT9V032STC CMOS із таблиці даних IDS та (b) модель Байєра з таблиці даних Artna.



«зелена» точність є кращою з огляду на підвищену чутливість людського ока до зеленого кольору. Автоматичний контроль посилення камери змінює вихідні рівні кольорових смуг, але часто і в нашому випадку ця функція оптимізована для зеленого каналу, а не для червоного. Однак у наступному абзаці ми пояснюємо, чому автоматичне регулювання підсилення є марним і його потрібно вимкнути для камер заводу.

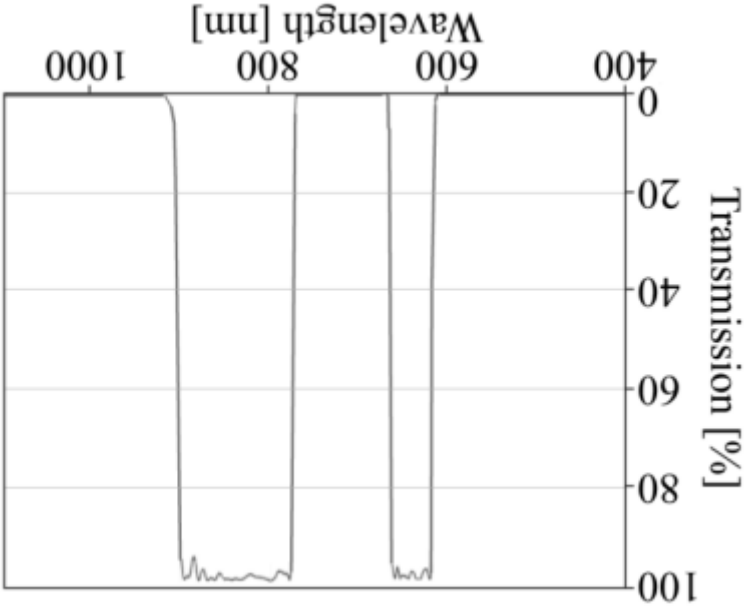


Рис. 2.5 Конструкція спеціального двосмугового фільтра ET620\_60 bp\_780\_900 bp від Chroma.

Завдяки застосуванню фільтра низьких частот чутливість до синього та зеленого вимикається, і ці пікселі тепер чутливі в діапазоні NIR. Червоний канал залишається чутливим як у червоному, так і в ближньому інфрачервоному діапазонах. Для більш точного розділення каналів NIR і червоного ми інтегрували налаштований покращений двосмуговий фільтр для червоного та NIR-діапазонів (рис. 2.4(b) і 2.5). Цей покращений фільтр усуває перехідна область між червоним і ближнім інфрачервоним діапазоном, а вихідна характеристика більш визначена заложно від довжин хвиль. З модифікацією оптичного шляху датчик зображення може використовуватися як NDVI заводська камера. Типове вихідне зображення з помилковими кольорами зображено на малюнку 19 із типовим червоно-білим виглядом.

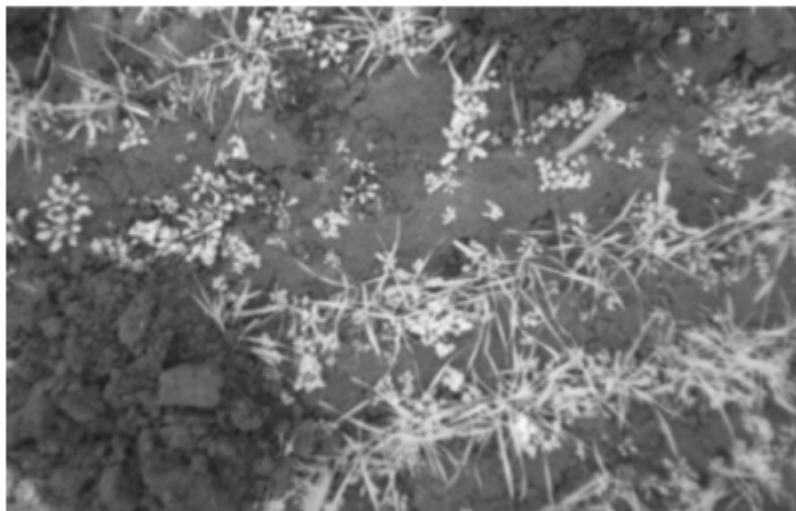
Схема Байера для цього датчика зображень показана на малюнку 2.3(b), і в кожній позиції пікселя можна виявити інформацію лише про один колір. Таким чином, більшість стандартних однокристальних камер RGB використовують алгоритм інтерполяції, щоб доповнити відсутню інформацію про колір у кожному пікселі. Існує багато різних алгоритмів для демозаїзації або дебаєрування необробленої матриці зображення, що покращує враження зображення, вирішуючи проблему відсутності інформації про колір за спеціального припущення сцени: використовується природне зображення, а роздільна здатність датчика зображення вища за роздільну здатність об'єкта накладання між пікселями. Обидва припущення не відповідають схемі нашої заводської камери. Камера не виявляє природних зображень після застосування

прямим сонячним світлом, що стає складнішим, як обговорюватиметься пізніше. Однак це зображення було зроблено за поточних умов розсіяного світла, а не під зображення. У результаті на цьому зображенні рослини виглядають білими. Однакова для всіх кольорних каналів, а  $R = G = B = 1$  перетворюється на білий для другим найбільш домінуючим кольором, оскільки чутливість NIR майже Червоний канал домінує через чутливість в обох діапазонах. Білий колір є

затвора становив 250 мкс.

забур'яненість озимої пшениці. Відстань свердління становила 14 см, а час

Рис. 2.6 Помилкове кольорове зображення модифікованої камери. Показано

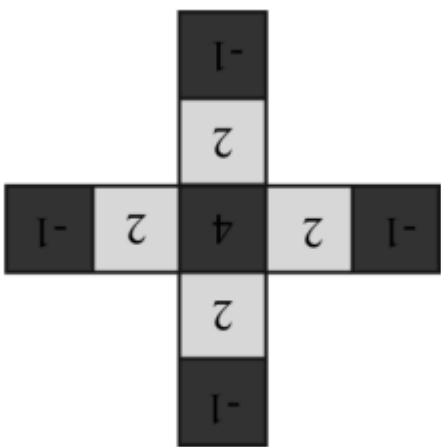


Для створення камери NDVI або заводської камери контроль підсилення є важливим фактором, оскільки необхідно запобігти насиченню пікселів. Насичений піксель створює несправильні результати для розрахунку NDVI і не випадає просто як яскравий піксель. Будуване в мікросхемі автоматичне регулювання посилення в нашій камері оптимізовано для зеленого кольору, який є домінуючим кольором для людського ока. Для NDVICMOS, червоний канал має тенденцію бути насиченим через комбіновану інтенсивність червоного та ближнього діапазонів хвилі. Щоб запобігти насиченню пікселів, деякі мікросхеми камери створюють піктограму разом із зображенням; інакше піктограма повинна бути розрахована. Що стосується найвищої інтенсивності

просту лінійну інтерполяцію для кожного окремого кольорового каналу. З одним пікселем NDVI. В іншому випадку також можна використовувати одну четвірку, наприклад червоний квадрат на малюнку 2.4(b), можна поєднати потрібно вимкнути. Якщо невідповідність між позиціями пікселів прийнятна, NDVI, буде відфільтровано, і тому він марний для нашої програми, і його різниця між червоним і зеленим каналами, які будуть використовуватися для Приклад фільтра демозаїзації на малюнку 2.7 показує, що контраст або

Malvar та ін. [17] від Microsoft Research.

Рис. 2.7 Приклад шаблону демозаїки та коефіцієнтів, що відповідають



з об'єктивом для метапиксельних камер. додаткового оптичного фільтра, а роздільна здатність пікселів низька порівняно

пикселів, може бути реалізована функція автоматичного регулювання посилення. Камеру слід запустити за тією ж процедурою, що й аналого-цифровий перетворювач ретівру послідовного надбиження. Камера починає працювати з його середнім налаштуванням посилення. Якщо є пикселі з найвищим бітовим значенням, посилення буде зменшено на половину діапазону. Інакше камера отримує більше посилення від  $1/2$  до  $3/4$  максимумального посилення. Потім процедура починається знову, і після восьми кроків виявляється правильне значення посилення з точністю до восьми біт. Після досягнення високої частоти кадрів камері потрібні лише невеликі варіації підсилення між зображеннями, оскільки саме зображення може змінюватися невеликими кроками. Щодо запобігання насичення пикселів, зменшення посилення буде ініціалізовано негайно, і підвищення посилення буде ініціалізовано після того, як інтенсивність пикселів зменшиться до визначеного поругу. Таким чином, буде реалізовано гістерезис для зменшення коливань малого рівня. Камера підключається через USB порт до ПК. За допомогою програмного інтерфейсу ActiveX від Microsoft посиленням і часом витримки можна керувати можна керувати вручну або автоматично за допомогою розробленої програми на мові програмування Matlab. У більшості випадків чипи камери мають більше ніж один ступінь підсилення, і перше підсилення має бути на найвищому рівні, щоб оптимізувати співвідношення сигнал/шум чипа. За допомогою програмного інтерфейсу ActiveX від Microsoft посиленням і часом витримки можна керувати вручну або автоматично за допомогою розробленої програми на мові програмування Matlab. У більшості випадків чипи камери мають більше ніж один ступінь підсилення, і перше підсилення має бути на найвищому рівні, щоб оптимізувати співвідношення сигнал/шум чипа. За допомогою програмного інтерфейсу ActiveX від Microsoft посиленням і часом витримки можна керувати вручну або автоматично за допомогою розробленої програми на мові програмування Matlab. У більшості випадків чипи камери мають більше ніж один ступінь підсилення, і перше підсилення має бути на найвищому рівні, щоб оптимізувати співвідношення сигнал/шум чипа.

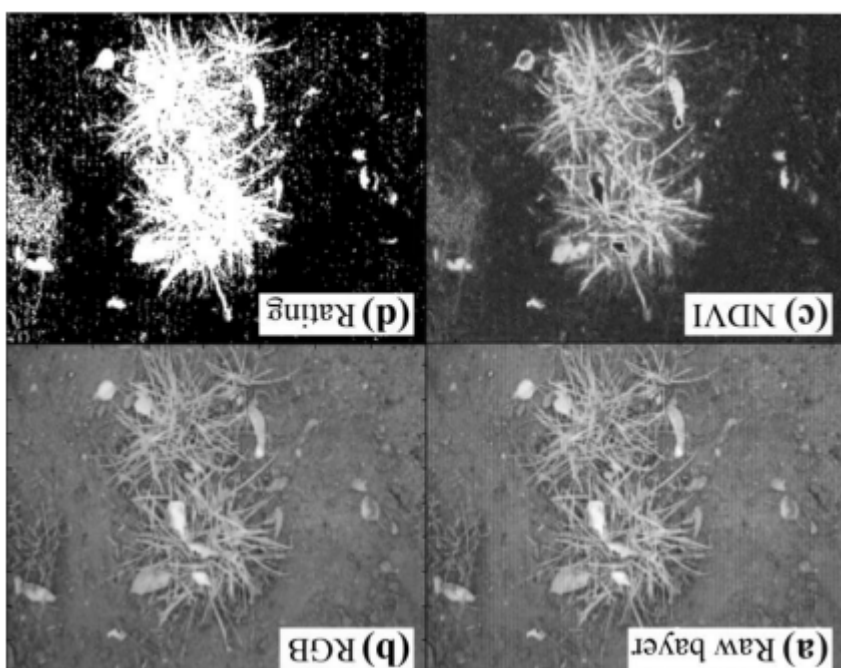
### 2.3. Умови вимірювання

Щоб описати складнощі NDVI, обчисленого за допомогою однокристальної камери завду за зовнішніх умов, у цьому параграфі описано найкращі та найгірші умови освітлення. Найкращі погодні умови спостерігаються в однорідний похмурий день, коли існує лише розсіяне світло. Розсіяне світло створює зображення, на якому немає тінювих областей, а загальний динамічний діапазон зменшується. Найгіршим є яскраве кутове пряме сонячне світло, оскільки тінюві області мають більш ніж у десять разів меншу інтенсивність, а отже, потрібен значно вищий динамічний діапазон. Крім того, кількісне значення NDVI змінюється від області тіні до області сонячного світла, оскільки співвідношення NIR до червоного змінюється для атмосферного розсіяного світла, яке освітлює область тіні. Розсіювання залежить від четвертого ступеня довжини хвилі. NIR-світло менш розсіюється та має меншу інтенсивність у тінювих областях, але коли тінь проходить крізь лист або саму рослину, виникає протилежна ситуація, оскільки NIR-світло має більшу пропускну здатність, ніж полінене червоне світло. Тому в області тіні існує невелика інтенсивність невідомої комбінації атмосферного розсіяного світла та світла, що проходить через рослини. Враховуючи нормований індекс, ці ефекти також можуть відобразити той факт, що тінюві області грядку яскравіші, ніж сонячні області грядку. В області тіні існує невелика інтенсивність невідомого поєднання атмосферного розсіяного світла та світла, що проходить через рослини.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \rightarrow NDVI_{CMOS} = \frac{(B + G) - R}{R} \quad (2.2)$$

Враховуюючи нормований індекс, ці ефекти також можуть відображати той факт, що тіньові області ґрунту яскравіші, ніж сонячні області ґрунту. Розсіяного світла та світла, що проходить через рослини. Враховуючи тіні існує невелика інтенсивність невідомого походження атмосферного факт, що тіньові області ґрунту яскравіші, ніж сонячні області ґрунту. Враховуючи нормований індекс, ці ефекти також можуть відображати той факт, що тіньові області ґрунту яскравіші, ніж сонячні області ґрунту.

Розсіяного світла та з часом затвора 250 мкс. Вселіки від синього (нуль) до червоного (256) і (d) бінарне зображення в умовах (b) несправильне кольорове зображення, (в) зображення NDVI у кольорах (a) Необроблене зображення пучків трави та листя, доланих вітром,





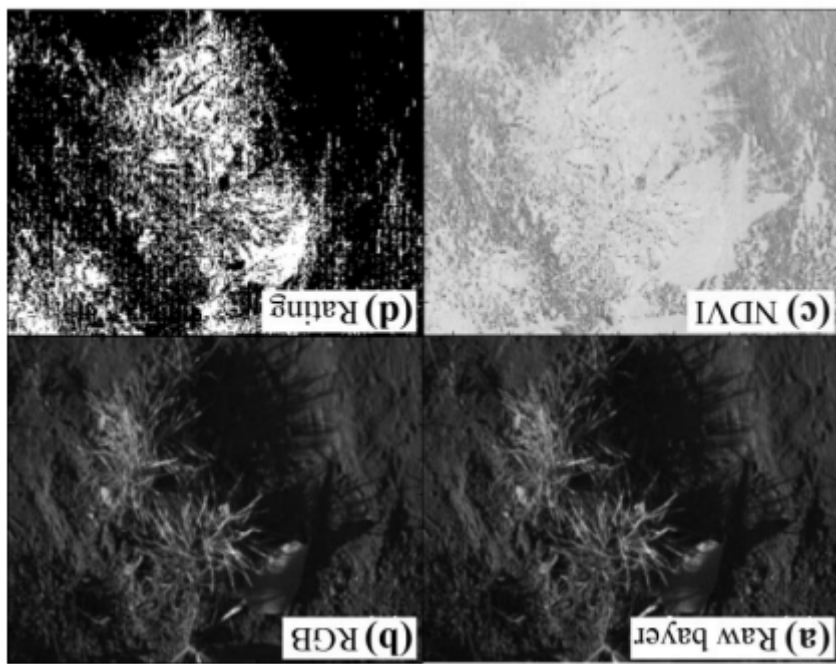
Найскладніші умови під кутовим сонячним світлом показано на малюнку 2.8, демонструючи, що майже немає контрасту між рослинами та ґрунтом у тіньовій області. Таким чином, обидва (всі) зображення NDVI потребують

допомогою адаптованих алгоритмів. Найскладніші умови під кутовим сонячним світлом показано на малюнку 2.8, демонструючи, що майже немає контрасту між рослинами та ґрунтом у тіньовій області. Таким чином, обидва (всі) зображення NDVI потребують допомоги адаптованих алгоритмів. Найскладніші умови під кутовим сонячним світлом показано на малюнку 2.8, демонструючи, що майже немає контрасту між рослинами та ґрунтом у тіньовій області. Таким чином, обидва (всі) зображення NDVI потребують

прямої кутовим сонячним світлом і витримкою 90 мкс.

всесилки від синього (нуль) до червоного (256) і (d) бінарне зображення під (b) непрайльне кольорове зображення, (в) зображення NDVI у кольорах

Рис 2.9(a) Необроблене зображення пучків трави та листя, доданих вітром,



певного вдосконалення в алгоритмах, щоб подолати ці недоліки. Різниця між мінімальними та максимальними значеннями інтенсивності пікселів надає інформацію про динамічний діапазон та умови освітлення на полі. Примітно, що важко отримати однакові результати для умов розсіяного світла та прямого сонячного світла. Необхідно враховувати наступні труднощі, щоб встановити одночипову заводську камеру:

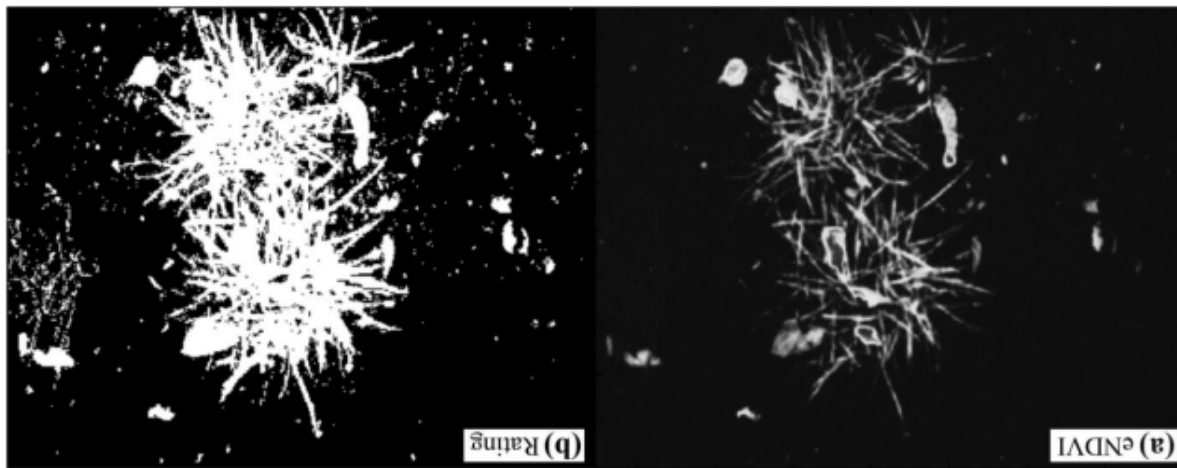
- NDVICMOS може бути швидше пошкоджено насиченістю пікселів через чутливість R-каналу до червоного та ближнього інфрачервоного світла.
- В умовах прямого сонячного світла пороговий рівень відрізняється в тінювій області зображення, що призводить до несправильної класифікації.
- Важко застосувати адекватний пороговий рівень навіть за умов найкращого розсіяного освітлення, оскільки поперечний зріз ґрунту та рослин перекривають значення NDVI.
- Покращені алгоритми рішення мають бути зрозумілими для встановлення в великих вбудованих системах для долатків онлайн-контролю.

Хоча рівняння (4) для NDVI здається простим, для вбудованої системи з невеликим процесором, таким як мікроконтролер із тактовою частотою 100 МГц, необхідна значна потужність обчислення. Хоча фактичний прототип використовує ПК для обчислень, це не є недорогим рішенням для вбудованої системи. Усі використовувані формули слід звести до мінімуму з точки зору обчислювальної потужності для вбудованої системи, особливо коли необхідно включити долаткові функції. Майбутня версія повинна використовувати функцію автоматичного регулювання посилення для встановлення більш-менш стабільної інтенсивності, якщо доступні контроль освітлення та еталонний фон. Якщо ця програма викликає стабільний знаменник (NIR + червоний), обчислення енергетичного ділення для нормалізації не потрібне. Як альтернатива, 3.2. Покращений NDVICMOS Алгоритм для однокристальної камери, що використовується в умовах розсіяного світла Значно, що рослини мають високу інтенсивність у діапазоні NIR за будь-яких умов освітлення, має бути можливим посилити контраст розсіяного ґрунту за допомогою піксельної

Співвідношення білих і чорних пікселів відповідає рівню покриття, і цю кореляцію можна безпосередньо використовувати для керування потужністю дози розпилення польового обприскувача. Результат також можна використовувати для маскування виділення додаткових ознак, таких як форма чи контур, або для кількісного аналізу інформації про завод NDVI. Таким чином, алгоритми для eNDVICMOS прості та можуть бути легко встановлені на

двійкове зображення.

Рис. 2.10(a) Зображення eNDVICMOS з необробленими даними з рисунка 2.9 у кольорах веселки від синього (нуль) до червоного (256) і (b) отримане



Застосований коефіцієнт посилення, пропорційний інтенсивності NIR, призводить до зникнення рівня інтенсивності для пікселів ґрунту, навіть у внутрішніх областях двох пучків трави в центрі зображення (Рис. 2.9(a)). Було встановлено поріг для правильного оцінювання, і лише кілька пікселів ґрунту були неправильно класифіковані (Рис. 2.10(b)). Виділення одного пікселя або п'ятичочковий фільтр Гауса видаляє більшість неправильних пікселів.

$$eNDVICMOS = \frac{R}{(B+G) - R} \cdot \left\{ \frac{B+G}{2} \right\} \quad (2.3)$$

близького інфрачервоного випромінювання: пікселів будуть помножені на середнє значення кольорних пікселів B і G чистого CMOS(eNDVICMOS) Рівняння (5) розширено таким чином, що всі результати інформації кольорового каналу NIR. Для розширеного NDVI

невеликих платах мікроконтролерів або програмованих вентильних матриць (FPGA). Однак ця ситуація може змінитися в умовах прямого сонячного світла, де є NDVICMOS не може ефективно відокремити рослини від ґрунту в тіньових областях зображення.

В умовах прямого сонячного світла динамічний діапазон інтенсивності пікселів значно вищий, і спектральні умови для освітлення також змінюються для тіньової області, як описано вище. Таким чином, ми не змогли розрахувати пороговий рівень, який працює для обох областей. Область тіні постійно була недостатньо представлена за допомогою порогових значень для області яскравого сонячного світла. Тому необхідна нелінійна функція підсилення, яку було отримано з досліджених зображень. Рівняння (3) розширено нелінійною функцією  $f(x)$ , де  $x$  представляє інтенсивність пікселів від нуля до одиниці:

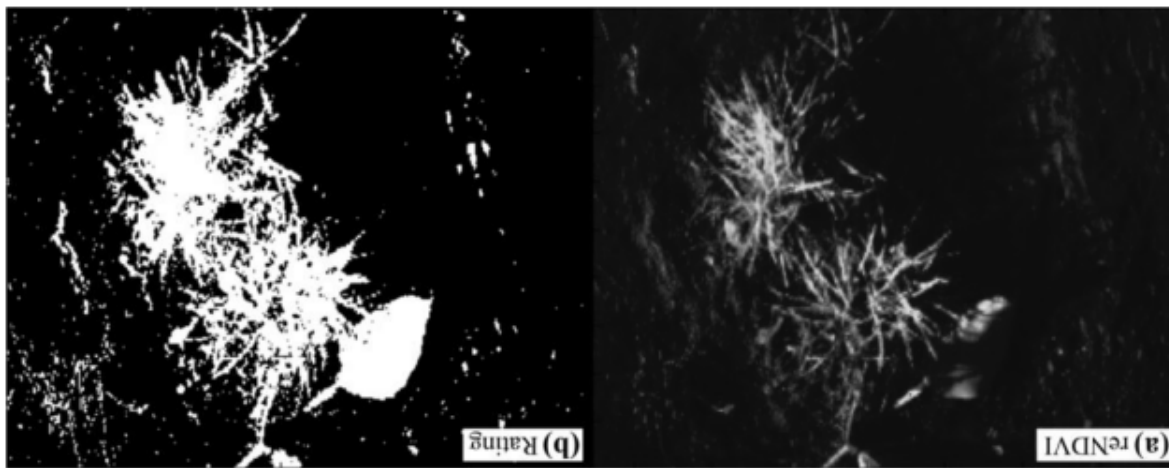
$$(2.4) \quad reNDVICMOS = \frac{R}{(B+G)-R} \cdot \left\{ \frac{2}{B+G} \cdot f(x) \right\} \cdot f(x) \quad \left| \begin{array}{l} f(x) = 1; \\ f(x) = 3 - 10 \cdot x; \\ f(x) = 2; \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} 0.2 < x < 1.0 \\ 0.1 < x \leq 0.2 \\ 0.0 \leq x < 0.1 \end{array}$$

NDVI з розширеним діапазоном CMOS(reNDVICMOS) може подлати цю проблему, оскільки пікселі низького рівня посилюються в тіньовій області. Формула була емпірично визначена з кількох нормалізованих зображень, і вона покращує зображення для всіх умов освітлення. Тоді як порогове значення завжди є критичним для значень NDVI

Для регіону тіньового ґрунту NDVI є надмірно представленим, а для reNDVICMOS поріг 0,1 є майже розумним. Застосування NDVI з розширеним діапазоном CMOS алгоритм до зображення на Рис. 2.8(с) генерував результати, показані на Рис. 2.11. Поєднання eNDVI і нелінійної функції вирішує проблему порогів для зображень із широким динамічним діапазоном. По-перше, вищий коефіцієнт посилення сигналу NIR поширюється від рослини до ґрунту в критичній тіньовій області, а на Рис. 2.11(а) велике листя демонструє підвищену яскравість навіть у тіні.

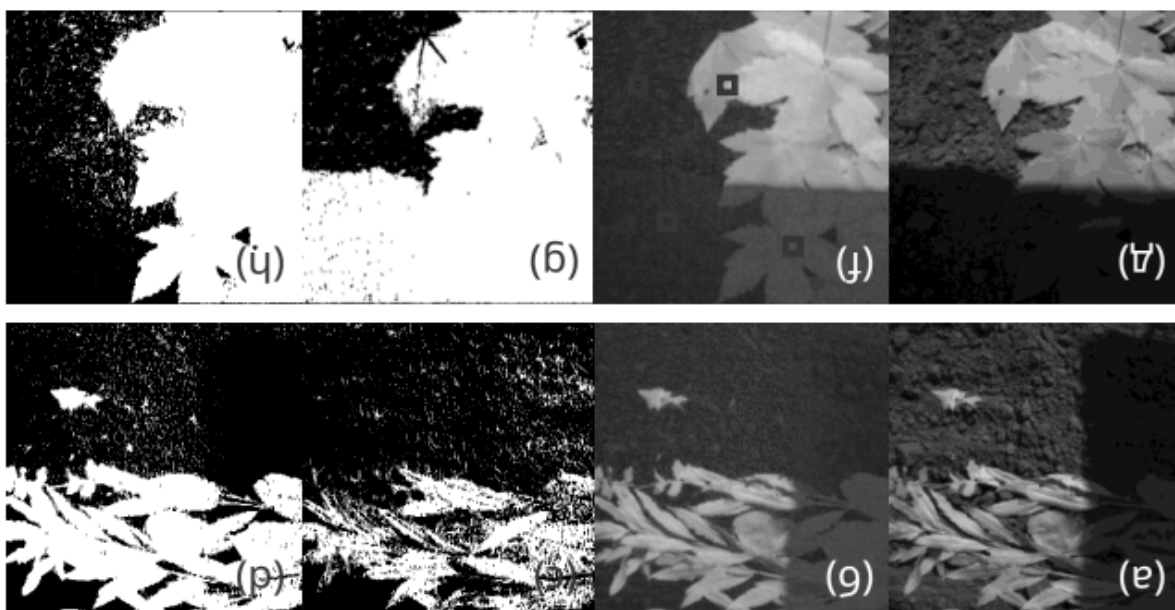
відфільтрований двійковий результат Гауса за п'ятьма точками.

Рис 2.12(a) Зображення застосованого гeNDVI із необробленими даними з рисунка 2.11 у кольорах веселки від синього (нуль) до червоного (256) та (b) відфільтрований двійковий результат Гауса за п'ятьма точками.



відфільтрованими за п'ятьма точками Гауса.

Рис 2.11(a) Необроблене зображення ситуації з високим динамічним діапазоном ґрунту, покритого частково листям, (b) прикладний гeNDVI, (в) бінарне зображення NDVI, (d) бінарне зображення гeNDVI, (e) бінарне зображення NDVI, (f) прикладний гeNDVI, (g) бінарне зображення NDVI та (ч) частково зображення гeNDVI. Усі двійкові зображення є результатами бінарне зображення гeNDVI. Усі двійкові зображення є результатами бінарне зображення гeNDVI.



По-друге, додаткове посилення для всіх низьких інтенсивностей покращує цю область, і рослини можна захопити за допомогою одного порогу для всього зображення. На рисунку 2.11(b) показаний майже ідеальний контур листя на бінарному зображенні після застосування  $\tau$ NDVI. Очевидно, що легше отримати кращий NDVI та оцінити результати за допомогою високопродуктивних камер, оснащених вищим динамічним діапазоном і меншим піксельним шумом, але отримання прийнятних результатів за допомогою недорогої однокристальної камери для виявлення рослин вимагається для багатьох сільськогосподарських програм. 2.11 і 2.13 демонструють перевагу застосованого алгоритму. Для встановлення цих результатів необхідний контроль посилення.

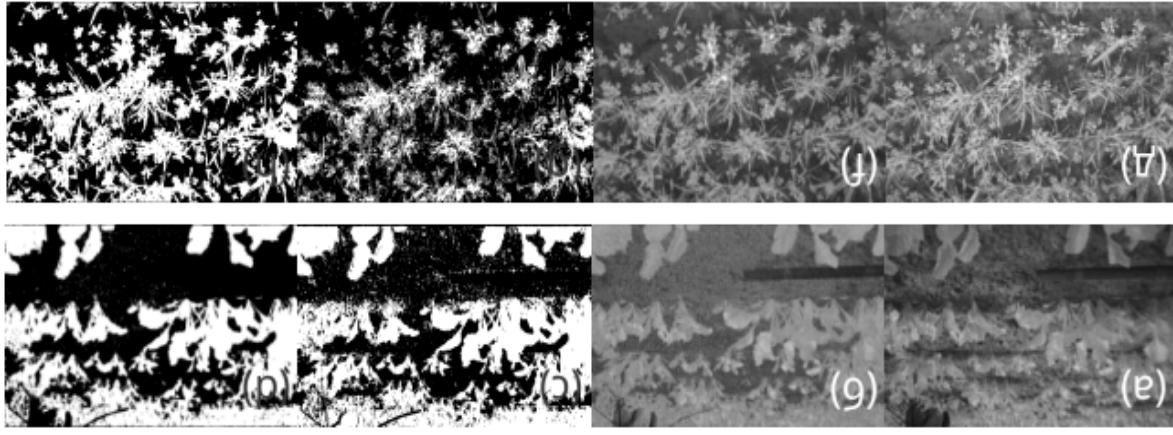


Рис. 2.13(a) Необроблене зображення поля салату (надано Cluse Lerpelmann Kognitionstechnik GmbH), (b) зображення  $\tau$ NDVI, (в) бінарне зображення NDVI, (d) бінарне зображення  $\tau$ NDVI, (e) необроблене зображення озимої пшениці в стані раннього росту в Потсдамі, Німеччина, (f) зображення  $\tau$ NDVI, (g) бінарне зображення NDVI та (ч) бінарне зображення  $\tau$ NDVI. Усі двійкові зображення є результатом, відфільтрованими за п'ятьма точками Гауса.

Заобігання насичення пікселів є важливим, щоб уникнути неправильної класифікації. Як описано R-канал містить інтенсивності червоного та ближнього інфрачервоного променів і, отже, спочатку насичений. Скривається будівлі на несільськогосподарському зображенні на малюнку 2.14 із насиченим

пікселем демонструє неправильну класифікацію як для NDVI, так і для  $\tau$ NDVICMOS зображення на рисунку 2.14(c,d). Крім цього,  $\tau$ NDVICMOS може точніше класифікувати траву в тіньовій області та дерева.

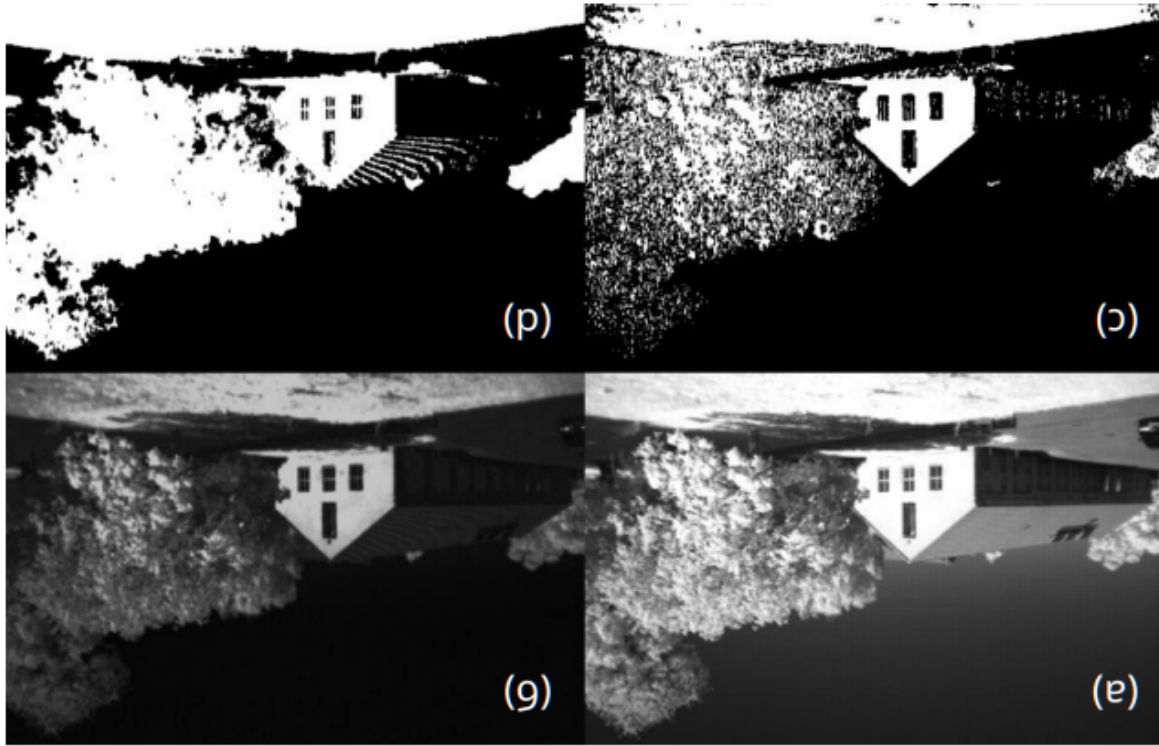


Рис. 2.14(a) Необроблене зображення пейзажу під прямим сонячним світлом, (b)  $\tau$ NDVICMOS зображення, (в) двійкове зображення для NDVI та (d) бінарне зображення для  $\tau$ NDVICMOS. Обидва двійкові зображення є результатами, відфільтрованими за п'ятьма точками Гауса.

## 2.4. Висновок

Результати демонструють, що камеру для виявлення рослин було розроблено з новою схемою конструкції оптичного фільтра для отримання недорогого датчика цифрового зображення. Цей фільтр вимикає синій і зелений чутливість до кольору та забезпечує справжній шлях світла NIR у режимі 850 нм. Тому сині та зелені пікселі можна використовувати для нових, чистих каналів NIR. Контрастність зображення NDVI можна оптимізувати за допомогою більш специфічного оптичного фільтра. Тоді як простий фільтр низьких частот працює, подвійний смуговий фільтр для пропускання червоної смуги від 620 нм до 660 нм і діапазону NIR від 780 до 900 нм усуває

інтенсивність між двома смугами пропускання. Це призводить до усунення перехідної області чутливості ближнього інфрачервоного випромінювання різних каналів камери, і, отже, вихідний відгук є кращим. Використання необробленого зображення Байєра ПЗ-чипа зменшує кількість пікселів; отже, шина даних до блоку обробки не була перевантажена великими масивами RGB, які мали б місце у форматі tiff. Користувач може вирішити, чи важливі ресурсами пам'яті та потужності процесора, чи потрібен алгоритм дебаєрування для заповнення пікселів. Будь-яка стратегія використовується однаково, а алгоритм, отриманий від камери, має бути вимкнено, оскільки він оптимізований для природних зображень RGB і непридатний для зображення NDVI. Це також вірно для оптимізованих зеленим кольором функції автоматичного регулювання підсилення, оскільки новий «червоний» канал є найбільш домінуючим із сумарною інтенсивністю червоного та ближнього інфрачервоного діапазону. Таким чином, повний контроль пікселів є незамінним для однокристалльної камери завду. У той час як NDVI є добре відомим і часто використовуваним індексом для збору інформаційного вмісту рослин, безпосереднє застосування недорогої однокристалльної камери рослин є складним за реальних зовнішніх умов. Тому простий поріг для виявлення, наприклад, рівня покриття недостатній. Навіть за найкращих умов освітлення, тобто розсіяного світла, NDVI потребує певного влосконалення, щоб досягти достатньої продуктивності чи точності для рівня покриття. Для NDVI ми продемонстрували, що множення з використанням середніх значень обох каналів NIR дає успішну оцінку для відлічення рослинного ґрунту. Однак за найгірших умов освітлення з кутвим сонячним світлом потрібен ще кращий алгоритм. Під кутвим сонячним світлом, як мінімум, сама рослина створює затінені області на зображенні. У цих затіненних областях, можна було використовувати той самий поріг для відлічення рослин від ґрунту. Однак рослини були недостатньо представлені, використовуючи цей поріг для яскравих ділянок. Встановлення розширеного діапазону NDVI може



49

подолати цей недолік, і листя з яскравими ділянками та тінями можна буде ефективно відокремити від ґрунту. Це може бути досягнуто за допомогою нелінійного підсилення, яке додатково підсилює значення низького рівня та підвищує значення для області завду, які знаходяться в тіні, над пороговим значенням. Більш алгоритм потребує невеликої кількості додаткових обчислювальних потужностей і тому може бути легко встановлений у невеликій вбудованій системі з мікроконтролером або FPGA. Оскільки алгоритм для eNDVI та reNDVI наразі достатньо, наступними кроками є реалізація алгоритму автоматичного визначення порогів для камери автономного завду. Результати потім будуть проаналізовані успішною стратегією впровадження, як буде показано в майбутніх дослідженнях.

### РОЗДІЛ 3. ОТРИМАННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ДІАПАЗОНІВ NDVI З ОДНІЄЇ СТАНДАРТНОЇ ЦИФРОВОЇ КАМЕРИ RGB: МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД

Мультиспектральні зображення, включаючи червоні та ближні інфрачервоні смуги, довели свою ефективність для розрізнення рослинності та ґрунту та сільськогосподарського моніторингу в програмах дистанційного зондування. Але вони рідко використовуються в наземних зображеннях і зображеннях БІЛІА через обмежену доступність адекватних пристроїв 2D зображень. У цьому документі пропонується загальна методологія для одночасного отримання ближнього інфрачервоного та червоного діапазонів від стандартної камери RGB після видалення блокуючого фільтра ближнього інфрачервоного діапазону всередині. Цей метод застосовано з двома дзеркальними фотоапаратами нового покоління (Canon 500D і Sigma SD14). Значення NDVI, отримані цими пристроями, порівнювали з еталонними значеннями для набору спектрів яскравості ґрунту та рослинності. Якість результатів показує, що смуги NDVI тепер можна отримати за допомогою пристроїв 2D-зображення з високою просторовою роздільною здатністю.

Нормалізований індекс різниці рослинності, або NDVI, запроваджений на початку сімдесятих років [1], сьогодні залишається дуже популярним інструментом у сільності дистанційного зондування, яка займається сільськогосподарським моніторингом. Це головним чином завдяки його чудовій здатності відрізняти рослинність від іншого матеріалу на багатоспектральних супутникових зображеннях. Зелена рослинність характеризується високим коефіцієнтом відбиття в ближньому інфрачервоному діапазоні (завдяки від 50 до 80%), що контрастує з дуже низьким коефіцієнтом відбиття в червоному діапазоні довжин хвиль через поглинання хлорофілу. Назвемо R та NIR цифрові відліки, отримані в червоному та ближньому інфрачервоному діапазонах багатоспектрального датчика. NDVI, виражений як:

це скалярне значення в діапазоні [-1, 1]. Чим вище це значення, тим вище ймовірність того, що воно відповідає зеленій рослинності. За розширенням, численні були зроблені спроби прямо пов'язати NDVI або інші похідні індекси на основі R та NIR з агрономічними індексами, такими як біомаса та LAI (індекс площі листя) [2], [3], [4].

Популярність NDVI у дистанційному зондуванні була широко підтримана наявністю каналів R та NIR на більшості датчиків супутникового лінійного сканування (Landsat, SPOT тощо). На жаль, це не стосується додатків моніторингу врожаю в нижчому просторовому масштабі: більшість систем бачення, вбудованих у наземні транспортні засоби або БПЛА (безпілотні літальні апарати), які потребують 2D-сенсорів, базуються на стандартних кольорових камерах, що призводить до проблем із надійністю рослинності. Виявлення. У більшості кольорових камер канали RGB отримують шляхом встановлення мозаїки мікрофільтрів (матриці Байєра) безпосередньо на сенсорі CCD (або CMOS). Це рішення вимагає дуже великого масштабу виробництва, і неможливо передбачити розробку конкретних байєрових матриць ближнього інфрачервоного діапазону для ринку моніторингу рослинності. Тому для застосування в сільському господарстві деякі виробники камер пропонують пристрої з декількома ПЗС, включаючи ближній інфрачервоний канал, наприклад MS-4100 (Geospatial Systems Inc., Best Генрієтта, Нью-Йорк, США) або AD-080 (JAI Ltd, Йокогама, Японія). Але ціна їх часто буває непомірно високою. Крім того, їх просторова роздільна здатність навряд чи достатня для отримання зображень БПЛА. Щоб подолати цю ситуацію, деякі кінцеві користувачі камер, яким потрібен ближній інфрачервоний канал, розробили альтернативні рішення на основі стандартних RGB-камер із матрицею Байєра, скориставшись небажаною властивістю їхніх силіцієвих датчиків: оскільки кольорові фільтри в матриці Байєра мають обмежену дію фільтрації. у видимій області виробники камер змушені додати фільтр блокування блинкового

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (3.1)$$

інфрачервоного випромінювання, щоб відповідати вимогам природної колориметрії. Вилучивши цей додатковий фільтр, ми отримуємо модифіковану камеру, чутливу до ближнього інфрачервоного випромінювання. Таким чином, першою можливістю отримати окремі діапазони R та NIR є одночасне використання стандартної та модифікованої кольорової камери, причому друга оснащена фільтром ближньої інфрачервоної смуги пропускання [5]. Однак виникають важливі питання щодо вирівнювання пікселів двох отриманих зображень [6]. Інший цікавий підхід полягає у використанні однієї модифікованої камери, пов'язаної з фільтром низьких частот, і створення ближнього інфрачервоного діапазону як спеціальної лінійної комбінації трьох отриманих каналів. Цю концепцію можна проілюструвати так: Припустимо, що ми маємо ідеальну модифіковану RGB-камеру, де три канали R, G, B забезпечують цифрові відліки, відповідно рівні  $R+NIR$ ,  $G+NIR$ ,  $B+NIR$ . Якщо ми додамо фільтр низьких частот перед об'єктивом, який блокує сині довжини хвилі, то ми отримаємо лише компонент NIR на синьому каналі. Цей компонент можна відняти від інших цифрових підрахунків каналу, що, нарешті, призводить до компонентів R, G та NIR. У реальному світі чутливість кожного каналу неможливо змодельовувати так просто, і для визначення необхідного фільтра низьких частот і лінійної комбінації для даної камери необхідно провести спеціальне дослідження. Досі цей підхід застосовувала компанія TetraCam (TetraCam Inc. Chatsworth, CA, USA) у своїх сільськогосподарських камерах (серія ADC). Проте їх просторова роздільна здатність (~3 Мікселів) не відповідає поточному стандарту фотокамер RGB (більше 10 Мікселів). Мета цього дослідження — формалізувати цей останній підхід і показати, як його можна розширити до останнього покоління комерційних датчиків зображення RGB, щоб поєднати надійну спектральну інформацію про рослинність із дуже високою просторовою роздільною здатністю. Запропоновано загальну методологію для визначення оптимального фільтра низьких частот і лінійної комбінації для практично будь-якої модифікованої камери RGB, якщо відомі її криві чутливості. Далі представлені результати, отримані за допомогою двох

комерційних пристроїв для обробки зображень, що представляють останні еволюції сенсорних технологій, Canon 500D (Canon, Tokyo, Японія) і Sigma SD14 (Sigma, Kawasaki, Японія).

### 3.1. Теоретичний підхід BSNP

Основна ідея, розроблена тут, полягає в моделюванні бажаної спектральної чутливості (далі її називають цільовою чутливістю) шляхом лінійної комбінації реальних спектральних чутливостей, доступних для даного датчика, пов'язаного з фільтром низьких частот. Далі ми формально виразимо цю лінійну комбінацію, а потім запропонуємо метод визначення оптимального фільтра низьких частот, який буде пов'язаний із датчиком.

Формально спектральну чутливість каналу датчика (або діапазону) можна охарактеризувати функцією  $v(\lambda)$  довжини хвилі. Він генерується для даного освітлення  $d(\lambda)$ , цифровий рахунок:

$$DC = \int_0^{\infty} e(\lambda) \cdot v(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3.2)$$

З практичних міркувань далі ми розглянемо обмежений діапазон довжин хвилі і обмежену спектральну роздільну здатність, що дозволяє нам розглядати будь-яку спектральну функцію як вектор у спектральному просторі розмірності, що призводить до дискретного виразу:

$$DC = \sum_{i=1}^n e(\lambda_i) \cdot v(\lambda_i) = E \cdot V \quad (3.3)$$

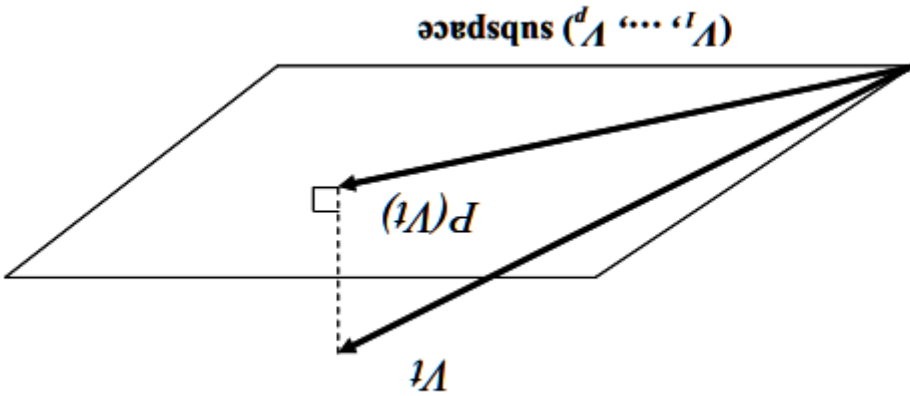
де  $E$  і  $V$  є векторами розмірності  $E \times V$  і  $V$  є їх скалярним добутком. Відповідно до цього формалізму назвемо  $V_1, \dots, V_n$  векторфактичні чутливості  $p$ -смуґ датчика зображення. Шляхом лінійної комбінації  $V_1, \dots, V_n$  ми можемо імітувати будь-яку віртуальну чутливість  $v$  що належить підпростору, породженому векторною базою  $(V_1, \dots, V_n)$ . Тепер давайте розглянемо задану цільову чутливість  $v$  як ми хочемо імітувати. У загальному випадку  $v$  не належатиме

У нашому випадку значення  $SAM(B_t, \Pi(B_t))$  ідеально має дорівнювати нулю, тобто  $B_t$  належить підпростору  $(B_1, \dots, B_{\text{стор}})$ . У реальному випадку, коли початкова спектральна чутливість різних каналів є характеристикою датчика, немає априорних підстав для виконання цієї вимоги. Давайте позвонимо  $(B^* 1, \dots, B^* \text{стор})$  ця початкова чутливість. Наш єдиний ступінь свободи для покращення ситуації полягає в тому, щоб пов'язати з датчиком оптичний фільтр (наприклад, встановивши його перед об'єктивом) зі

$$SAM(v_1, v_2) = \cos\left(\frac{v_1 \cdot v_2}{\|v_1\| \cdot \|v_2\|}\right) \quad (3.4)$$

між двома векторами  $v_1$  і  $v_2$  евклідових норм  $\|v_1\|$  і  $\|v_2\|$  як: спектральних даних  $SAM$ , або Spectral Angle Mapper [7]. Ця міра визначає кут близький до цільового вектора  $B_t$ . Зазвичай використовується міра подібності це не гарантує задовільного результату. Ми ще маємо це перевірити  $\Pi(B_t)$  чутливість  $B_t$ , вектор проєкції  $\Pi(B_t)$ , визначені вище, завжди існують, але Яким би не був набір спектральних чутливостей  $B_1, \dots, B_{\text{стор}}$  і цільову

Рис. 3.1 Ілюстрація ортогональної проєкції чутливості мішені  $B_t$



проєкція  $B_t$  можна виразити як:  $(\Pi, \text{стор})$  матриця, стовпцями якої є  $B_1, \dots, B_{\text{стор}}$  вектори. Ортогональна на  $(B_1, \dots, B_{\text{стор}})$  підпростір (рис. 3.1). Давайте позвонимо  $B = [B_1 \dots B_{\text{стор}}]$  цьому підпростору, а краще наблизення  $B_t$  буде його ортогональною проєкцією

спектральним коефіцієнтом пропускання  $\Phi$ , що призводить до зміненого набору чутливості:

$$(V_1, \dots, V^p) = (F \cdot V_1^*, \dots, F \cdot V^p) \quad (3.5)$$

Таким чином, наша мета полягає в тому, щоб визначити оптичний фільтр  $F$ ,

який мінімізує СЕМ між ціли  $V_i$  його проєкція  $\Pi(V_i)$ , згідно з рівняннями (3.4) і (3.8). Першим можливим методом буде прямий пошук оптимального фільтра  $F_V$

спектральному простору методами мінімізації. Такий метод буде досягти складним для розробки, але в цілому він може призвести до нерезалізованих складних фільтрів, якщо не ввести обмеження позитивності та плавності. На поточному етапі, відповідно до перших міркувань, описаних у вступі, ми вирішили зменшити складність проблеми, розглядаючи лише прості фільтри низьких частот як  $F_{\text{кандидатів}}$ . Головною перевагою є подальша можливість реалізації розчину за допомогою готових желятинових або скляних фільтрів.

The СЕМ наведений вище критерій використовувався для визначення набору векторів  $\Pi(V_i)$ ,  $\dots$ ,  $\Pi(V^p)$  (Вгк) максимумно добре відповідає початковому набору  $V_1, \dots, V^p$ . Вгк чутливості мішені в термінах спектральної форми. Іншим важливим моментом, якщо ці вектори призначені для обчислення сілсьькогосподарських індексів, таких як NDVI, є те, що вони забезпечують цифрові підрахунки, максимумно наближені до вихідних. Хоча це, очевидно, не може бути отримано для кожного спектру випромінювання, приблизним рішенням є перекодитися, що проєктований вектор і цільовий вектор мають однакові  $L_1$ -нормалі. Таким чином, наступна перенормування на решті застосовується до кожного спроектованого вектора:

$$V_i \in [1, k], \quad P^N(V_i) = P(V_i) \cdot \frac{\|P(V_i)\|_{L_1}}{\|V_i\|_{L_1}} \quad (3.6)$$

### 3.2. Матеріал і методи

Для оцінки методу BSOP було обрано дві комерційні фотокамери: Canon 500D, представник останніх матриць Bayer високої роздільної здатності (15 Мпкселів), і Sigma SD14, завдяки оригінальній технології датчика Foveon X3. Сенсор Foveon складається з трьох окремих шарів фотодетекторів. Оскільки кремній поглинає різні довжини хвиль на різній глибині, кожен шар вловлює різний колір. Матриця Бейера не потрібна, що забезпечує кращу просторову роздільну здатність. Навпаки, існує менше контролю над кривою спектральної чутливості кожного каналу. Кожну камеру було відкрито, а її блокуючий фільтр NIR видалено (фільтр знімний у Sigma, але не в Canon, що призводить до більш деликатної операції). Потім було виміряно спектральну чутливість кожної модифікованої камери в діапазоні 440-990 нм з кроком 10 нм. Для цього регульоване монохроматичне джерело світла лабораторного спектрометра (V-570, Jasco Inc, Істон, США) було віддалено перед об'єктивом камери через оптичне волокно на відстані 30 см у кімнаті без навколишнє освітлення. Зображення були зроблені у форматі raw для кожної довжини хвилі за таких умов: Фокусна відстань: 50 мм; Чутливість: 100 ISO. Час інтеграції: 5 с Plotim було зібрано середній рівень зображення джерела світла для кожного каналу на необроблених зображеннях камери за допомогою саморобного програмного забезпечення для аналізу зображень.

Дві цільові чутливості B1, B2 які відповідають відповідно червоному та ближньому інфрачервоному діапазонам. Оскільки в літературі не знайдено стандартизованих даних про чутливість (деякі автори використовують діапазони TM3 і TM4 Landsat, інші просто використовують довжини хвиль 660 нм і 760 нм), була використана наступна процедура: - червона смуга була отримана з колориметричних даних XYZ CIE 1931

Для подальшого використання на реальних гіперспектральних даних (див. розділ 3.3) усі дані, визначені вище (розділи 3.1 і 3.2), були повторно дискретизовані відповідно до спектральної роздільної здатності моделі гіперспектральної камери Nyspec VNIR-1600 (Norsk Elektro Optik A / S,



Норвегія), тобто 160 спектральних смуг від 415 до 993 нм. Відповідно до нотації, визначених у розділі 2, це призвело до двох наборів векторів  $B1^*$ ,  $B2^*$  (по одному для кожного типу камери) і два вектори  $B1$ ,  $B2$  ді розмір 160. Усі обчислення, описані в розділі 2, виконано за допомогою Matlab 7 (The MathWorks, Натік, Массачусетс, США). Після визначення оптимальної довжини хвилі різання було обрано найбільшій існуючий желатиновий фільтр Братена. Його справжню криву пропускання було виміряно за допомогою спектрометра Jasco V-570 і повторно відібрано відповідно до смуг Hyspex 160, що призводять до вектора фільтра  $\Phi_w$ . Нарешті, для кожного типу фотоапарата проєктована вектори  $PH(Bt1)$  і  $PH(Bt2)$  на підпросторі  $(\Phi_w, B^*1, \Phi_w, B^*2)$  були обчислені та перенормовано відповідно до (11).

Реальні гіперспектральні зображення твердотіпних пшениці були отримані на дослідних полях (INRA, Domaine de Meilgueil, Франція) у березні 2011 року за допомогою камери Hyspex VNIR-1600. Камера була встановлена на моторизованій перекаданій рейці на висоті одного метра над землею (докладніше див. [8]). Сцени включають пшеницю тверду на ранній стадії, а також різні види дводольних та однодольних бур'янів. Загалом 2210 спектрів якравості було зібрано на гіперспектральних зображеннях шляхом ручного вибору області, включаючи пшеницю, бур'яни та категорії ґрунту. Для кожного зібраного спектра, цифрові відліки  $R$  і  $NIR$ , що відповідають чутливості цієї червоного та ближнього інфрачервоного діапазону  $Bt1$ ,  $Bt2$  були обчислені як  $R = CBt1$  і  $NIR = CBt2$ , згідно з рівнянням (3). Потім було обчислено еталонне значення  $NDVI$  з використанням цих значень  $R$  і  $NIR$ . Така сама операція була виконана за допомогою  $PH(Bt1)$  і  $PH(Bt2)$  замість  $Bt1$  і  $Bt2$  щоб обчислити приблизний  $NDVI$  для кожного типу фотокамери.

### 3.3. Результати

На рис 3.3 показані спектральні чутливості  $B^*$  спеціально для камер Canon і Sigma без фільтра блокування NIR. На рис.3 криві якості BSOPF( $\lambda_B$ ) згідно з рівнянням (3.7). Можна помітити, що в обох випадках  $P(\lambda_B)$  не визначено

длина  $\lambda > 728$  нм, оскільки проекція  $OB_1$  (червона смуга) стає нульовим. Найкраща якість BSOP досягається для  $\lambda \approx 600$  нм, і краще для камери Canon. Відповідно до цього результату стандартний фільтр Watten Kodak 25 (посилання: 149 7072) з довжиною хвилі різання 600 нм було вибрано, і його фактичний коефіцієнт пропускання виміряно за допомогою спектрометра Jasco для подальшого моделювання.

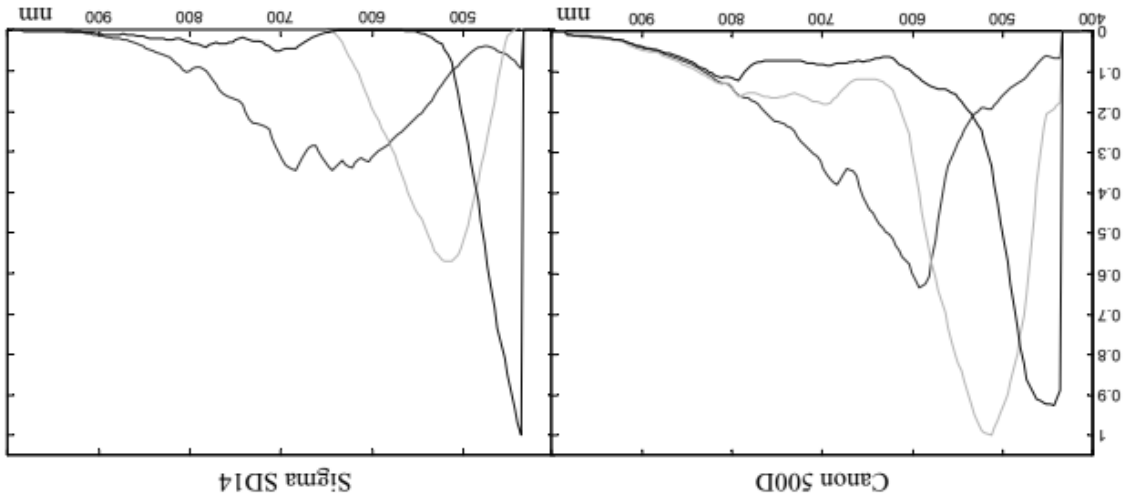


Рис. 3.2 Спектральна чутливість Canon 500D і Sigma SD14 без блокуючого фільтра NIR (чутливість змінено для максимального значення, що дорівнює одиниці)

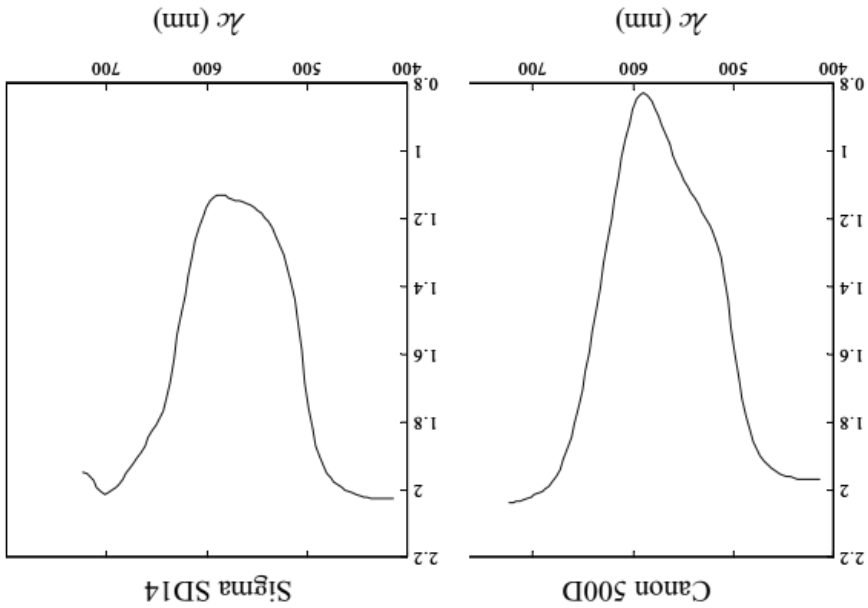


Рис. 3.3 Якість BSOP (λв) камер Canon і Sigma

Результати BSOP наведені на рис.3.3. Змодельована ближня інфрачервона смуга, отримана за допомогою камери Canon, виглядає більш регулярною, ніж смуга, отримана за допомогою камери Sigma, що підтверджує кращі результати, отримані за допомогою P(λv).

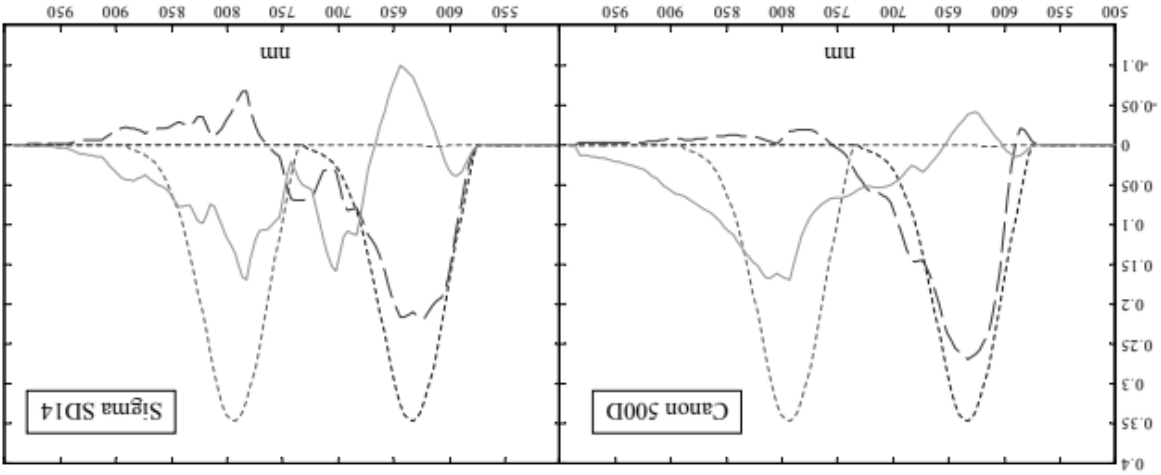


Рис. 3.4 Діапазони BSOP для камер Canon і Sigma з фільтром Wtattenp25. Пунктирні лінії: чутливість цилейВ1, В2. Штрихова лінія: червона смуга BSOP; Суцільна лінія: ближній інфрачервоний діапазон BSOP

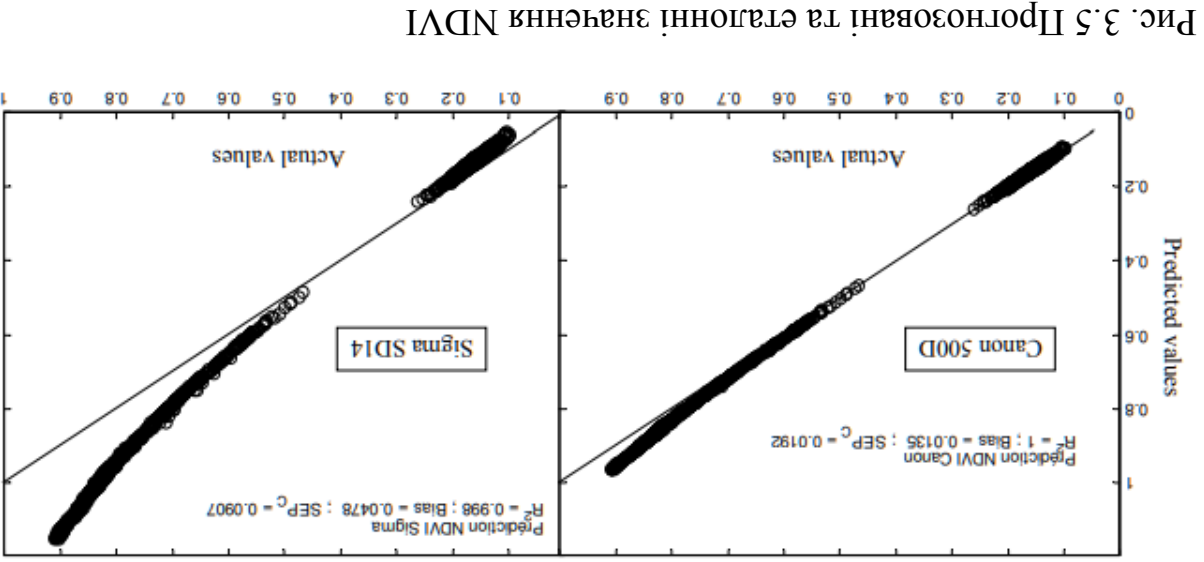


Рис. 3.5 Прогнозовані та еталонні значення NDVI

По-перше, ми можемо помітити дві чітко розділені групи значень NDVI. Вони відповідають відповідно ґрунту та рослинності (пшениця, однодольні та дводольні рослини), підтверджуючи надзвичайну ефективність NDVI для дискримінації культури та ґрунту. Якість прогнозування за допомогою камери

Canon значно краща: отримані значення NDVI майже дорівнюють еталонним, за винятком найвищих значень ( $NDVI > 0,8$ ), де похибка залишається менше 10%.

### 3.4. Висновок

У цьому розділі ми показали, що смуги NIR і R для обчислень NDVI можна отримати одночасно з однієї стандартної цифрової фотокамери RGB шляхом заміни блокуючого фільтра ближнього інфрачервоного діапазону всередині фільтром низьких частот. Для визначення оптимального замінного фільтра було запропоновано загальний метод під назвою BSOP. Цей метод застосовано з використанням реальних спектротричних даних дві комерційні дзеркальні камери, засновані відповідно на матриці Bayer і Foveon, пов'язані зі стандартним фільтром Wratten. Змодельовані значення NDVI, отримані для великої кількості спектрів якравості рослинності та ґрунту, порівнювали з еталонними значеннями NDVI. Результати, отримані за допомогою матриці Bayer, особливо задовільні. Foveon забезпечує надзвичайно менш точне передбачення NDVI, але залишається доречним вибором у контексті порівняння рослинності/ґрунту за пороговим значенням NDVI. Результати відкривають нові можливості для отримання зображень з високою роздільною здатністю для моніторингу посівів. Наступним нашим кроком буде реальне впровадження та тестування обох типів пристроїв на БПЛА в рамках програми моніторингу бур'янів.

Мультиспектральне дистанційне зондування визначається як сукупність відбитих, випущених або розсіяних променів від об'єкта чи області інтересу в кількох діапазонах електромагнітного спектру, включаючи видимий, інфрачервоний, ближній інфрачервоний (NIR), тепловий, мікрохвильовий та радіохвильовий діапазони. Існує багато застосувань для багатоспектрального дистанційного зондування, включаючи моніторинг стану ґрунту, виявлення інвазивної рослинності, картографування росту сільськогосподарських культур, оцінку шкоди від стихійних лих, аналіз взаємодії ґрунту та води тощо. Для багатьох із зазначених вище застосувань розробка багатоспектральних індексів рослинності, таких як нормалізований Індекс різниці рослинності (NDVI) є критичним. Використання безпілотних авіаційних систем (БПЛА) як мультиспектральних платформ дистанційного зондування набуло популярності протягом багатьох років. Дослідники встановили оптичні камери на БПЛА для різних місій дистанційного зондування, включаючи RGB, NIR та теплові діапазони. Зібрані аерофотознімки у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах можна використовувати для розрахунку NDVI у системах точного землеробства [19]. Подібні системи можна розширити до багатьох сценаріїв навколишнього середовища, включаючи оцінку швидкості випаровування, вмісту азоту та хлорофілу в тканинах культур, вологості ґрунту на поверхні та в кореневій зоні та об'єму листя культури [17]. Багатоспектральне дистанційне зондування на основі БПЛА також ефективно використовувалося в таких сферах, як управління водними ресурсами в реальному часі та розподілене керування зрошенням [27], моніторинг пожеж та пошуково-рятувальні операції в реальному часі. Схожі застосування є розортання БПЛА для одночасних пошуково-рятувальних операцій при лісових пожежах [4]. Незважаючи на те,

## РОЗДІЛ 4. БАГАТОСПЕКТРАЛЬНЕ ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ НА ОСНОВІ UAV І ОБЧИСЛЕННЯ NDVI ДЛЯ ОЦІНКИ ПІСЛЯ КАТАСТРОФИ

що багато дослідників працювали над багатоспектральним дистанційним зондуванням на основі UAS, наукової процедури калібрування та кількісної оцінки похибок у порівнянні з іншими мультиспектральними вимірюваннями (наприклад, наземними чи супутниковими) досі немає. Іншим важливим застосуванням багатоспектрального дистанційного зондування на основі БПЛА є збір даних про катастрофи та оцінка збитків. Катастрофи, особливо пов'язані з кліматичними та погодинними коливаннями, можуть завдати серйозної шкоди, включаючи людські жертви, пошкодження структури, втрати врожаю та зміни рослинності/довкілля. Для підготовки до подібних подій у майбутньому дуже важливо розуміти масштаби збитків і змін земель, спричинених цими лихами. Види з повітря полетіють цей аналіз, особливо в зонах великомасштабного лиха, які можуть бути небезпечними та важкодоступними для людей, а для супутників складно отримувати дані з високою просторовою/часовою роздільною здатністю. Поява недорогих і надійних безпілотних літальних апаратів і датчиків проклала шлях для розгортання БАС для таких проектів. БПЛА можна швидко запустити та запрограмувати на отримання певних планів польоту для охоплення зони лиха, одночасно отримуючи аерофотознімки чи відео. Отряд збору зображень на базі БПЛА для моніторингу та управління катастрофами наведено в [5]. У 2006 році використання БПЛА для огляду структуриних пошкоджень, спричинених ураганом Катріна, було досліджено в [6]. Інша спроба аналізу після урагану включала використання безпілотного навіодного апарату (USV) і мікро-БПЛА для допомоги в проведенні інспекцій мостів, дамб і опор, пошкоджених ураганом «Вілма» та «Айк» [7]. Обговорювалося використання недорогої системи дистанційного зондування на основі БПЛА для оцінки та відновлення після катастрофи, екологічного менеджменту та розвитку інфраструктури на Філіппінах [8]. Розподілена архітектура прийняття рішень із декількома БПЛА була розроблена в рамках проекту AWARE з набором реальних БПЛА та бездротових сенсорних мереж (WSN) для перевірки її реалізації в програмах управління катастрофами та цивільної безпеки [9]. Ці та інші внески підтвердили використання БПЛА для

аналізу катастроф і реагування на них. Однак більшість існуючих робіт зосереджено на RGB та/або теплових аерофотознімках, зібраних після катастроф. ВЛІ, оснащені ближніми інфрачервоними фотокамерами, можуть використовуватися для огляду пошкоджень рослинності в зонах лиха. Точні вимірювання масштабу та характеру пошкодження можуть забезпечити важливий зворотний зв'язок щодо стану поля, наприклад рівня пошкодження врожаю чи рослинності.

#### 4.1. Сенсорна платформа ВЛІА

Мультиспектральні та гіперспектральні оптичні камери завдячують вимогам точного калібрування радіометрії та коефіцієнта відбиття, щоб гарантувати хороші результати. Вплив двонаправленої функції розподілу відбиття на зображення дистанційного зондування з малих безпілотних літальних апаратів досліджено в [10], де проаналізовано вплив широкого поля зору (FOV) датчиків зображення та сонячного руху на дистанційне зондування на основі безпілотних літальних апаратів. Було розроблено напівавтоматичну модель для розрахунку коефіцієнтів відбиття червоної, зеленої та ближньої інфрачервоної смуг за допомогою білого сульфату барію (4) і галоову плату в [11]. Цей метод розглядає вплив зенітного кута сонця на властивості відбиття об'єктів. Однак для виконання радіометричного калібрування потрібні дорогі спектрометри та подвійні датчики сонячного світла. Розміри (діаметр х довжина) Режим роздільної здатності  $17,40 \times 22,48$   $1920 \times 1080$  стор Ця стаття зосереджена на ефективній оцінці пошкоджень від торнадо шляхом оцінки варіацій рослинності в полі за допомогою мультиспектральних наборів даних. Розроблено ефективну процедуру геоприв'язки зображень для обробки аерофотознімків для створення ортомозаїк. Запропоновано надійну процедуру калібрування NDVI з використанням цілі відбиття землі та лінійної регресії на рівні пікселів. Ці процедури перевірено з використанням даних польоту КНавк ВЛІА, зібраних після торнадо EF2 у Фаррагуті, штат Айова, у 2017 році. Рисунок 1. КНавк Zephyr з ВЛІА. Організація статті така. Розд. II фокусується

на описі платформи KНаwk BПЛA і датчиків. Процедура отримання аерофотознімків та генерації ортофото представлені в розділі. III. розд. IV надає детальну інформацію про запропоновану процедуру калібрування NDVI з використанням наземних мішеней відбивання з наступними наземними та льотними випробуваннями для перевірки. розд. V надає результати льотних випробувань для оцінки пошкоджень торнадо EF2. Нарешті, висновки та рекомендації щодо майбутньої роботи підсумовані в розділі. 4.3.

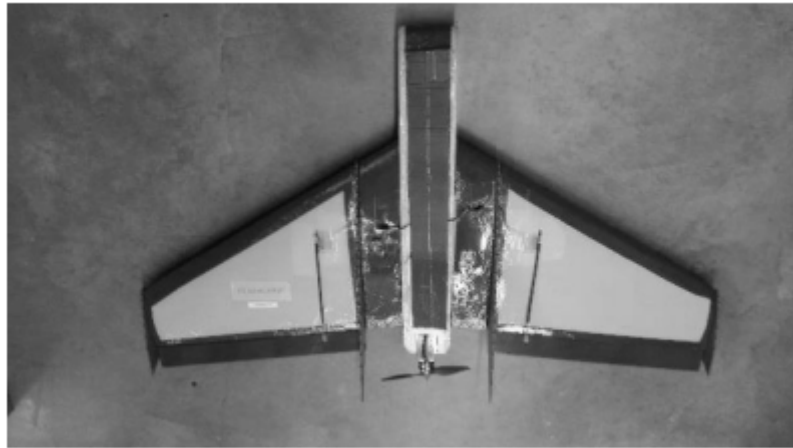


Рис 4.1 KНаwk Zephyr 3 BПЛA

KНаwk Zephyr 3 BПЛA використовується для аерофотозйомки в цьому документі, який був розроблений дослідниками Сільної лабораторії безпілотних систем (CUSL) Університету Канзасу (КУ). KНаwk Zephyr 3 BПЛA (рис. 4.1) — це літальний апарат із нерухомим крилом, виготовлений із спіненого ЕРР, з розмахом крил 47". Літак приводиться в рух штовхальним гвинтом і електродвигуном без щіток. Він має два елевони як контрольні поверхні для контролю крену та тангажу. Злітна вага становить приблизно 4 фунти разом з корисним навантаженням. Для живлення використовуються три батареї 11,1 В 2000 mAh, які витримують до 30 хвилин польоту. KНаwk Zephyr 3 BПЛA оснащений GPS-приймачем Ublox-Lea 6h і автопілотом Pixhawk, який може підтримувати як ручний, так і автономний політ. Дві камери Reaуrо82 Gоrро Hero 4 Black (RGB і NDVI) використовуються для аерофотозйомки на борту літака, як показано на рис. 4.2 Об'єктив «риб'яче око» замінено



об'єктивом 3,97 мм з мінімальними радіальними спотвореннями для одного та об'єктивом 3,37 мм із фільтром RED+NIR (NDVI) для іншого.



Рис. 4.2 RealPro82 GoPro Hero 4 Black

Метою багатоспектрального дистанційного зондування є створення 2D геоприв'язаних повітряних карт різних спектральних діапазонів, включаючи RGB, NIR (наприклад, 650 нм, 850 нм відповідно), теплові та інші діапазони. Повну мультиспектральну систему дистанційного зондування можна розбити на три етапи: отримання аерофотознімків, географічна прив'язка аерофотознімків та ортотрансформація (кілька діапазонів) і обчислення NDVI. Кожен із цих кроків сприяє успіху загальної багатоспектральної місії дистанційного зондування. У цьому розділі наведено детальний опис генерації плану польоту БПЛА для отримання аерофотознімків і створення аерофотокарт, а також аналіз їх точності.

А. Створення плану польоту БПЛА для отримання аерофотознімків Вибір плану польоту БПЛА має вирішальне значення для успіху будь-якої місії дистанційного зондування на базі БПЛА. Такі характеристики, як роздільна здатність пікселів, крейсерська швидкість, висота польоту та схема лінії польоту, відіграють важливу роль у визначенні здійсненності та надійності операції дистанційного зондування. Щоб створити хороший план польоту, необхідно враховувати певні фактори, такі як цілі місії, можливість БПЛА та камери, а також потужні умови. Типова проблема створення плану польоту представлена та описана нижче.

Варто зазначити, що автопілот БПЛА повинен бути здатний підтримувати коригування траєкторії польоту в режимі реального часу на основі

(4.1-3)

$$\theta_h = 2 \tan^{-1} \frac{P_h}{2f}, \quad \theta_v = 2 \tan^{-1} \frac{P_v}{2f},$$

$$FP_h = h \frac{P_h}{f}, \quad FP_v = h \frac{P_v}{f},$$

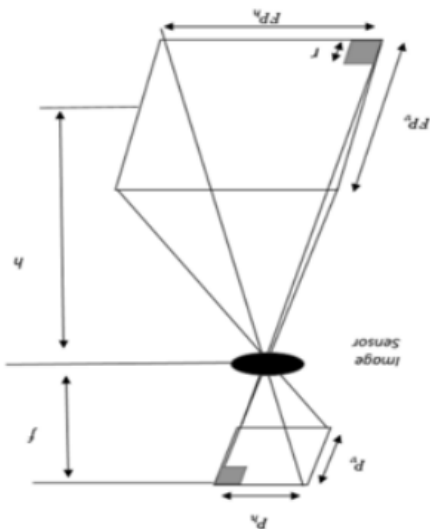
$$h = fr,$$

$$D_{FL,max} = \sigma h \frac{f}{P_h}.$$

мінімальний відсоток бокового перекриття .

показано в (35), використовуючи бажану висоту польоту  $h$ , поля зору  $h$ , і відстань перекриття між кожною лінією польоту, можна визначити, як залежить від ефективності відстеження положення БПЛА. Максимальна алгоритмом створює від руху (SFM). Відсоток бокового перекриття сильно мінімальні відсотки поперечного та поздовжнього перекриття визначаються крейсерської швидкості можна врахувати фотографічні вимоти. показано в рівняннях 1-3. При визначенні бажаної висоти та відомої висоту польоту та зони покриття камери  $h \times$  (Фіг.34) можна розрахувати, як  $h \times$  і фокусна відстань, горизонтальне і вертикальне поля зору  $h$ , бажану (GSD)ті властивості камери, наприклад зображення роздільна здатність пікселів Враховуючи зону інтересу, необхідна відстань відбору проб на землі

Рис. 4.3 Розрахунок площі сліду



характеристик стеження. На рис. 4.3 показаний типовий план польоту з мінімальним відсотком перекриття зображень над зоною інтересу. Кожен кольоровий прямокутник представляє відбиток камери на кожному кроці часу, а лінії представляють план польоту БПЛА.

У цьому підрозділі зосереджено увагу на процедурі створення аерофотокарти з подальшим аналізом її точності за допомогою наземних аерофотокарти та орієнтирів. Процедур створення аерофотокарти можна розбити на наступні етапи: географічна прив'язка зображення, вибір зображення та ортотрансформація зображення. Дані з GPS, IMU та камери можна вручну або автоматично синхронізувати щодо кожного кадру зображення. Час зльоту можна вибрати як опору точку для синхронізації датчиків. Враховуючи 2D швидкість літака, висота польоту, і x-прискорення, час зльоту, що відповідає кожному з цих датчиків, можна вибрати для різних платформ БПЛА.

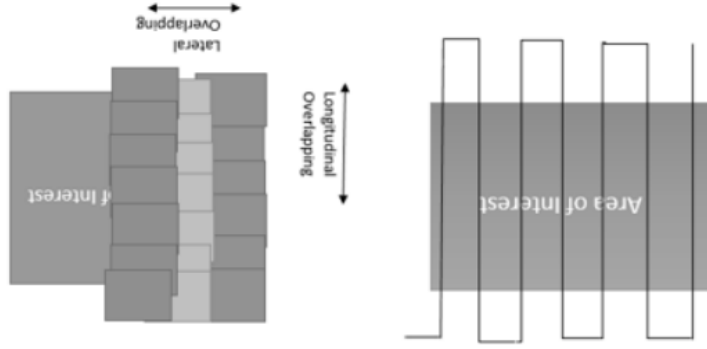


Рис. 4.4 План польоту БПЛА з накладенням зображення

Після геоприв'язки зображення наступним кроком є вибір необхідних зображень для картографування. Вибір зображень базується на зоні інтересу та ефективності відстеження орієнтації літака. Демонстраційний політ був проведений з KНавк Zephyr 3 БПЛА і камерою RealPort82 GoPro Hero 4 black RGB. Чотири мішені (1×0,7 м) використовувалися як наземні контрольні точки (рис. 4.4) і були розміщені поблизу наземної станції. Вони були розміщені у формі чотирикутника з приблизною відстанню 30 м між ними. GPS-приймач

NovAtel і GPS пристрій Ublox були розміщені в кожній точці приблизно на три хвилини для збору даних на землі. Специфікації аерофотокарти представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Характеристики аерофотокарти

Опис	Значення
Кількість зображень	499
GSD (м/пікс)	0,10
Зона покриття (км <sup>2</sup> )	0,886
Похибка розташування 2D (м)	17.72 і година 28 хв
Загальний час обчислень	1 година 28 хв

Для кількісної оцінки точності аерофотокарт було проведено аналіз помилок за допомогою опорних точок. Координати наземних контрольних точок зі сформованої аерофотокарти порівнювали з наземними вимірюваннями GPS (Ublox і NovAtel).



Рис. 4.5 Пташиний вид опорних точок.

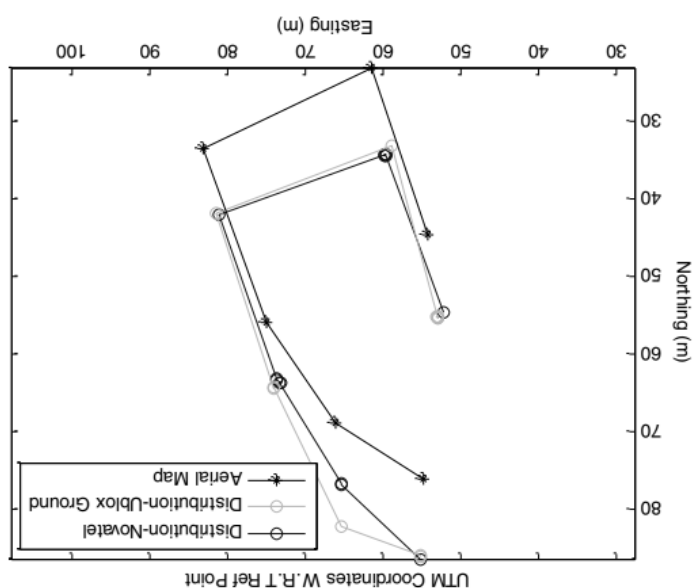
Зібрані GPS-координати перетворюються на відносні універсальні поперечні координати Меркатора (UTM), показані на рис.4.6.

Опис	Ublox	Novatel
Мінімальна похибка (м)	8.42	8,325
Середня похибка (м)	10.27	9.5
Максимальна похибка (м)	13.83	10.18
Стандартне відхилення (м)	0,088	0,01856

Таблиця 4.2. Помилки для тесту GPS

У таблиці 4.2 наведені середні, максимальні та мінімальні двовимірні похибки між GPS-координатами, отриманими з аерофотокарт і наземних GPS-приймачів. Тут також представлено стандартне відхилення GPS-приймачів Ublox і NovAtel. Зверніть увагу, що Ublox і NovAtel GPS мають горизонтальну точність 2,5 м і 1,5 м (RMS) відповідно, залежно від виробника. На наведений вище аналіз помилок може вплинути вибір розташування GPS. Подальший аналіз помилок було виконано з використанням орієнтирів, вибраних із супутникових зображень, які охоплюють весь ділянку карти.

Рисунок 4.6 UTM координати опорних точок.



Загалом було вибрано врючну 14 характерних точок на всій карті та проведено порівняння між координатами з ортомозаїки (Agisoft) і Google Earth, як показано на рис.4.6. Повідомляється, що Google Earth має точність позиціонування, яка коливається від ~0,1 м на півдні до ~2,7 м на півночі. Таблиця 4.3 представляє мінімальну, середню та максимальну похибки між згенерованою картою та Google Планета Земля.

Таблиця 4.3 Помилки для тесту орієнтирів.

Опис	Значення
Мінімальна похибка (м)	2.34
Середня похибка (м)	7.56
Максимальна похибка (м)	17.51

Середня похибка, показана у наведеній вище таблиці, виявляється меншою, ніж значення, спостережене в таблиці 4.3 Це пов'язано з факт, що аналіз, представлений у таблиці 4, складався з багатьох точок на всій карті на відміну від того, що виконується за допомогою опорних точок, які покривають лише невелику частину карти. Підсумовуючи, KНаwk Zерhуt 3 BПЛA може створювати аерофотокарти із зоною покриття 1 милью×1 милью з точністю близько 10 м. BПЛA KНаwk Zерhуt 3 може досягати роздільної здатності пікселів 0,10–0,12 м на висоті польоту 120 м за допомогою камер RealPro82 GoPro Hero 4 (RGB/NIR).

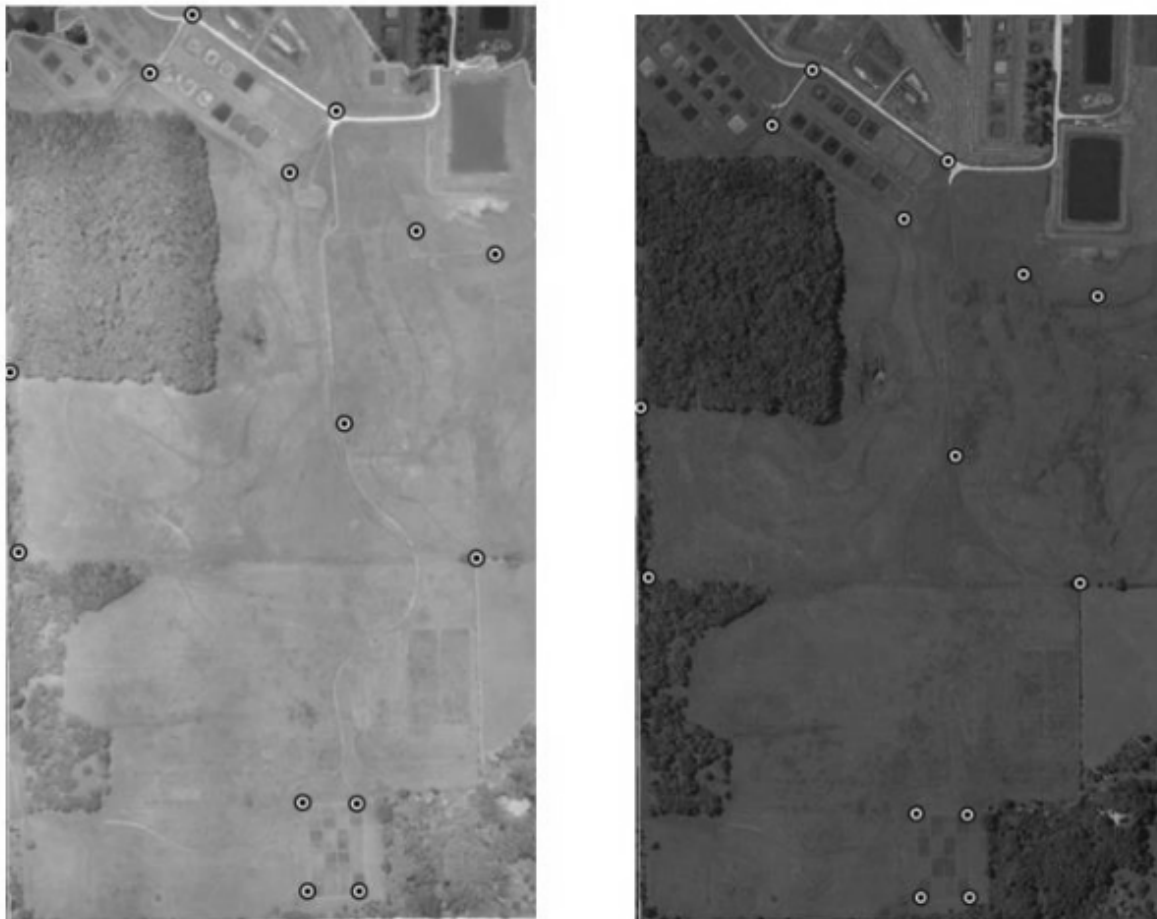
показано нижче, де :

що відповідують ближньому інфрачервоному діапазону та червоним смугам, як представляє інтерес, обчислюється на основі значень спектрального відбиття, господарства, біології та інших геонаук. NDVI об'єкта або області, що вимірювань дистанційного зондування, головним чином у галузях сільського перевірки. NDVI — це графічний індикатор, який можна використовувати для процедури калібрування застосовується до зображень землі та польоту для вирішальні фактори, які необхідно враховувати перед калібруванням. Нарешті, калібрування NDVI. Спочатку описується проблема калібрування NDVI, а потім У цьому розділі наведено детальний опис запропонованої процедури

## 4.2. Розрахунок NDVI

ортомозаїка (R).

Рис. 4.7 Орієнтири для аналізу помилок між Google Earth (L) і згенерована



$$R^{red} = k^{red}I^{red} + b^{red} \quad (4.5-6)$$

$$R^{NIR} = k^{NIR}I^{NIR} + b^{NIR}$$

використовувати для розрахунку NDVI для кожного пікселя. Відбиття для кожної смуги. Отримані значення коефіцієнта відбиття можна будь-якого зображення для перетворення необроблених DN у коефіцієнт визначити з лінійної регресії (6,7). Потім ці параметри можна застосувати до отримати лінійну залежність. Характеристики лінійної функції (k і b) можна P2, P3! необроблені DN<sub>1</sub>,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  мультиспектрального зображення можна складається з трьох поверхонь Ламберта з відомими значеннями відбиття P1, A. Проблема калібрування NDVI Дано цільову плату відбиття землі, що

використанням плати відбиття наземної цілі MAPIR [12]. Відбиття. Цей розділ зосереджується на процедурі калібрування, розробленій з щоб компенсувати всі параметри за допомогою плат із відомими значеннями атмосферні умови та характеристики датчика. Потрібно точне калібрування, містять таку інформацію, як інтенсивність світла, коефіцієнт відбиття, використовуючи лише необроблені DN, оскільки вони не відкалібровані та зображення NIR матиме діапазон DN 0-255. NDVI не можна обчислити, присвоєно номер залежно від смуг та інтенсивності світла. Наприклад: 8-бітне зображення представлені у вигляді цифрових чисел або DN. Кожному пікселю створювати спектральні карти NIR та червоних смуг. Однак необроблені дані відбиття. Мультиспектральне зображення, отримане з камери NDVI, може полягає в нормалізації цифрових чисел пікселів до їх відповідних значень NDVI. Основна відмінність між генерацією RGB і багатоспектральної карти мультиспектральних аерофотокарт, а також оброблених карт, таких як карта КНавк БІЛІА можна використовувати для створення необроблених

$$NDVI = \frac{R^{NIR} - R^R}{R^{NIR} + R^R} \quad (4.4)$$



Зуважте, що для точного калібрування необхідно враховувати певні фактори, такі як шум NIR та гаммакорекція, які докладніше пояснюються в цьому розділі. Відбивна здатність матеріалу — це його ефективність у відображенні випромінюваної енергії. Це частка електромagnetної потужності, яка відбивається на поверхні розділу. Для виконання цього калібрування потрібні плати з відомими значеннями відбиття. Для калібрування використовувався калібрувальний наземний ціль MAPiR (рис. 4.8). Плата складається з поверхонь Ламберта з відомими спектральними коефіцієнтами відбиття [0,87, 0,52 і 0,24].



Рис. 4.8 Плата наземної мішені з відбивною здатністю MAPiR [12]

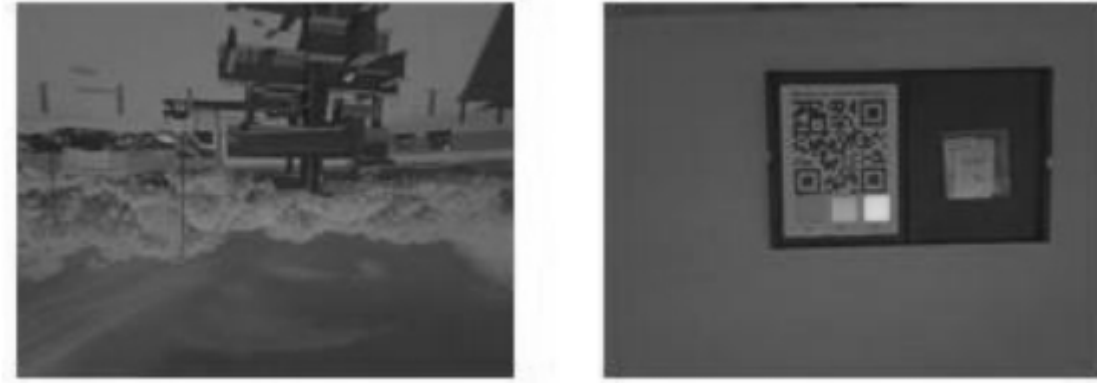
Існують певні фактори, які необхідно враховувати перед виконанням калібрування коефіцієнта відбиття. Ці фактори включають шум NIR та гамма-корекцію, які пояснюються нижче.

1) Шум NIR Камера RealPro82 GoPro Hero 4 оснащена фільтром NDVI,

який замінює синій канал на канал NIR. Теоретично червоний, зелений і ближній інфрачервоний діапазони повинні бути захоплені у відповідних каналах. Однак, оскільки червоний і зелений канали камер RealPro 82 надзвичайно чутливі до діапазону ближнього інфрачервоного діапазону, вони також схильні вловлювати деякі шуми ближнього інфрачервоного випромінювання. Щоб продовжити калібрування, червоний смугу потрібно спочатку «очистити». Для очищення від шуму можна використовувати наступну формулу:

Спочатку застосовується матриця шуму NIR для очищення червоної смуги. По-друге, коефіцієнт гамма-корекції  $\alpha = 1$  застосовується  $\gamma$  до середніх значень

Рис. 4.9 Зображення землі для калібрування



Наземний тест NDVI Комплексне наземне випробування було проведено з використанням камери RealPro82 GoPro Hero 4 NDVI. Щоб перевірити процедуру калібрування, було зроблено зображення відбиваючої панелі наземної цілі MAPiR та оточення (рис. 4.9).

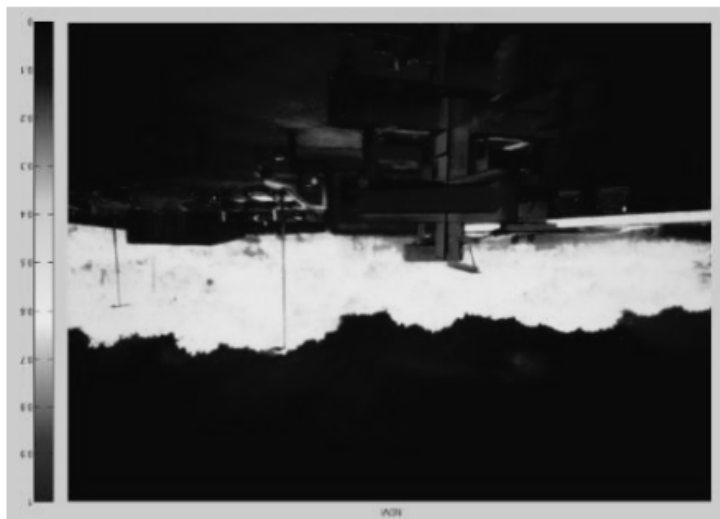
де  $I_{avg}$  представляє інтенсивність пікселів і являє собою шкалу гамма-корекції. Гамма-корекцію потрібно віддати, щоб отримати лінійну

$$I_{avg} = A I_{raw}^{\alpha} \quad (4.8)$$

де це відсоток шуму NIR у червоному каналі та  $I_{NIR}$ , це необроблені DN червоної смуги з шумом, смуги NIR та «очищеної» червоної смуги відповідно. Фактор можна отримати у виробника камери або в спеціалізація червоного фільтра. 2) Гамма-корекція Гамма-корекція — це нелінійна операція, яка використовується для кодування або декодування яскравості у відео чи нерухомому зображенні. Оптичний датчик нелінійно використовує яскравість об'єкта на зображенні, щоб створити «гарне» зображення, яке може сприймати людське око. Формула гамма-корекції визначається нижче:

$$I_{RC} = I_R - I_{NIR}^{\alpha} \quad (4.7)$$

Рис. 4.10 Нестраважне кольорове зображення NDVI тестового зображення



Колі встановлено лінійну регресію, нахили та значення перетину, необхідні для глобального калібрування, обчислюються та застосовуються до всіх значень пікселів у тестовому зображенні. Коefіцієнти калібрування, отримані в результаті процедури, застосовуються до тестового зображення, а для підтвердження процедури виконується растровий розрахунок NDVI. На рис. 4.9 показано хибне кольорове зображення NDVI, створене з тестового зображення, показаного на рис. 4.10. Можна спостерігати, що значення NDVI дерев потрапляють у очікуваний теоретичний діапазон 0,6–0,9. Також показано порогове зображення NDVI (рис. 4.11), яке можна використовувати для виявлення рослинності. Області значень NDVI вище 0,3 виділені.

$$(4.9) \quad \frac{R_2 - R_1}{I_2 - I_1} = \frac{R_3 - R_3}{I_3 - I_2}$$

цих плат, можна сформулювати наступне:

Відбиття дошок, 1, 2, 3і середні DN зображення jpeg, що відповідає кожній із DN, де  $\gamma$  – коefіцієнт гаммапоправки. Враховуючи теоретичні значення

На рис. 4.12 показано карту помилкових кольорів NDVI, згенеровану рівняннями калібрування, отриманими з попереднього розділу. У таблиці 4.3

Рис. 4.12 Карта NDVI після калібрування



Процедура калібрування NDVI додатково перевіряється з використанням теоретичними значеннями NDVI. порівняти наші вимірювання NDVI із супутниковими значеннями NDVI та даних польоту KНавк над польовою станцією КУ. Мета полягає в тому, щоб

Рис. 4.11 Порогове зображення NDVI для наземного тестового зображення



наведено порівняння між діапазоном NDVI і теоретичним діапазоном NDVI, що відповідає певним об'єктам.

Таблиця 4.3. Порівняння NDVI. опис Теоретичний діапазон NDVI P

Опис	Теоретичний діапазон NDVI	Розраховано NDVI означає
Густа рослинність (дерева, тропічні рослини)	0,6 - 0,9	0,58
Розріджена рослинність (чагарники, низькорослі трави)	0,2 - 0,5	0,38
Безплідна скеля, пісок, дорота	0 - 0,1	0,21
вода	< 0	> 0

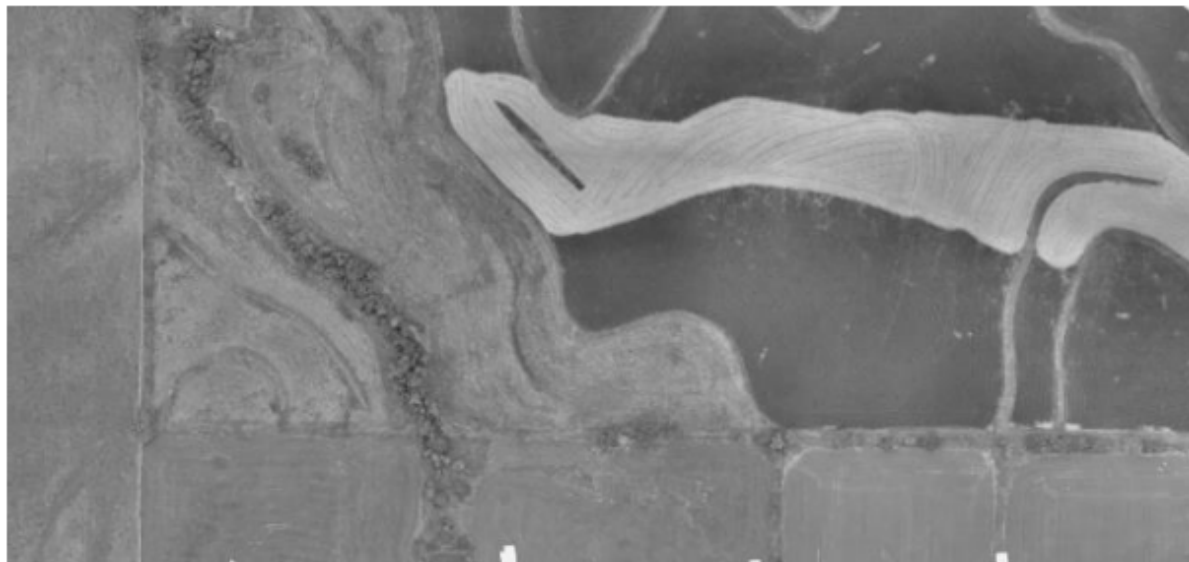


Рис. 4.13 RGB карта зони лиха торнадо

#### 4.3. Аналіз катастроф

У цьому розділі описано процедуру збору та аналізу даних після катастрофи. БІА КНawк Zephr 3 пролетів над полями в Фаррауті, штат Айова, 12 липня.т.с, 2017. Метою цього польоту було проаналізувати шкоду,

завдану торнадо EF2, яке торкнулося землі 28 червня т.с, 2017. КНawk БПЛА був оснащений камерами RealPro82 GoPro Hero 4 NDVI та RGB для аерофотозйомки. Літак пролетів над зоною лиха автономно за заздалегідь запланованою траєкторією польоту, як пояснюється в розд. III. RGB запланована карта місцевості показана на рис.4.15.



Рис. 4.14 Червона карта зони лиха торнадо

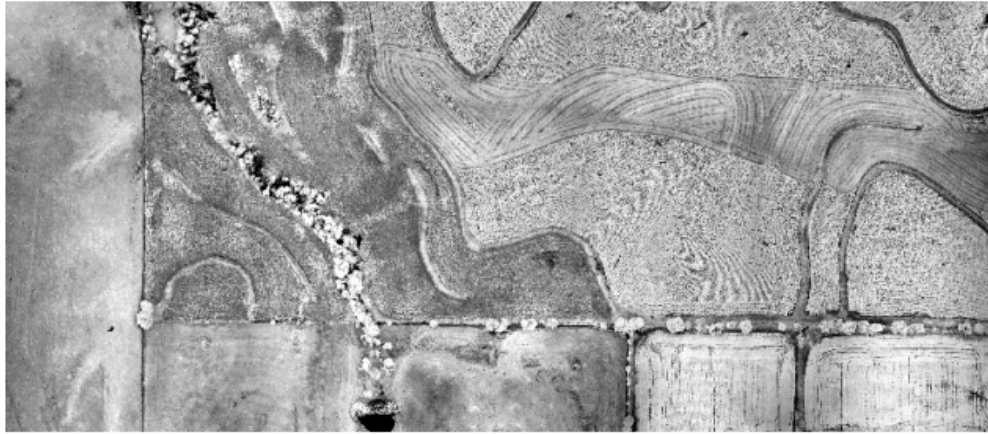


Рис. 4.15 NIR карта зони лиха торнадо



Рис. 4.16. Карта NDVI зони лиха торнадо

Ділянки високої рослинності поглинають світло від червоної смуги, водночас відбиваючи більше смуги NIR. Це можна спостерігати на червоній карті (рис. 4.14), де яскраві зони можна вивести як зони низької рослинності. Це регіон, який найбільше постраждав від торнадо. Карта NIR (рис. 4.15) також показує деякий контраст картини відбиття. NIR і червоні смуги були використані для створення карти NDVI області. Карту було піддано калібруванню лінійної ретресії на рівні пікселів, як описано в розділі V. Растрова карта NDVI забезпечує кількісний аналіз шляху пошкодження. На рис. 4.16 можна спостерігати, що значення NDVI падають між 0 і 0,25 у спостережуваний ступінь землі. Це підтверджує докази, надані червоними та RGB-картами, що найбільше постраждала рослинність у певному регіоні. Також було створено карту поротів NDVI (рис. 4.17),



Рис. 4.17 Порогова карта NDVI зони лиха торнадо

Показники ортрективованої карти були розраховані та наведені в таблиці 4.4. Загальна площа покриття, GSD і калібровані значення NDVI з порогової карти (таблиця 4.4) можуть бути використані для розрахунку площі пошкодженої доріжки та співвідношення пошкодженої доріжки до поля.

Таблиця 4.4 Характеристика карти Tomado

Опис	Значення
Кількість зображень	230
GSD (м/пікс)	0,117
Зона покриття (км <sup>2</sup> )	0,503
Зона сліду пошкодження (км <sup>2</sup> )	0,04

На це вказує відношення пошкодження колії до поля 0,0795 7,95% покритого поля було серйозно пошкоджено торнадо. Цей параметр може допомогти в оцінці поля та процедурах повторного зростання для відновлення поля. Варто зазначити, що після торнадо та перед оглядовим польотом фермери зорали частину поля. Таким чином, параметри треку торнадо, наведені в таблиці 4.4, представляють лише пошкодження, які спостерігаються під час польоту.

#### 4.4. Висновок

Підсумовуючи, Khawk Zephyr з BPLA виявився надійною багатоспектральною платформою дистанційного зондування. Ефективне калібрування NDVI було запропоновано та представлено разом із наземними та льотними випробуваннями для підтвердження. Запропонована система була перевірена під час місії з оцінки шкоди від торнадо. Створені мультиспектральні ортомозаїчні карти показали подібні моделі культур і можуть бути використані для прогнозування шляху пошкодження торнадо.

На основі отриманого досвіду зроблено наступні рекомендації:

Подальше калібрування та перехресну перевірку можна виконати для значень NDVI, розрахованих за допомогою BPLA, у порівнянні з супутниковими оцінками після певної обробки.



Подвійні датчики Sunshine, такі як Patot Sequoia, можна використовувати для радіометричного калібрування для підтримки точніших обчислень NDVI. ВПЛА повинні бути розгорнуті для аерофотозйомки якомога швидше після катастрофи, щоб запобігти брудь-якому втручанню людини, наприклад оранці. ВПЛА можна літати у формі, щоб покривати більші території за коротший час.

## РОЗДІЛ 5. АВТОМАТИЗОВАНА ОБРОБКА АЕРОНАВІАЦІЙНИХ ДАНИХ ВЕЛИКОЇ РОЗМІРНОСТІ

Автоматизована обробка даних є типовою задачею що вирішується сучасними аеронавіаційними системами. Обробка аеронавіаційних даних забезпечується як на борту у певних блоках авіоніки так і у наземних обчислювальних комплексах. Навіаційні параметри у сучасних системах вимірюються за допомогою значної кількості різних сенсорів, що забезпечують створення архіву даних, обробка яких потребує застосування спеціалізованих алгоритмів статистичної обробки. Кожен сенсор виконує вимірювання з певною величиною похибки, дію якої не можна виключити, проте її можна зменшити до прийняттого рівня. Отже сумісна обробка даних у аеронавіаційній системі виконується з врахуванням дії похибок кожного з сенсорів. Для цього використовують довірчі інтервали, що гарантують знаходження певного інтервалу у проміжку з певною ймовірністю [1]. Найбільш застосовуваними довірчими інтервалами є подвійне середньоквадратичне значення, що забезпечує 95% локалізації вимірних значень, виходячи з припущення про нормальний закон розподілу похибок.

Кожен блок авіоніки у своїй структурі більш схожий до архітектури персонального комп'ютера з відповідними елементами: процесор, пам'ять, аналого-цифрові/цифро-аналогові перетворювачі, що дозволяє виконувати обробку вимірних даних на програмному рівні [2]. Дані сенсорів переводяться до цифрового вигляду за допомогою дискретизації аналогових значень. Результати вимірювань у цифровому вигляді зберігаються у відповідних реєстрах, змінних, матрицях чи архівах даних.

Визначення точного місцеположення повітряного корабля (ПК) є однією з найважливіших задач цивільної авіації [3-5]. Зростаючі обсяги авіаперевезень вимагають постійного перегляду норм ешелонування для задоволення росту потреб авіаційного транспорту. Норми ешелонування ПК визначають

Сучасний літак цивільної авіації обладнаний цілою групою різноманітних датчиків, що забезпечують визначення координат місцезположення ПК у просторі. Відповідно до концепції автоматичного залужного спостереження (ADS-B) користувачі повітряного простору повинні періодично повідомляти своє місцезположення у просторі в автоматичному режимі. Найбільш поширеним бортовим обладнанням ADS-B є літаковий відповідач режиму 1090ES. Літаковий відповідач виконує функції автоматичного генерування цифрових повідомлень відповідно до налаштувань системи (стандартні налаштування забезпечує випромінювання сигналу з частотою у 1 Гц) та виконує їх випромінювання через всепрямовані антени системи [6, 7]. Поширене цифрове повідомлення містить ідентифікацію літака, координати місцезположення, барометричну висоту та інші дані. Координати ПК отримуються з обчислювальної системи літаководіння після вибору оптимальної системи позиціонування для певного повітряного простору виходячи з точності, що забезпечується системою та специфікаційних вимог які діють у повітряному просторі де знаходиться літак.

## 5.1. Вхідні дані

програмою забезпечення MATLAB. Траєкторію руху літального апарату та виконаємо її розрахунок за допомогою у якості прикладу обробки даних великої розмірності розглянемо сигналів, що створюється у просторі різними системами. позиціонування ПК цивільної авіації забезпечується полем аеронавігаційних наявності відповідних систем здатних задовільнити їх. Функціонування систем Введення більш точних вимог до позиціонування ПК можливе лише за умови введення більш точних вимог до визначення місцезположення ПК у просторі. зменшення безпечних відстаней між ПК. На практиці це реалізується шляхом пропускну здатності певної частини повітряного простору за рахунок вирішення питання переважності повітряного простору є збільшення площини, боковому та повздовжньому відхиленнях. Єдиним можливим шляхом максимально допустимі межі розділення ПК у просторі у вертикальній

Наземна мережа програмно керованих приймачів приймає і декодує дані передані за концепцією ADS-B. Зокрема, ідентифікаційний код літака з координатами місцеположення та барометричною висотою архівується у глобальних базах даних [8, 9]. Зокрема, обчислювальний кластери компанії Flightadar24 та Flightaware забезпечує одночасну обробку даних від більше ніж 30 тис програмно-керованих приймачів [10] сигналів ADS-B розмішених по всій планеті (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 – Мапа глобального трафіку [10]

Доступ до глобальних баз даних траєкторної інформації є відкритим і дозволяє отримати будь-який сегмент траєкторних даних для подальшого забезпечується на комерційній основі. Програмно керований інтерфейс аналізу.

У якості вхідних даних я використав дані траєкторії польоту UR-82060 / ADB3120 (Antonov Design Bureau 3120), що забезпечуються авіакомпанією British Airways зі сполученням BILUND, DENMARK (BLL) та GOSTOMEL, UKRAINE (GML). Дата вильоту 05 лютого 2022 о 02:25PM CET. Дата посадки 05 лютого о 05:26PM EET. Політ завершився пізніше на 4 хвилини від запланованого часу посадки. Політ виконувався на Antonov Antheus (Mta). Вхідні дані отримано від архіву за посиланням <https://flightaware.com/live/flight/UR-82060/history>

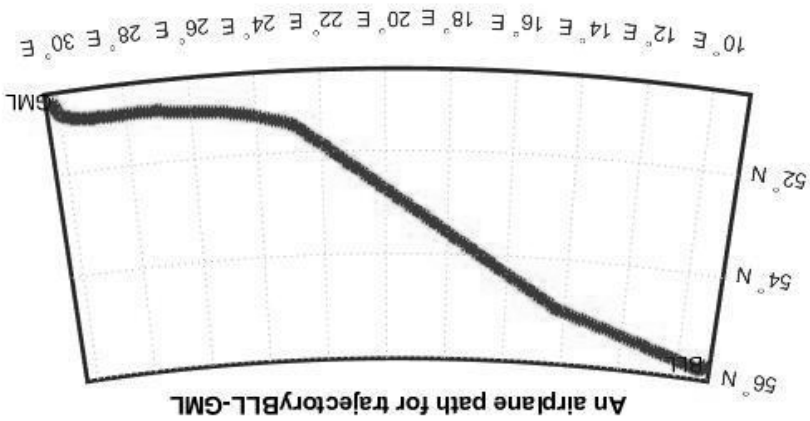
20220205/1321Z/EKBI/UKKM/tasklog. У таблиці 5.1 наведено перші та останні 15 рядків даних траєкторії польоту.

Таблиця 5.1. Траєкторні дані рейсу UR-82060 від 05 лютого 2022

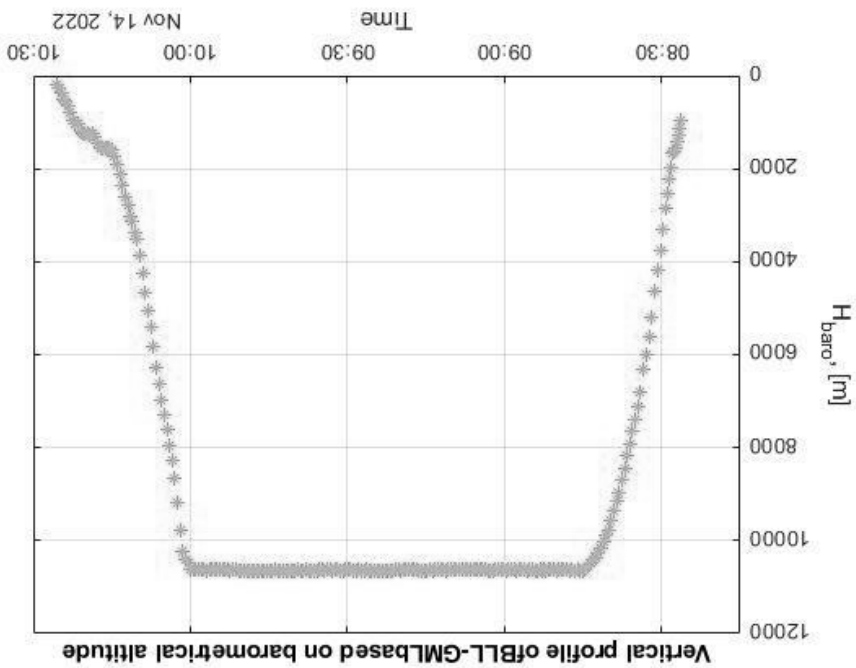
Час (EEST)	Широта	Довгота	Курс	Швидкість (kts)	Швидкість (mph)	Висота (фут)
Sat 08:26:15 AM	55.7479	9.0936	← 301°	122	140	3,175
Sat 08:26:31 AM	55.7532	9.0817	↘ 319°	131	151	3,750
Sat 08:26:48 AM	55.7637	9.0745	↓ 354°	164	189	4,175
Sat 08:27:04 AM	55.7774	9.0781	↓ 19°	196	226	4,700
Sat 08:27:20 AM	55.7882	9.0877	↗ 35°	223	257	5,100
Sat 08:27:36 AM	55.8043	9.1126	↗ 48°	263	303	5,300
Sat 08:27:52 AM	55.8158	9.1429	↗ 62°	299	344	5,475
Sat 08:28:10 AM	55.8251	9.1867	→ 78°	307	353	6,450
Sat 08:28:26 AM	55.8271	9.2239	→ 91°	309	356	7,300
Sat 08:28:43 AM	55.8233	9.2715	→ 103°	311	358	8,400
Sat 08:29:07 AM	55.8141	9.3275	→ 106°	326	375	9,375
Sat 08:29:38 AM	55.8006	9.4095	→ 105°	339	390	10,900
Sat 08:30:08 AM	55.7895	9.4910	→ 103°	344	396	12,375
Sat 08:30:35 AM	55.7784	9.5704	→ 106°	349	402	13,725
Sat 08:26:15 AM	55.7479	9.0936	← 301°	122	140	3,175
Sat 10:19:17 AM	50.8678	29.9528	↘ 113°	230	265	4,150
Sat 10:19:41 AM	50.8577	29.9904	↘ 115°	222	255	4,100
Sat 10:20:03 AM	50.8423	30.0146	↑ 156°	205	236	4,075
Sat 10:20:30 AM	50.8200	30.0334	↘ 150°	206	237	4,075
Sat 10:20:58 AM	50.7957	30.0499	↑ 159°	199	229	3,950
Sat 10:21:28 AM	50.7711	30.0660	↑ 157°	201	231	3,450
Sat 10:21:58 AM	50.7459	30.0845	↘ 154°	169	194	3,425
Sat 10:22:29 AM	50.7248	30.1005	↘ 155°	167	192	3,125
Sat 10:22:59 AM	50.7037	30.1162	↘ 154°	167	192	2,575
Sat 10:23:23 AM	50.6887	30.1280	↘ 155°	156	180	2,175
Sat 10:23:55 AM	50.6678	30.1435	↘ 155°	142	163	1,750
Sat 10:24:11 AM	50.6588	30.1502	↘ 155°	137	158	1,625
Sat 10:24:41 AM	50.6417	30.1633	↘ 155°	130	150	1,175
Sat 10:25:11 AM	50.6255	30.1750	↘ 154°	131	151	850
Sat 10:25:28 AM	50.6164	30.1817	↘ 154°	128	147	625

## 5.2. Візуалізація траєкторних даних у програмному забезпеченні

Виконаємо імпорт траєкторних даних рейсу UR-82060 від 05 лютого 2022 у програмне забезпечення MATLAB [11]. Результати візуалізації даних траєкторії польоту наведені на рис.5.2., а вертикальний профіль представлено на рис. 5.3.



Рисунки 5.2 – Траєкторія руху рейсу UR-82060 від 05 лютого 2022



Рисунки 5.3 – Вертикальний профіль рейсу UR-82060 від 05 лютого 2022

### 5.3. Інтерполяція траєкторних даних

Цифрові повідомлення передані за концепцією ADS-B є несинхронізованими за часом. Кожин передавач може бути налаштований на свою частоту видачі цифрових повідомлень. Крім того слід відмітити що частота 1090МГц є доволі завантаженою, оскільки на ній працюють вторинні радіолокатори, системи попередження зближень літаків та ADS-B. Це призводить до того, що певні цифрові повідомлення можуть накладатися один на одне створюючись. Тож траєкторні дані є несинхронізовані з багатьма «битими» повідомленнями. Для вирішення цієї проблеми застосовують методи інтерполяції даних. У якості інтерполюючої функції можуть виступати поліноми чи сплайн-функції. Результати інтерполяції вхідних даних на частоту 1 Гц наведені на рис. 5.4 - 5.6. Усі наступні обчислення будемо виконувати з інтерполюваними даними. Відобразимо дані у локальній системі NEU. У якості центра системи використаємо координати першої точки траєкторії. Результати візуалізації траєкторії у локальній системі показано на рис. 5.7 та рис. 5.8.

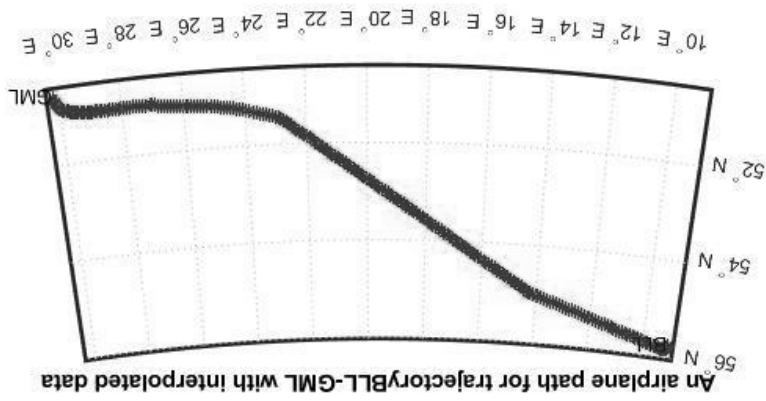


Рисунок 5.4 – Інтерполювана траєкторія руху ПК рейсу UR-82060 від 05

Рисунок 5.6 – Інтеповані траєкторні дані на частоті 1 Гц рейсу

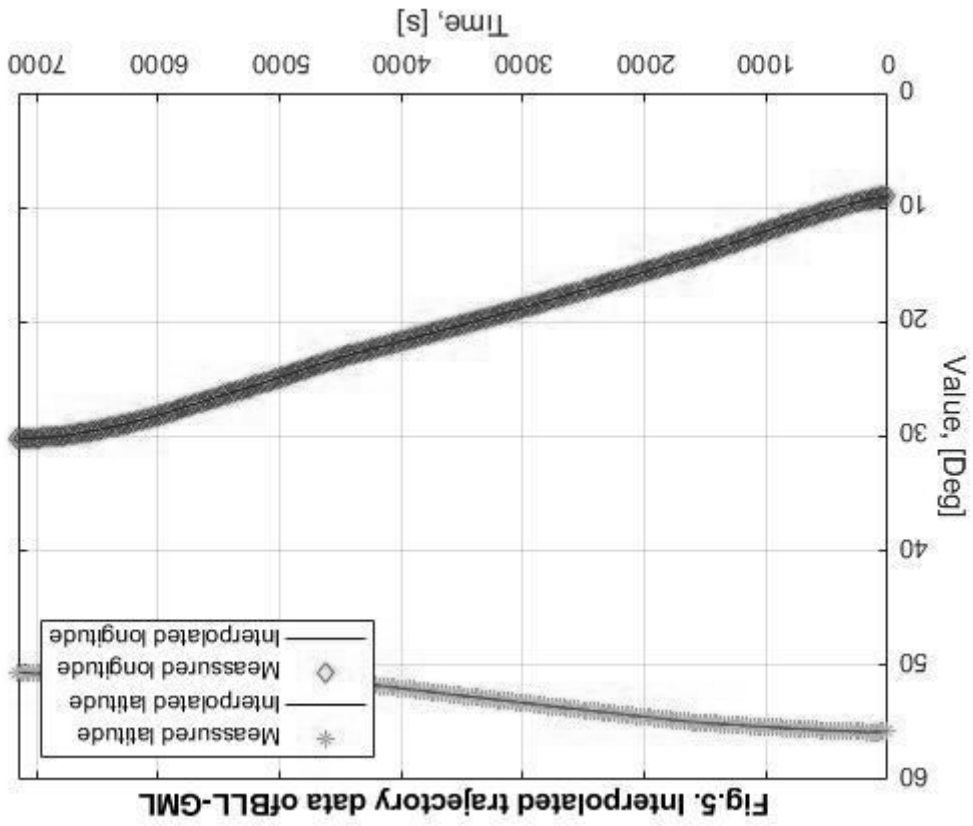


Fig.5. Interpolated trajectory data of BLL-GML

Рисунок 5.5 – Інтепований вертикальний профіль ПК рейсу UR-82060

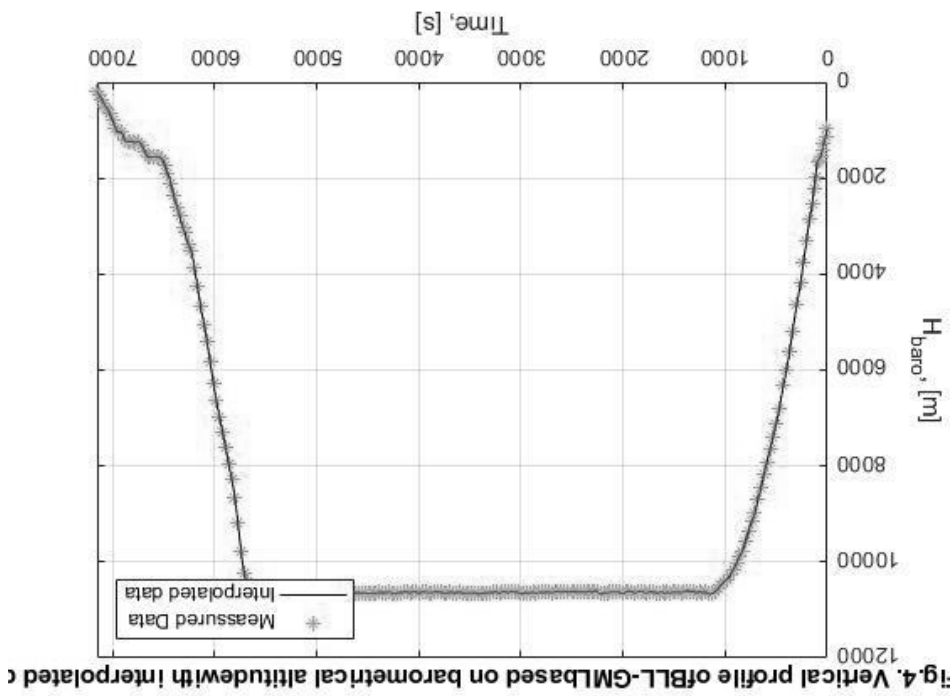
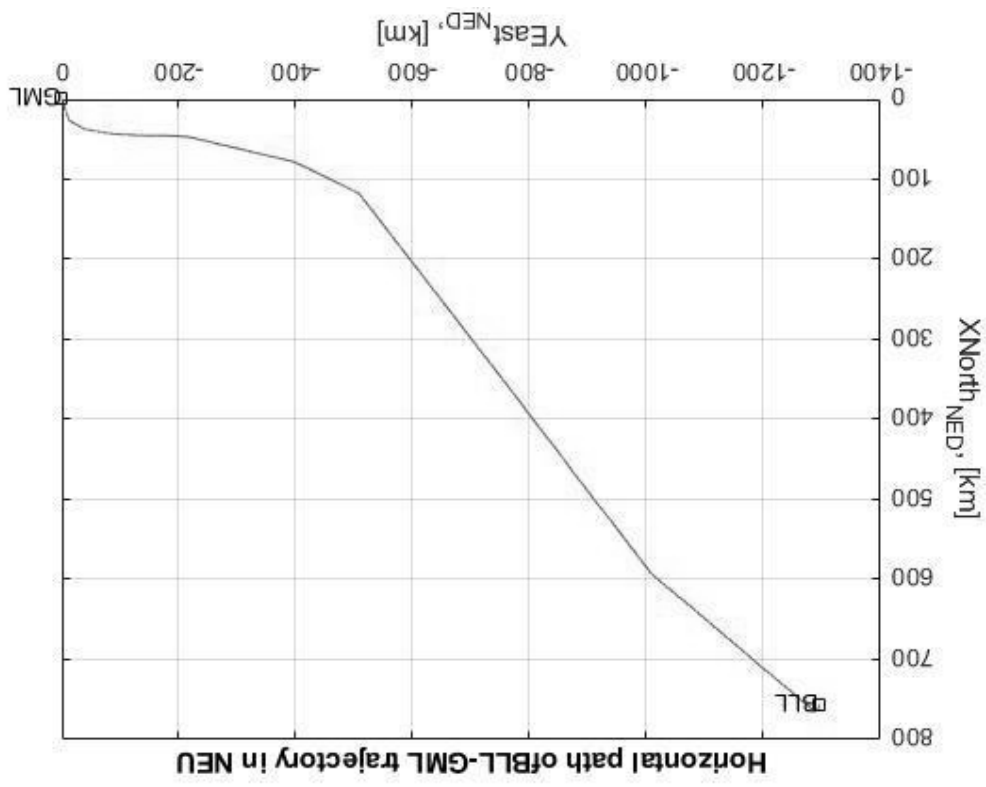


Fig.4. Vertical profile of BLL-GML based on barometrical altitude with interpolated

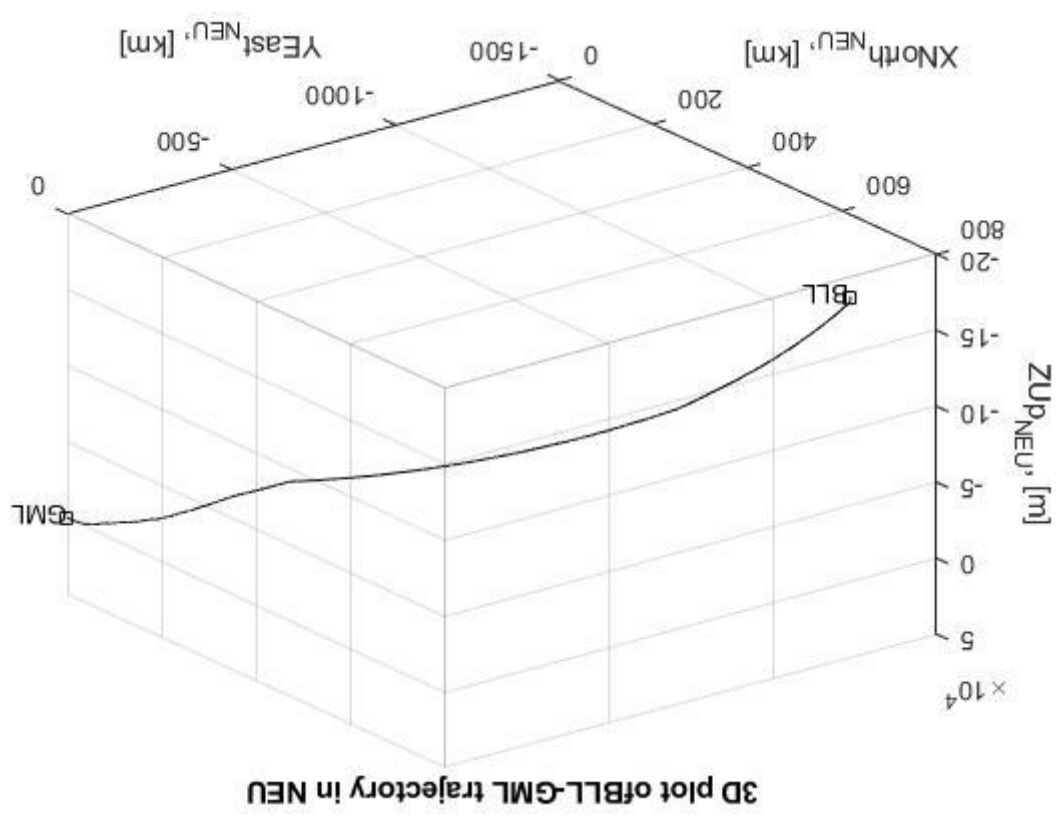


Рисунок 5.8 – Шлях руху рейсу UR-82060 у локальній системі координат



координат

Рисунок 5.7 – Траєкторія руху рейсу UR-82060 у локальній системі



#### 5.4. Розрахунок параметрів траєкторії

За набором даних тривимірної траєкторії руху виконаємо розрахунок компонентів швидкості, зокрема розрахуємо повну швидкість ПК, вертикальний та горизонтальний компонент. Результати розрахунку швидкості наведено на рис. 5.9, а оцінений курс літака на рис. 5.10. Також підрахуємо загальний час польоту, та довжину маршруту та траєкторії.

Загальний час польоту рейсу UR-82060 від 05 лютого 2022 склав 2 години 1 хв 49 с. Довжина траєкторії – 1581.2 км, а довжина маршруту (горизонтальної проекції) – 1581.7 км.

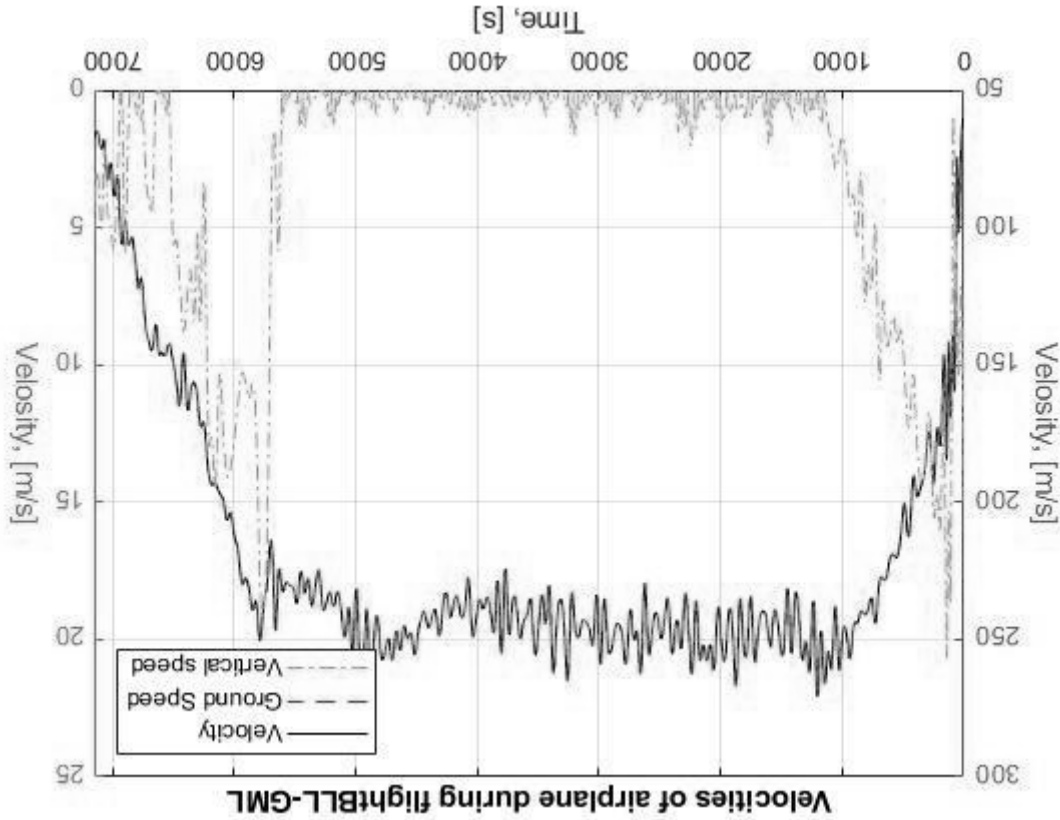
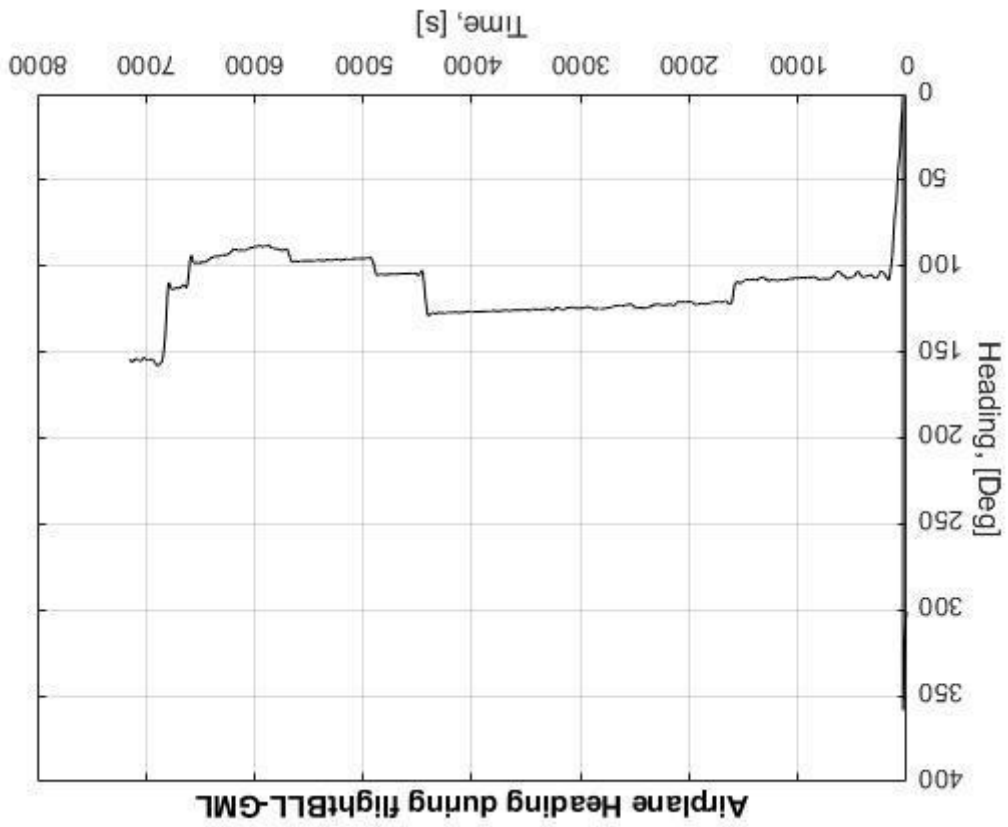


Рисунок 5.9 – Результати розрахунку швидкості польоту для рейсу UR-82060 від 05 лютого 2022

Рисунок 5.10 – Результати розрахунку курсу для рейсу UR-82060 від 05



Охорона праці – це система правових соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів і засобів щодо створення умов, які забезпечують безпеку, збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці.

Правовою основою законодавства щодо охорони праці є Конституція України, закони України: “Про охорону праці”, “Про охорону здоров'я”, “Про пожежну безпеку”, “Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення”, а також Кодекс законів про працю України (КЗпП).

Основні положення щодо реалізації конституційного права громадян про охорону їх життя і здоров'я в процесі трудової діяльності, регулювання за участю відповідних державних органів відносин між власником підприємства, установи і організації або утворювачем ним органом і працівником з питань безпеки, гігієни, праці та виробничого середовища і встановлення єдиного порядку організації охорони праці в Україні визначаються Законом України “Про охорону праці”, прийнятим 14 жовтня 1992 року.

Загальні положення по техніці безпеки при обслуговуванні приладів зв'язку викладені в “Правилах технічної експлуатації апаратури провідного та радіозв'язку” та “Інструкції по техніці безпеки і виробничої санітарії для електромеханіків та електромонтерів”.

Найважливішою умовою нормальної експлуатації пристроїв радіо зв'язку є виконання заходів щодо охорони праці. Вони спрямовані на утворення нормальних умов праці і безпечної роботи обслуговуючого персоналу.

Однією з найважливіших задач організації робочих місць і удосконалення умов праці є створення сприятливих фізіологічних та санітарно-гігієнічних умов на виробництві. При цьому основну увагу необхідно приділяти стану повітряного середовища, рівням освітленості, шуму, вібрації,

## ФАХІВЦІВ

### РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ НА РОБОЧОМУ МІСЦІ АВІАЦІЙНИХ

покращенню санітарно-побутового обслуговування, дотриманню режиму праці та відпочинку [10].

У робочому помешканні рекомендується комбіноване освітлення. Для загального освітлення застосовуються люмінесцентні світильники. Для місцевого освітлення, при роботі на стояках, варто використовувати переносні лампи напругою 36 – 40 В. Розетки з напругою 36 В повинні відрізнятися від розеток 220 В за формою і повинні бути відповідним чином підписані.

Для того, щоб у виробничих приміщеннях завжди було чисте повітря їх обладнують достатньою примусовою вентиляцією або періодично провітрюють.

Вибір системи вентиляції залежить від призначення будівлі та її об'єму, характеру виділення та вимог до системи вентиляції.

Сильний, постійно діючий шум шкідливо відбивається на здоров'ї людей та їх праездатності. Основними засобами боротьби з шумом є звукопоглинання, звукоізоляція, застосування глушительів шуму. Застосовуються й особисті засоби захисту від шуму, наприклад, спеціальні звукозбирні навушники різноманітних типів. Добрий ефект надає обробка звукозбирними матеріалами стін та стель у пехах з великим рівнем шуму.

До робочого місця регулювальника апаратури відноситься ділянка, на якій він проводить регулювальні профілактичні та ремонтні заходи. На робочому місці повинні знаходитися: принципиальні схеми устаткування, схеми електророз'єднання, посадові інструкції, графіки технологічних процесів, оперативний журнал, справний повний комплект інструменту, діелектричні рукавички, аптечка, вогнетасники, необхідний запас матеріалу для виконання профілактичних робіт. Інструмент повинен знаходитися в зручному та доступному місці удалині від пристроїв під напругою.

До роботи з устаткуванням припускаються особи, що ознайомилися з інструкцією експлуатації на системі, що мають кваліфікаційну групу по електробезпечності не нижче III, які знають „Правила технічної експлуатації апаратури провідного і радіозв'язку” та пройшли інструктаж з техніки безпеки.

## 6.1 Розрахунок освітлення приміщення проєктувальника апаратури

Приміщення повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до СНІП II-4-79 "Естественное и искусственное освещение".

Природне світло повинно проникати через бічні світлопроізи, зорієнтовані, як правило, на північ чи північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5%. Розрахунки КПО проводяться відповідно до СНІП II-4-79.

Робочі місця повинні бути достатньо освітлені. При штучному освітленні необхідно дивитися за тим, щоб воно було рівномірним. Цією умовою обумовлено використання комбінованого освітлення: загального та місцевого. При лампах накалювання загальне освітлення повинно складати 20%, місцеве – 80%; при люмінесцентному – загальне освітлення – 30%, місцеве – 70%.

Одним з основних питань охорони праці є організація раціонального освітлення виробничих приміщень.

Виробниче освітлення, правильно спроектоване і виконане, поліпшує умови здорової роботи, знижує стомленість, сприяє підвищенню продуктивності праці, сприятливо впливає на виробниче середовище, що чинить позитивний психологічний вплив на працівника, підвищує безпеку праці і знижує травматизм.

В усіх виробничих приміщеннях з постійним перебуванням у них людей для робіт у денний час варто передбачити природне освітлення як більш економічне й досконале з погляду медико-санітарних вимог у порівнянні зі штучним освітленням.

Раціональне електричне освітлення не можна вирішити довільним розміщенням джерел світла. Для вірного вибору світлового режиму необхідно знати норми освітлення, а також враховувати комплекс світлотехнічних і гігієнічних питань.

Проведемо розрахунок освітлення за методом коефіцієнта використання

світлового потоку [11].

Цей метод дає можливість визначити світловий потік ламп, необхідне для досягнення заданої освітленості, або при заданому світловому потоці знайти освітленість. Метод використовується для розрахунку повного освітлення при горизонтальній роботі поверхні з урахуванням світла, відбитого стінами, стелею та підлогою.

Світловий потік ламп розраховується за формулою, лм:

$$F = \frac{E_H \cdot K \cdot S \cdot Z}{\eta \cdot N \cdot n},$$

(6.1)

де  $E_H$  – нормативна величина освітленості, лк;

$K$  – коефіцієнт запасу вводять для компенсації зниження освітленості від

старіння ламп;

$S$  – площа поверхні, що освітлюється, м<sup>2</sup>;

$Z$  – відношення середньої освітленості до мінімальної (цей коефіцієнт

вводять у зв'язку з тим, що нормується не середня, а мінімальна освітленість);

$N$  – число світильників;

$n$  – число ламп у світильнику;

$\eta$  – коефіцієнт використання світлового потоку в частках одиниці, тобто

відношення світлового потоку, що падає на поверхню, що розраховується, до

сумарного потоку.

Згідно із санітарно-гігієнічними та технічними нормами використовуємо люмінесцентні лампи з наступними характеристиками:  $E_H = 750$  лк;

$F = 4220$  лм;  $K = 1,3$ ;  $n = 2$ . Розмір приміщення  $A = 8$  м;  $B = 5$  м;  $h = 2,8$

м.

Площа поверхні, що освітлюється, розраховується за формулою, м<sup>2</sup>:

Отже, для освітлення приміщення регулювальника апаратури необхідно 8

$$N = \frac{E_H \cdot K \cdot S \cdot Z}{\eta \cdot F \cdot n} = \frac{0.64 \cdot 4220 \cdot 2}{750 \cdot 1.3 \cdot 40 \cdot 1.1} = 7,9 \text{ шт.}$$

приміщення:

Визначимо число світильників необхідних для освітлення цього приміщення коефіцієнт використання світлового потоку рівним  $\eta = 64\%$ . За нормативними документами по будівництву виробничих приміщень

$$i = \frac{A \cdot B}{A + B} \cdot h \cdot (A + B) = \frac{8 \cdot 5}{2.8 \cdot (8 + 5)} = 1,1$$

Розрахуємо індекс  $i$  за формулою (5.3):

де  $h$  – розрахункова висота.

(6.3)

$$i = \frac{A \cdot B}{A + B} \cdot h \cdot (A + B),$$

формулою:

Для визначення коефіцієнта використання  $\eta$  знаходять індекс  $i$  за

$$S = 8 \cdot 5 = 40 \text{ м}^2$$

Розрахуємо площу за формулою (7.2):

$B$  – ширина приміщення.

де  $A$  – довжина приміщення;

(6.2)

$$S = A \cdot B,$$



## 6.2 Вимоги щодо електробезпеки, обладнання та організації робочого

### місця

Під час проектування радіосистем, монтажу силового електрообладнання та електричного освітлення будівель та приміщень для робочих місць необхідно дотримуватись вимог ПБЕ, ПТЕ, ПТЕ, ПБЕ, СН 357-77 "Інструкція по проектуванню силового освітельного обладнання промислових підприємств", затверджених Держбудом СРСР, ГОСТ 12.1.030 "СБТ Електробезопасность. Защитное заземление, зануление", ГОСТ 12.1.019 "СБТ Електробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты", ГОСТ 12.1.045, ВСН 59-88 Держкомархітектури СРСР "Електрооборудование жилых и общественных зданий. Нормы проектирования", Правила пожарной безопасности в Україні, а також розділів СНІП, що стосуються штучного освітлення і електротехнічних пристроїв, та вимог нормативно-технічної і експлуатаційної документації заводу-виробника ЕОМ.

Під час монтажу та експлуатації ліній електромережі необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, перейти на неторючу ізоляцію.

Робочі приміщення за електробезпекою поділяються:

- без підвищеної небезпеки;

- особливо небезпечні (присутність металевих підлог, підвищена

вологість);

- з підвищеною небезпекою.

Площа, виділена для одного робочого місця, повинна складати не менше 6 м<sup>2</sup>, а обсяг – не менше 20 м<sup>3</sup>.

Робочі місця відносно світлових промірів повинні розміщуватися так, щоб природне світло падало збоку, переважно зліва.

При розміщенні робочих місць з необхідною дотримуватись таких вимог:

Розрахуємо контур, який заземлює робоче місце. У якості заземлювачів прийматимуться вертикальні заземлювачі із сталевих труб довжиною  $l = 1,7$  м, діаметром  $D = 40$  мм, розташованих в ряд із відстанню між трубами у груповому заземленні  $d = 3,0$  м. Ширина горизонтальної

заземлення" в будівлі-яку пору року не повинен перевищувати  $4 \text{ Ом}$ . Згідно з вимогами "Правил улаштування електроустановок опір захисного із заземлювачем.

провідник, який з'єднує частини електричного устаткування, яке заземлюється, безпосередньому зіткненні з землею. Провідник, який заземлює це металевий сукупність металевих сполучених провідників, які знаходяться в провідників, що заземлюють. Заземлювач являє собою провідник або Захисне заземлююче обладнання складається з сукупності заземлювача і за значенням до потенціалу заземлюючого устаткування.

підіймання потенціалу основи, на якій стоїть людина, до потенціалу, близького заземленого устаткування, а також вирівнювання потенціалів за рахунок зумовлених замиканням на корпус. Це досягається зменшенням потенціалу заземлення – зниження до безпечних значень напруг дотику та кроку, електрообладнання, тобто при замиканні на корпус. Принцип дії захисного електричним струмом при появі напруги на конструктивних частинах під напругою. Воно призначено для усунення небезпеки ураження людей чи її еквівалентом металевих неструмоведучих частин, які можуть опинитися Захисним заземленням називають наявне електричне з'єднання з землею

### 6.3. Розрахунок захисного заземлення робочого місця

- прохід між рядами робочих місць має бути не меншим  $1 \text{ м}$ .
- повинна бути меншою  $2,5 \text{ м}$ ;
- відстань між тильною поверхнею одного робочого місця та іншого не  $1,2 \text{ м}$ ;
- відстань між бічними поверхнями робочих місць має бути не меншою за світловими прорізами;
- робочі місця розміщуються на відстані не менше  $1 \text{ м}$  від стін зі

сполучної сталеві смуги в = 32 мм, глибина закладення смуги в ґрунт  $t_0 = 0,5$  м. Ґрунт – глина, кліматична зона – четверта. Припустимий опір  $R_3 \leq 4$  Ом.

Визначимо опір одиночного вертикального заземлювача  $R_B$ , Ом:

$$R_B = 0,366 \cdot \left(\frac{l}{D}\right) \cdot \left[\lg\left(\frac{D}{2 \cdot l}\right) + \frac{1}{2} \cdot \lg\left(4S + \frac{4 \cdot S}{l} - l\right)\right] \quad (6.4)$$

де  $R$  – питомий опір ґрунту за рік, Ом · м;  
 $l$  – довжина сталевих труб,  $l = 1,7$  м;  
 $D$  – діаметр вертикальних заземлювачів із сталевих труб,  $D = 40$  мм;  
 $S$  – відстань від поверхні ґрунту до кінця занурення смуги в ґрунт, м.

Питомий опір ґрунту за рік  $R$ , Ом · м,

$$R = R_{sp} \cdot k^c, \quad (6.5)$$

де  $R_{sp}$  – питомий опір ґрунту,  $R_{sp} = 40$  Ом · м;  
 $k^c$  – коефіцієнт сезону, який враховує сезонне промерзання або

висихання,  $k^c = 1,2$  м.

$$R = 40 \cdot 1,2 = 48 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Відстань від поверхні ґрунту до кінця занурення смуги в ґрунт  $S$ , м,

$$S = t_0 + 0,5 \cdot l, \quad (6.6)$$

де  $t_0$  – глибина закладення смуги в ґрунт,  $t_0 = 0,5$  м;

$l$  – довжина сталевих труб,  $l = 1,7$  м.

$$S = 0,5 + 0,5 \cdot 1,7 = 1,35 \text{ М.}$$

Підставивши вихідні дані у формулу (5.4) одержимо

$$R_e = 0,366 \cdot \left( \frac{48}{1,7} \right) \cdot \left[ \lg \left( \frac{2 \cdot 1,7}{0,04} \right) + \frac{2}{1} \cdot \lg \left( 4 \cdot 1,35 + \frac{4 \cdot 1,35}{1,7} - 1,7 \right) \right] = 23,01$$

Ом

Кількість вертикальних заземлювачів  $n_1$  визначаємо з виразу:

$$n_1 = \frac{R}{R^B \cdot \eta^B} \quad (6.7)$$

де  $R^B$  – опір одиночного вертикального заземлювача,  $R^B = 23,01$  Ом;

$R^3$  – припустимий опір пристрою, який заземлює,  $R^3 = 4$  Ом;

$\eta^B$  – коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів,  $\eta^B = 1$

$$n_1 = \frac{4}{23,01} \approx 0,17 \text{ штук.}$$

Для знайденого  $n_1$  за формулою (6.4) визначимо за допомогою таблиці

A.3 [12] коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів  $\eta^B$  без урахування

впливу горизонтальної сполученої смуги, при  $\frac{l}{d} = \frac{1}{3} = 1,77$ .

$$\eta^B = 0,74.$$

Уточнимо кількість вертикальних заземлювачів  $n_2$  за формулою (6.7),

$$n_2 = \frac{23,01}{4 \cdot 0,74} \approx 8 \text{ штук.}$$

Для знайденого  $n_2$  аналогічно попередньому розрахунку визначимо  $\eta_B$ ,

$$\eta_B = 0,72.$$

Згідно останньому розрахунку  $\eta_B$  знайдемо кількість вертикальних

заземлювачів  $n_3$  за формулою (5.7),

$$n_3 = \frac{23,01}{4 \cdot 0,72} \approx 8 \text{ штук.}$$

Так як різниця між останніми числами заземлювачів  $n_2$  і  $n_3$  становить

менше одиниці, то останнє значення  $n$  приймемо рівним восьми штук, для якого

$$\eta_B = 0,72.$$

Визначимо результуючий опір проєктованого захисного пристрою, який

заземлює  $R_{rp}$ , Ом,

$$R_{rp} = \frac{R_B \cdot R_T}{R_B \cdot R_T + n \cdot R_T \cdot \eta_B},$$

(6.8)

де  $R_B$  – опір одиночного вертикального заземлювача,  $R_B = 23,01$  Ом;

$R_T$  – опір горизонтальної сполученої смуги, Ом;

$n$  – кількість вертикальних заземлювачів,  $n = 8$  штук;

$\eta_T$  – коефіцієнт використання горизонтальної сполученої смуги групового

заземлювача;

$\eta_B$  – коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів,  $\eta_B = 0,72$ .

Опір горизонтальної сполученої смуги  $R_T$ , Ом,

заземлювача  $\eta_r$  визначимо за таблицею А.4 [12],

Коефіцієнт використання горизонтальної сполученої смуги групового

$$l_r = 1,05 \cdot 3,0 \cdot 8 = 25,2 \text{ м.}$$

$n$  – кількість вертикальних заземлювачів,  $n = 8$  штук.

де  $d$  – відстань між трубами у груповому заземленні,  $d = 3,0$  м;

$$l_r = 1,05 \cdot d \cdot n, \quad (6.11)$$

Довжина горизонтальної смуги  $l_r$ , м,

$$p = 40 \cdot 2,0 = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

сезонне промерзання або висихання,  $K^c = 2,0$  м.

$K^c$  – коефіцієнт сезону для горизонтальних заземлювачів, який враховує

де  $p_{rp}$  – питомий опір ґрунту,  $= 40 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$

$$p = p_{rp} K^c \quad (6.10)$$

Питомий опір ґрунту за рік  $p$ , Ом  $\cdot$  м,

$t_0$  – глибина закладення сполученої смуги в ґрунт,  $t_0 = 0,5$  м.

$b$  – ширина горизонтальної сполученої сталевий смуги,  $b = 0,032$  м;

$l_r$  – довжина горизонтальної смуги, м;

де  $p$  – питомий опір ґрунту за рік, Ом  $\cdot$  м;

$$R_z = 0,366 \cdot \frac{l_r}{p} \cdot \lg \left( \frac{2 \cdot l_r}{b \cdot t_0} \right), \quad (6.9)$$

з метою захисту здоров'я населення України від впливу електромагнітних об'єктів та протягом усього періоду експлуатації.

проектів будівництва, прийняття в експлуатацію закінчених будівництвом здійснюється на стадіях погодження місця їх розташування, експертизи мобільного стільникового зв'язку та іншими радіотехнічними об'єктами державний санітарно-епідеміологічний нагляд за базовими станціями правил захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань», санітарно-епідеміологічний нагляд в Україні» та «Державних санітарних норм і епідемічного благополуччя населення», «Положення про державний Відповідно до вимог Закону України «Про забезпечення санітарного та

#### захисту навколишнього середовища

### 6.4. Державні санітарні норми випромінювання в Україні, як заходи

безпечні умови праці обслуговуючого персоналу: висотоміра малих висот безпілотного літального апарата створені сприятливі і вентиляції, освітлення та електробезпеки при виконанні робіт по проектуванню, заземлення робочого місця, а також дотримання всіх необхідних норм щодо Таким чином, за допомогою попереднього розрахунку захисного

штук, а довжину горизонтальної смуги  $l_r = 25,2$  м.

вертикальних заземлювачів, яку отримали в результаті розрахунку, восьми

У зв'язку з тим, що  $R_{rp} < R_3 (2,56 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом})$  приймаємо кількість

$$R_{rp} = \frac{23,01 \cdot 5,7}{23,01 \cdot 0,8 + 8 \cdot 5,7 \cdot 0,72} = 2,56 \text{ Ом.}$$

$$\eta_r = 0,78.$$

випромінювань наказом Міністерства охорони здоров'я України №239 від 01.08.96 р. були розроблені та затверджені «Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань» (далі – Санітарні норми). Дані норми були розроблені Лабораторією гієни електромагнітних випромінювань Інституту гієни і медичної екології ім. А.Н.

Марзеева Академії медичних наук України. Українські санітарні норми разом із методичними вказівками до них дозволяють суворо регламентувати умови розміщення та експлуатації базових станцій мобільного стільникового зв'язку і тим самим забезпечити належний захист здоров'я населення від впливу електромагнітних полів, що виникають у навколишньому середовищі. Відповідно до Санітарних норм, рівні електромагнітного поля, що створюються базовими станціями мобільного стільникового зв'язку на території, призначені для забудови, у приміщеннях житлових і громадських будинків, лікувально-профілактичних, оздоровчих, дитячих дошкільних і шкільних закладів, у будинках інвалідів і людей похилого віку, зонах відпочинку, на дитячих і спортивних майданчиках тощо не повинні перевищувати гранично допустимий рівень – 2,5 мкВт/см<sup>2</sup>. Слід зазначити, що вказаний рівень набагато жорсткіший, ніж норми, встановлені іншими країнами Європи та Америки. В Україні встановлення будь-якого радіотехнічного об'єкта, що випромінює в навколишнє середовище електромагнітну енергію, повинно погоджуватися з державною санітарно-епідеміологічною службою.

Вивчення питань впливу електромагнітних випромінювань на здоров'я людини займається велика кількість державних і недержавних науково-дослідних установ, а також міжнародні організації, основні з яких – Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) та Міжнародний комітет із неіонізуючого випромінювання. Незважаючи на значну кількість проведених досліджень, на сьогодні відсутні достовірні дані, які б підтверджували, що малопотенсивне електромагнітне випромінювання від базових станцій стільникового зв'язку, що розташовані та експлуатуються у відповідності до вимог санітарного законодавства, може завдавати шкоди здоров'ю людини.

Група британських вчених з Ессекського університету провела експеримент на 56 добровольцях, які скаржилися на хворобливу чутливість до електромагнітного випромінювання (у більшості з них поряд із будинками знаходилися базові станції). В ході експерименту було встановлено, що люди, які скаржались на підвищену чутливість до електромагнітного випромінювання,



не можуть чітко визначити, працює чи не працює в конкретний момент передавач базової станції. Коли автори експерименту говорили їм, що передавач увімкнений, респонденти відразу починали помічати в собі різні симптоми (одні – головний біль, інші – нудоту, деякі відзначали потішення зору), хоча насправді передавач залишався вимкненим. Інколи вчені робили витяг, що вимикають базову станцію, і тоді всі симптоми у волонтерів відразу зникали. Для експерименту були використані базові станції, що працюють у GSM та UMTS – стандартах. Таким чином, проведення експерименту дозволило стверджувати, що проблема впливу електромагнітного випромінювання на здоров'я населення має здебільшого психологічний характер.

Слід зазначити, що повідомлення в засобах масової інформації про виявлення випадків масового захворювання на рак населення, яке проживає поблизу місць встановлення базових станцій, викликали ряд протестів та сприяли зростанню соціальної напруги. На сьогоднішній день єдиним науково встановленим наслідком дії на людину РЧ-сигналів є підвищення температури тіла ( $> 1^{\circ}\text{C}$ ) при дії полів дуже високої напруженості, які існують тільки на деяких промислових підприємствах (наприклад, поля, що випромінюються РЧ-нагрівачами) [13]. Коли енергія радіохвиль поглинається органами, може виникнути ефект нагріву, залежний від інтенсивності дії. Рівень нагріву, що виникає від дії радіохвиль в межах встановлених рівнів настільки низький, що нормальні для тіла процеси терморегуляції фактично розсіюють будь-яке тепло, яке може бути вироблене.

Всі встановлені на сьогоднішній день результати дії РЧ-випромінювання на здоров'я пов'язані з нагрівом. РЧ-поля є неіонізуючими і не руйнують молекулярну структуру біологічного матеріалу. Так звані «нетеплові» результати дії були і продовжують бути предметом оцінки. До теперішнього часу, думка експертів з охорони здоров'я полягає в тому, що література про результати нетеплової дії є нечисленною і суперечливою і їх зв'язок із здоров'ям людини також сумнівний для використання даної інформації як підстави для встановлення меж дії електромагнітних полів на людину. Глибина, на яку

радіохвилі проникають в опромінювані тканини, залезають від використовуваної

частоти.

Ніякі підтверджені дослідження до теперішнього часу не показали

несприятливих для здоров'я наслідків при рівнях дії РЧ-сигналів організм

загаломоприйнятим. Фактично, при рівних рівнях дії РЧ-сигналів організм

людини поглинає в п'ять разів більше сигналів від радіоприймача або телевізора

у зв'язку з їх нижчою частотою, ніж від базових станцій. Це пояснюється тим,

що частоти, використовувані в радіомовленні (близько 100 МГц) і телебаченні

(близько 300 - 400 МГц), нижче за частоти, використовувані в мобільному

телефонному зв'язку (900 МГц і 1800 МГц). До того ж, станції радіо- і

телебачення діють вже більше 50 років, і яких-небудь несприятливих дій на

здоров'я за цей час не виявлено. Всесвітня Організація Охорони Здоров'я

заснувала спеціальний Міжнародний проект по вивченню електромагнітних

полів та їх впливу на здоров'я людини. Провідні галузеві міжнародні організації,

такі як Міжнародна комісія із захисту від неіонізуючого випромінювання

(МКЗНВ), Міжнародне агентство з дослідження раку (МАІР), Інститут

інженерів з електротехніки і радіоелектроніки (ІІЕР) підходять до вивчення

даних проблем максимально серйозно. Зокрема, ВООЗ, реалізуючи

Міжнародний проект по електромагнітних полях (ЕМП), розробила програму з

моніторингу наукової літератури про це явище для оцінки його наслідків для

здоров'я в результаті дії інтенсивністю про 0 до 300 Гц з метою надання

рекомендацій відносно можливих небезпек і визначення відповідних заходів по

їх зменшенню. Особливо цікавлять поля радіочастотного діапазону, які

створюються мобільними терміналами або базовими станціями мобільного

зв'язку.

Після всесторонніх міжнародних оглядів Міжнародний проект по ЕМП

стимулював проведення досліджень для запобігання прогалин в знаннях. У

відповідь на це національні уряди і дослідницькі інститути вклали більше 250

мільйонів доларів в дослідження впливу електромагнітних полів за останніх 11

років [14]. Дані дослідження є масштабним науково-практичним завданням. Це

пов'язано з тим, що складно відрізнити можливі наслідки дії дуже низьких сигналів, що випускаються базовими станціями, від наслідків дії інших сильніших РЧ-сигналів в навколишньому середовищі. В більшості випадків ученими різних країн досліджувалася дія ЕМП на користувачів мобільних телефонів. Дослідження мозкових хвиль, сприйняття і поведінки людей і тварин після дії РЧ-полів, таких як поля, що створюються мобільними телефонами, не виявили несприятливих наслідків для здоров'я. Під час цих досліджень рівні дії РЧ-сигналів прибіжно в 100 разів перевищували рівні дії на населення сигналів базових станцій зв'язку або бездротових мереж. Як-небудь дослідованих даних про порушення сну або серцево-судинних функцій не зареєстровано. Особливу стурбованість людей викликає неперевірена інформація про випадки захворювання раком в районах, прилеглих до базових станцій мобільного зв'язку. З географічної точки зору випадки захворювання раком, в яких би то не було популярних, розподілені нерівномірно.

Враховуючи той факт, що людину оточує велика кількість базових станцій зв'язку, можливе випадкове виникнення захворювань раком в місцях, розташованих поряд з базовими станціями. Більш того, часто зазначаються різні типи раку, які не мають загальних ознак і, тому, навряд чи можуть мати загальну причину. Враховуючи дуже низькі рівні дії і отримані на сьогоднішній день результати досліджень, можна відзначити, що не існує яких-небудь переконливих наукових даних, підтверджуючих, що слабкі РЧ-сигнали, що випускаються базовими станціями і бездротовими мережами, приводять до несприятливих наслідків для здоров'я.

З огляду на те, що надфонові електромагнітні хвилі здатні несприятливо впливати на фізіологічні функції людини та спричиняти патологічні розлади і захворювання, не треба нехтувати можливою потенційною загрозою будь-якого додаткового опромінення, зокрема того, джерелом якого є стільниковий зв'язок. Користуючись ним, треба дотримуватися певних профілактичних заходів:

- звертайте увагу на таку технічну характеристику мобільного терміналу, як коефіцієнт поглинання випромінювання (SAR). Відносно безпечними вважаються пристрої, які мають SAR не вище 1,0, краще до 0,5 - 0,6; - використовуйте спеціальні малогабаритні захисні пристрої (вставки тощо), які зменшують потужність випромінювання пристав безпосередньо на тіло; - без надзвичайної потреби не закріплюйте вимкнені пристрої на поясі, не тримайте їх у кишенях, використовуйте для цього кейси, сумки тощо, які тримаєте в руках; Дотримання цих простих рекомендацій значно зменшить потенційну загрозу негативного впливу випромінювання на здоров'я. Випромінювання антен базових станцій практично ніякого впливу на здоров'я людини не мають. Однак час постійного користування мобільним терміналом дорослою людиною в екранованих приміщеннях (кабіна, салон автомобіля, мікроавтобуса тощо) має бути обмеженим до 15 хвилин на добу.

Пам'ятайте, що ваш приймач телефону увесь час перебуває в активному стані очікування радіозв'язку, і тому не носіть його у кишені чи на грудях як медальйон, особливо це стосується молодих людей, ватітних жінок і дітей.

При користуванні терміналом не затупляйте задню кришку його корпусу долонею або пальцями руки. Наше тіло сильно поглинає електромагнітну хвилю, ослаблюючи сигнал від базової станції, що змушує пристав працювати з підвищеною потужністю.

Некалібровані цифрові камери з можливістюми ближнього інфрачервоного діапазону є відносно дешевими датчиками, але вони мають деяку додаткову обробку перед тим, як фотографії можна використовувати для кількісних оцінок рослинності. Після того, як витягнуті DN перетворюються на коефіцієнт відбиття та застосовуються інші поправки, такі як вплив сонця, починають з'являтися розумні тенденції. Однак стандартне відхилення для кожної дати графіка NDVI все ще високе ( $>0,1$ ), що пояснюється мініливістю від графіка до графіка NDVI усереднені сайту. Нашим наступним кроком буде порівняння цих сезонних профілів NDVI з аналогічними профілями, отриманими з супутникових даних.

Поточні дослідження показали відмінні характеристики за допомогою методу виключення пікселів з яскравістю нижче порогу з оцінки NDVI із конкретних зображень камери. Запропонований критерій відповідного освітлення для NDVI оцінка полягає в тому, що освітленість становить більше 0,033 (лк · с). Це відповідає тому, що яскравість зображення повинна бути більше 72 з 255 для гами 2,2. Коефіцієнт різниці між розрах NDVI із зображень камери та розрахованого за виміряним коефіцієнтом відбиття залишається в межах приблизно 3%. Для цієї мети використовуються цифрові камери, як-от деяких фотометрів, може бути рекомєндовано встановити гамму на 1,8, а не на 2,2 під час обробки зображення для оцінки NDVI.

Підсумовуючи, KНаwk Zерhуt з BПЛA виявився надійною багатоспектральною платформою дистанційного зондування. Ефективне калібрування NDVI було запропоновано та представлено разом із наземними та льотними випробуваннями для підтвердження. Запропонована система була перевірена під час місії з оцінки шкоди від торнадо. Створені мультиспектральні ортомозаїчні карти показали подібні моделі культур і можуть бути використані для прогнозування шляху поширення торнадо.

## ВИСНОВКИ

## СПИСОК ВИКОПИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Воробьева А.А. ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ [Электронный ресурс]. - СПб УИТМО. 2012. - 168 с. - Режим доступа <https://staff.tiame.uz/storage/users/153/books/HZCp5NIGFRJJCnPYdy0yJrg3LdKztnVggvFHjt.pdf>
2. Ambrosia, V.G.; Wegener, S.; Zajkowski, S.; and others. The Ikhana unmanned airborne system (UAS) western states fire imaging missions: From concept to reality (2006–2010) / Geocarto Int. - 26. - 2011. - pp. 85-101.
3. Hinkley, E.A.; Zajkowski, T. USDA Forest Service-NASA: Unmanned aerial systems demonstrations—pushing the leading edge in fire mapping / Geocarto Int. - 26. - 2011. - pp.103-111.
4. Fladeland, M., Sumich, M., Lobitz, B. and others. The NASA SIFERRA science demonstration programme and the role of small-medium unmanned aircraft for earth science investigations. / Geocarto Int. - 26. - 2011. - pp.157-163.
5. Breckenridge, R.P.; Dakins, M.E. Evaluation of bare ground on rangelands using unmanned aerial vehicles. / GISci. Remote Sens. - 2011. - 48. - pp.74-85.
6. Laliberte, A.S.; Winters, C.; Rango, A. UAS remote sensing missions for rangeland applications. / Geocarto Int. - 26. - 2011. - pp.141-156.
7. Laliberte, A.S.; Rango, A. Image processing and classification procedures for analysis of sub-decimeter imagery acquired with an unmanned aircraft over arid rangelands. / GISci. Remote Sens. - 2011. - 48. - pp.4-23.
8. Lejot, J., Delacourt, C., Piégay, H. and others. Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. / Earth Surf. Proc. Land. - 32. - 2007. - pp. 1705-1725.
9. Dunford, R., Michel, K., Gagnage, M. Potential and constraints of Unmanned Aerial Vehicle technology for the characterization of Mediterranean riparian forest. / Int. J. Remote Sens. - 30. - 2009. - pp. 4915-4935.

10. Hervouet, A., Dunford, R., Piegay, H. and others. Analysis of post-flood recruitment patterns in braided channel rivers at multiple scales based on an image series collected by unmanned aerial vehicles, Ultralight aerial vehicles, and satellites/ GISci. Remote Sens. - 48.- 2011- pp. 50-73.
11. International Civil Aviation Organization. Doc.10019, Manual on Remotely Piloted Aircraft System (RPAS). - 2015.
12. Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer [Електронний ресурс] / Jet Propulsion Laboratory, 2021. Режим доступу: <https://aviris.jpl.nasa.gov/html/aviris.overview.html> (доступ - 16 листопада, 2021)
13. AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) [Електронний ресурс] / EASA Earth on-line, 2021. Режим доступу: <https://earth.esa.int/web/eoportal/airborne-sensors/content/-/article/aviris> (доступ - 17 листопада, 2021)
14. Kruse, J. W., Boardman, A. B., Lefkoff A. B. and others. HYMAP : AN AUSTRALIAN HYPERSPECTRAL SENSOR SOLVING GLOBAL PROBLEMS – RESULTS FROM USA HYMAP DATA ACQUISITIONS / Proceeding of the 10th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference, Adelaide, Australia, 21-25 August. - 2000 — Causal Productions. - pp. 1-17.
15. Cocks T., Janssen R., Stewart A., Wilson I. and Shields T. THE HYMAP AIRBORNE HYPERPECTRAL SENSOR: THE SYSTEM, CALIBRATION AND PERFORMANCE / Proceeding of the 1 st EARSSEL Workshop on Imaging Spectroscopy, Zurich, October 1998. - Paris: European Association of Remote Sensing Laboratories.
16. Ларін В. Ю., Дюдачук І. Л. Дистанційне зондування покладів корисних копалин за допомогою безпілотного авіаційного комплексу / СТАЛІЙ РОЗВИТОК ГЛОБАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ, НАВІГАЦІЇ, СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ПОВІТРЯНОГО РУХУ CNS/ATM.

- тези доповіді Всеукраїнської науково-технічної конференції, 22-25 листоп. – К.: НАУ, 2021. – С.31-33.
17. Riley, D., Cudahy, T., Hewson, R., Jansing, D., Hackwell, J. SEBASS imaging for Copper Porphyry and Skarn Deposits, Yerington, NV / Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration" edited by B. Millkret. - 2007. - p. 1151-1157.
18. Hackwell J.A., Warren D.W., Bongiovi R.P., and other. LWIR/MWIR Imaging Hyperspectral Sensor for Airborne and Ground-Based Remote Sensing / Proc. SPIE, Imaging Spectrometry II. - vol. 2819. - 1996 - pp.102-17
19. R. Greg Vaughan, Wendy M. Calvin, James V. Taranik SEBASS hyperspectral thermal infrared data: surface emissivity measurement and mineral mapping / Remote Sensing of Environment — 85 - 2003- pp.48–63.
20. Никитский В.Е., Тлебовский Ю.С. (ред.) Магнитотерапевтика: Справочник геофизика - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1990. - 470 с.
21. М.И. Эпов, И.Н. Злыгостев. Применение беспилотных летательных аппаратов в аэрогеофизической разведке [Электронный ресурс] / Интеракто Геосибирь- №3. - 2012. Режим ДОСТУП: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-bespilotnykh-letatelnykh-apparatov-v-aerogeofizicheskoy-razvedke> (ДОСТУП 03.12.2021)
22. Christensen, P. R., M. D., Piatek, J. L., Ruff, S. W., & Stefanov, W. L. A thermal emission spectral library of rock-forming minerals. / Journal of Geophysical Research. -2000. — 105(E4). - pp. 9735 – 9739.
23. Johnson, B. R. In scene atmospheric compensation: Application to SEBASS data collected at the ARM site. Part I. / Aerospace Corporation technical report. - 1998- ATR-99 (8407).
24. Infrared camera optris PI 400i / PI 450i [Электронный ресурс] / OPTRIS Infrared Measurements. - 2021. Режим ДОСТУП: <https://www.optris.global/thermal-imager-optris-pi-400i-pi-450i> — (ДОСТУП 03.12.2021).



25. Великанов Д.А. Высокочувствительные методы исследования магнитных свойств кристаллических и плёночных магнитных систем / Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. - Красноярск. - 2017. - 436с.
26. GEM GSM-19 Cost Effective and High Precision Overhauser Magnetometer [Электронный ресурс] / GEM Systems - Режим доступа: <https://www.gemsys.ca/ru/gged-overhauser-magnetometer/> - (доступ 09.12.2021).
27. Samson, C., Straznicky, P., Laliberte, J., and others. Designing and building an unmanned aircraft system for aeromagnetic surveying / 80th Annual meeting of the Society of Exploration Geophysicists. - 29. — Denver, USA. - 2010. - pp. 1167-1171.
28. Samson, C., Cunningham, M., Wood, A. and others. Magnetic surveying using an unmanned system for geological mapping / Unmanned Systems Canada Conference. Montreal: 4-6 November. - 2014.
29. FGMD [Электронный ресурс] / SENSYS : Magnetometers & Survey solutions . - Режим доступа: <https://sensysmagnetometer.com/products/fgm3d/> - (доступ -10.12.2021).
30. Tezkan B., Stoll J.B., Bergers R., Groblich H. Unmanned aircraft system proves itself as a geophysical measuring platform for aeromagnetic surveys / First Break. - Vol 29. - No 4. -2011. - pp.103 – 105.
31. Cunningham M. Aeromagnetic surveying with unmanned aircraft systems // A thesis of Master of Science Diss. - Carleton University, Canada, Ontario. - 2016. -144 p.
32. Maley J.A. An investigation into low-cost manufacturing of carbon epoxy composites and a novel “mouldless” technique using the Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM) method / M.A.Sc. Thesis. - Carleton University. - 2008. - 126p.
33. Samson C., Straznicky P., Laliberte J. and others. Designing and building an unmanned aircraft system for aeromagnetic surveying / Proceedings of the SEG

- 80th Annual International Meeting Denver, Colorado. - SEG Expanded Abstracts, USA. - 2010. - pp. 1167-1171.
34. Sterligov B, Cherkasov S. Reducing Magnetic Noise of an Unmanned Aerial Vehicle for High-Quality Magnetic Surveys / International Journal of Geophysics Volume. - Hindawi Publishing Corporation. - 2016. - 7p. - dx.doi.org/10.1155/2016/4098275.
35. Злыгостев И.Н., Савлюк А.В. Аэрогеофизический комплекс для измерения вектора магнитного поля земли с высокой пространственной плотностью: тенденции развития, результаты разработок / Сборник научно-технической конференции "Научное приборостроение: современное состояние и перспективные развития", Москва, 15-16 ноября. - 2016. - с.71-74
36. Laliberte A.S., Goforth M.A., Steele C.M., Rango A. Multispectral Remote Sensing from Unmanned Aircraft: Image Processing Workflows and Applications for Rangeland Environments / Remote Sensing - 2011 — 3(11) - pp.2529-2551. <https://doi.org/10.3390/rs3112529>
37. Parshin A. V., Morozov V. A., Blinov A. V., and others. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey / Geo-spatial Information Science. - Wuhan University: Taylor & Francis Group. - 2018. - DOI: 10.1080/10095020.2017.1420508
- 38.1. Опис модему на сайті-виробника Microhard URL: <https://www.microhardcorp.com/P400.php>
- 39.2. HEX HereLink опис системи зв'язку від виробника URL: <https://docs.cubepilot.org/user-guides/hereLink/hereLink-overview>
- 40.3. Опис модему зв'язку Silvus URL: <https://silvustechologies.com/products/streamcaster-radios/>
- 41.4. Опис модему зв'язку Taisync Viulinx URL: [https://doc.makeflyeasy.com/](https://taisync.com/modules/doc.makeflyeasy.com/) <https://ardupilot.org/plane/index.html>
43. <https://docs.px4.io/master/en/concept/architecture.html>
44. Блажей Б.В., Національний авіаційний університет, м. Київ,

45. Актуальні та перспективні системи зв'язку БПЛА з НСР 2021 – 36 ірник  
 тез CNS-ATM 2021 – електронний
46. *Louis C. Westphal*. Handbook of Control Systems Engineering. — 2nd edition; The Springer International Series in Engineering and Computer Science. — Springer, 2001. — T. 635. — 1063 c. — ISBN 978-0792374947.
48. Consideration about UAV command and control. Ground Control Station URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1297/1/012007>
50. Priscariu Vasile<sup>1</sup>, Catalin Cioacă<sup>1</sup>, Doru Luculescu<sup>1</sup>, Andrei Luchian<sup>2</sup> and Sebastian Pop<sup>2</sup> Published under licence by IOP Publishing Ltd
51. [https://www.researchgate.net/publication/329422590\\_Umanned\\_Aerial\\_Vehicle\\_Classification\\_Applications\\_and\\_Challenges\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/329422590_Umanned_Aerial_Vehicle_Classification_Applications_and_Challenges_A_Review)
52. M. Boon, A. P. Drijfhout, and S. Testamichael, "Comparison of a fixedwing and multi-rotor nav for environmental mapping applications: A case study," ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W6 08 2017.
54. G. Ellis, "Chapter 13 - model development and verification," in Control System Design Guide (Fourth Edition) (G. Ellis, ed.)
55. Boston: Butterworth-Heinemann, fourth edition ed., 2012.
56. PX4 Dev Team, "Controller diagrams."
57. N. Kuyvenhoven. PID Tuning Methods: An Automatic PID Tuning with MathCad. Calvin College, 2002.
58. L. Kungin Y. Shengyi and S. Jiao. "Design and Simulation of the Longitudinal Autopilot of UAV Based on Self-Adaptive Fuzzy PID Control." In: International Conference on Computational Intelligence and Security (2009)
59. Stevens, B. L., Lewis, F. L., and Johnson, E. N. *Aircraft Control and Simulation*, 3rd ed., John Wiley, 2016. 53, 94
60. Dorf, R. C., Bishop R. H., *Modern Control Systems*, 13th ed., Pearson, 2017. 64, 65, 73
61. Ogata, K., *Modern Control Engineering*, 5th edition, Prentice Hall, 2010. 64, 65, 73

62. Megson, T., *Aircraft Structures for Engineering Students*, 5th ed., 2012. 32, 182
63. Berger, A. S., *Embedded Systems Design*, CMP Books, 2002. 125
64. Cady, F. M., *Microcontrollers and Microcomputers*, Oxford University Press, 1997. 124, 125
65. Autopilot Design of Unmanned Aerial Vehicle Ahmed Hassan Ahmed\*, Bahaeldin Gamal, Ahmed Nasr Ouda, Ahmed Mohsen Kamel and Yehia Zakaria El-Halwagy *Military Technical Research Center, Egypt* [https://www.researchgate.net/publication/224057242\\_A\\_HardwareSoftware\\_Architecture\\_for\\_UAV\\_Payload\\_and\\_Mission\\_Control](https://www.researchgate.net/publication/224057242_A_HardwareSoftware_Architecture_for_UAV_Payload_and_Mission_Control) <http://www.viewprtech.com/index.php.ac=article&cat=read&did=279>
66. Азаров І., Сидоренко В., Серета Ю. Використання безпілотного літального апарата як засобу дистанційного моніторингу надзвичайних ситуацій // *Безпека життєдіяльності*. – 2015. – № 2. – С. 30.
67. Безпілотні системи офіційний сайт фірми BAT ZALA AERO GROUP [Електронний ресурс]. URL: <http://zala.aero>
68. Беляев В. І., Оптичне Дистанційне зондування / Беляев В. І., Катковський Л. В. Мінськ. 2006. 455 с.
69. Бондар О.І. Моніторинг навколишнього середовища / [О. І. Бондар, І. В. Корінько, В. М. Ткач, О. І. Федоренко]; під ред. О. І. Федоренко. – К.-Х.: ДЕЛІ-ТІ, 2005. – 126 с.
70. Гребеніков А. Г., Мясниця А. К., Парфенюк В. В. Загальні види і характеристики безпілотних літальних апаратів: справ, посібник. Харків. 2008. 377 с.
71. Зосимович М. А. Безпілотники для екологічного моніторингу. М.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 484 с.
72. Інформація про стан навколишнього природного середовища // *Словник-довідник з екології: навч.-метод. посіб. / уклад. О. Г. Лановенко, О. О. Остапшина*. — Херсон : III Вишемирський В. С., 2013. — С. 104.

73. Катковський Л. Б. Бататоспектральне Дистанційне зондування. М.: LAP  
LAMBERT Academic Publishing, 2011. 396 с.
74. Козодеров В. В., Дмитрієв Є. В., Каменцев В. П. Когнітивні технології  
дистанційного зондування в природокоористуванні. М.: МДУ ім. М. В.  
Ломоносова, Тверський державний ун-т. 2016. С. 279.
75. Комягін С. І. Електроматрітна стійкість безпілотних літальних апаратів.  
М.: Красанд. 2015. 432 с.
76. Коротких А. М. Використання даних дистанційного зондування. М.: LAP  
LAMBERT Academic Publishing, 2012. 88 с.
77. Кошкін А. А. Безпілотні авіаційні системи. М.: Стратегічні пріоритети.  
2016. С. 676.
78. Моніторинг використання та екологічного стану земель за допомогою  
безпілотних літальних апаратів / Триснюк В. М. [та ін.] / Сучасні  
інформаційні системи Advanced Information Systems. 2018. Т. 2, № 4. С.  
124-127
79. Логорєв В. І. Безпілотні літальні апарати. Навантаження і нагрів /  
Навчальний посібник для СПО. М.: Юрайт. 2018. 230 С.
80. Растопчин В. В. Безпілотні авіаційні системи / Растопчин В. В., Румянцев  
С. С. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.avia.ru>
81. Рендалл У. Бірд, Тімоті У. Маклейн. Мали безпілотні літальні апарати.  
Теорія і практика. М.: Техносфера. 2015. 312 с.