

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра інформаційних технологій в телекомунікаціях

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Марія СКУЛИШ

«_____» _____ 2025 р

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Інформаційно-комунікаційні
технології»
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
на тему: «Метод покращення якості передачі безпроводного сигналу на
збільшену відстань»

Виконав: здобувач вищої освіти 4 курсу, групи ПІ-11
Михайловський Владислав Володимирович

(підпис)

Науковий керівник:
Старший викладач кафедри ІТТ НН ІТС, кандидат технічних наук
Педан Станіслав Ігорович

(підпис)

Рецензент:
Доцент кафедри ІБ НН ФТІ, доктор технічних наук
Прогонов Дмитро Олександрович

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Здобувач вищої освіти _____

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем**

Кафедра інформаційних технологій в телекомунікаціях

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Освітньо-професійна програма «Інформаційно-комунікаційні технології»
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____Марія СКУЛИШ
«_____» _____2025р

ЗАВДАННЯ

**на дипломну роботу студенту
Михайловському Владиславу Володимировичу**

1. Тема роботи : «Метод покращення якості передачі безпроводного сигналу на збільшену відстань», керівник роботи Педан Станіслав Ігорович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри ІТТ НН ІТС, затверджені наказом по університету від 26.05.2025 р. №1755-с
2. Строк подання студентом роботи 09 червня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи : спеціальна література, ноутбук та смартфон для проведення дослідження, матеріали мережі інтернет, власні роздуми.
4. Зміст пояснювальної записки дипломної роботи
Актуальність та структура бездротових мереж
Фактори, що впливають на якість сигналу при передачі на великі відстані
Сучасні рішення для підтримки зв'язку
Концепція візуальної стабілізації положення повітряного ретранслятора
Розробка методу стабілізації на основі оптичної одометрії
Загальні висновки
5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)
Зміст дипломної роботи;
Мета роботи;
Застосування 3D-ретрансляції за допомогою БПЛА в декількох сценаріях
Схема стабілізації ретранслятора за допомогою оптичного потоку

Блок-схема методу стабілізації положення ретранслятора на основі аналізу оптичного потоку

Архітектура трансформер-мережі FlowFormer для обчислення оптичного потоку

Приклад накладання векторів оптичного потоку та інтегральних показників руху на відеокадр

Висновки.

6. Дата видачі завдання : «12» жовтня 2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення з темою дипломної роботи, пошук всієї потрібної інформації	13.01 – 26.02	виконано
2	Розділ 1. Аналіз проблеми покращення якості сигналу та збільшення відстані передачі бездротових сигналів в умовах дії радіоперешкод	11.03 – 27.04	виконано
3	Розділ 2. Огляд методів стабілізації положення об'єктів у просторі	28.04 – 11.05	виконано
4	Розділ 3. Дослідження методів розрахунку оптичного потоку відеосигналу	05.05 – 11.05	виконано
5	Розділ 4. Розробка методу стабілізації об'єкту шляхом аналізу оптичного потоку його відеосигналу	05.05 – 12.05	виконано
6	Розділ 5. Практична реалізація та визначення метрик якості методу стабілізації положення об'єктів	13.05 – 28.05	виконано

Студент _____

Владислав МИХАЙЛОВСЬКИЙ

Науковий керівник _____

Станіслав ПЕДАН

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить 77 сторінок, 8 рисунків, 1 таблицю, а також використовує 37 джерел.

Актуальність теми: З появою нових бездротових технологій і потребою в довготривалому зв'язку в умовах радіоперешкод потрібні адаптивні методи забезпечення високої якості сигналу. Традиційні рішення часто не пристосовані до швидких змін середовища. Використання візуальної стабілізації дозволяє в реальному часі відстежувати рух ретранслятора (наприклад, БПЛА) відносно фону та автоматично коригувати його положення для мінімізації втрат сигналу. Тому розробка ефективного методу стабілізації на базі аналізу оптичного потоку є вкрай актуальною для сучасних телекомунікацій.

Метою дипломної роботи є розробка методу підвищення якості і збільшення відстані передачі бездротового сигналу в умовах дії радіоперешкод шляхом стабілізації положення комунікаційного пристрою (ретранслятора) на основі аналізу оптичного потоку його відеосигналу.

Об'єктом дослідження є процес стабілізації положення комунікаційних пристроїв (ретрансляторів) у просторі за допомогою візуальної інформації (відеопотоку) в умовах радіоперешкод.

Предметом дослідження є методи аналізу оптичного потоку відеосигналу комунікаційного пристрою для забезпечення високої якості безпроводного зв'язку.

Методами дослідження є системний аналіз існуючих підходів до стабілізації та обчислення оптичного потоку, математичне моделювання методів Фарнебека, Лукаса–Канаде та Хорна–Шунка з оцінкою їхніх обчислювальних ресурсів, розробка програмного забезпечення для обчислення оптичного потоку.

Ключові слова: БЕЗПРОВІДНИЙ СИГНАЛ, РАДІОПЕРЕШКОДИ, ОПТИЧНИЙ ПОТІК, СТАБІЛІЗАЦІЯ ПОЛОЖЕННЯ, БПЛА-РЕТРАНСЛЯТОР, ЯКІСТЬ ЗВ'ЯЗКУ.

ABSTRACT

The thesis comprises 77 pages, 8 figures, 1 table, and cites 37 sources.

Relevance of the Topic: With the advent of new wireless technologies and the need for sustained communication under radio interference, adaptive methods for ensuring high signal quality are required. Traditional solutions often fail to adapt to rapid environmental changes. Using visual stabilization makes it possible to track a relay's motion (e.g., a UAV) relative to the background in real time and automatically correct its position to minimize signal loss. Therefore, developing an effective stabilization method based on optical flow analysis is extremely relevant for modern telecommunications.

The objective of this study is to develop a method for improving the quality and extending the range of wireless signal transmission under radio-interference conditions by stabilizing the position of the communication device (repeater) based on analysis of the optical flow of its video signal.

The object of study is the process of stabilizing the position of communication devices (relays) in space using visual information (video stream) under radio-interference conditions.

The subject of the study is methods for analyzing the optical flow of a communication device's video signal to ensure high-quality wireless communication.

The research methods include a systematic analysis of existing approaches to stabilization and optical flow computation, mathematical modeling of the Farneback, Lucas–Kanade, and Horn–Schunck algorithms with assessment of their computational requirements, and the development of software for optical flow computation.

Keywords: WIRELESS SIGNAL, RADIO INTERFERENCE, OPTICAL FLOW, POSITION STABILIZATION, UAV RELAY, CONNECTION QUALITY.

ЗМІСТ

СПИСОК ТЕРМІНІВ І СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ СИГНАЛУ ТА ЗБІЛЬШЕННЯ ВІДСТАНІ ПЕРЕДАЧІ БЕЗПРОВІДНИХ СИГНАЛІВ В УМОВАХ ДІЇ РАДІОПЕРЕШКОД	13
1.1 Основні фізичні та технічні перешкоди для передачі сигналу на великі відстані	13
1.1.1 Загасання сигналу зі збільшенням відстані	14
1.1.2 Багатопромєневїсть	15
1.1.3 Шум та радіоперешкоди	16
1.1.4 Перешкоди рельєфу та екранування середовищем	17
1.1.5 Мобільність та доплєрівський зсув	17
1.2 Типові інженерні проблеми при організації зв'язку на великі відстані в складному середовищі	18
1.2.1 Розгортання та мобільність інфраструктури	18
1.2.2 Забезпечення прямої видимості та оптимального положення	19
1.3 Традиційні методи покращення якості сигналу на великі відстані та їх обмеженість	20
Висновки до розділу 1	21
РОЗДІЛ 2 ОГЛЯД МЕТОДІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПОЛОЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ У ПРОСТОРИ	22
2.1 Інерційний метод стабілізації	22
2.2 Супутникова стабілізація (GNSS)	22
2.3 Візуальна стабілізація, на основі комп'ютерного зору	23
2.3.1 Принцип дії візуальної стабілізації на основі комп'ютерного зору	24
2.3.1.1 Оптичний потік	24
2.3.1.2 Візуальна одометрія (VO)	25

2.3.1.3 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)	25
2.3.2 Переваги використання візуальної стабілізації на основі комп'ютерного зору	26
2.3.3 Обмеження та виклики візуальної стабілізації	26
2.4 Стабілізація за допомогою висотомірів та далекомірів.....	27
2.4.1 Барометричний метод стабілізації висоти	27
2.4.2 Ультразвуковий метод стабілізації висоти	28
2.4.3 Лазерний метод стабілізації висоти (лідарні системи).....	28
2.5 Стабілізація на основі радіомаяків (локальні системи).....	29
Висновки до розділу 2.....	30
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ОПТИЧНОГО ПОТОКУ ВІДЕОСИГНАЛУ	31
3.1 Класичні диференційні методи оцінки оптичного потоку	31
3.1.1 Метод Лукаса–Канаде	33
3.1.2 Метод Хорна–Шунка.....	35
3.2 Метод поліноміальної апроксимації Фарнебека.....	36
3.3 Сучасні методи оптичного потоку на основі глибокого навчання	39
3.3.1 Архітектура FlowNet	39
3.3.2 Підхід PWC-Net	40
3.3.3 Метод RAFT	41
Висновки до розділу 3.....	42
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА МЕТОДУ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБ'ЄКТУ ШЛЯХОМ АНАЛІЗУ ОПТИЧНОГО ПОТОКУ ЙОГО ВІДЕОСИГНАЛУ.....	43
4.1 Отримання та обробка відеокадрів.....	46
4.2 Розрахунок оптичного потоку	47
4.3 Побудова та аналіз векторного поля зміщень.....	48
4.4 Ухвалення рішення про корекцію положення	50
4.5 Формування керуючого сигналу та корекція положення	51
Висновки до розділу 4.....	52

РОЗДІЛ 5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ МЕТРИК ЯКОСТІ МЕТОДУ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПОЛОЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ	54
5.1 Обґрунтування вибору методу Фарнебека для обчислення оптичного потоку	54
5.2 Опис тестових даних для верифікації методу	55
5.3 Аналіз архітектури та модифікацій програмного коду реалізації методу	55
5.3.1 Ініціалізація середовища, імпорт бібліотек та підготовка вхідних даних	58
5.3.2 Обчислення оптичного потоку у циклі обробки	59
5.3.3 Візуалізація результатів: стрілкова мапа та HSV-карта потоку	60
5.3.3.1. Стрілкова мапа руху	60
5.3.3.2 HSV-візуалізація потоку	60
5.3.4 Обчислення інтегральних метрик.....	61
5.3.5. Накладання текстової інформації	61
5.3.6 Збереження кадру та перехід до наступного	62
5.4. Результати тестувань	63
5.4.1 Обробка даних інерційних сенсорів	64
5.4.2 Нормалізація та синхронізація результатів.....	65
5.4.3 Кореляційний аналіз.....	67
5.4.5 Загальні результати.....	68
5.5. Порівняння з альтернативними методами стабілізації положення ...	69
Висновки до розділу 5.....	72
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	73
ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА.....	75

СПИСОК ТЕРМІНІВ І СКОРОЧЕНЬ

- SNR – Signal-to-Noise Ratio (співвідношення сигнал/шум)
- БПЛА – Безпілотний літальний апарат
- FEC – Forward Error Correction (коди корекції помилок)
- ARQ – Automatic Repeat reQuest (механізми повторної передачі)
- ІНС – Інерціальна навігаційна система
- GNSS – Global Navigation Satellite System (супутникові навігаційні системи)
- VO – Visual Odometry (візуальна одометрія)
- SLAM – Simultaneous Localization and Mapping (одночасна локалізація та картографування)
- UWB – Ultra-Wideband Radio Navigation (ультраширокосмугова радіонавігація)
- ToF – Time of Flight (вимірювання часу польоту)
- KLT – Kanade–Lucas–Tomasi (метод Канаде–Лукаса–Томасі)
- FPS – Frames Per Second (частота кадрів)

ВСТУП

У сучасних умовах функціонування більшості галузей людської діяльності безперервний бездротовий зв'язок набуває критичного значення: він уже не є просто інструментом для зручності, а виступає базовим елементом оперативного управління, реагування та координації дій у реальному часі. Особливо актуальним питання забезпечення стабільного каналу зв'язку є в тих ситуаціях, коли стаціонарна комунікаційна інфраструктура відсутня або частково зруйнована.

У таких екстремальних обставинах оперативне розгортання тимчасових бездротових мереж зв'язку стає необхідною умовою для збереження ефективності управління та координації дій рятувальних служб, військових підрозділів або інших оперативних бригад. Не менш важливо забезпечити тимчасовий або локальний зв'язок у низці галузей, де відсутність покриття є нормою через географічні чи інфраструктурні обмеження. Так, у сільському господарстві застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА), сенсорних IoT-систем та автономної техніки потребує стабільного зв'язку на відкритих просторах без покриття мобільних мереж. Подібна ситуація складається під час проведення геологічних, екологічних чи археологічних експедицій у важкодоступних регіонах — гірських масивах, пустелях, лісових зонах.

Таким чином, бездротовий зв'язок відіграє роль не лише засобу оперативного реагування в екстремальних умовах, а й універсального інструменту для забезпечення надійної комунікації в широкому спектрі практичних завдань, де класична інфраструктура є недоступною, повільною у розгортанні або малоефективною.

Метою дипломної роботи є розробка методу підвищення якості і збільшення відстані передачі бездротового сигналу в умовах дії

радіоперешкод шляхом стабілізації положення комунікаційного пристрою (ретранслятора) на основі аналізу оптичного потоку його відеосигналу.

Об'єктом дослідження є процес стабілізації положення комунікаційних пристроїв (ретрансляторів) у просторі за допомогою візуальної інформації (відеопотоку) в умовах радіоперешкод.

Предметом дослідження є методи аналізу оптичного потоку відеосигналу комунікаційного пристрою та алгоритми автоматичного коригування його положення для забезпечення високої якості бездротового зв'язку.

Методами дослідження є системний аналіз існуючих підходів до стабілізації та обчислення оптичного потоку, математичне моделювання методів Фарнебека, Лукаса–Канаде та Хорна–Шунка з оцінкою їхніх обчислювальних ресурсів, розробка програмного забезпечення для обчислення оптичного потоку.

Практичне значення дослідження полягає в можливості розгортання автономної мобільної мережі зв'язку на основі БПЛА-ретрансляторів у районах без стандартного покриття, що забезпечує підвищення якості зв'язку.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ СИГНАЛУ ТА ЗБІЛЬШЕННЯ ВІДСТАНІ ПЕРЕДАЧІ БЕЗПРОВІДНИХ СИГНАЛІВ В УМОВАХ ДІЇ РАДІОПЕРЕШКОД

Сигнал [4] - це фізичний процес, що несе в собі інформацію про стан або зміну стану системи у вигляді змін електромагнітних, акустичних, механічних чи інших параметрів у часі та просторі. У контексті бездротового зв'язку мова йде переважно про електромагнітні сигнали, що поширюються у вигляді радіохвиль через повітряне або вакуумне середовище, виступаючи носієм інформації між передавачем і приймачем.

1.1 Основні фізичні та технічні перешкоди для передачі сигналу на великі відстані

Передача радіосигналів на великі відстані в умовах ускладненого середовища — процес багатofакторний, і що важливо, високочутливий до як природних, так і антропогенних впливів. Сукупність перешкод, що виникають у подібному середовищі, формується із декількох ключових компонентів.

По-перше — згасання сигналу. Зі зростанням відстані, особливо в умовах нерівномірного середовища, амплітуда хвилі зменшується, що призводить до поступового зниження енергетичного потенціалу радіоканалу [4].

По-друге — багатопроменева інтерференція. Результат відбиття сигналу від різних поверхонь (рельєф, споруди, ґрунт), що спричиняє накладення сигналів і, як наслідок, деформацію інформаційного навантаження. Не завжди передбачувану, і не завжди відфільтровувану стандартними засобами [1].

Окремо слід відзначити топографічні перешкоди. Рельєф місцевості часто виступає не просто як пасивне середовище поширення хвиль, а як

активний фільтр і модулятор сигналу. Перевали, ущелини, глибокі низини — кожен елемент здатен кардинально змінити конфігурацію зони покриття. До цього додаються електромагнітні шуми — фонові або створені діяльністю людини. Вони змінюють спектральну чистоту каналу та можуть суттєво знижувати співвідношення сигнал/шум, що безпосередньо впливає на стійкість прийому.

У реальних умовах передавач і приймач можуть перебувати у русі, змінювати положення, або ж працювати у середовищі з постійно змінними характеристиками. Це означає, що канал не є стаціонарним, і його параметри варіюються в часі — як у межах секунд, так і в довгих інтервалах. Саме ця нестабільність, згідно з сучасними дослідженнями [1], є одним із найбільш складних для прогнозування аспектів. Навіть мінімальне зміщення системи призводить до погіршення якості безпроводного сигналу [1].

Таким чином, забезпечення стабілізації положення передавача/ретранслятора є основною задачею для підтримання якості сигналу й надійності зв'язку в умовах постійної змінності каналу та руху системи [1].

1.1.1 Загасання сигналу зі збільшенням відстані

Одним із визначальних фізичних чинників, що безпосередньо впливають на якість бездротового зв'язку, є загасання сигналу з відстанню. Згідно із законом вільного простору, втрати шляху (FSPL) [5] описуються формулою (1.1)

$$\text{FSPL} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (1.1)$$

де d — відстань до джерела, λ — довжина хвилі. Звідси випливає, що інтенсивність електромагнітної хвилі зменшується обернено пропорційно квадрату відстані до джерела.

Це означає, що навіть незначне збільшення відстані між передавачем і приймачем може спричинити суттєве зниження рівня сигналу на вході приймального пристрою. Особливо критично це проявляється в умовах низького розташування обладнання або у складному середовищі, де присутні численні природні чи антропогенні перешкоди [1].

Крім того, при збільшенні дистанції зростає вплив атмосферних факторів. До таких належать поглинання сигналу водяною парами, дощем, сильним вітром, підвищеною вологістю або навіть щільною рослинністю.

Для часткової компенсації втрат традиційно застосовують підсилювачі сигналу або високонаправлені антени, проте підвищення потужності трансляції збільшує енергоспоживання (критично для автономних систем), а вузьконаправлені антени вимагають точної орієнтації й складного керування (особливо в мобільних умовах) [2].

1.1.2 Багатопроменевість

Ще одним суттєвим фактором, що визначає якість радіозв'язку в реальних умовах експлуатації, є багатопроменеве поширення сигналу. У фізично складному середовищі, електромагнітна хвиля надходить до приймального пристрою не лише по прямій траєкторії. Вона розповсюджується також через численні відбиття: від ґрунту, стін, водних поверхонь, металевих елементів, дерев та інших об'єктів середовища [1].

Кожен із цих відбитих сигналів має власну довжину шляху, затримку в часі, відмінність у фазі. І саме ці відмінності формують основу для виникнення інтерференційних ефектів. У результаті — в одній точці простору сигнали можуть як підсилювати один одного (конструктивна інтерференція), так і взаємно компенсуватись (деструктивна

інтерференція). Найбільш небезпечним проявом останнього є фейдінг [4] — завмирання сигналу, яке може мати короткочасний або стійкий характер.

В окремих випадках це призводить до переривань зв'язку, втрати пакету даних або необхідності повторної передачі, що, у свою чергу, знижує ефективність та пропускну здатність системи загалом [1].

1.1.3 Шум та радіоперешкоди

Окрім суто фізичних перешкод, суттєвий вплив на якість радіозв'язку справляє електромагнітний шум [6] — будь-яке небажане електричне збурення, яке деградує цілісність корисного сигналу. Залежно від походження, це можуть бути тепловий, квантовий, атмосферний або штучний шуми, що безпосередньо знижують співвідношення сигнал/шум у каналі. Кожен приймач характеризується власним фоновим шумовим рівнем. Саме цей рівень визначає порогову чутливість системи, тобто мінімальну потужність вхідного сигналу, нижче якої адекватне декодування інформації стає фізично неможливим [1].

У лабораторних умовах такі параметри вдається стабілізувати. Однак у реальному середовищі ситуація значно складніша. До внутрішніх шумів додається широкий спектр зовнішніх радіоперешкод. Їх джерела — різноманітні, серед них: побутові та промислові пристрої з електромагнітним випромінюванням, генератори, електродвигуни, високовольтне обладнання, а також — природні явища, а саме: сонячна активність, грозові розряди, магнітні бурі. Усі вони створюють стохастичне навантаження на частотний ресурс системи зв'язку.

Результатом є зниження співвідношення сигнал/шум (SNR), що призводить до погіршення якості прийому, збільшення ймовірності помилок декодування, необхідності повторної передачі або навіть втрати зв'язку при критичних перевищеннях рівня перешкод.

1.1.4 Перешкоди рельєфу та екранування середовищем

Окрему групу факторів, що значною мірою впливають на якість радіозв'язку, становлять географічні особливості місцевості, що можуть частково або повністю блокувати розповсюдження радіохвиль у прямій лінії. Це порушує умови вільного поширення сигналу й формує зони повного чи часткового затінення.

У таких середовищах традиційний прямий зв'язок між передавачем і приймачем часто неможливий. Електромагнітна хвиля, не маючи прямого шляху, змушена адаптуватись до конфігурації рельєфу. Передача сигналу в подібних умовах відбувається здебільшого за рахунок дифракційних ефектів — тобто огинання хвилею перешкод, багаторазових відбиттів від поверхонь місцевості або ретрансляції через проміжні вузли комунікаційної мережі [1].

Кожен із цих механізмів забезпечує часткове збереження функціональності каналу, проте супроводжується додатковими втратами енергії, фазовими зсувами та часовими затримками.

1.1.5 Мобільність та доплерівський зсув

Мобільність передавальних та приймальних засобів становить один із найскладніших викликів для забезпечення надійного бездротового зв'язку. У випадках використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), наземної мобільної техніки чи піших мобільних підрозділів положення антен змінюється динамічно, іноді — непередбачувано. Це призводить до флуктуацій основних параметрів каналу: змінюється рівень сигналу, варіюється напрямок і кут поширення хвилі, а також — конфігурація зони покриття.

Крім того, у русі проявляється ефект Доплера [7] — зміщення частоти прийнятого сигналу, що виникає внаслідок взаємного переміщення

передавача та приймача. Це ускладнює процес синхронізації, впливає на точність демодуляції, порушує часові та частотні параметри прийому [2], [3]. Сигнал, під впливом цих чинників, може не лише погіршуватись у якості, а й раптово зникати, особливо у випадках зі швидкою зміною просторового положення платформи.

Як результат — навіть незначне зміщення платформи може стати причиною миттєвого розриву зв'язку [3]. Тому стабілізація положення ретранслятора в реальному часі, буде максимально підтримувати надійність і якість зв'язку.

1.2 Типові інженерні проблеми при організації зв'язку на великі відстані в складному середовищі

Крім фізичних обмежень радіоканалу, які були проаналізовані в попередньому підпункті, при побудові бездротових мереж у складних умовах існує низка типових інженерних викликів. Вони охоплюють як питання швидкого розгортання інфраструктури, так і забезпечення енергоживлення, стабільної передачі сигналу та інтеграції тимчасових рішень у вже існуючі системи зв'язку. Усі ці аспекти критично важливі у випадках, коли зв'язок необхідно встановити терміново та на обмежений час — наприклад, під час рятувальних операцій, польових досліджень або військових дій [1], [2].

1.2.1 Розгортання та мобільність інфраструктури

У ситуаціях, коли необхідність у зв'язку виникає миттєво, а час на розгортання традиційної інфраструктури відсутній, застосування стаціонарних базових станцій чи прокладка дротових каналів є технічно неможливими.

За таких обставин єдиною практичною відповіддю виступає мобільна комунікаційна інфраструктура. Її реалізація може включати широке коло

рішень: наземні транспортні засоби з телекомунікаційним оснащенням, портативні ретрансляційні блоки або БПЛА, здатні виступати у ролі тимчасових вузлів зв'язку.

Проте на практиці виникає серйозна проблема — стабілізація положення ретранслятора зафіксованого на БПЛА. З урахування складних умов, які зазвичай є в описаних вище ситуаціях, ця задача стає великою проблемою.

Таким чином, оперативна організація зв'язку в екстремальних або нестабільних умовах передбачає використання мобільних рішень із високим рівнем адаптивності та здатністю до самостійної оптимізації топології — як у просторі, так і в часі [2].

1.2.2 Забезпечення прямої видимості та оптимального положення

З метою мінімізації втрат при передачі радіосигналу критично важливо забезпечити пряму лінію видимості між ретрансляційним вузлом і кінцевими користувачами. Теоретично — завдання формулюється чітко, а практично ж — реалізується з великими складнощами. У міському середовищі сигнал екранується щільною забудовою, утворюючи мозаїку тіньових зон. У відкритій місцевості — домінують природні перешкоди.

Необхідно знайти оптимальне співвідношення між висотою підйому ретранслятора [8] - виконує роль проміжного вузла для передачі сигналу між двома пунктами, коли пряма видимість або безпосередній зв'язок заблоковані, просторовою геометрією променевого покриття та допустимим рівнем енергоспоживання. На Рис. 1.1 зображено приклад застосування 3D-ретрансляції за допомогою БПЛА в декількох сценаріях.

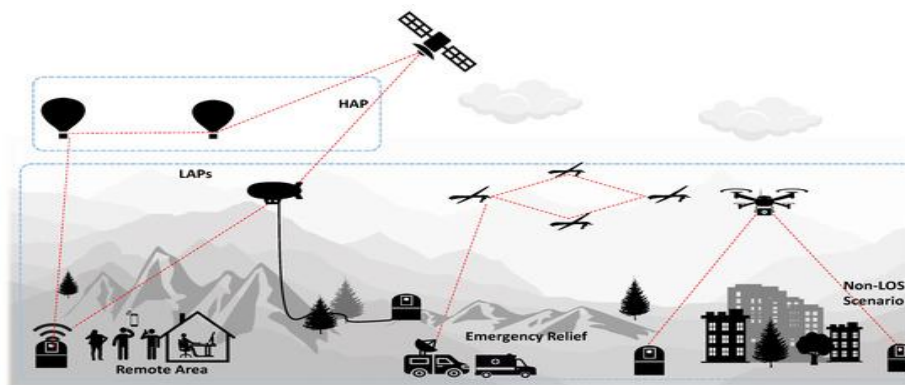


Рисунок 1.1 Застосування 3D-ретрансляції за допомогою БПЛА в декількох сценаріях [8].

Таким чином, ефективна передача даних у складному середовищі — це не статичне завдання, це динамічна система, що вимагає постійного перегляду параметрів, адаптації до контексту й технічної гнучкості на кожному етапі розгортання.

1.3 Традиційні методи покращення якості сигналу на великі відстані та їх обмеженість

Забезпечення надійного бездротового зв'язку на великі відстані є однією з ключових інженерних задач у сфері сучасних телекомунікацій. Протягом кількох десятиліть було напрацьовано базовий набір інженерних підходів, спрямованих на підвищення стійкості сигналу, його потужності та загальної якості зв'язку в умовах просторового розосередження.

Серед таких класичних рішень можна виділити: фізичні методи впливу на сигнал - підвищення вихідної потужності передавача, застосування антен із високою спрямованістю, вибір частот із нижчим затуханням у середовищі, топологічні заходи, зокрема встановлення ретрансляторів або проміжних вузлів посилення, програмно-алгоритмічні рішення, серед яких: коди корекції помилок (FEC), адаптивна модуляція, а також використання механізмів повторної передачі (ARQ) з урахуванням якості каналу.

На перший погляд, ці підходи виглядають як вичерпна відповідь на проблему деградації сигналу. Проте в реальних умовах експлуатації — особливо у динамічному середовищі, де одночасно діють фактори згасання, багатопроменевості, шуму, мобільності платформи та нестабільності каналу — ефективність зазначених рішень різко знижується.

Таким чином, навіть ґрунтуючись на перевірених технічних підходах, забезпечення якісного бездротового зв'язку на великій відстані залишається незамкненою інженерною задачею, вирішення якої потребує поєднання класичних методів із новими — гібридними, адаптивними та контекстно-чутливими системами управління зв'язком.

Висновки до розділу 1

У розділі проведено аналіз факторів, які знижують ефективність передачі бездротового сигналу на великі відстані в умовах радіоперешкод: закономірне загасання за вільного простору з експоненційним падінням потужності; додаткові втрати від атмосфери (вологість, опади, рослинність); мультишляхова інтерференція, що спричиняє фейдінг; електромагнітний шум, який погіршує співвідношення сигнал/шум; а також топографічні перешкоди (гори, ущелини, ліси, щільна забудова), що викликають дифракцію й багатократні відбиття. Мобільність систем (зміна положення джерела, приймача чи БПЛА-ретранслятора) додає ефект доплера й порушує синхронізацію. Хоча підсилювачі, вузькоспрямовані антени, ретранслятори та FEC/ARQ частково компенсують втрати, їхню ефективність обмежує висока динаміка середовища. Отже, забезпечення стабілізації положення передавача/ретранслятора є основною задачею для підтримання якості сигналу й надійності зв'язку в умовах постійної змінності каналу та руху системи.

РОЗДІЛ 2

ОГЛЯД МЕТОДІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПОЛОЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ У ПРОСТОРИ

Просторова стабілізація автономних повітряних платформ (БПЛА та інших) гарантує керованість, точність навігації й безпеку, забезпечуючи в реальному часі активну компенсацію зовнішніх (вітер, мікротурбуленція) і внутрішніх (флуктуації, похибки сенсорів) збурень; методи реалізації, що відрізняються джерелами даних про положення і логікою корекції руху, класифіковано в цьому розділі.

2.1 Інерційний метод стабілізації

Функціонування інерційного методу стабілізації базується на гіроскопах та акселерометрах, інтегрованих в інерційну навігаційну систему (ІНС): гіроскопи вимірюють кутові швидкості для контролю орієнтації (крен, тангаж), а акселерометри з алгоритмами інтеграції оцінюють лінійні зміщення об'єкта [12]. Завдяки подвійній інтеграції прискорень ІНС обчислює поточне положення без зовнішніх сигналів, що забезпечує абсолютну автономність у авіації, ракетобудуванні, БПЛА та наземних системах, особливо коли зовнішні навігаційні сигнали недоступні [12]. Проте з часом через дрейф гіроскопів і шум акселерометрів накопичуються помилки, і позиція, розрахована ІНС, експоненційно розходиться зі справжньою [12].

2.2 Супутникова стабілізація (GNSS)

Супутникові навігаційні системи (GNSS), зокрема найпоширеніша GPS, визначають абсолютні координати об'єкта за сигналами від орбітальних супутників [9]. Для стабілізації БПЛА звичайно використовують вбудований GPS-приймач, який передає широту, довготу й висоту до автопілота; порівнявши їх із заданою точкою, система формує

коригувальні впливи на двигуни та сервоприводи, повертаючи платформу у фіксоване положення [9]. На відміну від інерційної навігації, GNSS дає абсолютну просторову прив'язку у глобальній системі (WGS-84), що виключає накопичення похибки з часом [9]. Супутникова стабілізація є стандартом у відкритих просторах [12]: більшість комерційних і професійних БПЛА оснащені GPS-модулями з режимами «Position Hold» або «Loiter», корисними для аерофотозйомки, візуального моніторингу та залежного від вітру зависання над ділянкою [12]. Проте метод має обмеження: необхідність прямої видимості супутників (всередині приміщень, під землею чи серед щільної міської забудови GNSS-сигнал ослаблений або відсутній), типова абсолютна похибка GPS становить 2–5 м по горизонталі та до 10 м по висоті, що недоцільно для дециметрової чи сантиметрової точності [10], низька частота оновлення координат (1–10 Гц) не забезпечує достатньої швидкості реакції на раптові пориви вітру [10], уразливість GNSS до навмисного чи випадкового глушіння — простий перешкоджувач може паралізувати стабілізацію в зонах радіоелектронного впливу [11].

2.3 Візуальна стабілізація, на основі комп'ютерного зору

Суть підходу полягає у використанні камери як основного сенсорного джерела інформації: обробляючи послідовні відеозображення навколишнього простору, система визначає зміни положення та орієнтації платформи, здійснюючи локалізацію в реальному часі. Паралельно виконується побудова карти навколишнього середовища (як відомої, так і незнайомої), що дозволяє апарату орієнтуватися у складному або повністю невідомому середовищі.

Сучасні дослідження демонструють, що візуальні методи стабілізації вже перетворилися на стандарт де-факто у багатьох застосуваннях, пов'язаних із навігацією та контролем руху роботів. Завдяки можливості

безперервно отримувати дані про швидкість, напрямок і положення апарата лише за допомогою відео-аналізу, ці системи забезпечують високу точність стабілізації навіть в умовах нестабільного або повністю відсутнього зовнішнього орієнтування [15], [17].

2.3.1 Принцип дії візуальної стабілізації на основі комп'ютерного зору

Система візуальної стабілізації, як ключова складова сучасної автономної навігації, ґрунтується на застосуванні методів комп'ютерного зору, які дозволяють оцінювати положення апарата відносно оточення виключно через аналіз відеопотоку з бортових камер [10]. Відсутність залежності від зовнішніх джерел координат — супутникових, радіомаякових або магнітних — надає цьому підходу унікальну гнучкість у складних середовищах, зокрема в умовах недоступності GNSS.

2.3.1.1 Оптичний потік

Одним із базових методів є оптичний потік, який передбачає обчислення векторного поля зміщення пікселів між двома послідовними кадрами. На практиці це дає змогу визначати локальні зсуви текстур зображення, що в інтеграції з модельними припущеннями дозволяє оцінити швидкість і напрямок руху. Камера, спрямована на поверхню — наприклад, вниз — фіксує мікрозміщення структур (країв, тіней, текстур), що дозволяє утримувати апарат на фіксованій позиції або компенсувати знос при зависанні.

Важливо, що оптичний потік працює з усім простором зображення, а не лише з окремими ключовими точками. Це забезпечує багатство інформації та стійкість до локальних перешкод. У контексті стабілізації польоту, такий метод дозволяє відносно позиціювання без попередньої карти та за відсутності зовнішніх орієнтирів [15].

2.3.1.2 Візуальна одометрія (VO)

Більш узагальненим підходом є візуальна одометрія (VO) — метод, який реконструює траєкторію переміщення платформи на основі послідовного аналізу зображень [11]. VO дозволяє визначити позу апарата — його положення та орієнтацію — шляхом порівняння візуальних даних між кадрами.

Існують дві основні реалізації: Feature-based VO, що базується на виявленні характерних елементів (кутів, ліній, країв) та їх трекінгу у часі, та Direct VO, що виконує оптимізацію інтенсивності пікселів без попереднього виділення ознак [11].

2.3.1.3 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

Технологія SLAM дає змогу БПЛА не лише визначати своє положення, а й поступово створювати карту оточення: камера фіксує візуальні орієнтири й використовується для локалізації у вже побудованій системі координат. Коли апарат повертається в раніше відому точку, система порівнює нове зображення із збереженими орієнтирами, коригує накопичену похибку й “перезавантажує” координати, формуючи глобально узгоджене положення, близьке до GPS, але без зовнішньої інфраструктури. Існуючі варіанти SLAM: Mono-SLAM (монокамера), Stereo-SLAM (двокамера з глибиною), RGB-D SLAM (камера глибини) та VINS (Visual-Inertial SLAM), що поєднує дані камери й інерційних сенсорів для підвищення стійкості до швидких рухів і погіршення умов зйомки [17].

Усі три підходи — оптичний потік, візуальна одометрія, SLAM — є частинами однієї технологічної екосистеми. Камера, у цьому контексті, виконує функцію головного сенсора просторової прив’язки, дозволяючи як короткострокову стабілізацію (на рівні поточних зсувів), так і побудову власної координатної бази навігації, з внутрішньою картою простору і замиканням циклів.

2.3.2 Переваги використання візуальної стабілізації на основі комп'ютерного зору

Візуальна стабілізація забезпечує високу просторово-часову роздільність завдяки камерам, які фіксують текстури, кольори та контури сцени. Це дозволяє методам виявляти мікросуви й досягати сантиметрової точності навіть на платформах з обмеженими обчислювальними ресурсами. Одночасно камера може виконувати інші завдання — розпізнавання перешкод або класифікацію об'єктів — що розширює функціональність сенсорної системи [14], [25].

Відсутність залежності від GPS/GNSS. Камера виступає як “штучний зір”, знижуючи вразливість до мультипатингу, глушіння чи спуфінгу [14].

Інтеграція з методом SLAM дозволяє не лише оцінювати відносні зсуви, а й будувати глобальну карту середовища з механізмом замикання циклів. Робот може повернутися до початкової точки та мінімізувати накопичену похибку, що критично важливо для багаторазових обльотів (інспекція будівель, складів) [17]. У таких випадках візуальна система фактично замінює GPS, працюючи як внутрішній “локальний GPS” [17].

Нарешті, сучасні камери компактні, енергоощадні й економічно вигідні порівняно з лазерними сканерами чи високоточними ІНС. Це відкриває широкі можливості масштабування — від DIY-дронів до автономних роботів у логістиці, інспекціях чи доставці [16], [17].

2.3.3 Обмеження та виклики візуальної стабілізації

Методи візуальної стабілізації, хоча й ефективні, залежать від освітлення: зниження яскравості, контрасту чи насиченості текстур погіршує обробку зображень, а в темряві камера втрачає здатність фіксувати інформативний сигнал [11]. Щоб компенсувати це, застосовують CMOS-сенсори з високою світлочутливістю, інфрачервоне підсвічування чи нічне бачення [18]. Крім того, методи комп'ютерного зору потребують значних

обчислювальних ресурсів, але швидкий розвиток апаратних прискорювачів, оптимізованих бібліотек і стратегій керування пам'яттю (стиснені карти, адаптивне оновлення) дає змогу запускати навіть ресурсоємні методи на мобільних пристроях [18]. Таким чином, незважаючи на світлозалежність і обчислювальну інтенсивність, ці рішення стають реальними для інтеграції в компактні автономні системи.

2.4 Стабілізація за допомогою висотомірів та далекомірів

Багато задач стабілізації в повітрі потребують контролю не лише горизонтального положення, але й висоти. Для автоматичного утримання висоти та відстані до поверхні широко застосовуються висотоміри різного типу: барометричні, ультразвукові, лазерні. Принцип дії цих сенсорів заснований на вимірюванні відстані від об'єкта до опорної поверхні (землі) або визначенні його висоти над рівнем моря, з подальшою корекцією тяги двигунів, щоб утримати цю відстань постійною.

2.4.1 Барометричний метод стабілізації висоти

Барометричний висотомір — один із найпоширеніших інструментів непрямого вимірювання висоти в класичних аеронавігаційних системах і сучасних БПЛА [12]. Він базується на залежності атмосферного тиску від висоти: за гіпсометричним рівнянням тиск експоненційно зменшується з підвищенням над рівнем моря, і, вимірюючи поточне значення тиску, сенсор розраховує висоту відносно еталонного значення, зафіксованого при запуску або калібруванні. У БПЛА барометр підтримує сталу висоту: фіксуючи зміну тиску, що вказує на відхилення від заданої висоти, система управління адаптує тягу рушіїв, повертаючи апарат у стабільну зону [12]. Переваги барометричних датчиків — компактність, мінімальні вимоги до обчислювальних ресурсів і автономність (не потребують оптичного доступу до землі чи зовнішніх навігаційних даних) [12].

Водночас їхню точність обмежують такі фактори: сенсор дає лише відносну оцінку висоти (без стартової калібрування немає абсолютних значень), зміни погоди (коливання тиску) можуть спричиняти штучні зрушення показників, типовий похиб $\pm 1-3$ м (у турбулентних або температурно нестабільних умовах — вищій) і довготривалий дрейф даних у статичних умовах, коли барометр поступово «зсувається», накопичуючи помилку до кількох метрів, що ускладнює довготривале утримання висоти без корекції [12].

2.4.2 Ультразвуковий метод стабілізації висоти

Ультразвуковий далекомір визначає висоту апарата, випромінюючи короткі акустичні імпульси до поверхні та фіксуючи час їх повернення; знаючи швидкість звуку в повітрі й затримку, система розраховує відстань до опорної площини [12]. Переваги методу—низька вартість, простота конструкції, можливість вбудування в компактні дрони та відносна оцінка висоти без зовнішньої прив'язки [12]. Однак через розсіювання звуку в повітрі стабільні вимірювання можливі переважно до 4–5 м (максимально до 10 м), за чим точність падає, а геометрія конусоподібного променя створює залежність від рельєфу та структури поверхні (нерівні ділянки або матеріали з низькою акустичною відбивною здатністю—тканини, рослинність, пісок, килими—спотворюють або поглинають сигнал, іноді не даючи його повернення) [12]. На висотах нижче 20–30 см через перекриття зон випромінювання й прийому виникає затухання або резонансні спотворення, що ускладнює точні вимірювання [12].

2.4.3 Лазерний метод стабілізації висоти (лідарні системи)

Лазерні далекоміри, або лідарні висотоміри, реалізують вимірювання відстані шляхом високоточного оптичного зондування: випромінюється вузький лазерний імпульс, який після відбиття від поверхні повертається до

приймального модуля. На основі часу прольоту (Time of Flight, ToF) або фазового зсуву між переданим і прийнятим сигналом система обчислює точну дистанцію до об'єкта [10].

Цей принцип дозволяє досягати виняткової просторової роздільності: сучасні авіаційні лідарами можуть забезпечувати точність до кількох сантиметрів навіть на висотах у десятки або сотні метрів.

Попри високотехнологічність, лідарні системи мають ряд структурних і експлуатаційних обмежень, які важливо враховувати під час проєктування. По-перше — вартість. У порівнянні з ультразвуковими чи барометричними сенсорами, лідарами є істотно дорожчими — як у плані апаратної реалізації, так і обчислювального обслуговування [12].

По-друге — енергоспоживання. Для повноцінної роботи — особливо у режимі багатоканального сканування — потрібні потужні обчислювальні ресурси, здатні обробляти великі обсяги даних у реальному часі. Це обмежує використання в надлегких або енергообмежених платформах [12].

По-третє — залежність від оптичних властивостей сцени. Лазерний промінь може некоректно відбиватись від темних, м'яких або поглинаючих поверхонь (тканина, гума, рослинність), а також спотворюватись у разі потрапляння на дзеркальні чи блискучі матеріали (вода, метал, лід). За наявності оптичних перешкод — таких як туман, дощ, сніг або запиленість — лазерне випромінювання розсіюється на аерозольних частинках, що різко знижує достовірність та дальність вимірювання [12].

2.5 Стабілізація на основі радіомаяків (локальні системи)

Радіомаяки — стаціонарні передавачі з відомими координатами, що слугують локальними орієнтирами для визначення положення рухомих об'єктів за відстанями чи кутами до них; підхід схожий на GNSS, але реалізований локально через наземні передавачі [13]. Одним із найперспективніших рішень є ультраширокосмугова (UWB) радіонавігація:

у межах об'єкта розміщують кілька UWB-маячків (якорів) з точно відомими координатами, а мобільний вузол на борту БПЛА обмінюється імпульсними сигналами з кожним якорем [13]. Альтернативно застосовують Wi-Fi/Bluetooth-маячки або сигнали стільникових вишок для грубої навігації в будівлях, цехах, ангарах чи на закритих територіях, де не потрібна висока точність. Хоча UWB-системи забезпечують високу точність, вони залежать від інфраструктури (потребують встановлення та калібрування вузлів), мають обмежений радіус дії (поза зоною покриття точність різко падає; у складних умовах—металеві цехи, склади—відбиття викликають похибки до десятків сантиметрів) [13], а також є дорогими через необхідність синхронізаторів, обробки сигналів і потужних обчислювальних ресурсів [12], [13].

Висновки до розділу 2

У цьому розділі було розглянуто основні підходи до стабілізації положення комунікаційних пристроїв. Кожен з проаналізованих методів - має як свої переваги, так і певні обмеження. Втім, серед них метод візуальної стабілізації на основі комп'ютерного зору з використанням оптичного потоку вирізняється своєю відносною простотою реалізації, високою точністю визначення швидкості та напрямку руху, а також здатністю забезпечувати стабілізацію навіть за відсутності GPS. Саме ці характеристики роблять його особливо придатним для використання в умовах обмежених обчислювальних ресурсів і змінного середовища, таких як польоти в приміщеннях або в зонах із перешкодами.

З огляду на зазначені переваги, для подальшої реалізації та практичної частини дослідження у цій роботі буде використано метод візуальної стабілізації на основі оптичного потоку.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ОПТИЧНОГО ПОТОКУ ВІДЕОСИГНАЛУ

У межах попереднього розділу було емпірично доведено: використання оптичного потоку як інструменту візуальної стабілізації становить собою одну з найперспективніших альтернатив навігації для БПЛА у середовищах. Проте — і це принципово — результативність підходу істотно залежить від обраного методу розрахунку оптичного потоку, тобто векторного поля, що відображає мікродислокації піксельних елементів між суміжними кадрами відеопотоку.

Зважаючи на обмеження обчислювальних ресурсів, змінність освітлення, а також динамічність сцен, — постає необхідність ретельного вибору.

3.1 Класичні диференційні методи оцінки оптичного потоку

Методи класичного типу, що використовуються для оцінювання оптичного потоку, спираються — як на формальний фундамент — на диференціальний аналіз зміни інтенсивності зображення в просторі-часі, а також на низку апріорних припущень щодо неперервності та гладкості руху в межах локальних областей сцени [19, 20]. Центральною гіпотезою, яка становить концептуальну вісь даного підходу, є гіпотеза константності яскравості: інтенсивність світлового сигналу від певної фізичної точки сцени залишається незмінною протягом короткого часового інтервалу — змінюється лише її положення в площині зображення. Наслідком цього принципу, майже очевидним, але глибоко формалізованим, постає рівняння градієнтного зв'язку (оптичного потоку):

Наслідком цього принципу, майже очевидним, але глибоко формалізованим, постає рівняння градієнтного зв'язку (оптичного потоку) (3.1):

$$I_x(x, y) u + I_y(x, y) v + I_t(x, y) = 0 \quad (3.1)$$

У даному рівнянні позначення мають наступну фізичну інтерпретацію: I_x та I_y — частинні похідні інтенсивності по координатах простору, I_t — частинна похідна по часовій осі, тобто міжкадрова зміна інтенсивності; $u(x, y)$ та $v(x, y)$ — компоненти вектора оптичного потоку, що описують горизонтальну та вертикальну швидкості відповідно у точці (x, y) .

Рівняння, яке встановлює зв'язок між просторово-часовими похідними інтенсивності та швидкісними компонентами руху, виявляється недостатньо визначеним: для кожного пікселя воно формує лише одну скалярну умову на два невідомі. Як наслідок — множинність допустимих розв'язків, нескінченна множина.

Суть останнього полягає в тому, що для локально однорідної області, особливо вздовж лінійних структур (країв), істинний напрямок руху не може бути однозначно відновлений: уздовж краю можливо нескінченно багато векторів зміщення, які дають той самий градієнт яскравості.

Рішення полягає в введенні додаткових обмежень. Алгоритмічно це реалізується шляхом впровадження регуляризації: локальної (через припущення про однорідність руху в околі пікселя) або глобальної (через мінімізацію функціоналу енергії для всього зображення). Лише таким чином можливо зняти невизначеність та одержати унікальне — або щонайменше стабільне — оцінювання вектора потоку [19,20].

3.1.1 Метод Лукаса–Канаде

Серед перших практичних реалізацій концепції обчислення оптичного потоку особливе місце займає метод Лукаса–Канаде, вперше представлений у 1981 році [19]. У своїй суті він належить до класу локальних диференційних методів, проте ця проста класифікація недостатньо відображає глибину його алгоритмічної структури. Метод формулюється на основі припущення про локальну сталість вектора зміщення: в межах обмеженого околу (локального вікна) навколо пікселя вважається, що всі точки зображення зазнають однакового руху, тобто мають спільний вектор (u, v) .

На практиці це дає гладкий рух, однорідність в межах малих областей, сталість структури на мікрорівні — усе це обґрунтовує побудову перевизначеної системи лінійних рівнянь для кожного пікселя (x_i, y_i) , що належить локальному вікну розміром W (3.1.1.1):

$$I_x(x_i, y_i) u + I_y(x_i, y_i) v + I_t(x_i, y_i) = 0 \quad (3.1.1.1)$$

де $i = 1, 2, \dots, N$, а N — кількість пікселів у вікні. Завдяки надмірній кількості рівнянь відносно кількості змінних система підлягає розв'язанню методом найменших квадратів, який мінімізує квадратичну помилку узгодження інтенсивностей (3.1.1.2):

$$E(u, v) = \sum_{(x_i, y_i) \in W} (I_x(x_i, y_i) u + I_y(x_i, y_i) v + I_t(x_i, y_i))^2 \quad (3.1.1.2)$$

Для знаходження мінімуму розглядають перші похідні функціоналу помилки за u та v , прирівнюють їх до нуля, і розв'язують отриману систему. Її результат — оцінки компонентів оптичного потоку у межах вікна (3.1.1.3):

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum I_x^2 & \sum I_x I_y \\ \sum I_x I_y & \sum I_y^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -\sum I_x I_t \\ -\sum I_y I_t \end{pmatrix} \quad (3.1.1.3)$$

Ключовим тут є обчислення по всіх пікселях заданого вікна. Отримана при цьому матриця у лівій частині рівняння — це не що інше, як локальна гессіан-матриця — симетрична, позитивно визначена (у кращому випадку) структура, інформативність якої залежить від локальної текстурної насиченості області.

Невиродженість цієї матриці — критична умова. Її відсутність сигналізує про проблемні ділянки: однорідні, крайові, ізотропні зони, де градієнти I_x , I_y колінеарні або близькі до нуля. У таких випадках виникає ефект отвору: невизначеність напрямку руху.

Часткове рішення - це коректний вибір розміру вікна, в межах якого зміни інтенсивності достатньо насичені, а градієнтна інформація — багатовимірною. Проте навіть за цих умов базовий варіант методу показує найкращі результати лише у випадках малих міжкадрових зміщень.

Попри відносну простоту, метод Лукаса–Канаде демонструє високу ефективність в задачах, де пріоритетом є низька обчислювальна складність і робота в реальному часі. Особливо в контексті апаратної реалізації: вбудовані системи, бортові обчислювачі безпілотників, пристрої з обмеженими ресурсами [19].

Нарешті, варто згадати похідну версію — метод KLT (Kanade–Lucas–Tomasi), що використовує метод для відстеження ключових точок, автоматично вибираючи найінформативніші області зображення (кути, вершини, деталі) для трекінгу. Це стало фундаментом для десятків сучасних систем візуального позиціонування.

3.1.2 Метод Хорна–Шунка

Альтернативним до локальних диференційних методів підходом є глобальна варіаційна модель, запропонована Хорном і Шунком у 1981 році [20]. На відміну від методу Лукаса–Канаде, який базується на припущенні про сталість вектора зміщення у локальному вікні, метод Хорна–Шунка формулюється як задача мінімізації функціоналу, визначеного на всій області зображення. Основним додатковим припущенням у цій моделі є гіпотеза глобальної гладкості векторного поля оптичного потоку.

Зазначене припущення дозволяє уникнути локальної неоднозначності розв'язку (зокрема, проблеми отвору) за рахунок впровадження регуляризації. Таким чином, задача зводиться до одночасного визначення щільного векторного поля зміщення, яке мінімізує функціонал енергії, що складається з двох доданків: першого — що забезпечує узгодженість з рівнянням яскравісного потоку, та другого — що накладає обмеження гладкості на векторне поле. Функціонал має вигляд (3.1.2.1):

$$E(u, v) = \iint \left[(I_x u + I_y v + I_t)^2 + \alpha^2 ((\partial_x u)^2 + (\partial_y u)^2 + (\partial_x v)^2 + (\partial_y v)^2) \right] dx dy \quad (3.1.2.1)$$

У цьому записі перший доданок описує міру невідповідності яскравісному рівнянню $I_x u + I_y v + I_t = 0$, тобто забезпечує фотометричну узгодженість, тоді як другий доданок є гладкішим регуляризатором, що мінімізує градієнти компонент вектора потоку. Ваговий коефіцієнт визначає співвідношення між точністю відтворення локального руху та ступенем згладжування: при малих значеннях домінує відповідність даним, при великих — гладкість.

Мінімізація функціоналу за допомогою варіаційного числення приводить до виведення рівнянь Ейлера–Лагранжа. У дискретному вигляді система розв'язується ітераційно, з використанням чисельної схеми Гауса–Зейделя, де на кожному кроці значення u та v оновлюються на основі

середніх значень у локальному околі та поточної похибки у яскравісному рівнянні. Формули оновлення мають вигляд (3.1.2.2):

$$\begin{aligned}
 u^{(k+1)} &= \bar{u}^{(k)} - \frac{I_x (I_x \bar{u}^{(k)} + I_y \bar{v}^{(k)} + I_t)}{\alpha^2 + I_x^2 + I_y^2} \\
 v^{(k+1)} &= \bar{v}^{(k)} - \frac{I_y (I_x \bar{u}^{(k)} + I_y \bar{v}^{(k)} + I_t)}{\alpha^2 + I_x^2 + I_y^2}
 \end{aligned}
 \tag{3.1.2.2}$$

Завдяки глобальному характеру моделі, метод Хорна–Шунка забезпечує визначення потоку навіть у текстурно невиражених зонах, шляхом інтерполяції значень з навколишніх ділянок. Це особливо актуально для однорідних областей, де локальні методи не можуть гарантувати стабільного розв’язку через виродження локальної гессе-матриці.

Водночас метод має низку обмежень. По-перше, значна обчислювальна складність, зумовлена необхідністю багатьох ітерацій для збіжності [20]. По-друге, складність вибору параметра, який істотно впливає на результати: надто велике значення згладжує реальні межі об’єктів, тоді як занадто мале — підвищує чутливість до шумів [20].

У порівнянні з методом Лукаса–Канаде, який забезпечує локальне, швидке та обчислювально ефективне оцінювання потоку, метод Хорна–Шунка має перевагу у побудові глобально узгодженого поля переміщення, але поступається у відтворенні тонких деталей та меж об’єктів [19, 20]. Обидва методи виходять із припущення про малу амплітуду руху між кадрами та інваріантність яскравості, що обмежує їх застосування у сценах зі значними трансформаціями або освітлювальними змінами [19, 20].

3.2 Метод поліноміальної апроксимації Фарнебека

У 2003 році Гуннар Фарнебек запропонував метод оцінки оптичного потоку, який базується на апроксимації інтенсивності зображення у вигляді

поліноміального розкладу другого порядку [21]. Цей підхід розглядається як проміжна ланка між класичними диференціальними методами першого покоління (зокрема, Лукаса–Канаде [19] та Хорна–Шунка [20]) і сучаснішими варіантами, що використовують багатокomпонентну регресію або глибоке навчання. Метод зберігає локальність обробки, однак використовує багатшу модель опису локальної структури інтенсивності, що забезпечує більшу точність оцінювання переміщення.

На відміну від припущення про сталість градієнтів або векторів швидкості у межах локального вікна (як це реалізовано в [19]), метод Фарнебека моделює околиці пікселів шляхом двовимірної квадратичної апроксимації функції яскравості. У межах околиць кожного пікселя інтенсивність моделюється як (3.2.1):

$$f(x, y) \approx ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + g \quad (3.2.1)$$

де коефіцієнти a , b , c , d , e , g визначаються методом найменших квадратів з метою найточнішого відтворення локальної яскравісної поверхні. Така апроксимація дозволяє відобразити не лише напрям градієнта, а й локальну кривизну поверхні інтенсивності, що значно підвищує стійкість методу до флуктуацій та неоднорідних текстур.

У процесі оцінки оптичного потоку для двох послідовних кадрів формуються відповідні поліноміальні апроксимації: $f_1(x, y)$ — для першого кадру, $f_2(x, y)$ — для другого. Якщо між кадрами має місце переміщення (u, v) , то наближення f_2 можна привести до форми f_1 , виконавши просторове зсування, тобто розглядати $f_2(x - u, y - v)$. Відповідність між цими функціями дозволяє оцінити вектор зміщення шляхом аналізу зміни лінійних компонентів між апроксимаціями. В роботі [21] показано, що зсув між поліномами може бути формалізовано у вигляді системи лінійних рівнянь (3.2.2):

$$A(x) \cdot d(x) = \delta b(x) \quad (3.2.2)$$

де $A(x)$ — симетрична матриця, сформована з коефіцієнтів квадратичних членів; $\delta b(x)$ — різниця лінійних коефіцієнтів між другим і першим околom; $d(x) = (u(x), v(x))^T$ — вектор локального зміщення, що підлягає визначенню. Розв'язання такої системи виконується поелементно для кожного пікселя незалежно, подібно до підходу Лукаса–Канаде, але з використанням поліноміальних параметрів, а не простих градієнтів.

Оскільки така поелементна оцінка чутлива до локальних коливань, метод додатково використовує згладжування, тобто усереднення отриманих векторів зміщення з урахуванням вагових коефіцієнтів сусідніх пікселів. Це дозволяє зменшити шум та стабілізувати оцінювання потоку. З метою покращення результатів метод допускає ітеративне уточнення, а також масштабну обробку — побудову піраміди зображень з обчисленням потоку від coarse до fine масштабів.

Метод забезпечує щільне векторне поле зміщень, аналогічне до підходу Хорна–Шунка, однак із концептуально іншим принципом побудови: тоді як [20] формує глобальне узгоджене поле через енергетичну оптимізацію, підхід Фарнебека є локальним за природою, із подальшою процедурою регуляризації. За рахунок моделювання кривизни поверхні інтенсивності, метод здатен точніше передавати складні текстурні області, уникаючи надмірного згладжування, характерного для глобальних варіаційних схем.

У порівняльному аналізі (включаючи експериментальні дослідження на відомій тестовій послідовності Yosemite) [21] показано, що середня похибка методу становила 1.40 пікселя, що є поліпшенням порівняно з результатами попередніх методів. У практичному застосуванні метод відзначається високою ефективністю на сучасних центральних процесорах

і був реалізований як стандартна функція в бібліотеці OpenCV, що суттєво сприяло його поширенню.

З урахуванням вказаного, метод Фарнебека є доцільним вибором для задач візуальної стабілізації безпілотних літальних апаратів, де важливими є щільність, швидкість та допустима точність оцінювання. Метод не потребує спеціалізованого апаратного прискорення, демонструє помірне навантаження на обчислювальні ресурси, і може бути ефективно застосований у режимах близьких до реального часу за умов невисокої роздільності відеосигналу.

3.3 Сучасні методи оптичного потоку на основі глибокого навчання

Починаючи з 2010-х років, в задачі оцінки оптичного потоку відбувся суттєвий прорив завдяки застосуванню глибоких нейронних мереж. Класичні методи [19-21] вимагали ручного конструювання функціоналів або моделей та мали обмеження при великих зміщеннях або складних випадках (текстурні відсутності, нелінійні спотворення). Натомість глибокі CNN можуть навчитися безпосередньо оцінювати потік з прикладів, потенційно враховуючи більш складні закономірності руху. Далі розглядаються три знакові нейромережеві моделі для оптичного потоку: FlowNet [22], PWC-Net [23] та RAFT [24]. Кожна наступна покращує точність і ефективність, спираючись на досвід попередньої.

3.3.1 Архітектура FlowNet

У 2015 році запропоновано FlowNet – перший CNN-підхід до прямого прогнозування оптичного потоку між двома кадрами [22]. Ідея полягала в тому, що згорткові мережі, успішні у задачах класифікації та сегментації, можна адаптувати до регресії векторного поля руху завдяки навчання на синтетичних наборах (Flying Chairs, Flying Things3D). FlowNetS (Simple) об'єднує два зображення в шістканальний вхід і використовує архітектуру

«енкодер–декодер» із skip connections для побудови виходу $u(x,y)$, $v(x,y)$. FlowNetC (Correlation) вводить дві паралельні гілки з CNN-енкодерами, які формують cost volume для явного пошуку відповідностей між ознаками, що дає кращу точність при великих зміщеннях. На Flying Chairs середньоквадратична помилка (EPE) FlowNetS становила близько 2.7 пікселя, а у FlowNetC—ще менше, при цьому мережі забезпечували десятки FPS на сучасних GPU, що робило їх придатними для реального-часових задач [22]. Однак на складніших наборах (MPI Sintel) перша версія FlowNet поступалась класичним варіаційним методам, що спричинило появу FlowNet 2.0 (2017) з каскадним уточненням, який значно підвищив точність ціною зростання обчислювальних витрат і розміру параметрів.

3.3.2 Підхід PWC-Net

PWC-Net (2018) поєднує класичні елементи оцінювання руху (піраміди, варпінг, cost volume) у єдину диференційовну CNN-архітектуру [23]. Спершу обидва кадри проходять через згорткові енкодери, утворюючи ієрархію ознак на масштабах 1/4, 1/8, 1/16. На кожному рівні мережа спочатку уточнює наближення потоку, застосовуючи варпінг: ознаки другого кадру зсувають відповідно до поточного потоку, щоб зменшити залишкову деформацію. Потім формується cost volume — локальна міра відповідності між ознаками першого й варпованого другого кадру в межах заданого радіуса. Невелика згорткова підмережа обробляє цей cost volume і контекстні ознаки, видаючи уточнення потоку, яке масштабується для наступного (дрібнішого) рівня.

Завдяки повторному використанню блоків і оптимізованому каскаду, PWC-Net налічує приблизно 9 млн параметрів (тоді як FlowNet2 – понад 160 млн), що забезпечує суттєве зменшення розміру без втрати точності. На бенчмарках MPI Sintel (final) та KITTI модель показала найнижчий на той

час EPE, і при цьому могла працювати близько в реальному часі на GPU [23].

3.3.3 Метод RAFT

RAFT (Recurrent All-Pairs Field Transforms, 2020) став еталоном точності серед нейромережових методів оцінювання оптичного потоку [24]. Модель будується на повній парній кореляції ознак: обидва кадри проходять через згортковий енкодер (зазвичай модифікований ResNet) до роздільності $1/8$, а для першого додатково обчислюються контекстні ознаки. Потім формується чотиривимірний тензор кореляцій $C(i,j,k,l)$, що є глобальною картою схожостей між усякими парами пікселів у ознаковому просторі. Хоча тензор великий, ефективна GPU-реалізація та пулінг за радіусами створюють піраміду кореляції, поєднуючи локальні й глобальні відповідності.

На початку потік ініціалізується нульовим. Кожна ітерація рекурентного модуля GRU приймає: попереднє поле потоку, вибраний зі схеми кореляції патч відповідно до поточного потоку, контекстні ознаки та прихований стан. Вихід ітерації — поправка $\Delta(u,v)$, яка додається до оцінки. Так мережа поступово уточнює рух від грубого до детального рівня.

За рахунок усієї парної кореляції RAFT забезпечує точні відповідності навіть при великих зміщеннях чи значних деформаціях. На бенчмарках MPI Sintel (clean) середня похибка становила близько 1.5 пікселя (на 30% точніше за PWC-Net), а на KITTI 2015 $F1 = 5.0\%$ (проти 7–8% у попередників) [24]. Продуктивність — близько 10 FPS на 1080p GPU — робить RAFT застосовним для багатьох практичних задач, навіть якщо модель вимагає потужного графічного прискорювача та великих анотованих датасетів.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі проведено огляд методів оптичного потоку для системи візуальної стабілізації БПЛА, від класичних диференціальних моделей до сучасних неймереж. Методи Лукаса–Канаде [19] і Хорна–Шунка [20] використовують припущення сталої яскравості та гладкості поля, ефективні на текстурованих областях при невеликих рухах, але чутливі до однорідних ділянок і великих зсувів. Метод Фарнебека [21] апроксимує локальні поверхні яскравості поліномами, забезпечуючи щільну оцінку руху з помірною складністю, що цінно для ресурсів обмежених платформ. Серед неймережових рішень FlowNet [22] уперше застосував CNN для безпосередньої регресії векторного поля змін, PWC-Net [23] поєднує багатомасштабну обробку, варпінг і cost volume, а RAFT [24] використовує all-pairs кореляцію і рекурентне уточнення, задавши новий стандарт точності.

Вибір методу для практичної реалізації залежить від балансу між точністю та ресурсомісткістю: Фарнебек [21] є оптимальним варіантом для легких або бюджетних платформ, бо формує щільне поле потоку з достатньою точністю та реальними потребами обчислювальних ресурсів. Якщо ж доступна більша обчислювальна потужність, корисними будуть гібридні стратегії — базовий контроль швидкими локальними методами з періодичним уточненням через нейронні або варіаційні методи — разом із інтеграцією ІНС чи барометра для підвищення стійкості за втрати візуальних даних.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДУ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБ'ЄКТУ ШЛЯХОМ АНАЛІЗУ ОПТИЧНОГО ПОТОКУ ЙОГО ВІДЕОСИГНАЛУ

Виходячи з висновків попереднього розділу, в якості базового засобу стабілізації просторового положення мобільного ретранслятора було обрано метод візуальної стабілізації, реалізований шляхом аналізу оптичного потоку. Запропонований підхід передбачає використання камери, орієнтованої вертикально вниз, для безперервного спостереження за поверхнею під апаратом.

На основі порівняння послідовних відеокадрів обчислюється оптичний потік — векторне поле зміщення характерних точок зображення. За результатами цього аналізу визначається відносний рух апарата в площині, після чого формується корекційна команда, що дозволяє компенсувати зміщення та повернути платформу до заданого положення. Таким чином, забезпечується стабільне "зависання" ретранслятора без використання зовнішніх систем позиціонування (GNSS, маяків), виключно на основі обробки візуальної інформації з камери.

На *Рис. 4.1* схематично зображено принцип роботи системи. Ретранслятор приймає сигнал від передавача, виконує його підсилення і передає далі до кінцевого отримувача. Водночас його положення у просторі стабілізується шляхом постійного аналізу зображення земної поверхні, над якою він розміщується. Сині стрілки на схемі вказують напрямки векторів оптичного потоку, що дозволяють системі оцінювати мікросуви положення платформи.

Особливістю такого підходу є його незалежність від зовнішньої інфраструктури та здатність працювати в умовах, де традиційні засоби навігації або недоступні, або ненадійні. У випадках, коли стабільність позиціонування є критичною умовою підтримання якості зв'язку

(наприклад, у сценаріях із сильним вітром, завадовими умовами або повною відсутністю GPS-сигналу), візуальна стабілізація виступає ефективним, технологічно досяжним і гнучким рішенням.

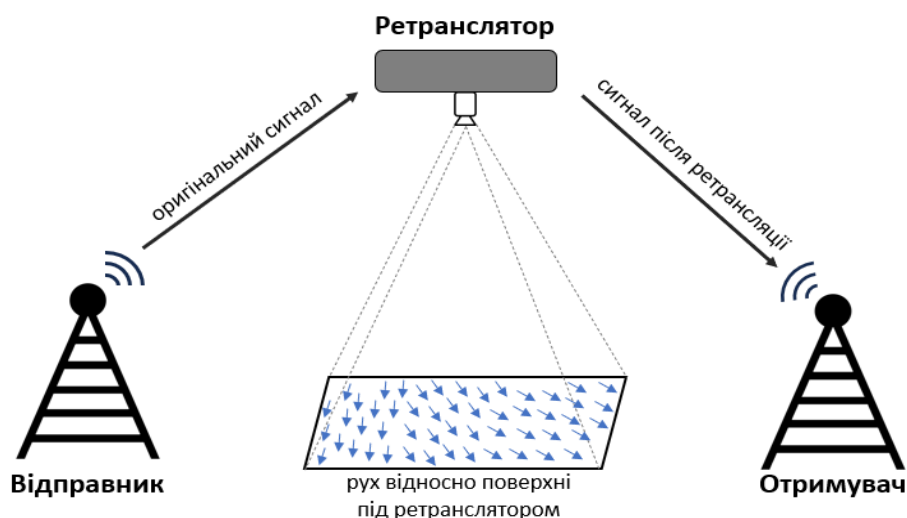


Рис. 4.1 – Схема стабілізації ретранслятора за допомогою оптичного потоку: безпілотний ретранслятор між Відправником та Отримувачем обладнаний камерою, спрямованою на землю

Розроблений алгоритм стабілізації просторового положення ретрансляційної платформи ґрунтується на принципах послідовної обробки відеосигналу з подальшим формуванням зворотного керуючого впливу. Його структурна реалізація наведена на *Рис. 4.2* у вигляді функціональної блок-схеми, яка відображає послідовність ключових етапів обробки та реакції системи.

Перший етап алгоритму передбачає безперервне отримання відеокадрів із бортової камери, жорстко зафіксованої на корпусі ретранслятора та орієнтованої вертикально вниз. Ці зображення проходять попередню обробку, що може включати нормалізацію яскравості, фільтрацію шуму або зменшення роздільної здатності з метою оптимізації подальших розрахунків.

Далі, для кожної пари послідовних кадрів здійснюється обчислення оптичного потоку — векторного поля, яке описує зміщення характерних

точок зображення між кадрами. Це дозволяє оцінити напрямок та величину переміщення платформи у площині, паралельній до земної поверхні. За наявності відповідної глибинної інформації або аналізу перспективного зсуву може бути також сформовано оцінку зміни висоти.

Наступним кроком є аналітичне визначення коригувального вектора, тобто обчислення тієї зміни положення, яка необхідна для компенсації виявленого зсуву. На основі цієї інформації генерується керуючий сигнал, що подається на двигуни або інші виконавчі елементи платформи. В результаті здійснюється корекція положення апарата у просторі, спрямована на відновлення заданого стану стабільності.

Крім основного каналу керування, реалізовано також зворотний зв'язок, що дозволяє уточнювати корекційні дії на основі поточних параметрів системи. Зокрема, контролюється якість ретранслявання сигналу (наприклад, рівень SNR або RSSI), а також аналізуються показники з бортових сенсорів, зокрема інерціальних, барометричних, ультразвукових або лазерних висотомірів. Ці дані інтегруються на рівні модуля розрахунку корекції та дозволяють сформуванню більш точну та адаптивну керуючу реакцію системи на дестабілізуючі впливи.

У наступному підрозділі наведено детальний розгляд кожного з етапів функціонального циклу стабілізації.

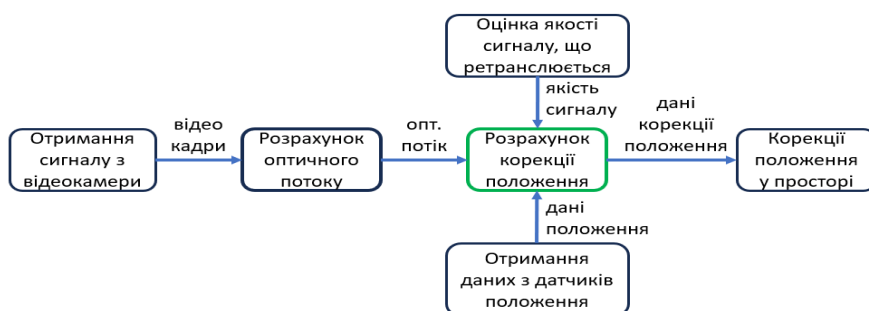


Рис. 4.2 – Блок-схема методу стабілізації положення ретранслятора на основі аналізу оптичного потоку (стрілками показано потік даних між етапами)

4.1 Отримання та обробка відеокадрів

Початковим етапом реалізації запропонованої методики стабілізації є формування послідовності зображень шляхом захоплення відеосигналу з бортової камери, встановленої на ретрансляційній платформі. Камера, орієнтована вертикально вниз, здійснює безперервне знімання поверхні під апаратом. Отримуваний аналоговий або цифровий потік конвертується у послідовність окремих кадрів з заданою частотою оновлення, що має бути достатньо високою для реєстрації усіх релевантних динамічних змін положення платформи.

Кожен кадр може піддаватися базовій попередній обробці, яка включає, зокрема: компенсацію оптичної дисторсії (наслідків особливостей оптики камери), фільтрацію шуму (для підвищення стабільності градієнтів яскравості), локальне вирівнювання яскравості (особливо в умовах нерівномірного освітлення сцени).

Мета попередньої обробки — забезпечити максимально сприятливі умови для надійного та точного обчислення оптичного потоку на наступному етапі.

Для глибшого розуміння фізичної природи оптичного потоку та його взаємозв'язку з реальними параметрами руху платформи, варто врахувати математичні співвідношення, що описують залежність вимірної швидкості зображення від просторового переміщення та обертання камери. Зокрема, у роботі [26] наведено рівняння (4.1), які пов'язують компоненти оптичного потоку з горизонтальними складовими швидкості БПЛА та його кутовими швидкостями при відомій висоті польоту:

$$\Omega_x = -\frac{V_x}{A} - \omega_y, \quad \Omega_y = -\frac{V_y}{A} + \omega_x. \quad (4.1)$$

де: Ω_x, Ω_y — компоненти оптичного потоку (кутова швидкість зображення в пікселях/с), V_x, V_y — горизонтальні компоненти лінійної швидкості апарата (м/с), A — висота камери над поверхнею (м), ω_x, ω_y — кутові швидкості обертання апарата навколо осей x і y (рад/с).

Ці співвідношення формують аналітичну основу для подальшого визначення реального переміщення платформи на основі даних з оптичного потоку, з урахуванням динаміки орієнтації. Вони активно використовуються в практичних алгоритмах стабілізації положення ретранслятора та є важливими для реалізації точного позиціонування в умовах автономного керування [26].

Після формування зображення, кадри можуть бути зменшені до оптимальної роздільної здатності з метою зниження обчислювального навантаження. У ряді випадків застосовується також перетворення в градації сірого, оскільки кольорова інформація не є критичною для розрахунку зміщення — аналіз інтенсивності яскравості пікселів достатній для обчислення оптичного потоку.

Підготовлені кадри, після перетворення, передаються до обчислювального модуля, де запускається процес векторного аналізу зміщень — тобто, обчислення оптичного потоку, що є основою для подальших дій системи стабілізації.

4.2 Розрахунок оптичного потоку

Ключовим елементом методики візуальної стабілізації є оптичний потік—векторне поле руху між двома кадрами.

Найновіший FlowFormer [29] застосовує механізм уваги для чотиривимірною cost volume, знижуючи середню помилку прогнозу на понад 16% порівняно з попередниками [28, 29]. Етапи роботи мережі такі: побудова cost volume—міра відповідності між ознаками двох кадрів, енкодер із self-attention формує стислу cost memory, рекурентний декодер

уточнює карту потоку, комбінуючи цю пам'ять із контекстними ознаками. Це дозволяє враховувати глобальні зміщення, довгі краєві контури та оклюзії, що є критично важливим для стабілізації платформи на основі відео.

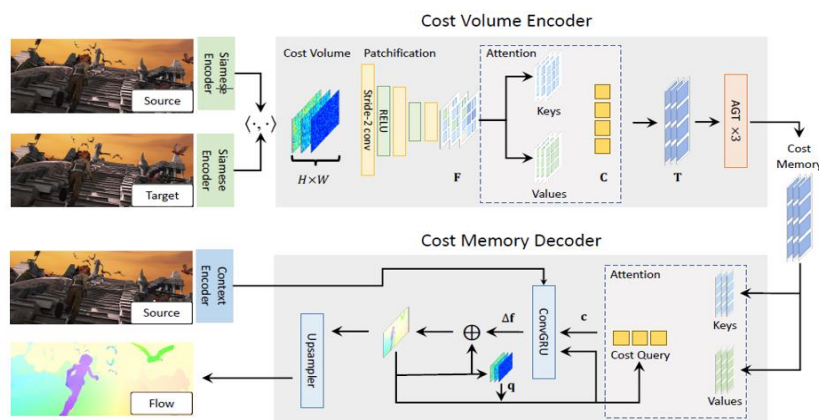


Рисунок 4.2 – Архітектура трансформер-мережі FlowFormer для обчислення оптичного потоку

Вибір методу залежить від обчислювальних можливостей платформи та компромісу між точністю й швидкістю. Оскільки оптичний потік має обчислюватися в реальному часі безпосередньо на борту, використовуються компактні моделі, які забезпечують автономність системи стабілізації. Тому в нашому випадку оберемо метод Фарнебека.

У результаті отримуємо масив векторів потоку, що описують локальні зміщення між поточним і попереднім кадром: горизонтальні компоненти (по осях x , y камери) відповідають руху у площині, паралельній землі, а середня радіальна компонента (збігання/розбігання векторів від центру кадру) вказує на зміну висоти.

4.3 Побудова та аналіз векторного поля зміщень

Після отримання векторного поля оптичного потоку (локальні зміщення між двома кадрами) наступний крок — інтерпретація його як реального руху платформи. Оскільки камера жорстко закріплена на корпусі,

будь-який зсув або обертання апарата прямо відображається в структурі векторів.

Для отримання узагальненої оцінки руху зазвичай обчислюють середній вектор потоку в центральній області кадру, що мінімізує крайові спотворення. Горизонтальні компоненти вказують на трансляцію Δx , Δy у площині, паралельній землі, а радіальна структура (розбігання/збігання від центру кадру) свідчить про зміну висоти Δz . Обертання навколо вертикальної осі виявляється через вихрові конфігурації полю векторів.

Оскільки потік задається в пікселях/сек, для переведення в м/с необхідні висота камери H , параметри камери (фокусна відстань f , розмір пікселя) та інтервал між кадрами Δt [1]. Знаючи H (із барометра, лазерного далекоміра або ІНС), можна масштабувати пікселі в метри, отримавши абсолютні швидкості. Без цих даних оптичний потік дає лише відносну швидкість.

Отже, метод видає Δx , Δy (горизонталь), Δz (вертикаль, за наявності радіальної компоненти) і за потреби кутове зсування. Ця інформація передається в підсистему керування для корекції руху. Щоб підвищити точність, поточні оцінки з оптичного потоку можна поєднувати з вимірюваннями ІНС (наприклад, за допомогою розширеного фільтра Калмана), що дає стійкішу метричну оцінку руху.

На практиці, це реалізується у вигляді рекурсивного оновлення оцінки горизонтальної швидкості \hat{V}_x на основі двох джерел (4.3): прогнозованого значення за модельним рівнянням руху, що враховує прискорення a_x , та вимірюваного значення швидкості V_x , отриманого з вектора оптичного потоку.

$$\hat{V}_x(t_{k+1}) = K_x(t_{k+1}) \cdot mV_x(t_{k+1}) + (1 - K_x(t_{k+1})) \cdot (\hat{V}_x(t_k) + a_x(t_k) \cdot \Delta t), \quad (4.3)$$

$$K_x(t_{k+1}) = \frac{\hat{P}_{V_x V_x}(t_k) + \sigma_x^2}{\hat{P}_{V_x V_x}(t_k) + \sigma_x^2 + \sigma_{V_x}^2}.$$

де: \hat{V}_x - оцінка горизонтальної швидкості на поточному кроці, V_x - виміряна швидкість за оптичним потоком, a_x - акселерометричне прискорення, Δt - інтервал часу між вимірюваннями, $\hat{P}_{V_x V_x}$ - оцінена дисперсія помилки швидкості, σ_x^2 - дисперсія шуму сенсора оптичного потоку, $\sigma_{V_x}^2$ - дисперсія моделі руху.

Цей підхід дозволяє динамічно адаптувати вагу кожного джерела залежно від оціненої надійності: якщо оптичний сенсор демонструє стабільні вимірювання — фільтр покладається на них; якщо ж рівень шуму високий, більшого значення набуває інерційний прогноз. Як показано в [27], така стратегія злиття значно підвищує точність оцінки швидкості навіть у складних умовах, де окремі сенсори не забезпечують надійних даних.

4.4 Ухвалення рішення про корекцію положення

Ключовим елементом методики стабілізації є перетворення векторного поля оптичного потоку в команду переміщення платформи до цільової точки зависання. Оптичний потік дає Δx , Δy (а за потреби Δz) за інтервал Δt , що відображає ненульові вектори через турбуленцію, дрейф чи вібрації. Система порівнює ці значення із нульовим вектором (ідеальна стабільність) або заданим еталоном. Наприклад, якщо аналіз показав зсув праворуч на 5 см, то команда корекції руху спрямовує платформу на 5 см ліворуч.

Для перетворення помилки в сигнал керування застосовують P-регулятор або PID-регулятор із врахуванням поточного зсуву, накопиченої помилки (інтегральна складова) та швидкості зміни помилки (диференціальна складова). Це запобігає перерегулюванню та осциляціям.

Якщо є дані ІНС, їх інтегрують через розширений фільтр Калмана (ЕКФ) [27], що підвищує точність оцінки положення, швидкості та орієнтації, особливо у слабкотекстурованих умовах або за шумів у відео.

Оптичний потік залишається основним джерелом помилки, а ІНС забезпечує уточнення кінематичних параметрів.

Додатково метод може використовувати зворотний зв'язок за якістю каналу—наприклад, RSSI чи BER. Якщо корекція поліпшує сигнал, поточна позиція фіксується; якщо ж якість погіршується, запускається пошук альтернативної точки. Отже, на цьому етапі обчислюють δx , δy (горизонтальна корекція) і δz (вертикальна), які передаються модулю низькорівневого керування для формування команд на двигуни платформи.

4.5 Формування керуючого сигналу та корекція положення

На завершальному етапі функціонального циклу дані, отримані в результаті оцінки просторового зсуву платформи, трансформуються у керуючі сигнали, що подаються до актуаторів — зокрема, до електродвигунів мультикоптерної платформи, яка виконує функції ретранслятора.

З урахуванням специфіки керування безпілотними літальними апаратами, корекція положення реалізується шляхом регулювання тяги окремих пропелерів або задіяння інших засобів зміни орієнтації та поступального руху. Автопілотна система інтерпретує команду на зміщення у вигляді векторів переміщення і конвертує її у відповідні зміни швидкості обертання гвинтів, які, у свою чергу, створюють момент сили та забезпечують необхідну динаміку.

Однак рух платформи не є миттєвим: динамічні властивості системи — інерція, обмеження на прискорення, кут нахилу та допустима швидкість — враховуються при формуванні керуючої дії. Наприклад, при виявленні дрейфу вправо, керуюча система може збільшити оберти лівих пропелерів і зменшити правих, створивши поступовий зсув апарата вліво. Інтенсивність цієї реакції визначається параметрами регулятора, зокрема —

коефіцієнтами пропорційного або PID-контролю, розрахованими на попередньому етапі.

Після формування та подачі керуючих сигналів система не припиняє моніторинг положення платформи, а продовжує відслідковувати вектор оптичного потоку, що формується на основі наступних відеокадрів. Якщо в результаті попередньої корекції величина оптичного потоку зменшується до значення, близького до нуля, це свідчить про успішну стабілізацію — тобто, про досягнення відносної нерухомості платформи щодо земної поверхні.

У разі, якщо зображення й надалі демонструє зміщення (наприклад, через новий порив вітру або вплив локальних збурень), вектор оптичного потоку залишається ненульовим. Це активує новий цикл оцінювання та корекції — система повторно виконує обчислення й формує нову керуючу дію. Таким чином формується замкнений контур керування, в якому: зміщення → оптичний потік → корекція → нове зміщення, — і цей цикл періодично повторюється з частотою, заданою частотою кадрів або зниженим темпом при необхідності зменшення навантаження на обчислювальний модуль.

Після кожного завершеного циклу корекції процес повторюється: з нових кадрів повторно розраховується оптичний потік, і платформа, за необхідності, коригує своє положення. У разі погіршення якості каналу зв'язку — наприклад, при виявленні зниження рівня RSSI, зростання BER або появи нових перешкод — система може виконати додаткові маневри пошуку оптимального положення, спираючись на зворотний зв'язок із фізичного каналу зв'язку.

У підсумку, забезпечується стабільний канал зв'язку між передавачем та отримувачем, підтримуваний засобами комп'ютерного зору та оптичного потоку, без залучення зовнішньої інфраструктури.

Висновки до розділу 4

У цьому розділі запропоновано та обґрунтовано метод автономної стабілізації платформи-ретранслятора на основі аналізу оптичного потоку з бортової камери, не вимагаючи зовнішніх навігаційних систем.

Алгоритм охоплює весь цикл: захоплення кадру → обчислення оптичного потоку → векторна оцінка зсуву → перетворення в координати (із урахуванням висоти, фокусної відстані, ІНС-даних тощо) → обчислення корекційних команд (за допомогою P/PID-регулятора чи EKF) → подача сигналів на двигуни → повторний моніторинг потоку. Кожен етап адаптується під можливості вбудованої платформи: для потоку можна використовувати як легкі диференційні методи (Фарнебека), так і неймережеві (FlowNet, RAFT, FlowFormer); для керування — PID-контроль або Калман-фільтр; для масштабування векторів — барометр чи лазерний далекомір.

Крім візуального сигналу, система враховує якість каналу зв'язку (RSSI, BER, відбиття), що дозволяє уточнювати рішення про оптимальне положення. Такий мультикритеріальний підхід забезпечує гнучкість і стійкість у реальних умовах.

Загалом показано, що оптичний потік—достатньо надійна база для реального часу стабілізації ретранслятора з мінімальними ресурсами та без інфраструктурної залежності, що робить метод перспективним для автономних комунікаційних платформ у нестабільному середовищі.

РОЗДІЛ 5

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ МЕТРИК ЯКОСТІ
МЕТОДУ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПОЛОЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ

5.1 Обґрунтування вибору методу Фарнебека для обчислення оптичного потоку

У задачі стабілізації платформи вибір методу оптичного потоку визначається балансом між точністю, щільністю поля та обчислювальними ресурсами. Після порівняння класичних і нейромережових підходів обрано метод Фарнебека, оскільки він поєднує детальність щільного поля, адекватну точність та можливість роботи на вбудованих CPU [21].

На відміну від Лукаса–Канаде, що обчислює рух лише у локальних вікнах для характерних точок і втрачає інформацію в однорідних ділянках [19], Фарнебека регресує поліноміальну модель інтенсивності в кожному локальному околі, формуючи вектор для кожного пікселя. Це дає змогу підхоплювати дрібні деталі (на відміну від Хорна-Шунка, який, хоч і створює суцільне поле через глобальну регуляризацію, часто згладжує важливі контури і має високу обчислювальну вартість) [20].

Практично Фарнебек достатньо швидкий для реального часу на середніх одноплатних комп'ютерах (Raspberry Pi, NVIDIA Jetson) та досить точний для повільних або середньошвидкісних рухів [21]. Реалізація через `OpenCV cv2.calcOpticalFlowFarneback` спрощує інтеграцію, а параметри— розмір вікна, рівні піраміди та ступінь згладжування—дозволяють адаптувати метод під умови зйомки [21, 37].

Нейромережові моделі (PWC-Net [23], RAFT [24], FlowFormer [29]) дають вищу точність, але вимагають GPU та великих наборів даних, що неприпустимо для автономних дронів із обмеженим енергоспоживанням. Farneback забезпечує щільне поле без критичних втрат продуктивності, працюючи на CPU [21].

Тому метод Фарнебека обґрунтовано обрано як оптимальний для стабілізації ретранслятора: він забезпечує потрібну точність, адаптивність до текстур і освітлення, а також відповідає реальним обчислювальним обмеженням автономних платформ [21, 37].

5.2 Опис тестових даних для верифікації методу

Для перевірки точності й стійкості методу Фарнебека були зібрані реальні відеодані, які моделюють рух БПЛА на низькій висоті над двома типами поверхонь: трав'яним покриттям і бруківкою. Зйомка здійснювалася в Full HD (1920×1080, 30 FPS) портативною камерою на висоті близько 1 м без додаткової стабілізації, щоб відобразити мікрозсуви та коливання [30]. Для кожного з чотирьох сценаріїв (різні локації) було записано шість варіантів руху (зсуви вліво/вправо/вперед/назад та обертання $\pm 180^\circ$), загалом 32 відеофрагменти, що дозволило охопити широкий спектр текстурної неоднорідності, рельєфних ілюзій та освітлення [30].

Одночасно фіксувалися показники ІНС (акселерометр, гіроскоп), які інтегрувалися у зміщення [33, 34] для верифікації результатів оптичного потоку. Після нормалізації та синхронізації даних оптичний потік зіставляли з реальними переміщеннями камери, що дало змогу кількісно оцінити кореляцію по осях X та Y, а також врахувати варіації траєкторій і обертання [30, 33, 34]. Відео зберігалися в оригінальній якості, а повний архів доступний за посиланням у додатку [30].

Таким чином, експериментальна вибірка — структурована, контрольована за текстурою, рельєфом і освітленням — створює репрезентативну базу для оцінювання чутливості, точності та стійкості методу Farneback у реальних умовах [21, 30, 33, 34].

5.3 Аналіз архітектури та модифікацій програмного коду реалізації методу

У рамках прикладного компонента дослідження було здійснено розгортання та суттєве вдосконалення програмної реалізації методу обчислення оптичного потоку на основі методу Фарнебека. Як базову відправну точку було використано публічно доступний вихідний код з відкритого репозиторію GitHub [31], який містить канонічну реалізацію функції *cv2.calcOpticalFlowFarneback* для побудови щільного векторного поля зміщень між суміжними відеокадрами. Однак у процесі практичної інтеграції цей код зазнав глибокої структурної та функціональної адаптації відповідно до потреб експериментального тестування, візуального аналізу та виведення метричних оцінок динаміки.

Передусім було перепроєктовано загальну архітектуру скрипта, реалізовано підтримку гнучкої взаємодії через командний інтерфейс. Зокрема, було запроваджено параметри для передачі шляху до вхідного відеофайлу, частоти кадрів, цільової директорії для збереження результатів, а також можливість виклику з налаштуваннями, що забезпечують адаптивність до різних умов зйомки [37].

Для підвищення інформативності результатів було реалізовано систему інтерактивної візуалізації оптичного потоку у двох форматах, а саме векторну мапу переміщень (*arrowVis*), де напрямки та інтенсивність руху відображаються у вигляді стрілок на відео, та HSV-представлення поля потоку (*hsvVis*), де напрямок кодується у відтінках кольору, а швидкість — у яскравості [37]. Обидві візуалізації формуються автоматично, об'єднуються у комбінований кадр і зберігаються у форматі відеофрагмента з уніфікованою роздільною здатністю, що забезпечує однорідність представлення результатів.

Було реалізовано тонке налаштування щільності та чутливості вибірки векторів: значення порогу візуалізації (*threshold = 0.5*) визначає мінімальну амплітуду зміщення, за якої вектор відображається, параметр щільності (*density = 0.002*) дозволяє контролювати кількість стрілок на

кадрі, а масштабування розміру стрілок динамічно прив'язане до модуля зміщення для збереження читабельності карти руху [21].

Окремо було оптимізовано налаштування самої функції *calcOpticalFlowFarneback*, зокрема: збільшено розмір вікна згладжування з 15 до 25 пікселів та підвищено кількість ітерацій обчислення з 3 до 5, що забезпечило стійкість до шумів та покращену точність при роботі у складних освітлювальних або текстурно неоднорідних умовах [21, 37].

Додатково в коді реалізовано блок обчислення інтегральних характеристик потоку між кадрами, таких як: середнє зміщення по координатних осях dx , dy , модуль результуючого вектора переміщення (*magnitude*) та кут напрямку вектора руху (*angle*, у градусах) [37]. Усі ці метрики виводяться у вигляді текстових накладень у верхній частині відеокадру, що дозволяє спостерігати за еволюцією динаміки руху під час перегляду візуалізації без необхідності зовнішнього аналізу [37].

Також до функціоналу було інтегровано вимірювання швидкодії обробки, що дає змогу визначити продуктивність обчислень на поточному обладнанні — критично важливий параметр при впровадженні в реальні системи реального часу [37]. Система підтримує збереження вихідного відео в кольорових просторах, забезпечуючи збереження контекстної інформації сцени, що важливо при аналізі фону [37].

Окремим напрямом вдосконалення стало впровадження логіки оцінки узагальнених характеристик руху, які, в перспективі, можуть бути зіставлені з даними ІНС. Така інтеграція забезпечує можливість побудови гібридної навігаційної моделі з комбінованим джерелом вхідних даних, у якій результати, отримані з оптичного потоку, уточнюються через порівняння з показниками акселерометра та гіроскопа. Це відкриває потенціал для корекції дрейфів, оцінювання похибки, або навіть реалізації фільтрів злиття даних (наприклад, на базі ЕКФ) у майбутніх версіях системи [33, 34].

У результаті реалізований код із базової демонстраційної конструкції трансформовано у функціонально повноцінний аналітично-візуальний інструмент, придатний як для інтеграції в модулі стабілізації положення мобільної платформи, так і для автономного використання у задачах верифікації, тестування або візуального аналізу сценаріїв руху. Повний перелік модифікацій, приклади використання, а також коментарі до реалізації наведено у додатку до цієї роботи [32].

У наступному підрозділі розглянуто деталізовану структуру реалізації з поділом на логічні блоки, що визначають архітектуру програмного рішення та взаємозв'язки між його компонентами.

5.3.1 Ініціалізація середовища, імпорт бібліотек та підготовка вхідних даних

Реалізація методу аналізу оптичного потоку починається з імпорту основних бібліотек, серед яких ключовими є *OpenCV* для обробки зображень та відео, *NumPy* для ефективної роботи з масивами, а також допоміжні модулі для взаємодії з файловою системою, синхронізації часу та командного інтерфейсу. Шлях до вхідного відеофайлу зчитується через параметри командного рядка, що забезпечує гнучкість використання скрипта у різних сценаріях тестування.

Для роботи з відеоматеріалом ініціалізується об'єкт *cv2.VideoCapture*, за допомогою якого здійснюється покадрове зчитування зображень із вхідного файлу. Паралельно визначається загальна кількість кадрів у відеопотоці (*frameTotal*), встановлюються параметри формування вихідного відео: ім'я результатного файлу, частота кадрів (FPS), роздільна здатність, а також створюється відповідний каталог (якщо він не існує) за допомогою конструкції *os.makedirs(..., exist_ok=True)*.

Перший кадр відео зчитується окремо через метод *cap.read()*, після чого виконується конвертація зображення у відтінки сірого (*cv2.cvtColor*)

для формування базового кадру *prvsFrame*, який буде використовуватись як еталон для подальших обчислень оптичного потоку. Ініціалізується лічильник оброблених кадрів (*frameCount = 1*) та фіксується час старту (*tStart = time.time()*), що дозволяє надалі оцінити продуктивність роботи скрипта у термінах кількості кадрів за секунду.

5.3.2 Обчислення оптичного потоку у циклі обробки

Основна обчислювальна логіка реалізована у циклі *while*, який покадрово опрацьовує відеопотік до його завершення. На кожній ітерації зчитується черговий кадр (*ret, rawImg = cap.read()*), і у разі успішного зчитування (*ret == True*) здійснюється: оновлення лічильника кадрів та вивід у консоль службової інформації про прогрес обробки (наприклад: *Processing frame number 50/200*), що особливо корисно при роботі з довгими відеозаписами [37].

Поточний кадр підлягає послідовному перетворенню кольорового простору: спочатку з BGR у RGB, далі — у відтінки сірого (*nextFrameGray*). Перетворення в RGB необхідне для забезпечення узгодженості з бібліотекою *FlowVis*, яка використовує цей простір у процесі візуалізації.

Власне обчислення оптичного потоку між *prvsFrame* та *nextFrameGray* здійснюється за допомогою функції *cv2.calcOpticalFlowFarneback(...)* з розширеними налаштуваннями: *pyramidal scale = 0.5, levels = 3, window size = 25, iterations = 5, poly_n = 7, poly_sigma = 1.5*.

Порівняно з типовими значеннями OpenCV (*winsize = 15, iterations = 3*), використані параметри забезпечують вищу стійкість до шуму та кращу адаптацію до складних динамічних умов, зокрема при різких чи нерівномірних переміщеннях. Результатом роботи функції є матриця *flow*, де кожному пікселю відповідає вектор зміщення ($\Delta x, \Delta y$), що відображає

напрям і величину локального зсуву між поточним та попереднім кадром [37].

5.3.3 Візуалізація результатів: стрілкова мапа та HSV-карта потоку

Для підвищення інформативності результатів реалізовано два варіанти візуального представлення оптичного потоку, які відображаються у парі на кожному кадрі вихідного відео.

5.3.3.1. Стрілкова мапа руху

У функції *visualize_flow(...)* реалізовано побудову векторного представлення: компоненти потоку перетворюються у полярні координати з обчисленням модулів (*mag*) і кутів (*ang*), модулі нормалізуються до діапазону [100, 255] — відповідно до інтенсивності зеленого каналу у візуалізації, відображаються лише вектори, які перевищують заданий пороговий рівень (*threshold = 0.5*) — для фільтрації незначних або шумових зміщень, з урахуванням *density = 0.002* формується випадкова підмножина векторів, що забезпечує помірну насиченість карти та зберігає її читабельність а стрілки малюються з коефіцієнтом масштабування *scale = 15*, що візуально компенсує розмір екрану.

5.3.3.2 HSV-візуалізація потоку

Здійснюється побудова кольорової карти потоку за допомогою *flow_vis.flow_to_color(...)*. У ній відтінок (H) відповідає напрямку руху, насиченість (S) та яскравість (V) — модулю переміщення. Для забезпечення сумісності з кольоровим простором кадру зображення перетворюється в RGB перед горизонтальним об'єднанням із *arrowVis* (*np.hstack(...)*). У підсумку формується кадр *out*, у якому ліва частина відображає векторну мапу стрілок, а права — "теплову" карту руху, що

забезпечує комплексне сприйняття характеру зміщення на всій площині зображення.

Такий підхід до візуалізації дозволяє не лише інтерпретувати рух у реальному масштабі, але й ефективно демонструвати відповідність між локальними векторами переміщення та загальною картиною динаміки сцени, що є особливо корисним у процесі налагодження та валідації методу стабілізації.

5.3.4 Обчислення інтегральних метрик

Ця частина додана в рамках даного дослідження спеціально для оцінки якості стабілізації. Після отримання матриці *flow* проводиться розрахунок середнього вектора оптичного потоку по всьому кадру. Для цього з матриці *flow* витягуються окремо компоненти по осі X ($fx = flow[...][0]$) та по осі Y ($fy = flow[...][1]$). Обчислюється середнє значення для кожної компоненти: $mean_fx = np.mean(fx)$, $mean_fy = np.mean(fy)$ – ці величини відповідають усередненому зміщенню зображення (а отже, і камери) по горизонталі та вертикалі між кадрами. Далі з них обчислюється модуль середнього вектора: $magnitude = \sqrt{mean_fx^2 + mean_fy^2}$, а також кут напрямку руху $angle_deg = \arctan2(mean_fy, mean_fx)$ у градусах. Таким чином, отримуємо зведену оцінку руху об'єкта між двома сусідніми кадрами: наприклад, «за останню 1/30 секунди камера змістилася вліво на 2,5 пікселя і вгору на 1,0 пікселя», що відповідає вектору з модулем ~ 2.7 px під кутом $\sim 158^\circ$.

5.3.5. Накладання текстової інформації

Щоб зробити ці метрики наочними при перегляді відео, код формує текстовий рядок зі значеннями: форматування $dx: \{mean_fx:.2f\}$, $dy: \{mean_fy:.2f\} | mag: \{magnitude:.2f\}px | angle: \{angle_deg:.1f\} deg$ вставляє обчислені числа з необхідною кількістю знаків після коми. Наприклад,

рядок може виглядати як: “*dx: -1.80, dy: 0.37 | mag: 1.83px | angle: 168.4 deg*”, що означає середній рух на 1.80 пікселя вліво і 0.37 пікселя вгору; результуючий зсув 1.83 px під кутом 168.4° (близько до осі $-X$). Цей текст накладається поверх зображення: спершу малюється чорний прямокутник-фон для контрастності (*cv2.rectangle*), а поверх нього виводиться сам текст (*cv2.putText*) – товстим жовтим шрифтом. Розмір шрифту і товщина обрані так, щоб текст було видно на фоні відео. Положення тексту фіксоване (наприклад, у лівому верхньому куті кадру, з відступами 10 px). На рис. 5.3 показано приклад відображення цих даних на фрагменті кадру.

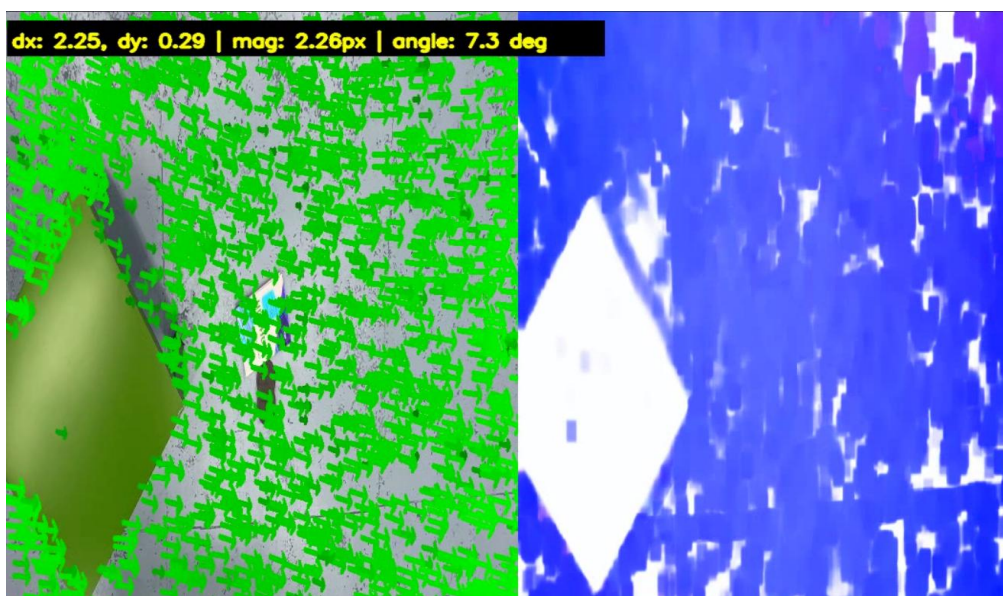


Рисунок 5.3 Приклад накладання векторів оптичного потоку та інтегральних показників руху на відеокадр

5.3.6 Збереження кадру та перехід до наступного

Після додавання всіх анотацій отримане зображення *resizedImg* (приведене до стандартного розміру вихідного відео 1080×720) додається як черговий кадр у вихідний відеофайл через *output.write(resizedImg)*. Змінна *prvsFrame* оновлюється: тепер попереднім кадром для наступної ітерації стає поточний *nextFrameGray*. Цикл повторюється до вичерпання вхідних кадрів.

Після завершення обробки відео цикл *while* завершується, і проводиться прибирання ресурсів: закриття вихідного відеофайлу (*output.release()*), звільнення захоплення камери (*cap.release()*) та закриття всіх вікон OpenCV (*cv2.destroyAllWindows()*) [32]. Для контролю продуктивності в консоль також виводиться середній FPS обробки (відношення числа кадрів до часу роботи) [32]. В кінці роботи скрипт друкує “Finished” у консоль, сигналізуючи про успішне завершення [32].

Таким чином, реалізований код проходить повний цикл від читання сирих відеоданих до формування наочних результатів. На виході для кожного тестового ролика отримано нове відео, в якому поруч зі справжньою сценою відображаються стрілки оптичного потоку та кольорова карта, а також накладено числові показники зсуву. Це дозволяє проаналізувати роботу методу: візуально оцінити, чи правильно визначаються напрямки руху (по стрілках і кольоровій карті), та кількісно виміряти, наскільки стабільно платформа утримує положення (по величині dx , dy). В подальшому такі результати можуть бути використані для автоматичного регулювання руху об’єкта: наприклад, подаючи ці інтегральні зсуви на систему керування дроном, можна виконувати корекцію його положення, прагнучи звести середній оптичний потік до нуля.

5.4. Результати тестувань

У цьому розділі представлено результати експериментального порівняння двох підходів визначення переміщення: візуального – на основі оптичного потоку, та інерційного – на основі показів акселерометра, гіроскопа і лінійного акселерометра. Тестування проводилось на власних даних: відеозаписах руху та синхронно зібраних показах сенсорів. Метою є зіставлення форми отриманих графіків зміщення у часі, а не точних метричних значень переміщення. Для цього обидва сигнали були приведені

до безрозмірної шкали та проаналізовано їх кореляцію. Нижче детально описано етапи обробки даних та результати порівняння.

5.4.1 Обробка даних інерційних сенсорів

Записи інерційних датчиків містять прискорення та кутову швидкість пристрою в часі. Оскільки акселерометр дає сумарне прискорення з урахуванням гравітації, використовувалися покази лінійного акселерометра (очищені від впливу гравітації) для обчислення поступального руху, дані прискорень попередньо згладжувалися для зменшення шуму. Згладжування виконувалося методом ковзного середнього - кожне значення прискорення замінювалося середнім по вікну з кількох сусідніх вибірок. Формально ковзне середнє можна подати як (5.4.1):

$$a_t^{\text{сгладж}} = \frac{a_{t-N+1} + a_{t-N+2} + \dots + a_t}{N} \quad (5.4.1.1)$$

де a_t – початкове значення прискорення у момент часу t , а N – розмір вікна усереднення. Така фільтрація відноситься до згладжувальних (низькочастотних) і дозволяє прибрати випадкові коливання сигналу, що особливо важливо перед інтегруванням прискорення, аби зменшити накопичення похибки.

Після згладжування здійснювалося чисельне інтегрування прискорення для отримання швидкості, а потім — повторне інтегрування для визначення пройденого шляху (зміщення). Інтегрування виконувалося дискретно, методом підсумовування (метод прямокутників або трапецій) на основі тимчасових інтервалів між вибірками. Наприклад, для рівномірних відліків швидкість обчислювалася як (5.4.1.2)

$$v_k = \sum_{i=1}^k a_i \Delta t \quad (5.4.1.2)$$

а зміщення як (5.4.1.3)

$$s_k = \sum_{i=1}^k v_i \Delta t \quad (5.4.1.3)$$

де Δt — крок по часу між вибірками. Цей процес відповідає інтегруванню прискорення $a(t)$ для отримання швидкості $v(t)$ та подальшому інтегруванню $v(t)$ для визначення пройденого шляху $s(t)$ [33, 34]. Початкові умови приймалися нульовими ($v_0=0$, $s_0=0$), оскільки пристрій був нерухомим на початку запису [33].

Інтегрування лінійного прискорення двічі поспіль дає відносну оцінку переміщення пристрою. Абсолютні значення такого переміщення можуть дрейфувати з часом через накопичення похибок (наприклад, неідеальне калібрування нуля акселерометра призводить до появи невеликого сталого прискорення, яке при інтегруванні створює квадратичний дрейф зміщення) [33, 34]. У наших експериментах тривалість руху була відносно невеликою (до кількох секунд), тому дрейф не встиг набрати значної величини. До того ж результуючі криві зміщень порівнювалися лише за формою після нормалізації, що усуває вплив постійних похибок масштабу та зсуву. Отже, інерційний підхід дав криву зміщення $s_{IMU}(t)$ (відносно початкового положення) у довільних одиницях, пропорційну реальному пройденому шляху [33, 34].

5.4.2 Нормалізація та синхронізація результатів

Отримані дві часові залежності зміщення — інерційна $s_{IMU}(t)$ та візуальна $s_{OF}(t)$ — мали різні одиниці вимірювання та різні частоти дискретизації. Частота запису відео (наприклад, 30 кадрів/с) відрізняється від частоти збору даних сенсорів (наприклад, 100 Гц), тому спершу потрібно було привести обидва масиви до спільної часової шкали. Для цього один із сигналів інтерполювали: значення одного масиву обчислювалися у часових мітках іншого. У реалізації використовувалася лінійна інтерполяція: для кожного часу кадру відео знаходили відповідне зміщення за даними

сенсорів, або навпаки — для кожного відліку сенсора обчислювали зміщення за оптичним потоком [34, 37]. Інтерполяція дала змогу отримати дві траєкторії $s_{IMU}(t)$ та $s_{OF}(t)$, задані на однаковому наборі часових точок t_k , що необхідно для їх подальшого покрокового порівняння.

Наступним кроком була нормалізація амплітуди обох сигналів. Нормалізація здійснювалася методом мін–макс, тобто лінійним перетворенням діапазону значень кожної траєкторії до інтервалу $[0, 1]$. Формула мін–макс [36] нормалізації має вигляд (5.4.2):

$$x' = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (5.4.2)$$

де x – початкове значення (наприклад, зміщення в сирих одиницях), $\min(x)$ і $\max(x)$ – мінімальне та максимальне значення в масиві цих даних, а x' – нормалізоване значення. Для траєкторій зміщення така нормалізація означає, що найменше значення зміщення стає 0, а найбільше – 1 (у відносних одиницях). В результаті обидві траєкторії було зведено до безрозмірного вигляду. Це усуває розбіжності в одиницях вимірювання та масштабах: наприклад, якщо оптичний потік дав зміщення в умовних пікселях, а інерційний метод – у відносних метрах, після нормалізації обидва сигнали коливатимуться від 0 до 1, що дозволяє прямо порівнювати їх форму.

Слід підкреслити, що нормалізація також знімає вплив адитивних і мультиплікативних похибок. Зсув нуля (початкове зміщення) в обох методах був нульовим за задумом експерименту, але можливий дрейф або залишкове зміщення наприкінці руху не впливають на форму графіка після нормування. Так само коефіцієнт масштабу (наприклад, скільки пікселів відповідає певній відстані) вже не важливий – обидва графіки приведено до співставного діапазону. Таким чином, після інтерполяції та нормалізації можна безпосередньо зіставляти траєкторії у функції часу.

5.4.3 Кореляційний аналіз

Для визначення ступеня подібності між двома джерелами даних – зміщенням, обчисленим через оптичний потік, та зміщенням, отриманим шляхом подвійного інтегрування інерційних даних – було використано коефіцієнт кореляції Пірсона. Після нормалізації обох сигналів до діапазону $[0, 1]$ кожну пару сигналів зіставляли у відповідні моменти часу та аналізували ступінь збігу їх форми. Формула для обчислення коефіцієнта Пірсона [35] має вигляд (5.4.3):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.4.3)$$

де: x_i — значення зміщення за даними інерційних сенсорів у момент часу t_i , y_i — відповідне зміщення за даними оптичного потоку, \bar{x}, \bar{y} — середні значення відповідних сигналів.

На рисунках нижче наведено приклади одного з експериментів, у якому обидва джерела даних демонструють високу схожість сигналів. Для осі X спостерігається практично повне накладання графіків, що вказує на близьке значення коефіцієнта кореляції до 1.

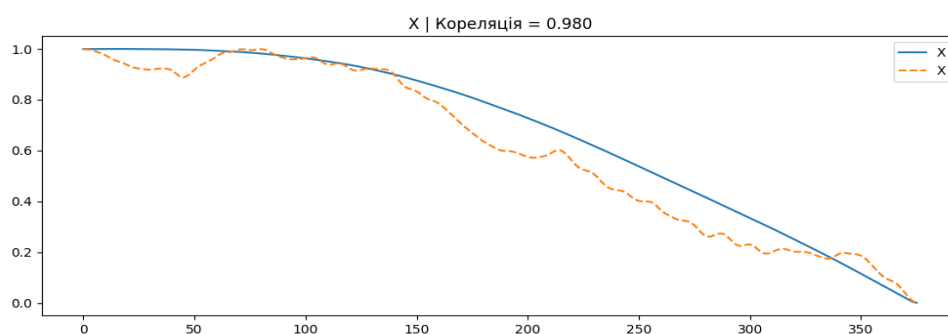


Рисунок 5.4.1 Порівняння зміщення по осі X

Також показано приклад порівняння по осі Y. Попри можливе незначне відставання піків або флуктуації в амплітуді, форма сигналів зберігає спільні риси, що підтверджує лінійну залежність.

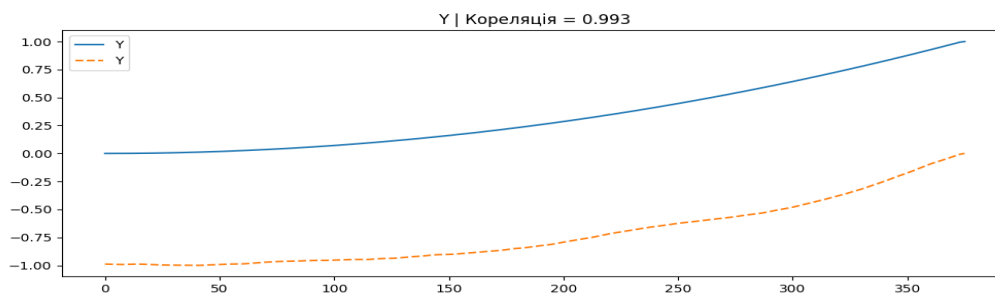


Рисунок 5.4.2 Порівняння зміщення по осі Y

Показані приклади ілюструють, що метод оптичного потоку здатен достовірно повторювати характер переміщення пристрою у просторі. При чіткому текстурованому фоні та стабільному освітленні він визначає зміщення не гірше за інерційний метод. Невеликі похибки можуть виникати через особливості сцени або сенсорний шум, проте вони практично не впливають на форму сигналу.

5.4.5 Загальні результати

Після проведення повного циклу обробки було виконано 32 експерименти, для кожного з яких обчислено коефіцієнти кореляції між зміщеннями, визначеними оптичним потоком та інерційними даними — окремо по кожній осі. Результати свідчать про стабільно високу схожість сигналів. Середнє значення кореляції по осі X склало 0.943 (94,3%), а по осі Y — 0.948 (94,8%), що підтверджує ефективність запропонованого методу візуального відстеження зміщення.

На *Рис. 5.4.3* представлено графік загального порівняння по всіх експериментах, де показано значення кореляції по осях X і Y для кожного відео. Видно, що переважна більшість експериментів дала результати з кореляцією понад 0.9 (90%). Окремі винятки (із зниженими значеннями) зумовлені наявністю шумів, втратою текстур, або несприятливими умовами сцени.

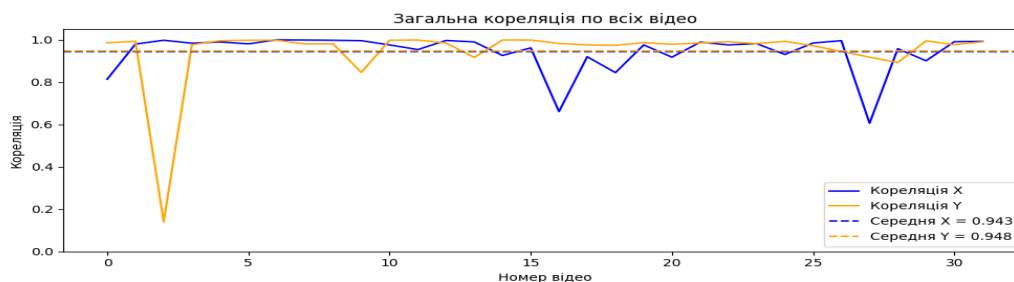


Рисунок 5.4.3 Графік загальної кореляції по всіх відео

Такий результат демонструє, що візуальне одометрування за допомогою оптичного потоку може успішно застосовуватись як незалежне джерело для оцінки зміщення, особливо у випадках, коли інерційні дані схильні до дрейфу або зашумлені. Форма сигналу, що є критичною у багатьох задачах стабілізації, жестикуляції або відносного позиціонування, достовірно передається оптичним методом.

5.5. Порівняння з альтернативними методами стабілізації положення

На основі Таблиці 5.5 можна здійснити глибоке порівняння методу оптичного потоку (Фарнебека) із шістьма основними альтернативами, що використовуються для стабілізації положення об'єктів у просторі.

Критерій	ІНС	GNS S	SLA M	Візуал ьна одомет рія	Висото міри (баро/ул ьтра/лід ар)	Радіомая ки (UWB/Vi con)	Оптичн ий потік (Farneb ack)
Точність (локальна)	Низь ка	Сере дня	Висо ка	Висок а	Висока	Висока	Висока
Довготривал а точність	Низь ка	Висо ка	Висо ка	Серед ня	Середня	Висока	Висока
Автономніст ь	Висо ка	Низь ка	Висо ка	Висок а	Висока	Низька	Висока
Енергоспожи вання	Низь ке	Низь ке	Висо ке	Серед не	Низьке	Середнє	Середн є
Похибка/дри фт	Висо ка	Низь ка	Низь ка	Серед ня	Середня	Низька	Низька
Чутливість до шумів	Висо ка	Низь ка	Висо ка	Серед ня	Висока	Низька	Середн я
Вартість реалізації	Низь ка	Низь ка	Висо ка	Низька	Низька	Висока	Низька
Складність реалізації	Низь ка	Сере дня	Висо ка	Серед ня	Середня	Висока	Низька
Потреба в інфраструкту рі	Ні	Так	Ні	Ні	Ні	Так	Ні
Залежність від освітлення	Ні	Ні	Так	Так	Ні	Ні	Частков о

Таблиця 5.5 Порівняння методів стабілізації об'єктів в повітрі

Метод Фарнебека був обраний як базовий через оптимальне поєднання автономності, точності, ресурсної ефективності, стійкості до збурень і незалежності від інфраструктури. ІНС споживають мало енергії й працюють автономно, але накопичують інтегративну похибку, що обмежує довготривалу стабілізацію [33, 34]. У Фарнебека кожна оцінка зсуву незалежна, без накопичення помилок, і, хоча потребує більше обчислень, сучасні CPU дозволяють працювати в реальному часі [21, 37].

GNSS забезпечує глобальну орієнтацію, але з похибкою в метри, що неприпустимо там, де потрібна субметрова точність, і воно недоступне в закритих приміщеннях чи міських «каньйонах» [10]. Фарнебека працює незалежно від зовнішніх сигналів, використовуючи локальну візуальну інформацію, та може функціонувати за мінімального освітлення за наявності базової текстурованості сцени [21].

Методи SLAM дають високу точність та карту середовища, але критично залежать від видимих візуальних ознак, GPU та великого обсягу пам'яті [17, 18]. Фарнебека не потребує побудови карти, працює з локальними зміщеннями і може виконуватись на одноплатних комп'ютерах (Raspberry Pi, NVIDIA Jetson) без дорогого обладнання [21, 37].

Візуальна одометрія зазвичай базується на розрідженому відстеженні ознак і втрачає ефективність у низькотекстурованих або погано освітлених сценах [11, 16]. Фарнебека формує щільне поле для кожного пікселя, дозволяючи виявляти навіть мінімальні зміщення в однорідних ділянках без потреби у збереженні ідентичності ознак [21].

Барометричні, ультразвукові та лазерні висотоміри вимірюють лише вертикаль (Z) й мають вузькі обмеження: ультразвук чутливий до рельєфу й матеріалу поверхні, барометри – до атмосферного тиску, лазери – до вартості та умов (пил, туман) [12]. Фарнебека забезпечує інформацію про горизонтальні зміщення (X, Y) лише з однієї камери [21].

Локальні радіомаякові системи (UWB, Vicon) дають сантиметрову точність, але потребують зовнішньої інфраструктури — настінно розміщених маяків, камер або серверів [13, 12]. Фарнебека працює лише з відео, без зовнішнього синхрування й інфраструктури [21].

Таким чином, метод Фарнебека поєднує місцеву точність, незалежність від інфраструктури, помірну вимогливість до ресурсів, стійкість до збурень і простий спосіб інтеграції в низькорівневі системи керування. Це робить його оптимальним для автономних мобільних платформ у змінному або непередбачуваному середовищі, де стабільність положення є критичною для підтримки зв'язку.

Висновки до розділу 5

Метод стабілізації на основі оптичного потоку за методом Фарнебека виявився надзвичайно ефективним у наших експериментах: аналіз щільного поля зміщень для кожного пікселя дозволив точно відстежувати переміщення платформи над різними типами поверхонь, навіть у зонах із слабкою текстурою. За результатами 32 відеоекспериментів середнє значення кореляції між траєкторіями зміщень, отриманими через оптичний потік, і незалежними даними акселерометра склало 0,943 для осі X та 0,948 для осі Y, що свідчить про близько 94 % подібність сигналів. Отримані результати доводять, що ця візуальна методика може самостійно забезпечувати стабільну оцінку зміщень у більшості сценаріїв без додаткових ресурсів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Метою моєї дипломної роботи є розробка методу підвищення якості і збільшення відстані передачі бездротового сигналу в умовах дії радіоперешкод шляхом стабілізації положення комунікаційного пристрою (ретранслятора) на основі аналізу оптичного потоку його відеосигналу. Відповідна мета була досягнута.

У перших трьох розділах дослідження було проаналізовано чинники, що знижують якість бездротового сигналу: мультишляхову інтерференцію (фейдінг), топографічні перешкоди (гори, ущелини, ліси, щільна забудова), які спричиняють дифракцію та багатократні відбиття, а також мобільність систем (зміна положення джерела, приймача або БПЛА-ретранслятора). Було встановлено, що традиційні підходи до покращення якості сигналу в таких умовах є недостатньо ефективними.

Після такого аналізу було вирішено, що для забезпечення збільшення відстані передачі сигналу та підвищення надійності зв'язку доцільно застосувати передачу через БПЛА-ретранслятор, оскільки цей підхід дозволяє мінімізувати вплив багатошляховості та топографічних бар'єрів.

Після аналізу існуючих методів стабілізації положення БПЛА-ретранслятора проведено їх порівняльну оцінку, у результаті якої обрано метод, що базується на обчисленні оптичного потоку відеосигналу, та розглянуто різні методи обчислення оптичного потоку для визначення оптимальної реалізації в умовах обмежених обчислювальних ресурсів і мінімальної освітленості сцени.

У четвертому розділі детально викладено принцип роботи розробленого методу, а саме використання БПЛА-ретранслятора, який визначає власне положення за допомогою аналізу оптичного потоку відеосигналу. Забезпечено опис методу стабілізації, що дозволяє компенсувати перелічені фактори, які негативно впливають на якість бездротового сигналу, та підвищити дальність його передачі.

У п'ятому розділі описано методику обчислення оптичного потоку, проведено практичне тестування розробленого методу та порівняно його показники з показниками інерціальної навігаційної системи. Отримані результати продемонстрували високу точність відстеження рухів (понад 94 %), що підтверджує переваги обраного рішення. Наприкінці розділу проведено якісне порівняння різних методів стабілізації положення БПЛА-ретранслятора, що дозволило підтвердити ефективність розробленого підходу в складних умовах експлуатації.

Таким чином, реалізація розробленого методу підвищення якості та збільшення дальності передачі бездротового сигналу в умовах радіоперешкод шляхом стабілізації положення комунікаційного пристрою підтвердила виконання поставленої мети дипломної роботи.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Sobouti M. J., Mohajerzadeh A., Adarbah H. Y., Rahimi Z., Ahmadi H. Utilizing UAVs in Wireless Networks: Advantages, Challenges, Objectives, and Solution Methods. 2024.
2. Li B., Zhao S., Miao R., Zhang R. A survey on unmanned aerial vehicle relaying networks. 2021.
3. Tao C., Liu B. Online Autonomous Motion Control of Communication-Relay UAV with Channel Prediction in Dynamic Urban Environments. Drones. 2024.
4. Kulkarni S. R. Basics of Signals. Princeton University; 2002.
5. MDPI AG. Free-Space Path Loss. Encyclopedia MDPI. 2023.
6. Kalyan R., and Viswanathan V. Noise and Telecommunications Systems. Hilaris Publisher; 2016.
7. ZHENGMAO Y., Z. Exploring Impact of Doppler Effect on Time-Varying Multipath Wireless Communication Channels via Model Based Characteristic Analysis. WSEAS Transactions on Signal Processing. 2024.
8. Nzekwu N. J., Fernandes M. A., Fernandes G. M., Monteiro P. P., Guiomar F. P. A Comprehensive Review of UAV-Assisted FSO Relay Systems. 2024.
9. Qu S., Cui J., Cao Z., Qiao Y., Men X., Fu Y. Position Estimation Method for Small Drones Based on the Fusion of Multisource, Multimodal Data and Digital Twins. 2024.
10. Chang Y., Cheng Y., Manzoor U., Murray J. A review of UAV autonomous navigation in GPS-denied environments. 2023.
11. Aqel M. O., Marhaban M. H., Saripan M. I., Ismail N. B. Review of visual odometry: types, approaches, challenges, and applications. 2016.
12. Balestrieri E., Daponte P., De Vito L., Picariello F., Tudosa I. Sensors and Measurements for UAV Safety: An Overview. 2021.

13. Masiero A., Fissore F., Antonello R., Cenedese A., Vettore A. A comparison of UWB and motion capture UAV indoor positioning. 2019.
14. Rodriguez A. A., Shekaramiz M., Masoum M. A. S. Computer Vision-Based Path Planning with Indoor Low-Cost Autonomous Drones: An Educational Surrogate Project for Autonomous Wind Farm Navigation. 2024.
15. Gugan G., Haque A. Path Planning for Autonomous Drones: Challenges and Future Directions. 2023.
16. Rostum H. M., Vásárhelyi J. A Review of Using Visual Odometry Methods in Autonomous UAV Navigation in GPS-Denied Environment. 2023.
17. Xu K., Yang Z., Xie L., Wang C. GroundSLAM: A Robust Visual SLAM System for Warehouse Robots Using Ground Textures. 2025.
18. Zhuang L., Zhong X., Xu L., Tian C., Yu W. Visual SLAM for Unmanned Aerial Vehicles: Localization and Perception. 2024.
19. Lucas B. D., Kanade T. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision 1981.
20. Horn B. K. P., Schunck B. G. Determining Optical Flow. 1981.
21. Farnebäck G. Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion. 2003.
22. Dosovitskiy A., Fischer P., Ilg E., Häusser P., Hazırbaş C., Golkov V., van der Smagt P., Cremers D., Brox T. FlowNet: Learning Optical Flow with Convolutional Networks. 2015.
23. Sun D., Yang X., Liu M.-Y., Kautz J. PWC-Net: CNNs for Optical Flow Using Pyramid, Warping, and Cost Volume. 2018.
24. Teed Z., Deng J. RAFT: Recurrent All-Pairs Field Transforms for Optical Flow. 2020.
25. Singh S., Kumar A., Chemban F. P., Fernandes V., Penubaku L., Arya K. Vision-based indoor localization of nano drones in controlled environment with its applications. 2024.

26. Miller A. B., Miller B. M., Popov A. K., Stepanyan K. V. UAV Landing Based on the Optical Flow Videonavigation. 2019.
27. Belfadel D., Cain J., Haessig D., Chibane C. Optical Flow and IMU Fusion for Drone Horizontal Velocity Control. 2024.
28. Ranjan A., Black M. J. Optical Flow Estimation using a Spatial Pyramid Network. 2017.
29. Huang Z., Shi X., Zhang C., Wang Q., Cheung K. C., Qin H., Dai J., Li H. FlowFormer: A Transformer Architecture for Optical Flow. 2022.
30. Архів відеоматеріалів:
<https://drive.google.com/file/d/1ECDtzoQzrne1GMGmQkN1u2GRHJNLZj0V/view?usp=sharing>
31. Ahammed, I. Optical Flow using OpenCV (Farneback Method). GitHub repository. 2021.
32. Архів авторського коду:
https://drive.google.com/file/d/17UVh67tCRgdD5c7O7TmlyXxNfMUXrq7_/view?usp=sharing
33. Titterton, D. H.; Weston, J. L. Strapdown Inertial Navigation Technology. 2004.
34. Särkkä, S. Bayesian Filtering and Smoothing. Cambridge. 2013.
35. Benesty J., Chen J., Huang Y., Cohen I. Pearson Correlation Coefficient. 2009.
36. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. 2008.
37. OpenCV Documentation: <https://docs.opencv.org>.