

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

Факультет електроніки

Кафедра електронних пристроїв та систем

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Євген ВЕРБИЦЬКИЙ

«__» червня _____ 2023 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електронні компоненти і системи»

спеціальності 171 «Електроніка»

на тему: «Пристрій обробки відеозображень безпілотного літального апарата»

Виконав (-ла):

студент ІV курсу, групи ДС-91
Єгор КУЩИНСЬКИЙ

Керівник:

Проф. каф. ЕПС, д.т.н. , проф.
Тетяна ТЕРЕЩЕНКО

Рецензент:

Зав. каф. АМЕС, д.т.н., проф.
Сергій НАЙДА,

Консультант

з нормоконтролю
Доц. каф. ЕПС, к.т.н., доц.
Лариса БАТРАК

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2023 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроніки
Кафедра електронних пристроїв та систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 171 «Електроніка»

Освітньо-професійна програма «Електронні компоненти і системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Євген ВЕРБИЦЬКИЙ

«17» травня 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Кущинському Єгору Олеговичу

1. Тема проєкту « Пристрій обробки відеозображень безпілотного літального апарата» _____

керівник проєкту Терещенко Тетяна Олександрівна д.т.н. проф. _____
Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання,

затверджені наказом по університету від « 30 » травня 2023 р. № 2063-с

2. Термін подання студентом проєкту 17.06.2023 _____

3. Вихідні дані до проєкту Вихідний файл – зображення з камери ESP32 Cam.Стиснутий файл передається по інтерфейсу UART. Коефіцієнт стиснення не нижче 60%.

4. Зміст пояснювальної записки Огляд видів та характеристик безпілотних літальних апаратів, вимоги НАТО. Аналіз методів цифрової обробки відеозображень апаратурою безпілотного літального апарата. Використання вейвлет перетворень для стиснення інформації. Розробка пристрою обробки відеозображень безпілотного літального апарату та моделювання його роботи

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Презентація, схема електрична принципова, схема електрична структурна, теоретичне креслення

6. Консультанти розділів проєкту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 17 травня 2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналіз літератури по темі: Види та характеристики безпілотних літальних апаратів, Аналіз вимоги НАТО до БПЛА Стандарти НАТО для передачі даних	17.05.23-19.05.23	
2	Класифікація та характеристики безпілотних літальних апаратів в авіаційних системах.	20.05.23-21.05.23	
3	Аналіз методів цифрової обробки відеозображень апаратурою БПЛА	22.05.23-25.05.23	
4	Опис алгоритмів стиснення на базі вейвлет-перетворення	26.05.23-29.05.23	
5	Моделювання та порівняння алгоритмів стиснення	30.05.23-02.06.23	
6	Розробка структурної та принципової схеми пристрою	03.06.23-07.06.23	
7	Оформлення пояснювальної записки	08.06.23-16.06.23	

Студент

Єгор КУЩИНСЬКИЙ

Керівник

Тетяна ТЕРЕЩЕНКО

АНОТАЦІЯ

За останні роки безпілотні літальні апарати стали невід'ємною та дуже актуальною частиною сучасної авіації. Вони використовуються для різних цілей, включаючи військові, комерційні та наукові. У світі наразі проходять активні дослідження та розробки, пов'язані з безпілотними літальними апаратами. Зокрема, досліджується можливість використання БПЛА для виконання завдань, які раніше були недосяжні для пілотованих літаків, таких як збір інформації з висоти або зони, яка вважається небезпечною для людини.

Метою дипломного проекту є розробка пристрою та алгоритмів стискування інформації для передачі по каналу зв'язку з відносно низькою пропускнуою здатністю без суттєвого використання втрат якості сигналу.

Під час виконання дипломного проекту були оглянуті види та характеристики безпілотних літальних апаратів і вимоги до них. Був проведений аналіз цифрової обробки відеозображень апаратурою безпілотного літального апарата. Обрано та використано вейвлет перетворень для стиснення інформації. Розроблено пристрій обробки відеозображень безпілотного літального апарата та змодельовано його роботу.

В результаті роботи були отримані результати стиснення зображення використовуючи алгоритм встановлення підрозділів ієрархічних дерев. Поведено моделювання для перевірки можливостей даного алгоритму по стисненню відеозображень.

Ключові слова: Дискретне косинус перетворення, коефіцієнти вейвлет перетворень, розкладання зображень, вейвлет перетворення, кодування, декодування, алгоритми стиснення.

ANNOTATION

Over the past years, unmanned aerial vehicles (UAVs) have become an integral and highly relevant part of modern aviation. They are used for various purposes, including military, commercial, and scientific applications. Active research and development related to UAVs are currently taking place worldwide. In particular, the possibility of using UAVs to perform tasks that were previously inaccessible to manned aircraft, such as gathering information from high altitudes or hazardous areas for humans, is being explored.

The goal of the diploma project is to develop a device and information compression algorithms for transmission over a low-bandwidth communication channel without significant loss of signal quality. During the execution of the diploma project, types and characteristics of UAVs and their requirements were reviewed. An analysis of digital image processing by UAV hardware was conducted. Wavelet transforms were selected and utilized for information compression. A device for processing UAV video images was developed and its operation was simulated.

As a result of the work, image compression results were obtained using an algorithm for establishing hierarchical tree subdivisions. Simulation was performed to verify the capabilities of this algorithm for video image compression.

Keywords: Discrete cosine transforms, wavelet coefficients, image decomposition, wavelet transforms, encoding, decoding, compression algorithms.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. ВИДИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ, ВИМОГИ НАТО.....	10
1.1. Класифікація безпілотних літальних апаратів в авіаційних системах	10
1.2. Характеристики сучасних безпілотних літальних апаратів	16
1.3. Стандартизація вимог до систем передачі зображень для БПЛА ...	18
1.4. Вимоги до форматів відеозображень та до каналів передачі	20
1.5. Стандарти НАТО для передачі даних.....	23
2. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ АПАРАТУРОЮ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА	29
2.1. Технології стискання зображень та відеофайлів	29
2.2. Огляд методів стиснення цифрових зображень.....	35
2.3. Дискретне косинус перетворення (ДКП) для стиснення інформації	38
2.4. Використання вейвлет Хаара для стиснення відеофайлів	40
3. ВИКОРИСТАННЯ ВЕЙВЛЕТ ПЕРЕТВОРЕНЬ ДЛЯ СТИСНЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ	43
3.1. Одновимірне перетворення Хаара.....	43
3.2. Двовимірне перетворення Хаара	45
3.3. Алгоритми кодування вейвлет коефіцієнтів.....	48
3.3.1. Алгоритм вкладеного нуль дерева(EZW)	48
3.3.2. Алгоритм встановлення підрозділів в ієрархічних деревах(SPIHT)	50
4. РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ОБРОБКИ ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЙОГО РОБОТИ.....	53
4.1. Розробка структурної та принципової схеми пристрою	53
4.2. Моделювання роботи пристрою обробки.....	55

									Анк
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				7

4.2.1. Моделювання вейвлетів Хаара	55
4.2.2. Моделювання методу SPIHT	57
4.3. Аналіз отриманих результатів моделювання стиснення зображення	58
ВИСНОВКИ	66
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	67
Додаток А.	70
Додаток Б.	72
Додаток В.	74
Додаток Г.	75
Додаток Г'.	76
Додаток Д.	77

ВСТУП

Метою дипломної роботи є розробка пристрою та алгоритмів стискання інформації для передачі по каналу зв'язку з відносно низькою пропускнуою здатністю без суттєвого використання втрат якості сигналу.

За останні роки безпілотні літальні апарати стали невід'ємною та дуже актуальною частиною сучасної авіації. Вони використовуються для різних цілей, включаючи військові, комерційні та наукові. У світі наразі проходять активні дослідження та розробки, пов'язані з безпілотними літальними апаратами. Зокрема, досліджується можливість використання БПЛА для виконання завдань, які раніше були недосяжні для пілотованих літаків, таких як збір інформації з висоти або зони, яка вважається небезпечною для людини.

Однією з ключових функцій БПЛА є збір та обробка відеоданих, які передаються з камер, що розміщені на борту. Сучасні розробки в цій області дозволяють збирати більше інформації та передавати її в режимі реального часу, що допомагає покращувати безпеку польотів та забезпечувати більш точну інформацію про навколишнє середовище. Також розробляються нові алгоритми для обробки відеоданих, що дозволяє зменшити час обробки та підвищити якість інформації, що отримується. Наразі існують безліч сучасних розробок та варіацій БПЛА, які відрізняються за розмірами, функціональністю та призначенням. Зокрема, існують БПЛА для моніторингу екологічних умов, для пошуку та рятування під час лих надвір'я, а також для комерційних цілей, наприклад, для доставки посилок та забезпечення безпеки нафтогазових об'єктів. Також безпілотні літальні апарати використовуються військовими для розвідки, надання підтримки на полі бою та для виконання небезпечних завдань без наявності пілота на борту.

									Анк
									9
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				

1. ВИДИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ, ВИМОГИ НАТО

1.1. Класифікація безпілотних літальних апаратів в авіаційних системах

Безпілотна авіаційна система (БАС) – цільова авіаційна система, що включає літальний апарат без екіпажу, засоби наземного забезпечення, підготовки і застосування відповідно до призначення літального апарата [1].

За своїм загальним призначенням літальні апарати в БАС поділяться на види, надані на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Класифікація безпілотних літальних апаратів БПЛА за призначенням

Безпілотний літальний апарат (БПЛА), також відомий як Unmanned Aerial Vehicle (UAV) у англійській термінології, може виконувати свої функції без присутності людини на його борту для керування. Цей термін має широке вживання і не завжди точно передає особливості літального апарата. Тому до цього класу не включають безпілотні модифікації стандартних літаків, які використовуються як повітряні мішені, а також всі види балістичних і крилатих ракет.

У групу безпілотних літальних апаратів (БПЛА) входять дистанційно пілотовані літальні апарати (ДПЛА), безпілотні автоматичні літальні апарати (БПАЛА) і безпілотні бойові літальні апарати (БПБЛА), як зображено на рис. 1.1.

									Анк
									10
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				

Дистанційно пілотований літальний апарат (ДПЛА) є безпілотним літальним апаратом, який здійснюється неперервне управління з фіксованої або рухомої точки управління. Безпілотний автоматичний літальний апарат (БПАЛА) є безпілотним літальним апаратом, який автоматично виконує свої функції відповідно до програм та алгоритмів, вбудованих у нього (наприклад, крилаті ракети або розвідувальні літаки). Останнім часом, в провідних країнах у сфері авіації, активно розробляються безпілотні авіаційні системи (БАС), які призначені для заміни пілотованих бойових літальних апаратів. Ці системи часто називаються безпілотними бойовими літальними апаратами (БПБЛА).

Проте, враховуючи спосіб інформаційної взаємодії між літальним апаратом та оператором, ці апарати можуть бути віднесені до категорії дистанційно пілотованих літальних апаратів (ДПЛА). ДПЛА є безпілотними літальними апаратами, які в основному працюють в автономному режимі, з епізодичним втручанням оператора для зміни налаштувань або перепрограмування системи управління.

Наявність розумного штучного інтелекту у ДПЛА дозволяє їм не тільки виконувати політ, але й самостійно приймати рішення щодо застосування зброї. Це відрізняє їх від наступного покоління БАС і визначає їх як окрему категорію дистанційно керованих авіаційних систем.

Авіаційна система, яка керується дистанційно, є перспективною формою безпілотного літального апарату, який має властивості та можливості, що найбільш наближаються до пілотованого літального апарату з аналогічним призначенням. Цей літальний апарат керується зі спеціального пункту управління, який може бути розташований на землі або у повітрі, і може бути стаціонарним або мобільним. Він працює у дискретно-імпульсному режимі і виконує задані бойові завдання відповідно до своїх власних алгоритмів функціонування, інформаційних та силових впливів зовнішнього середовища та команд, які надходять з пункту управління.

Наукові аналітики зарубіжних військових сил використовують сучасні методи функціональної класифікації, які базуються на основній відмінності між

						<i>ДП. ДС91.08. 000. ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			<i>11</i>

бойовими безпілотними літальними апаратами і БПЛА забезпеченням (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Функціональна класифікація БПЛА

БПЛА включають спеціалізовані ударні БПЛА, які можуть бути використані як багаторазові, так і одноразові засоби удару.

При розробці бойових ударних БПЛА особлива увага приділяється спеціалізованим багаторазовим ударним апаратам, які мають тактико-технічні характеристики, що наближаються до сучасних тактичних винищувачів. У початковому етапі будь-якого регіонального конфлікту, коли система протиповітряної оборони противника ще є ефективною, ударні БПЛАUCAV (Unmanned Combat Vehicle) здатні грати важливу роль у придушенні противника, зокрема в знищенні радіолокаційних станцій та пунктів управління. Ці апарати входять до першого ешелону повітряного удару і використовуються перед крилатими ракетами та бойовими літаками.

До характерних представників спеціалізованих ударних систем БПЛА багаторазового використання відносяться: RQ-1A "Predator" і "Predator-B" (фірма "General Atomic Aeronautical Systems Inc", США), RQ-3 Dark Star ("Boeing, Lockheed Martin", США),UCAV-N ("Northrop-Grumman", США),UCAR і "BlackUCAV" ("Lockheed-Martin", США),UCAV (європейська корпорація "ЕАДС"), ASN-206 (Xian ASN Technology Group Company, Китай), "Grand Duck" ("Dasso", Франція) і деякі інші [2].

						ДП. ДС91.08. 000. ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата			12

Хоча вартість багатьох існуючих бойових БПЛА є досить високою, велика частина з них призначена для багаторазового використання, що означає необхідність повернення БПЛА після виконання місії. За розрахунками, спеціалізовані ударні БПЛА можуть відповідати критерію "вартість-ефективність", якщо вони здатні здійснити від 5 до 9 бойових вильотів.

У сучасних тенденціях також існує і розвивається клас безпілотних літальних апаратів БПЛА, для яких не виникає питання про повернення після виконання місії. Цими апаратами є ударні БПЛА одноразового застосування, які призначені для ураження не лише радіовипромінюючих цілей противника, але й інших типів наземних цілей, включаючи мобільні. Такі БПЛА виконують завдання за схемою "камікадзе", коли літальний апарат направляється на ціль і здійснює підрив з використанням бойової частини, що він має на борту.

Представниками ударних БПЛА одноразового застосування є: "Harpy" (Israeli Aircraft Industries – IAI, Ізраїль), CUTLASS (IAI, Ізраїль, і "Рейтеон", США), "Ferret", ("Northrop-Grumman", США), LEWK ("Advanced Technologies", США), "Typhoon" ("СТН-атлас", Німеччина).

БПЛА можуть бути класифіковані як розвідувальні, цільові та транспортні платформи. Цільові та транспортні платформи, фактично, є наступниками розвідувальних БПЛА. Фахівці виокремлюють основні наявні та перспективні завдання для БПЛА (рис. 1.3).

Сучасні стратегічні розвідувальні БПЛА висотного і середньовисотного класу в багатьох аспектах відрізняються від БПЛА першого покоління. Перш за все, вони мають значно меншу злітну масу (в 3-10 разів менше), при цьому забезпечуючи значно більшу тривалість польоту, яка вимірюється не годинами, а навіть цілодобово. Ці характеристики стали можливими завдяки використанню останніх досягнень в дозвуковій аеродинаміці, технології виготовлення легких композитних конструкцій і використанню високоефективних двигунів.

У військових фахівців, які порівнюють висотні стратегічні розвідувальні БПЛА з апаратами, що діють на середніх висотах, виникає думка, що,

									Анк
									13
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				

незважаючи на вищу ціну, висотні апарати мають низку переваг. Ці переваги включають:

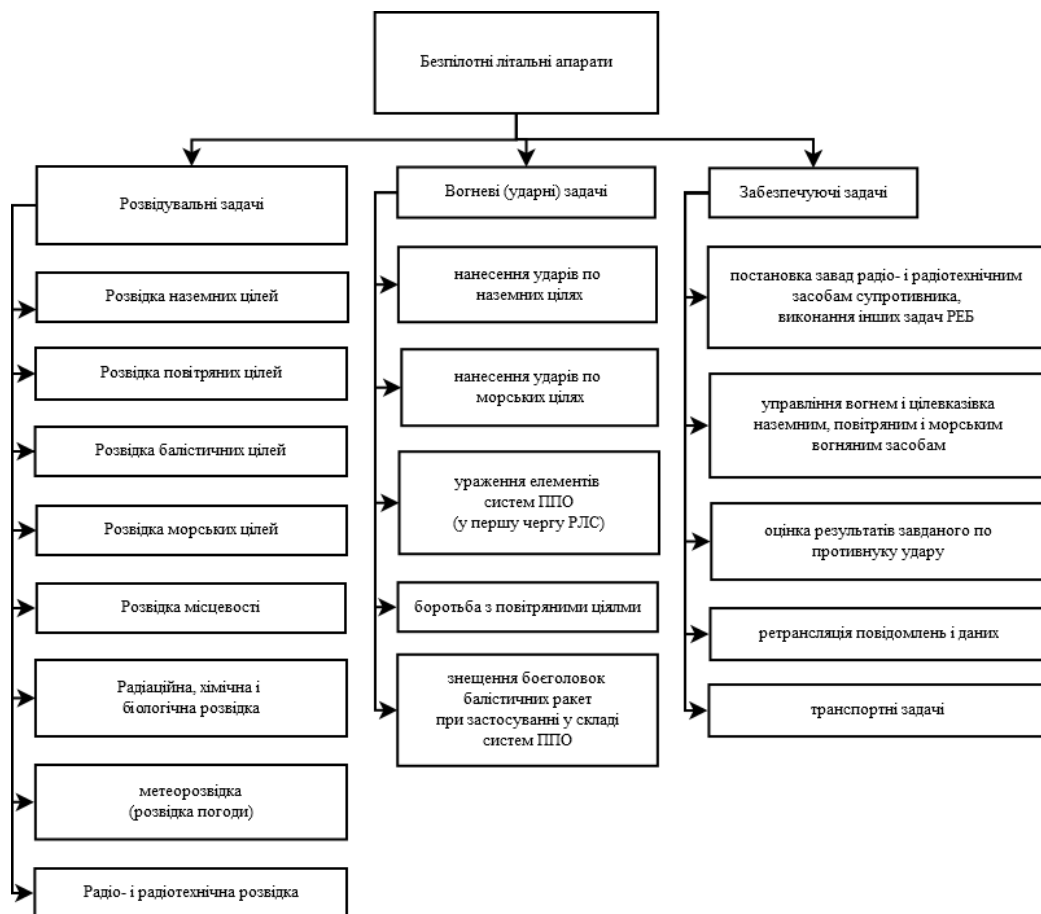


Рис. 1.3. Класифікація БПЛА за призначенням

- велику дальність прямої видимості, що дозволяє розвідувальній апаратурі і засобам зв'язку працювати в широкому діапазоні;
- меншу ймовірність льотних пригод, оскільки вони виконуються над зонами поганої погоди і над областями, виділеними для польотів інших літальних апаратів;
- зменшену кількість зльотів і посадок, коли статистично більшість аварій БПЛА відбуваються.

До числа існуючих стратегічних розвідувальних БПЛА відносяться висотні RQ-4A "Global Hawk" і "Sensor Craft" (обидва – США), французький "Fregat", шведський "Gladan". У категорію середньовисотних входять RQ-1A

"Предатор", А-160 "Хаммінгберд" (США), європейський "Ігл-1", ізраїльський "Hermes 450"[3].

Завданням тактичних розвідувальних БПЛА є забезпечення розвідувальною інформацією частин і з'єднань сухопутних військ, починаючи від корпусної ланки і нижче, а також частин і з'єднань військово-морських сил. У деяких країнах тактичні розвідувальні БПЛА також використовуються в інтересах військово-повітряних сил. Практично у всіх індустріально розвинених зарубіжних країнах проводиться модернізація наявних та розробка нових зразків тактичних розвідувальних БПЛА.

У США розробка розвідувальних БПЛА зосереджена на підтримці сухопутних військ, ВМС та корпусу морської піхоти. Крім класичної розвідки, ці БПЛА також використовуються для картографування бойового театру та виявлення мінних полів. Для флоту та морської піхоти розробляються вертикальні зльотно-посадкові БПЛА.

У європейських країнах, після повітряної війни в Югославії, спостерігається зростання зацікавленості використанням БПЛА та проведенням робіт з їх вдосконалення. Великобританія, Франція та Німеччина, які залучали БПЛА до дій в Югославії, виявили обмежені можливості наявних систем розвідки в реальному часі.

До числа існуючих тактичних розвідувальних БПЛА відносяться: "E-Hunter" (IAI, Ізраїль), "Darter" ("Silver Arrow", Ізраїль), RQ-2 Pioneer і RQ-5 Hunter (TRW Inc, Avionics and Surveillance Group і ізраїльською фірмою IAI), RQ-6 Outrider (Alliant Techsystems, США)[3].

Також існує класифікація БПЛА залежно від організаційних ознак, яка може бути представлена на рис. 1.4. Цей перелік ознак не лише вказує на унікальні можливості гнучкого використання БПЛА, але також вимагає наявності комплексної системи.

					<i>ДП. ДС91.08. 000. ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		15

Керування: Безпілотні літальні апарати можуть керуватися віддалено з допомогою пульта керування або відповідної програми на смартфоні або комп'ютері. Деякі дрони також можуть мати системи автоматичного пілоту, які дозволяють апаратам самостійно виконувати польотні задачі на основі попередньо заданої програми, встановлених параметрів або режимів роботи.

Переносність та мобільність: Багато сучасних дронів мають компактний дизайн, що робить їх переносними та мобільними. Вони можуть бути легко транспортовані з місця на місце, що робить їх зручними для різних застосувань, таких як відеозйомка, фотографія, дослідження територій або надання допомоги в рятувальних операціях.

Камери та сенсори: Багато безпілотних літальних апаратів оснащені високоякісними камерами та різними типами сенсорів, такими як GPS, гіроскопи, акселерометри, датчики відстані та інші. Це дозволяє їм здійснювати різноманітні завдання, такі як зйомка відео та фотографій з повітря, визначення місцезнаходження, автоматичне уникнення перешкод, виконання точних маневрів та інші.

Технічні можливості: Сучасні безпілотні літальні апарати можуть мати ряд різних технічних можливостей, таких як висока швидкість польоту, довгий час польоту, можливість виконання акробатичних маневрів, використання тепловізорів, лазерних сканерів та інших передових технологій, що розширюють їх функціональність та ефективність.

Сучасні безпілотні літальні апарати володіють високою точністю і надійністю роботи, мають широкі можливості застосування і оснащені найсучаснішими датчиками та інструментами [4].

1.3. Стандартизація вимог до систем передачі зображень для БПЛА

Основні вимоги швидкості передачі даних від бортових сенсорів БПЛА сформульовані в стандарті НАТО STANAG 4609 Edition 2 та у другій редакції "Посібники по реалізації" цього стандарту AEDP-8 [5]. Мета стандарту -

									Анк
									17
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				

підвищення здатності до взаємодії між системами контролю та управління (С³І) НАТО у питаннях обміну цифровими мультимедійними зображеннями (телевізійними, радіолокаційними тощо), у тому числі формованими на борту БПЛА. При цьому мається на увазі, що припинено розвиток аналогових засобів передачі даних. STANAG 4609 базується на комерційних цифрових стандартах, що дозволяє використовувати для запису та передачі цифрових образів комерційне обладнання. Крім цього, стандарт STANAG 4609 дозволяє розробникам системи гнучко налаштовувати метадані, що використовуються для супроводу відеоінформації військового призначення. Він не встановлює фізичні інтерфейси для з'єднання різних систем або їх конфігурацію, що дає розробникам максимальну свободу у виборі технологій та реалізації.

Назва стандарту STANAG 4609, "Digital Motion Imagery", можна інтерпретувати як "цифрові рухомі зображення". Термін "Motion Imagery" означає зовнішній вигляд або подання сцени, яка може містити об'єкти або процеси діяльності, які розташовані на ній або протікають на її тлі. Це поняття ширше, ніж просто "відеодані" і враховує рух і динаміку, що присутні у відеоінформації[3].

Основні вимоги до каналів передачі даних залежать від якості мультимедійної інформації, яка включає в себе такі параметри, як роздільна здатність та форма пікселів, колірність, кількість пікселів у кадрі, частота кадрів, формат кадру (співвідношення сторін), ступінь стиснення зображення, ймовірність появи помилкових пікселів у кадрі, тип зображень і їх вміст. Вимагається збереження цих характеристик при передачі даних по каналу. Звичайно, для зниження необхідної швидкості передачі даних у режимі повітряної розвідки може використовуватися і покадрова передача фотографій замість потокового відео, проте необхідна додаткова ідентифікація цілей, що особливо рухаються або маневрують. Сказане відноситься не тільки до телевізійних, а й до радіолокаційних зображень. Крім того, завдання ідентифікації ускладнюється коливаннями платформи БПЛА. Перехід до відеоданих дозволяє спростити ідентифікацію цілей, що рухаються, тому

						<i>ДП. ДС91.08. 000. ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			<i>18</i>

передача цифрових відеопотоків стала стандартною вимогою до бортових сенсорів сучасних БПЛА.

Спільноти користувачів НАТО виконують різноманітні місії, які потребують різних систем формування рухомих зображень. Доступні користувачам смуги пропускання також різняться у межах. Тому стандарт STANAG 4609 класифікує всю сукупність МІ за рівнем складності. Для цього в "Посібник з реалізації" AEDP-8 введено матрицю системи рухомих просторово-тимчасових образів (MISM), що дозволяє віднести ту чи іншу систему МІ до певного рівня складності (MISM-Level). Матриця MISM (EG 0220) має шість загальних категорій, що охоплюють 15 рівнів МІ (MISM-L0 - MISM-L14)[3].

Окремі вузли системи в межах ланцюга обробки зображень можуть функціонувати на різних рівнях MISM-L, причому повна специфікація системи визначається вузлом найнижчого з використовуваних рівнів MISM. У загальному випадку, чим нижчий рівень у матриці, тим нижча якість зображень, проте цього так однозначно не можна сказати про вимоги до пропускної спроможності. Країни НАТО можуть застосовувати системи будь-якого рівня MISM, але здатність до взаємодії не гарантується для зображень, рівень складності яких перевищує MISM-L10.

На сьогоднішній день стандартизація вимог до систем передачі зображень для безпілотних літальних апаратів є важливим кроком у розвитку та застосуванні цих технологій, оскільки це дозволяє забезпечити взаємну сумісність та співпрацю між різними моделями БПЛА та системами передачі зображень, що забезпечує більш ефективну та безпечну роботу.

1.4. Вимоги до форматів відеозображень та до каналів їх передачі

Керівництво AEDP-8 докладно класифікує зображення за рівнями MISM, вказуючи вимоги щодо пропускної можливості ліній зв'язку для неспотвореної передачі цифрового відео (телевізійного чи радіолокаційного). Як найбільш економічний варіант модернізації аналогових відеосистем фахівці розглядають

									Анк
									19
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				

перехід до цифрового відео підвищеної чіткості з прогресивною розгорткою та форматом зображення 720×480×60p (480p) або 720×576×50p (576p). Однак системи 576p та 480p не використовують квадратні пікселі, що призводить до різної роздільної здатності в горизонтальній та вертикальній площинах. Це не завжди прийнятно для військових систем і до того ж не дозволяє ефективно використовувати дисплеї формату 16:9, яким найближчим часом пророкують роль стандарту в додатках мультимедіа. Тому формати відеоданих підвищеної чіткості 576p і 480p можна розглядати лише для обмеженого класу відеосистем, сфера застосування яких не вимагає високого просторового або тимчасового дозволу та не потребує засобів відображення формату 16:9. Всі інші існуючі та заплановані до розробці протягом найближчих 5–10 років відеосистеми військового призначення в країнах НАТО, у тому числі для БПЛА переводяться на стандарт відео високої чіткості (HD) SMPTE 296M-2001 з прогресивною розгорткою та форматом зображення 1280×720×(50p) 60p. У STANAG 4609 зазначено також, що надалі, в міру вдосконалення технологій, очікується початок масового переходу на бойові відеозасоби формату 1920×1080×50p (60p), і лише в додатках типу тренажерних засобів, що не вимагають високої тимчасової роздільної здатності, натомість можуть обмежено використовуватися MI формату Full HD 1920×1080×24p/25p/30p[3].

Орієнтована на перспективні відеозасоби максимальна за складністю категорія MI EG 0220a охоплює "просунуте" відео високої чіткості (Advanced HD) з роздільною здатністю не менше 1920×1080 пікселів та кадровою частотою 48–120 Гц. Глибина пікселів (розрядність вистави) у своїй становить 8, 10 чи 12 біт (понад 12 біт для MISM-L14). При цьому найвищий рівень складності MISM-L14 відведено сукупності форматів стисненого відео (наприклад, стандарту RAW): 1920×1080×60p (50p) із співвідношенням сторін 16:9; 2048×1080×48p із співвідношенням сторін кадру 1,896; 1998×1080×48p (кінематографічний стандарт США 16,65:9 = 1,85 для 35-мм широкоекранного фільму); 2048×858×48p із співвідношенням сторін кадру 2,39 та ін. Для передачі стиснутого відеопотоку MISM-L14 потрібна пропускна здатність 3-4

					<i>ДП. ДС91.08. 000. ПЗ</i>	Анк
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата		20

Гбіт/с, доступна, наприклад, в оптоволоконному транспортному середовищі систем із синхронною цифровою ієрархією SONET рівня OC-96. Тим не менш, STANAG 4609 вказує, що рівень MISM-L14 охоплює системи формування, обробки, управління, зберігання, архівування та розповсюдження МІ, призначені для вирішення завдань збору даних, розвідки та спостереження за полем бою. Зазначимо, що передбачена у цій категорії частота кадрів 120 Гц – це щось абсолютно зайве. Наприклад, при наведенні засобів ураження на маневруючі цілі з борту ударного БПЛА з урахуванням його просторових еволюцій зазвичай потрібно до 30 команд керування за секунду. Бо для видачі кожної команди управління необхідно обробити, як правило, не менше чотирьох кадрів зображення мети, легко отримати потрібну швидкість потоку 120 кадрів за секунду. Два інших рівня категорії EG 0220a описують потоки, аналогічні MISM-L14, але у помірно стисненому (MISM-L13) і сильно стислим (MISM-L12) форматах. Вони призначені для обробки та транспортування сигналів просунутого HD-відео. Детальні характеристики рівнів MISM-L12 та MISM-L13 уточнюватимуться надалі[3].

SM-L13 уточнюватимуться надалі. У категорії EG 0220b глибина пікселів зображення високої чіткості обмежена 10 бітами. Нестиснений відеопотік HD-відео рівня MISM-L11 охоплює формати з прогресивною розгорткою та співвідношенням сторін кадру 16:9, їх дозвіл – 1920×1080×30р (25р, 24р) та 1280×720×60р (50р, 30р, 25р, 24р). Номінальна пропускна здатність каналу зв'язку передачі таких відеопотоків – 1,485 Гбіт/с. До появи радіоканалів з такою пропускною спроможністю цей рівень складності допустимо лише на початкових стадіях обробки сигналів, що надходять безпосередньо з ПЗЗ-матриць відеосенсорів, або у лазерних каналах супутникового зв'язку, що проектується для стратосферних БПЛА. Рівень MISM-L10, залежно від ступеня стиснення зображень, розбитий на два підрівні. Саме верхній з них, MISM-L10M, є граничним для гарантованої сумісності обладнання країн НАТО. Він передбачає використання 8-бітних пікселів з максимальною роздільною здатністю зображення 1920×1080×60р та середнім ступенем його

									Арк
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	<i>ДП. ДС91.08. 000. ПЗ</i>				21

Мінімальні вимоги до пропускної спроможності визначаються рівнем 32 Кбіт/с (MISM-L1.0H) та відповідають архаїчним за якістю МІ з максимальною роздільною здатністю 176×144р, частотою зміни кадрів 12–15 Гц та ступенем стиснення 5200:1. Нарешті, найнижчий рівень складності MISM-L0, як не дивно, знову повертається до дозволу 1920×1080 і 12-розрядному поданню пікселів. При цьому за рахунок стиснення 10:1 та швидкості оновлення зображень всього один або два кадри в секунду потрібна пропускна спроможність обмежується 56-512 Кбіт/с.

Вимоги до форматів відеозображень та до каналів їх передачі є важливою складовою стандартизації систем передачі зображень для безпілотних літальних апаратів, оскільки це забезпечує сумісність та ефективну передачу відеоданих на різних етапах використання БПЛА, зокрема, збору, обробки, передачі та архівування інформації.

1.5. Стандарти НАТО для передачі даних

Документ AEDP-8 описує вимоги до форматів зображень та каналів передачі даних, а також пов'язані з МІ метадані, що супроводжують будь-який інформаційний потік з борту БПЛА. Проте власне формат передачі потоків даних з борту БПЛА регламентовано стандартом STANAG 7023 та керівництвом AEDP-9 [6]. Без цих нормативних документів неможливо суворо оцінити фактичні вимоги до пропускної спроможності каналів зв'язку з БПЛА, оскільки передача власне зображень має супроводжуватися обов'язковою службовою інформацією, що відволікає на себе частину транспортного ресурсу радіолінії.

Стандарт STANAG 7023 визначає два типи даних: сенсорні та допоміжні. Сенсорні дані є інформацією, що надходить від сенсорів, які збирають відеозображення, таких як радари з синтезованою апертурою, інфрачервоні та телевізійні фотокамери, та інші подібні пристрої. Допоміжні дані використовуються для підтримки та допомоги в обробці та аналізі сенсорних даних. Стандарт передбачає передачу цифрової інформації максимум із 64

						<i>ДП. ДС91.08. 000. ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Анк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			23

бортових сенсорів, що формують зображення. Під час передачі відеопотоків використовуються допоміжні дані, які містять інформацію про формат відеоданих, алгоритми їх обробки та іншу важливу інформацію. Крім того, можуть бути передані дані, які збираються іншими бортовими датчиками, такими як навігаційне обладнання, системи керування та системи керування відеосенсорами, навігаційно-пілотажний комплекс та інші. Ці дані допомагають у забезпеченні правильної обробки та інтеграції відеоданих для виконання потрібних функцій та завдань. Усього на борту може бути 256 різних джерел даних. Усі дані (сенсорні та допоміжні) передаються у вигляді окремих файлів. Кожен файл має свій унікальний заголовок, що містить адресу джерела (1 байт, 256 різних адрес) та адресу одержувача (4 байти). Ці 5 байт, насправді, визначають 240 різних типів файлів. У разі сенсорних даних формат файлів визначається в пов'язаних із ними файлах допоміжних даних. Усі дані передаються радіолінією пакетами. Структура пакета включає деякі обов'язкові компоненти, такі як синхронізуюча послідовність (10 байт), заголовок (32 байти) і основний файл даних (до 4 Гбайт). Для забезпечення цілісності даних, заголовок та, за бажанням, файл даних захищаються контрольною сумою CRC. Заголовок пакета містить інформацію про довжину файлу даних, адресу відправника та адресу отримувача. Крім того, в ньому можуть бути визначені додаткові параметри, такі як наявність контрольної суми CRC для файлу даних. Адреса відправника однозначно вказує на тип даних, які передаються, такі як дані про місію, дані про ціль, телеметрія платформи, параметри сенсорів, дані від сенсорів та інші. У випадку, якщо отримувач не зміг отримати або правильно декодувати пакет, він може запросити повторну відправку з тим самим заголовком, щоб забезпечити доставку даних.

Пакети, що містять дані, групуються в сегменти, а сегменти, у свою чергу, об'єднуються в записи (Records). У сегментах пакети розташовані безпосередньо один за одним, без використання будь-яких роздільників. Крім пакетів даних, сегменти можуть містити преамбули, постамбули та маркери кінця сегментів. Кожен окремий сегмент, як правило, пов'язаний з активністю

						<i>ДП. ДС91.08. 000. ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адж.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			24

конкретних груп сенсорів протягом місії, і зазвичай в сегменті працює щонайменше один сенсор. Послідовність сегментів утворює запис в рамках термінології стандарту STANAG 7023. Запис - це послідовність сегментів, яка відповідає виконанню конкретної місії. Хоча стандарт допускає наявність декількох записів, у четвертій редакції стандарту описується робота лише з одним записом. Структура запису включає преамбулу та набір сегментів, розділених кінцевими маркерами (постамбулами). Запис завершується маркером, що позначає кінець запису. Перший сегмент у записі, так званий нульовий сегмент, завжди є преамбулою.

Преамбула – це набір допоміжних даних, попередніх першому інформаційному сегменту та що дозволяють наземній станції обробити наступний потік інформаційних пакетів. Наприклад, у преамбулі може міститися інформація про мету, деталі місії, режим роботи сенсорів (тип, формат, спосіб кодування тощо). Зазвичай, преамбула розміщується перед початком виконання завдання або місії.

Постамбула представляє собою набір додаткових файлів, які розташовані після сегмента даних. Вона може містити повторення преамбули, індексовані файли з даними про інтервали роботи сенсорів, таблиці подій, навігаційну інформацію та інше. Наявність постамбули в сегменті не є обов'язковою. Дані, які містяться у постамбулі, мають за мету надати інформацію про положення та тип цілей, режими роботи сенсорів та інші додаткові відомості. Ця інформація доповнює передній потік відео (сенсорні дані), що передається.

Загальний аналіз структури пакетів даних, які використовуються для зв'язку з беспілотними літальними апаратами (БПЛА) через радіолінії НАТО, дозволяє зробити висновок, що присутність допоміжних метаданих майже не впливає на пропускну здатність радіолінії під час передачі високо- або підвищеної чіткості зображень кадр за кадром. Завдяки наявності накопичувачів інформації на борту БПЛА з великою ємністю (понад 4 Гбайт), можна повністю використовувати ресурси стандартного формату запису, що допомагає мінімізувати витрати на передачу службової інформації. Проте,

						<i>ДП. ДС91.08. 000. ПЗ</i>	<i>Алк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			25

важливо знайти компроміс між кількістю та тривалістю сегментів у записах, а також знизити ризик спотворення інформації під час передачі через вплив активних перешкод. Очевидно, що параметри структурних елементів запису можуть адаптивно змінюватися в залежності від перешкодової обстановки. Застосування стандарту STANAG 7023, як зазначено у цьому документі, вимагає використання інших телекомунікаційних стандартів НАТО, які описують формати та протоколи передачі даних.

Серед відкритих стандартів НАТО, які регламентують передачу даних з безпілотних авіаційних платформ, вкажемо стандарт STANAG 4607/AEDP-7 [7]. У ньому визначено зміст і формат даних, що одержуються з радарів виявлення рухомих цілей на тлі земної поверхні (GMTI - Ground Moving Target Indicator). Залежно від пропускну здатності доступних каналів зв'язку, формат GMTI, описаний у стандарті, надає можливість передавати інформацію про рухаючіся цілі, а також супутні радіолокаційні зображення з високою роздільною здатністю. Дані передаються у вигляді пакетів розміром 65535 байт, що дозволяє передавати інформацію про 80 позначок цілей та їх траєкторії з високою деталізацією відносно відстані. У звичайному режимі передачі, цей розмір пакету дозволяє передавати інформацію про 4300 цілей та їх траєкторії.

Вимоги до зв'язку з безпілотними літальними апаратами (БПЛА), які є сумісними з тактичними засобами Common Data Link (CDL)/Tactical Common Data Link (TCDL), визначені у закритому стандарті НАТО STANAG 7085. Для високо захищеного каналу обміну даними для БПЛА IC2 DL (Interoperable Command and Control Data Link) використовується стандарт STANAG 4660. Цей стандарт регулює всі аспекти передачі оперативних даних (телеметрії) з БПЛА на землю (downlink) і команд управління платформою та обладнанням з землі на БПЛА (uplink). У стандарті описані такі параметри, як частоти, ширина смуги сигналів, відстань між пунктами передачі-прийому інформації, швидкість передачі даних та інші специфічні характеристики. Проект стандарту наразі знаходиться на стадії завершення, але деякі питання ще потребують узгодження і доопрацювання. Багато з цих питань пов'язані з проблемою обмеженого

									Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>ДП. ДС91.08. 000. ПЗ</i>				26

доступу до частотного ресурсу. Ускладнення ситуації спричиняє очікуване впровадження в найближчі роки великої кількості нових типів БПЛА, які мають датчики з високою роздільною здатністю. Це призводить до зростання вимог до ширини смуги частот та швидкості передачі даних.

Ключовим документом для країн Альянсу у забезпеченні сумісності БПЛА та наземних пунктів управління (Ground Control Station) став стандарт STANAG 4586[3], прийнято вже в другій редакції та формулює вимоги до форматів даних та протоколів обміну, визначаючи один із п'яти можливих рівнів сумісності літального апарату та пункту управління. Величезний позитивний ефект від цього стандарту – відсутність необхідності розробляти окремі пункти управління кожному за типу БПЛА. Розв'язання цих завдань досягається шляхом впровадження спеціальних модулів підтримки конкретних типів літальних апаратів (Vehicle Specific Module - VSM) у комплект апаратури наземної станції. Це забезпечує сумісність системи та позитивно впливає на підвищення конкурентоспроможності в галузі обладнання, сумісного зі стандартом STANAG, а також знижує витрати на розробку. У 2008 році була завершена робота над третьою редакцією стандарту STANAG 4586, яка знаходиться на етапі ратифікації. Основні покращення в STANAG 4586 включають уточнення (звуження) смуги частот та використання нових технологічних досягнень у сфері інтерфейсів для обміну даними.

При обговоренні методів радіозв'язку з БПЛА, особливо в контексті тактичних БПЛА зі значним радіусом дії декілька десятків кілометрів, фахівці зарубіжних країн рекомендують використовувати прямі радіорелейні зв'язки у дециметровому діапазоні хвиль. В цьому випадку центр управління БПЛА використовує середньонаправлені антени, спрямовані на БПЛА. Для стратегічного зв'язку з БПЛА без прямої видимості можна розглянути використання супутникових зв'язків. Одним із варіантів є організація зв'язку на основі ретрансляторів, встановлених на БПЛА, а також використання іоносферного поширення радіохвиль. Однак, вибір антенних пристроїв для діапазону декаметрових хвиль на БПЛА може бути викликом. Тим не менше,

									Анк
									27
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				

цей варіант варто розглядати, оскільки дальність іоносферного зв'язку може досягати сотень кілометрів.

Узагальнюючи вищезазначене, розробка радіоліній зв'язку для БПЛА повинна ґрунтуватися на вимогах існуючих стандартів НАТО, які відображають найкращий світовий досвід в цій галузі. Щодо формування відеозображень на борту БПЛА, рекомендується використовувати високороздільні відеокамери з прогресивною розгорткою та квадратними пікселями. Найкращим варіантом є камери з роздільною здатністю Full HD 1920×1080×(50p) 60p або 1920×1080×(24p) 30p. Щоб зменшити вимоги до пропускної здатності радіоліній, відеоінформацію слід стискувати, а при виборі якості зображень слід керуватися рівнями MISM-L10M - MISM-L9H, визначеними у стандарті STANAG 4609. Таким чином, для передачі відеопотоків з роздільною здатністю 1920×1080×(24p) 30p потрібна мінімальна пропускна здатність 20 Мбіт/с з одного джерела сигналу.

Як більш простий варіант, можна розглядати формат відео з роздільною здатністю 1280×720×(50p) 60p, що дозволяє при стисканні зображень (відповідно до рівня MISM-L9H) обійтися пропускною спроможністю 5 Мбіт/с. Щодо вимог до безпомилкової передачі даних, то для зображень 1920×1080 доцільно обмежити рівень спотворень даних величиною одного піксельного артефакту кадр. Це відповідає ймовірності помилки на рівні 10^{-7} – 10^{-6} .

Основна проблема при реалізації каналів зв'язку у БПЛА – обмеження частотного ресурсу у разі зростання вимог до швидкості передачі. Тому необхідні нові методи мінімізації потрібної смуги частот або спільного використання єдиної смуги різними БПЛА.

Стандарти НАТО для передачі даних мають на меті забезпечити взаємну сумісність та співпрацю між різними країнами-членами НАТО в галузі безпілотних літальних апаратів та їхніх систем передачі даних, що дозволяє покращити ефективність та безпеку використання БПЛА у військовій сфері.

									Анк
									28
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				

2. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ АПАРАТУРОЮ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

2.1. Технології стискання зображень та відеофайлів

У різних кодексах AVI реалізовано кілька основних технологій. Наприклад, Indeo 3.2 і Сінерак використовують векторну квантизацію[8]. Міжнародні стандарти, такі як MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4, H.261 та H.263, поєднують дискретне косинус-перетворення та компенсацію руху. Останнє покоління деяких кодеків базується на дискретному перетворенні елементарної хвилі (Discrete Wavelet Transform або DWT)[9]. Крім того, існують інші технології, включаючи алгоритм рекурсивного стиснення зображення, розроблений компанією Iterated Systems.

Стиснення без втрат передбачає, що декодоване зображення повністю збігається з початковим.

Стиснення з втратами, з свого боку, призводить до втрати частини інформації під час процесу стиснення. Цей тип стиснення базується на обмежених можливостях людського зору.

Стиснення з відсотковими втратами означає, що всі втрати інформації залишаються в межах, коли людське око не сприймає різницю між початковим зображенням та декомпресованим стисненим зображенням, яке містить помилки стиснення з втратами.

При стисненні з природними втратами, що використовується, наприклад, у форматах JPEG та MPEG для стиснення відео з втратами, зображення часто пошкоджується більше, ніж при стисненні з відсотковими втратами. Проте відео все ще залишається прийнятним для людського сприйняття. Якщо стиснення та декомпресія спричиняють пошкодження зображення, подібне до природних пошкоджень, то зір не реагує значно на це.

Втрата великої деталізації на зображенні часто вважається прийнятною, оскільки люди сприймають об'єкти в природному світі з різними рівнями

									Анк
									29
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				

деталізації, залежно від відстані та кута зору до об'єкта. Люди також звикли до природних перешкод, таких як дощ та туман. Людське око сприймає гострі границі та лінії на зображенні незалежно від рівня деталізації. Таким чином, людина сприймає об'єкти незважаючи на зміни рівня деталізації.

Стиснення з неприродними втратами проявляється у візуальних артефактах, які різко привертають увагу через досить низьку якість стиснення із втратами. Прикладом таких артефактів є блокові артефакти, які можна спостерігати у сильно стислому MPEG відео та інших декодерах, що використовують дискретне косинус-перетворення зображення.

У деякий момент алгоритм стиснення може викликати неприродні артефакти, які сприймаються як нові об'єкти у сцені. Людське око дуже чутливе до ліній та граней. Одна з основних його функцій полягає у розпізнаванні фізичних об'єктів, таких як інші люди або потенційні загрози. Об'єкти для людини мають границі. Тому дія алгоритму стиснення, який знищує або створює границі на зображенні, особливо помітна, коли людське око не сприймає це як межу об'єкта.

Усі широко використовувані відео кодеки є алгоритмами стиснення з втратами. При досить високому рівні стиснення виникають проблеми з відображенням граней. Алгоритми стиснення, засновані на векторній квантизації, дискретному косинус-перетворенні та перетворенні елементарної хвилі, працюють з растровим зображенням, де відсутнє поняття краю та лінії.

Послідовне кодування довжини (ПКД) є методом кодування, який часто використовується у різних кодеках для стиснення даних. Один з прикладів кодека, що використовує ПКД, це Microsoft RLE (MRLE).

ПКД також використовується для кодування коефіцієнтів DCT (дискретного косинус-перетворення) в блоках, які входять у реалізацію форматів, таких як MPEG, H.261, H.263 та JPEG.

Особливості ПКД включають наступне:

									Анк
									30
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				

Добре підходить для чорно-білих або 8-розрядних графічних зображень, таких як кадри анімації. Це означає, що він ефективний при кодуванні послідовностей пікселів одного кольору.

Не підходить для природних зображень з високою роздільною здатністю або 24-розрядних зображень. Природні зображення мають складну структуру та багато різноманітних кольорів, тому послідовності пікселів одного кольору в них практично відсутні, що знижує ефективність ПКД.

ПКД кодує послідовність пікселів однакового кольору як одиночне ключове слово. Наприклад, послідовність пікселів "77 77 77 77 77 77 77" може бути закодована як "7 77" (сім 77). Цей метод добре працює з двійковими зображеннями та 8-бітними образами, особливо з кадрами мультиплікації, де є значні послідовності однакового кольору.

Проте, ПКД майже не ефективний для 24-розрядних природних зображень, оскільки такі зображення мають велику кількість різноманітних кольорів, а послідовності пікселів одного кольору в них мало ймовірні.

Векторна квантизація є методом стиснення даних, який використовується в деяких кодексах, зокрема Indeo 3.2 та Сінерак. Ці кодекси працюють з YUV представленням кольору.

Основна ідея векторної квантизації полягає в тому, що зображення розділяється на блоки, наприклад, 4x4 пікселі для Indeo та Сінерак. Деякі блоки можуть бути схожими на інші блоки, хоча вони зазвичай не є ідентичними. Кодер ідентифікує класи схожих блоків і замінює їх на "універсальний" блок, який представляє цей клас. Для цього використовується пошукова таблиця коротких двійкових кодів, які відповідають "універсальним" блокам. Зазвичай найкоротші двійкові коди використовуються для найбільш загальних класів блоків у зображенні. При декодуванні векторної квантизації декодер використовує пошукову таблицю для відтворення наближеного зображення, складеного з "універсальних" блоків, відповідно до пошукової таблиці.

Однак, при векторній квантизації втрати стиснення неминучі, оскільки фактичні блоки замінюються на "універсальні", які є лише приближенням

									Анк
									31
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				

початкових блоків. Процес кодування є обчислювально інтенсивним та повільним, оскільки кодер повинен накопичувати статистику частоти блоків і формувати класи схожих блоків для пошукової таблиці. З іншого боку, процес декодування є швидким, оскільки він базується на заздалегідь створеній пошуковій таблиці.

Зменшення розміру пошукової таблиці дозволяє досягти більшого стиснення, але при цьому якість зображення погіршується, оскільки з'являються блокові артефакти. Таким чином, вибір оптимального розміру пошукової таблиці є компромісом між стисненням і якістю зображення.

Дискретне косинусне перетворення (ДКП) є широко використовуваним методом стиснення зображення та використовується в багатьох кодеках, таких як Editable MPEG, Motion JPEG, H.261, H.263, H.263+, MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4.

Процес ДКП включає застосування двовимірного перетворення до блоків пікселів розміром 8×8 . Ідея полягає в тому, що людське око менш чутливе до високочастотних компонент зображення, які представлені вищими коефіцієнтами ДКП. Тому більші коефіцієнти квантування застосовуються до цих вищих частотних компонент. У стандарті JPEG, наприклад, використовується стандартна матриця квантування, яка має вищі коефіцієнти квантування для вищочастотних коефіцієнтів ДКП.

Квантовані коефіцієнти ДКП потім кодуються у вигляді змінної довжини кодів, що вказують кількість нульових коефіцієнтів, за якими слідує ненульові коефіцієнти. Наприклад, код змінної довжини може вказувати на 4 нульових коефіцієнти, за якими слідує ненульовий коефіцієнт рівня 2. Короткі коди змінної довжини використовуються для загальних комбінацій послідовностей нулів і ненульових коефіцієнтів, а більш довгі коди змінної довжини використовуються для менш загальних комбінацій.

У результаті досягається значна компресія зображення. ДКП матриця розміром $N \times N$ містить рядки, які представляють функції косинуса. Ці рядки

										Анк
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ					32

використовуються для виконання перетворення над блоками пікселів зображення.

Однак, при високому стисканні зображення можуть виникати блокові артефакти, які проявляються в замазуванні гострих граней і випадковому розмитті. Крім того, ДКП вимагає значних обчислювальних потужностей для ефективної роботи. ДКП матриця $N \times N$, рядки якої – функції косинуса:

$$ДКП(m, n) = \sqrt{\frac{1 - \Delta(m, 1)}{N}} \cos \frac{\pi(n - 1/2)(m - 1)}{N},$$

де

$$\Delta(m, 1) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } m = 1 \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}.$$

Дискретне перетворення елементарної хвилі (DWT) є ще одним методом стиснення зображення і використовується в деяких кодексах, таких як VDO WAVE VDONET'S, Intel Indeo 5.x, VxTreme, Intel Indeo 4.x.

DWT відрізняється від ДКП тим, що більшість кодеків, які використовують DWT, здійснюють перетворення без блокових артефактів. Алгоритми стиснення, засновані на DWT, часто працюють швидше, ніж ДКП. Суб'єктивна якість відеозображень, стиснутих з використанням DWT, також може бути кращою, ніж у випадку ДКП при тому ж коефіцієнті стиснення.

Процес DWT полягає в проходженні сигналу через два фільтри - фільтр високих частот (ФВЧ) і фільтр низьких частот (ФНЧ). Сигнал спочатку розбивається на два однакових сигнали, а потім кожен з цих сигналів зменшується удвічі. Параметри фільтрів вибираються таким чином, щоб при складанні сигналів з ФНЧ і ФВЧ відтворювався початковий сигнал. Вихід ФВЧ або ФНЧ може бути поданий на інший парний набір фільтрів для повторного проходження.

Простим прикладом DWT є перетворення Хаара елементарної хвилі, де вхідний сигнал розбивається на дві половини, а потім виконується різниця і сума цих двох половин. При збільшенні стиснення зображення на гострих гранях можуть з'являтися артефакти, які розмивають і оточують границі об'єктів. Це спільна проблема із ДКП

									Анк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				33

Таким чином, DWT є іншим методом стиснення зображення, який має свої переваги та особливості порівняно з ДКП.

Хаар НПФ (середнє число двох послідовних вибірок):

$$G[n] = \frac{1}{2}(x[n] + x[n+1]).$$

Хаар ВПФ (відмінність двох послідовних вибірок):

$$H[n] = \frac{1}{2}(x[n+1] - x[n]).$$

Помітимо, що:

$$X[n] + g[n] - h[n],$$

$$X[n+1] = g[n] + h[n].$$

Для відтворення початкового вхідного сигналу $x[n]$ можна розкласти послідовності $g[n]$ та $h[n]$ на дві частини, виключивши парні або непарні члени. Це дозволяє зберегти необхідну інформацію, а при відтворенні все ще отримати початковий сигнал. Зазвичай опускаються непарні вибірки для цього процесу. Вхідний сигнал $x[n]$ може бути відтворений повністю за

$$g[0], g[2], g[4], \dots$$

$$h[0], h[2], h[4], \dots$$

$$X[0] = g[0] - h[0],$$

$$X[1] = g[0] + h[0]$$

$$X[2] = g[2] - h[2]$$

$$X[3] = g[2] + h[2]$$

і т.д.

Висновок фільтра з нижньою частотою (ФНЧ) надає грубе наближення початкового вхідного сигналу, що може призводити до зображення з низькою роздільною здатністю у випадку зображень. Зворотно, висновок фільтра з високою частотою (ФВЧ) додає додаткові деталі, особливо під час обробки зображень.

Грубе наближення часто називають основним рівнем, а додавання деталей - рівнем розширення. Вихідний сигнал фільтра ФВЧ $h[n]$ може бути введений в інший набір фільтрів для подальшої обробки.

									Анк
									34
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				

При стисненні відеозображень DWT може бути застосовано кілька разів. Алгоритм генерує ту саму кількість бітів, що і вхідний сигнал. Результати на виході називають коефіцієнтами перетворення.

Хоча перетворення Хаара елементарної хвилі використовується для ілюстративних цілей, насправді використовуються складніші фільтри для DWT.

Алгоритми, що базуються на DWT, показують кращі результати порівняно з ДКП і стають все більш популярними в останні часи.

2.2. Огляд методів стиснення цифрових зображень

Існує багато методів стиснення інформації, які використовуються для зменшення розміру даних, що передаються або зберігаються. Давайте розглянемо деякі з найбільш популярних методів стиснення інформації[10].

Безстисне кодування

Цей метод не зменшує розмір даних, а просто кодує їх таким чином, щоб вони можна було передати без помилок. Для цього використовуються різноманітні кодувальні алгоритми, наприклад, кодування Хаффмана, кодування арифметичне та інші. Цей метод дозволяє зберігати дані без втрат, але не дозволяє зменшити їх розмір.

Стиснення без втрат

Цей метод стиснення даних дозволяє зменшити їх розмір без втрати якості. Це досягається за допомогою різноманітних алгоритмів стиснення, наприклад, алгоритму Лемпеля-Зіва (LZ), алгоритму Рунлента (Run-length encoding, RLE) та інших. Завдяки цим алгоритмам можна стиснути дані, не втрачаючи інформацію.

Стиснення з втратою

					<i>ДП. ДС91.08. 000. ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		35

Цей метод стиснення даних дозволяє зменшити їх розмір за рахунок видалення некритичної інформації. Так, наприклад, при стисненні зображення втрачаються деталі, які людське око не може помітити. Цей метод є найбільш ефективним для стиснення великих об'ємів даних, але не дозволяє відновити початкові дані з 100% точністю.

Стиснення з використанням вейвлет-аналізу

Цей метод стиснення даних базується на використанні вейвлет-аналізу. Вейвлет-аналіз дозволяє розділити сигнал на декілька компонентів різних масштабів, що може бути використано для стиснення даних. Наприклад, при стисненні зображення можна відокремити компоненту, яка містить низькочастотну інформацію, що є основним зображення, та компоненти, що містять високочастотну інформацію, таку як деталі та текстури. Компонента з низькою частотою може бути збережена з високою точністю, тоді як компоненти з високою частотою можуть бути стиснуті з використанням методів стиснення без втрат, таких як алгоритм Хаффмана або алгоритм Лемпеля-Зіва. Цей метод стиснення даних є одним з найефективніших, оскільки він дозволяє зменшити розмір даних з високою точністю, зберігаючи важливу інформацію про об'єкт.

Стиснення з використанням нейронних мереж

Цей метод стиснення даних базується на використанні нейронних мереж. Нейронні мережі можуть навчитися розпізнавати і видаляти некритичну інформацію з даних, тим самим зменшуючи їх розмір. Наприклад, при стисненні зображень нейронна мережа може видаляти деталі, які не впливають на сприйняття зображення людським око. Цей метод є дуже ефективним, але вимагає багато обчислювальних ресурсів і великої кількості даних для навчання нейронної мережі.

Стиснення з використанням множинного квантування

					<i>ДП. ДС91.08. 000. ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		36

Цей метод стиснення даних базується на використанні множинного квантування. Квантування полягає у зведенні значень даних до дискретних значень, що можуть бути збережені з меншою точністю. При множинному квантуванні значення даних квантуються на декілька рівнів, що дозволяє зберегти значення даних з меншою кількістю бітів. Цей метод стиснення даних є простим у реалізації і може бути застосований для стиснення будь-яких типів даних. Однак, він не є найефективнішим і може призвести до втрати важливої інформації.

Порівняння алгоритмів стиснення наведено в табл. 2.1[11].

Таблиця 2.1

Характеристики алгоритмів стиснення

Алгоритм	Коефіцієнти стиснення	Симетричність за часом	На що орієнтований	Втрати	Розмірність
RLE	32, 2, 0.5	1	3,4-х бітні	Немає	1D
LZW	1000, 4, 5/7	1.2-3	1-8 бітні	Немає	1D
Хаффмана	8, 1.5, 1	1-1.5	8 бітними	Немає	1D
ССІТТ-3	213(3), 5, 0.25	~1	1-бітні	Немає	1D
JBIG	2-30 разів	~1	1-бітні	Немає	2D
Lossless JPEG	2 рази	~1	24-бітові, сірі	Немає	2D
JPEG	2-20 разів	~1	24-бітові, сірі	Є	2D
Вейвлет-перетворення	2-200 разів	1.5	24-бітові, сірі	Є	2D
Фрактальний	2-2000 разів	1000-10000	24-бітові, сірі	Є	2.5D

Симетричність за часом в характеристиках алгоритмів стиснення вказує на те, що час, необхідний для стиснення даних, є пропорційним до часу, необхідного для розпакування даних. Це означає, що час стиснення і розпакування даних є близькими або практично однаковими. У симетричних алгоритмах стиснення, таких як алгоритми стиснення без втрат, час, необхідний для стиснення даних, майже еквівалентний часу їх розпакування.

Симетричність за часом є важливою характеристикою для деяких застосувань, де швидкість розпакування даних є критично важливою. Наприклад, в реальному часі або в системах з обмеженими ресурсами, де швидкодія важлива, симетричні алгоритми стиснення можуть бути більш практичним варіантом, оскільки вони дозволяють ефективно використовувати час для стиснення та розпакування даних.

Коефіцієнт стиснення в характеристиках алгоритмів стиснення вказує на ступінь стиснення даних після застосування алгоритму стиснення. Він вимірює співвідношення між розміром стиснутих даних та розміром вихідних (нестиснутих) даних. Коефіцієнт стиснення є важливою метрикою для оцінки ефективності алгоритмів стиснення. Вищий коефіцієнт стиснення вказує на більш ефективний алгоритм, який забезпечує більш значне зменшення розміру даних. Звичайно, ефективність стиснення також повинна оцінюватися разом з швидкістю стиснення та розпакування даних та іншими факторами залежно від конкретних вимог та потреб застосування.

Загалом, кожен метод стиснення інформації має свої переваги та недоліки. Вибір методу стиснення залежить від типу даних, які потрібно стиснути, від розміру файлів та якості, яку можна допустити при стисненні.

2.3. Дискретне косинус перетворення (ДКП) для стиснення інформації

Часто треба виконати перетворення тільки в дійсній області, без використання комплексних змінних. У цьому випадку традиційним методом, який розділяє частотні характеристики сигналу є дискретне косинус перетворення (ДКП)[12]. Розглянемо пряме дискретне косинусне перетворення (ДКП) для $N = 8$, де N вибрано не випадково. У форматі JPEG зображення розбивається на квадрати розміром 8×8 , що призводить до використання саме такої кількості складових у дискретному косинусному перетворенні. Вираз для прямого ДКП має наступний вигляд:

										<i>ДП. ДС91.08. 000. ПЗ</i>	<i>Алк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>							<i>38</i>

$$F_v = \frac{1}{\sqrt{2}} C_v \sum_{i=0}^7 p_i \cos \frac{(2i+1)v\pi}{16},$$

$$C_i = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & i = 0; \\ 1, & i > 0. \end{cases}$$

Зворотне дискретне косинус перетворення:

$$p_i = \frac{1}{\sqrt{2}} C_i \sum_{v=0}^7 F_v \cos \frac{(2i+1)v\pi}{16}.$$

Крім дискретного косинусного перетворення (ДКП), існують інші тригонометричні перетворення, такі як дискретне синусне перетворення (ДСП) і перетворення Хартлі (ДПХ). Перетворення Хартлі назване на честь Р. Хартлі, який у 1942 році опублікував статтю про пару інтегральних перетворень - пряме і зворотне - з використанням функції $\text{cas}\theta = \sin\theta + \cos\theta$, яку він ввів. Протягом багатьох років ці результати були маловідомими, аж до початку 1980-х, коли Р. Брейсуелл привернув до них увагу дослідників і розробив теорію як для неперервного, так і для дискретного перетворення Хартлі.

Дискретне перетворення Хартлі (ДПХ) дійсної функції $f(\tau)$ та відповідне зворотне перетворення визначаються наступними співвідношеннями:

$$H(v) = \frac{1}{N} \sum_{\tau=0}^{N-1} f(\tau) \text{cas} \frac{2\pi v\tau}{N},$$

$$f(\tau) = \sum_{v=0}^{N-1} H(v) \text{cas} \frac{2\pi v\tau}{N},$$

де використовується позначення $\text{cas} \theta = \cos \theta + \sin \theta$, введене Хартлі.

Для доведення даного факту скористаємося властивістю ортогональності

$$\sum_{v=0}^{N-1} \text{cas} \frac{2\pi v\tau}{N} \text{cas} \frac{2\pi v\tau'}{N} = \begin{cases} N, & \tau = \tau'; \\ 0, & \tau \neq \tau'. \end{cases}$$

Підставляючи величину

$$\frac{1}{N} \sum_{\tau=0}^{N-1} f(\tau) \text{cas} \frac{2\pi v\tau}{N},$$

яка визначає перетворення $H(v)$, у вираз

									Анк
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				39

$$\sum_{v=0}^{N-1} H(v) \operatorname{cas} \frac{2\pi v \tau}{N},$$

отримаємо

$$\sum_{v=0}^{N-1} H(v) \operatorname{cas} \frac{2\pi v \tau}{N} = \sum_{v=0}^{N-1} \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} f(t) \operatorname{cas} \frac{2\pi v t}{N} \operatorname{cas} \frac{2\pi v \tau}{N} = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} f(t) \sum_{v=0}^{N-1} \operatorname{cas} \frac{2\pi v t}{N} \operatorname{cas} \frac{2\pi v \tau}{N} = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} f(t) \times \begin{cases} N, & \tau = t; \\ 0, & \tau \neq t \end{cases} = f(\tau),$$

що підтверджує справедливість зворотного перетворення. Дискретне перетворення Хартлі (ДПХ) використовує коефіцієнт N^{-1} , який взятий з практики використання дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). Це зроблено для забезпечення симетрії процедури ДПХ, аналогічно до ДПФ, де $F(0)$ відповідає постійній складовій функції $f(\tau)$. Крім того, ДПХ є дійсним перетворенням, оскільки функція $f(\tau)$ є дійсною. Порівнюючи ДКТ (дискретне косинусне перетворення), ДСТ (дискретне синусне перетворення) та ДПХ, можна відзначити, що синусне перетворення надає найгіршу якість результату, тоді як перетворення Хартлі показує найкращі результати.

2.4. Використання вейвлет Хаара для стиснення відеофайлів

Вейвлет Хаара - це один з найпоширеніших і найпростіших вейвлетів, які використовуються для стиснення відео та зображень.

Принцип вейвлет-стиснення полягає у розкладанні відео на набір невеликих вейвлет-коефіцієнтів, які представляють різні частоти та просторові компоненти. Потім ці коефіцієнти можуть бути представлені з меншою кількістю бітів, що призводить до стиснення відео без значної втрати якості.

Для стиснення відео за допомогою вейвлета Хаара виконуються такі кроки:

Розділення відео на кадри: Відео розбивається на послідовність окремих кадрів, які будуть оброблятися незалежно один від одного.

Перетворення кадрів: Кожен кадр відео піддається двовимірному дискретному вейвлет-перетворенню Хаара. Це перетворення розкладає кожен кадр на дві складові: наближену (low-frequency approximation) та деталізовану

						ДП. ДС91.08. 000. ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата			40

(high-frequency detail). Наближена складова містить низькочастотні компоненти зображення, а деталізована складова містить високочастотні компоненти.

Квантування коефіцієнтів: Деталізовані коефіцієнти, що представляють високочастотні деталі, можуть бути сильніше стиснуті, ніж наближені коефіцієнти, тому що людське око менш чутливе до високочастотних деталей. Застосовується квантування зменшення кількості біт, необхідних для кодування деталізованих коефіцієнтів.

Кодування та стиснення: Квантовані коефіцієнти кодуються за допомогою методів стиснення даних, таких як алгоритм Хаффмана або алгоритм арифметичного кодування. Ці методи дозволяють ефективно уявити коефіцієнти з меншою кількістю біт.

Декодування та відновлення: Кодовані коефіцієнти декодуються та відновлюються зворотним чином, включаючи зворотне вейвлет-перетворення, щоб отримати стислий відео-кадр.

Об'єднання кадрів: Відновлені кадри об'єднуються у відеопослідовність.

Вейвлет Хаара зазвичай використовується як базовий вейвлет у складніших алгоритмах стиснення відео, таких як стандарт стиснення відео MPEG-4. Цей вейвлет забезпечує гарне поєднання компресії та візуальної якості, особливо для зображень з низьким контрастом і деталями, що швидко змінюються.

Дискретне косинус-синус перетворення (DCT) та дискретне перетворення Хаара (DWT) є двома різними методами перетворення сигналів та даних. Основні відмінності між ними:

Принцип роботи: DCT та DWT засновані на різних математичних підходах. DCT використовує косинусні функції для подання сигналу, а DWT використовує вейвлети, такі як Хаара вейвлет.

Локальність: DWT більш локальний у порівнянні з DCT. Вейвлети поділяють сигнал на різні масштаби та частоти, дозволяючи більш локальне уявлення та аналіз різних частин сигналу. DCT, з іншого боку, не має такої локальності і не поділяє сигнал на різні масштаби.

									Арк
									41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				

Енергетична компактність: DWT має кращу енергетичну компактність порівняно з DCT. Вейвлети Хаара мають здатність добре стискати енергію сигналу в невеликій кількості коефіцієнтів, що робить їх ефективними для стиснення даних та зображень. DCT також забезпечує компактне уявлення сигналу, але не настільки ефективно, як DWT.

Використання в стисненні відео та зображень: Обидва перетворення широко використовуються в алгоритмах стиснення відео та зображень. DCT є основним компонентом стандартів стиснення, таких як JPEG та MPEG, та забезпечує гарну якість стиснення з незначною втратою інформації. DWT, включаючи вейвлет Хаара, також використовується в алгоритмах стиснення, таких як JPEG2000 та стандарті стиснення відео H.264, та забезпечує гарне поєднання компресії та візуальної якості.

Аналіз основних технологій стискання зображень та відеофайлів показав, що ефект зменшення розміру файлів можливо лише для технологій зі втратами. Серед них по мірі збільшення втрат та зменшення розміру файлу розрізняють методи стиснення з відсотковими втратами, з природними втратами, стиснення з неприродними втратами.

При досить високому рівні стиснення виникають проблеми із відображенням граней. Розглянуті методи - послідовного кодування довжини, векторної квантизації, дискретного косинуса - перетворення та перетворення елементарної хвилі не мають цих проблем. Найбільш перспективним серед них є перетворення Хаара.

Порівняння методів обробки як статичних зображень так і відео файлів показало переваги методу використання вейвлетів Хаара.

					<i>ДП. ДС91.08. 000. ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адж.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		42

3. ВИКОРИСТАННЯ ВЕЙВЛЕТ ПЕРЕТВОРЕНЬ ДЛЯ СТИСНЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ

3.1 Одновимірне перетворення Хаара

Дискретне вейвлет-перетворення (ДВП), також відоме як Discrete wavelet transform (DWT), - це метод представлення вейвлетів у вигляді дискретних сигналів (вибірок фрагментів). Вейвлет-перетворення Хаара є одним з простих і ефективних способів перетворення зображення до форми вейвлетів. Цей вид аналізу зображень має важливе значення у багатьох алгоритмах обробки сигналів і зображень, таких як стиснення зображень, фільтрація шуму, відновлення зображень та інше. Перетворення Хаара може бути застосоване як до одновимірних, так і до двовимірних сигналів. Його базовий принцип полягає у розкладі сигналу на пари півхвильових функцій, що дозволяє перетворити зображення на набір дискретних коефіцієнтів вейвлет-простору. Кожна пара півхвильових функцій на кожному рівні масштабування утворюється шляхом розбиття зображення на дві функції (вузьку і широку) залежно від їхньої ширини. Вузькі та широкі півхвильові функції подальшого розкладу рекурсивно розбиваються на нові пари функцій, створюючи наступний рівень масштабування. Цей процес створює структуру дерева розкладу зображення на вейвлет-коефіцієнти, які можуть бути використані для подальшої обробки. Завдяки своїй ефективності і простоті, перетворення Хаара залишається одним із найпопулярніших методів вейвлет-аналізу зображень.

Ефективність вейвлет перетворення Хаара залежить від розміру вхідного сигналу. Розмір вхідного сигналу повинен бути ступенем двійки, щоб можна було зручно використовувати рекурсивні формули. Якщо розмір вхідного сигналу не є ступенем двійки, то до сигналу додаються нулі, щоб довести його до найближчого більшого значення, яке є ступенем двійки. Алгоритм вейвлет-перетворення Хаара може бути реалізований з трудомісткістю $O(N \log N)$, де N - розмір вхідного сигналу. Виконання першого рівня дискретного вейвлет-

									Анк
									43
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				

перетворення Хаара вимагає $2N$ операцій (N операцій для обчислення коефіцієнтів $A1$ та N операцій для обчислення коефіцієнтів $D1$). Виконання наступних рівнів дискретного вейвлет-перетворення Хаара потребує додаткових $2N$ операцій на кожен рівень. Загальна трудомісткість вейвлет-перетворення Хаара залежить від кількості рівнів трансформації та розміру вхідного сигналу. Зазвичай для обчислення вейвлет-перетворення Хаара використовуються спеціалізовані бібліотеки, які забезпечують швидке виконання операцій.

Теорія дискретних вейвлет перетворень має свої коріння в роботі угорського математика Альберта Хаара, який розпочав свої дослідження у цьому напрямку на початку минулого століття. Основна ідея Хаара полягала у наступному: якщо вхідний сигнал має масив з 2^n чисел, то вейвлет перетворення Хаара групує ці числа попарно і обчислює суму і різницю кожної пари. Далі, суми групуються знову (якщо кількість сум парна), створюючи наступний рівень розкладання. В результаті отримується 2^{n-1} різниць і 1 загальна сума.

Метод дискретного вейвлет-перетворення є високоефективним засобом стиснення зображень, теоретично дозволяючи зменшити розмір зображення в 200 разів без втрати якості. Це вражаючий результат, особливо з урахуванням того, що зображення залишається високодеталізованим, зі збереженою контрастністю та зменшеною зашумленістю.

Вейвлет Хаара є одним з перших відомих ортогональних вейвлетів. Його деталізуюча функція відображається як послідовність прямокутних імпульсів, що меандрують. Значення цієї функції рівне 1 в інтервалі $[0, 0.5]$ і -1 в інтервалі $[0.5, 1]$. Апроксимуюча функція (зображена на рисунку 3.1) має значення 1 в інтервалі $[0, 1]$, а за його межами - значення 0. Вейвлети Хаара мають хорошу локалізацію в просторі, що означає, що вони добре концентруються навколо конкретних точок або інтервалів. Однак, вони не є дуже добре локалізованими в частотній області, оскільки меандр, що використовується у вейвлеті Хаара, має широкий спектр частот. Це означає, що вейвлет Хаара враховує широкий діапазон частот у своєму представленні, що теоретично є нескінченним.

						ДП. ДС91.08. 000. ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата			44

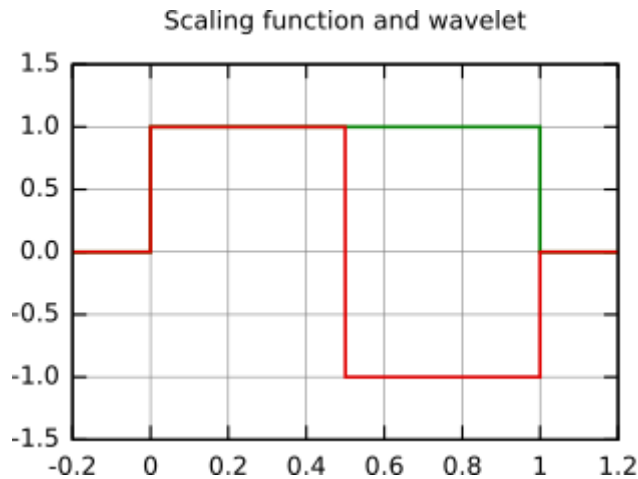


Рис. 3.1 Деталізуюча (червоний колір) і апроксимуюча (зелений колір) функції вейвлета Хаара

Перетворення Хаара в загальному вигляді для одновимірного сигналу (відліків) виглядає наступним чином. Нехай s є одновимірний дискретний сигнал. Кожній парі елементів з індексами $2j$ і $2j+1$, $j \in Z$, поставимо у відповідність два значення:

$$a_j = \frac{s_{2j} + s_{2j+1}}{2}, \quad d_j = \frac{s_{2j} - s_{2j+1}}{2}, \quad (3.1)$$

де a_j є апроксимирована версія сигналу s , а d_j містить деталізуючу інформацію, необхідну для відновлення сигналу s [13].

3.2. Двовимірне перетворення Хаара

Розглянемо двовимірний сигнал як матрицю s кінцевого розміру. Застосуємо одновимірне вейвлет перетворення до кожного рядка матриці s . Це призведе до отримання двох матриць, де кожен рядок містить апроксимаційну та деталізуючу складові відповідного рядка вихідної матриці.

Подальше застосування одновимірного вейвлет перетворення до кожного стовпчика цих двох матриць призведе до утворення чотирьох матриць (рис. 3.2). Перша матриця буде містити апроксимаційну складову вихідного сигналу (згрубшену версію), а інші три матриці міститимуть деталізуючу інформацію - вертикальну, горизонтальну і діагональну [14].

									Анк
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата					45

Таким чином, після двовимірного вейвлет перетворення отримуємо чотири матриці, які відображають різні аспекти сигналу: апроксимацію та деталізацію у вертикальному, горизонтальному та діагональному напрямках..

Двовимірне перетворення може бути зведене до композиції одновимірних перетворень.

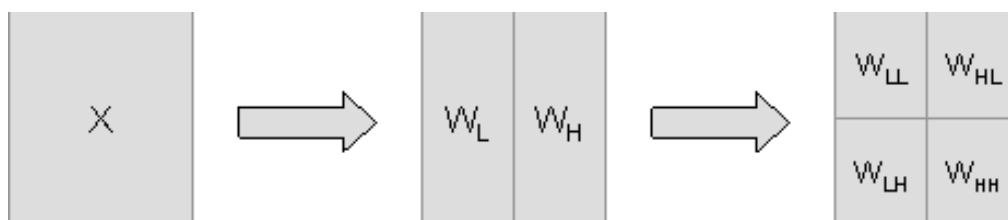


Рис. 3.2 Схеми двовимірного вейвлет-перетворення

Наприклад, для s -матриці:

$$s = \begin{vmatrix} 23 & 22 & 26 & 25 \\ 25 & 24 & 21 & 29 \\ 22 & 23 & 28 & 25 \\ 21 & 24 & 27 & 26 \end{vmatrix}$$

На першому етапі при застосуванні вейвлет-перетворення до кожного рядка вихідної матриці отримуємо 2 матриці:

$$W_L = \begin{vmatrix} (23+22)/2 & (26+25)/2 \\ (25+24)/2 & (21+29)/2 \\ (22+23)/2 & (28+25)/2 \\ (21+24)/2 & (27+26)/2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 22.5 & 25.5 \\ 24.5 & 25 \\ 22.5 & 26.5 \\ 22.5 & 26.5 \end{vmatrix}$$

$$W_H = \begin{vmatrix} (23-22)/2 & (26-25)/2 \\ (25-24)/2 & (21-29)/2 \\ (22-23)/2 & (28-25)/2 \\ (21-24)/2 & (27-26)/2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & -4 \\ -0.5 & 1.5 \\ -1.5 & 0.5 \end{vmatrix}$$

Далі застосовуємо перетворення Хаара до кожного стовпця матриць W_L, W_H та отримуємо матриці $W_{LL}, W_{LH}, W_{HL}, W_{HH}$:

W_{LL} характеризує низькочастотну складову

$$W_{LL} = \begin{vmatrix} (22.5+24.5)/2 & (25.5+25)/2 \\ (22.5+22.5)/2 & (26.5+26.5)/2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 23.5 & 25.25 \\ 22.5 & 26.5 \end{vmatrix}$$

W_{LH} - вертикальне відхилення

$$W_{LH} = \begin{vmatrix} (22.5 - 24.5)/2 & (25.5 - 25)/2 \\ (22.5 - 22.5)/2 & (26.5 - 26.5)/2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -1 & 0.25 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$$

W_{HL} - горизонтальне відхилення

$$W_{HL} = \begin{vmatrix} (0.5 + 0.5)/2 & (0.5 - 4)/2 \\ (-0.5 - 1.5)/2 & (1.5 + 0.5)/2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.5 & -1.75 \\ -1 & 1 \end{vmatrix}$$

W_{HH} - діагональне відхилення

$$W_{HH} = \begin{vmatrix} (0.5 - 0.5)/2 & (0.5 + 4)/2 \\ (-0.5 + 1.5)/2 & (1.5 - 0.5)/2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 2.25 \\ 0.5 & 0.5 \end{vmatrix}$$

Реконструкція вихідної матриці відбувається в зворотному порядку за формулами:

$$s'_{2j} = a_j + d_j, \quad s'_{2j+1} = a_j - d_j. \quad (3.2)$$

Перший етап реконструкції початкового сигналу:

$$W_L = \begin{vmatrix} (23.5 - 1) & (25.25 + 0.25) \\ (22.5 + 0) & (26.5 + 0) \\ (23.5 + 1) & (25.25 - 0.25) \\ (22.5 - 0) & (26.25 - 0) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 22.5 & 25.5 \\ 22.5 & 26.5 \\ 24.5 & 25 \\ 22.5 & 26.5 \end{vmatrix}$$

$$W_H = \begin{vmatrix} 0.5 + 0 & (-1.75 + 2.25) \\ (-1 + 0.5) & (1 + 0.5) \\ (0.5 - 0) & (-1.75 - 2.25) \\ (-1 - 0.5) & (1 - 0.5) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.5 & 0.5 \\ -0.5 & 1.5 \\ 0.5 & -4 \\ -1.5 & 0.5 \end{vmatrix}$$

Другий етап реконструкції початкового сигналу:

$$s = \begin{vmatrix} (22,5 + 0,5) & (22,5 - 0,5) & (25,5 + 0,5) & (25,5 - 0,5) \\ (22,5 - 0,5) & (22,5 + 0,5) & (26,5 + 1,5) & (26,5 - 1,5) \\ (24,5 + 0,5) & (24,5 - 0,5) & (25 - 4) & (25 + 4) \\ (22,5 - 1,5) & (22,5 + 1,5) & (26,5 + 0,5) & (26,5 - 0,5) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 23 & 22 & 26 & 25 \\ 22 & 23 & 28 & 25 \\ 25 & 24 & 21 & 29 \\ 21 & 24 & 27 & 26 \end{vmatrix}$$

Перетворення Хаара можна розглядати як процес поділу сигналу на низькочастотну (апроксимуючу) та високочастотну (деталізуючу) складові за допомогою пари фільтрів. Після проведення перетворення і отримання цих складових, вихідний сигнал можна відновити шляхом простого об'єднання цих складових.

3.3. Алгоритми кодування вейвлет коефіцієнтів

Для стиснення вейвлет коефіцієнтів використовуються різні методи кодування. У даній роботі були використані алгоритм вкладеного нуль-дерева (EZW) та алгоритм встановлення підрозділів в ієрархічних деревах (SPIHT). Ці алгоритми використовуються для ефективного збереження даних шляхом видалення надмірності та зменшення обсягу пам'яті, не втрачаючи важливої інформації.

3.3.1 Алгоритм вкладеного нуль дерева(EZW)

Алгоритм вкладеного нуль-дерева (Embedded Zerotree Wavelet coder - EZW) розроблений Шапіро заснований на передачі і ненульових даних, і карти значень[15]. У цьому алгоритмі використовується властивість надмірності карт значень, що породжуються зображеннями, для досягнення ефективності стиснення. Якщо вузол має малу енергію, то ймовірність того, що його нащадки також є незначущими, дуже висока. Тому в більшості випадків генерується символ "нуль-дерево", який позначає, що дані в цьому вузлі майже нульові. Це дозволяє передати багато інформації за допомогою невеликої кількості бітів для кодування карти значень. Якщо один або більше нащадки незначного вузла є значущими, генерується символ "ізолюваного нуля". Ймовірність цієї події нижче, тому для кодування потрібна більша кількість бітів. Це компроміс між ефективністю стиснення та уникненням значного спотворення через помилкове породження нуль-дерева.

Вкладений, ієрархічний код, яким працює алгоритм EZW, має великий практичний інтерес з кількох причин:

- можливість точного регулювання швидкості передачі: За допомогою вкладеного коду можна передавати зображення з різною швидкістю. Спочатку передається апроксимація зображення невеликою кількістю біт, що дозволяє отримати загальну структуру зображення. Потім ця апроксимація може бути поступово уточнювана шляхом передачі додаткових

									Анк
									48
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				

біт. Таким чином, отримувач може регулювати швидкість передачі в залежності від своїх потреб і обмежень каналу передачі даних;

- можливість відновлення всього зображення при припиненні прийому декодером біт в будь-якій точці: Одна з важливих переваг вкладеного коду полягає в тому, що при припиненні прийому біт декодером в будь-якій точці передачі, можна відновити максимально якісне зображення для даної кількості отриманих біт. Це особливо корисно при передачі по каналах з втратами, де можуть втрачатись деякі біти. Також це може бути застосовано в додатках мовлення, де може бути обмежена пропускна здатність каналу передачі даних або обчислювальна можливість декодера. В цих випадках кодер генерує потік високошвидкісних біт, який передається по каналам з різною пропускною здатністю та обчислювальною можливістю декодерів. Таким чином, вкладений код дозволяє забезпечити максимально якісну передачу зображення в обмежених умовах. Останні виділяють з нього потрібні їм субсмуги;

- можливість швидкого перегляду зображень у віддаленій базі даних, де для пошуку використовується швидка і груба копія зображення. Однак, якщо знайдено потрібне зображення, воно повністю декодується для детального перегляду.

Алгоритм Шапіро використовує побітовий метод для генерації вкладеного коду. Основні операції в методі EZW полягають у наступному.

Спочатку проводиться часткове упорядкування коефіцієнтів за їх амплітудою. Це досягається шляхом порівняння кожного вейвлет-коефіцієнта (ВК) з певним порогом T . Якщо значення ВК більше за T , вважається, що коефіцієнт є значущим, в іншому випадку він вважається незначущим.

Сканування виконується від низькочастотних смуг до високочастотних. Для кодування знаку і позиції кожного коефіцієнта використовується двобітовий символ. Цей символ може бути: « \pm » - для позначення знаку ВК; «0» - для позначення незначущого ВК; «Корінь нуль-дерева» - для позначення незначущого ВК разом з усіма ВК у даній просторовій області з вищими

									Анк
									49
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				

частотами. Таким чином, використовується міжсмугова та просторова кореляція ВК. Після обчислення та передачі карти значень для значущих коефіцієнтів, необхідно передати біти, які уточнюють їх значення («карта даних»). Потім карта даних і карта значень стискаються арифметичним кодером. Якщо швидкість передачі ще не вичерпана, поріг T поділяється на два і процес повторюється.

5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	→		1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	→				1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	→								1	1	1	1	1	1
1	→													
0	→													

На
рис.
3.3
зобра
жений
Бітов

ий план для сканування упорядкованих вейвлет-коефіцієнтів.

Рис.3.3 Бітовий план для сканування упорядкованих вейвлет-коефіцієнтів

Візуальний аналіз рис. 3.3 показує, що верхні рядки біт містять багато нульових значень. Це пояснюється тим, що багато коефіцієнтів мають значення, які не перевищують встановлений поріг. Нуль-дерево виконує важливу функцію, яка полягає у запобіганні передачі цих нульових значень. Символ нуль-дерева може бути повторно переданий для даного коефіцієнта до тих пір, поки його значення не перевищить поточно встановлений поріг. Після досягнення цього значення передається квантоване значення коефіцієнта.

3.3.2 Алгоритм встановлення підрозділів в ієрархічних деревах(SPIHT)

Алгоритм SPIHT (Set Partition In Hierarchical Trees - "встановлення підрозділів в ієрархічних деревах") є покращеною версією алгоритму EZW[16]. Він був розроблений з метою оптимальної прогресивної передачі та стиснення

зображень. Основна особливість цього алгоритму полягає в тому, що на кожному етапі декодування якість відтворення зображення є найкращою для введеної кількості інформації про це зображення. Це означає, що з кожним додатковим бітом переданою інформації, відображення зображення покращується, і можна отримати все більш деталізовану картину.

Алгоритм SPIHT має ще одну цікаву особливість, пов'язану з використанням вкладеного кодування. Цю властивість можна сформулювати так: коли кодер використовує вкладене кодування і створює два файли - один більший за об'ємом і один менший - менший файл містить початкові біти більшого файла. Основні кроки кодера SPIHT:

Крок 1: Для даного зображення, яке буде стиснуто, проводиться вейвлет-трансформація за допомогою певних вейвлетних фільтрів. Результатом є розклад зображення на набір коефіцієнтів перетворення, які представлені як цілі числа з фіксованою розрядністю. У даному випадку коефіцієнти мають 16-бітну розрядність, де найлівіший біт використовується для позначення знака, а у решті 15 біт записується модуль цього числа. Значення цих чисел змінюються в діапазоні від $-(2^{15} - 1)$ до $(2^{15} - 1)$. Задамо змінній n значення $\lceil \log_2 \max_{i,j} (c_{i,j}) \rceil$. У нашому прикладі $n = \lceil \log_2 (2^{15} - 1) \rceil = 14$.

Крок 2: Сортування. Передати число l коефіцієнтів $c_{i,j}$, які задовольняють нерівності $2^n \leq |c_{i,j}| < 2^{n+1}$. Потім передати l пар координат і l знаків цих коефіцієнтів.

Крок 3: виправлення. Передати $(n - 1)$ -і найстарші біти всіх коефіцієнтів, що задовольняють нерівності $|c_{i,j}| \geq 2^n$. Ці коефіцієнти були обрані на кроці сортування попередньої ітерації циклу (не цієї ітерації!).

Крок 4: Виконується ітерація. Значення n зменшується на 1. Якщо потрібно провести ще одну ітерацію, перейти до Кроку 2.

Зазвичай остання ітерація відбувається при $n=0$, але кодер може зупинитися раніше. В такому випадку менш значуща частина інформації (деякі менш значущі біти вейвлет-коефіцієнтів) не передається. Це природно

									Анк
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				51

природжене відкидання частини інформації в методі SPIHT. Цей підхід еквівалентний скалярному квантуванню, але результат є кращим, оскільки коефіцієнти передаються в упорядкованій послідовності. В іншому варіанті кодер передає всю інформацію про зображення (тобто всі біти всіх вейвлет-коефіцієнтів), а декодер може зупинити процес декодування в будь-який момент, коли відновлене зображення досягає необхідної якості. Ця якість може встановлюватися користувачем або автоматично декодером на основі часу, який був витрачений.

Наступним кроком роботи є моделювання методів стиснення та оцінка їх параметрів

Вейвлет-перетворення Хаара є добре відомим і є одним з найпростіших методів дослідження. Воно використовує всього два фільтри: низькочастотний фільтр, який містить апроксимовану версію сигналу, і високочастотний фільтр, який містить деталізуючу версію сигналу разом з шумами, які потрібно відфільтрувати. Саме через свою простоту це перетворення є популярним для подальшого вивчення та дослідження.

Проведений огляд вейвлет-перетворень та існуючі методи стиснення становлять основу моделювання оцінки їх параметрів методів стиснення.

					<i>ДП. ДС91.08. 000. ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Анк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		52

4. РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ОБРОБКИ ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЙОГО РОБОТИ

4.1. Розробка структурної та принципової схеми пристрою

На рис. 4.1 зображена структурна схема пристрою для обробки відеозображень, який включає в себе камеру і мікроконтролер (МК). Вхідне зображення отримується від камери, а МК передає стиснуте зображення на блок керування БПЛА. Структурна схема включає такі блоки: Камера (зі стрілкою, що показує напрямок сигналу від блока керування, який не є предметом нашої розробки, але для якого ми здійснюємо стискання зображення). Від камери веде стрілка до МК, і через UART стиснуте зображення передається на блок керування.



Рис. 4.1 Структурна схема пристрою

МК, або мікроконтролер ESP32-CAM з камерою OV2640, є сучасним пристроєм для створення камерних пристроїв. Ця технологія відкриває широкі можливості в області машинного зору, а також може використовуватись як система керування в розумних будинках та роботах.

									Анк
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				53

МК має наступні характеристики .

- Процесор: 32-х бітний, частота 160-240 МГц;
- Об'єм оперативної пам'яті: 520 КБ
- Об'єм Flash-пам'яті: 448 КБ
- Живлення: 2.2 - 3.6В;
- Зовнішня Flash-пам'ять: 4 МБ;
- Підтримка Wi-Fi: 802.11 b/g/n/d/e/i/k/r (802.11n до 150 Мбіт/с);
- Підтримка Bluetooth: 4.2 BR/EDR і Low Energy
- 8 Виводів GPIO;
- Вбудований світлодіод підсвітки;
- Інтерфейси: UART, SPI, I2C, PWM.

Призначення виводів МК наведено на рис.4.2.

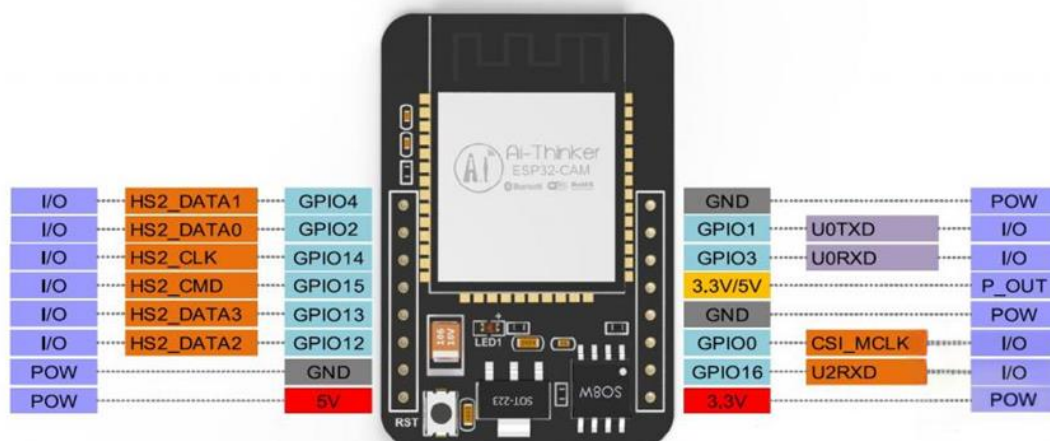


Рис.4.2.Призначення виводів МК

Зв'язок з вищим ієрархічним рівнем керування літальним апаратом здійснюється по інтерфейсу UAR, рис 4.3.

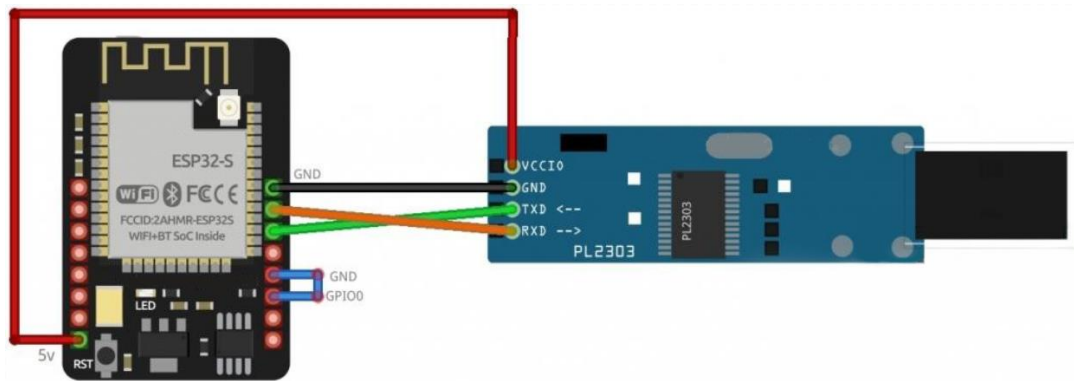


Рис. 4.3 Використання інтерфейсу UART

Принципова схема пристрою наведена на рис.4.4.

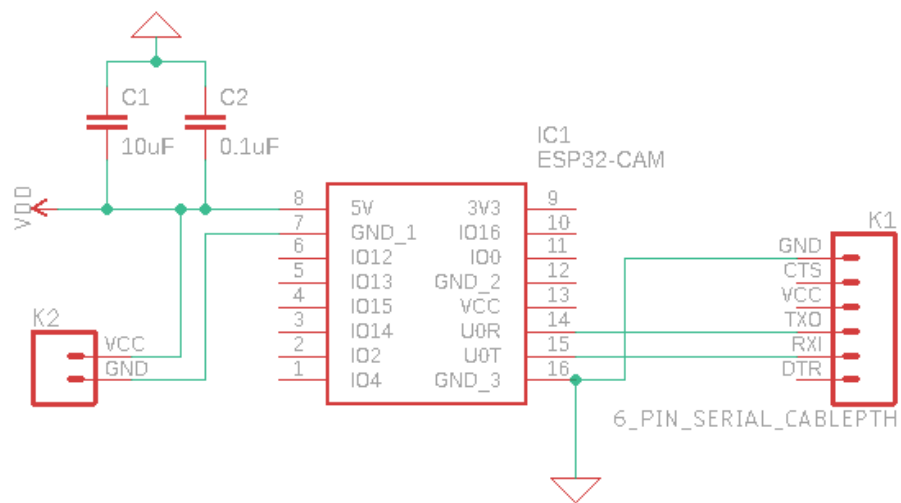


Рис. 4.4 Принципова схема пристрою стиснення інформації

4.2. Моделювання роботи пристрою обробки

4.2.1. Моделювання вейвлет перетворення

Для моделювання обраних методів стиснення зображень було використано MATLAB, пакет прикладних програм для числового аналізу та мову програмування, що входить до складу цього пакету. MATLAB є зручним інструментом для роботи з математичними матрицями, виконання обчислень, малювання функцій, роботи з алгоритмами та створення робочих інтерфейсів з програмами, написаними на інших мовах програмування. Він спеціалізується на чисельних обчисленнях, але має також інструменти для роботи з

програмним забезпеченням Maple, що робить його потужним інструментом для роботи з алгеброю.

Пакет MATLAB Wavelet Toolbox [17] надає функції та додатки для аналізу та синтезу сигналів, зображень та даних, які проявляють регулярну або переривчасту поведінку з різкими змінами. Цей набір інструментів включає алгоритми для безперервного вейвлет-перетворення (CWT), скаляграм та вейвлет-когерентність. Він також має алгоритми та засоби візуалізації для дискретного вейвлет-аналізу, включаючи децимовані, недозволені та двоелементні вейвлет-перетворення.

Wavelet Toolbox дозволяє аналізувати залежність частоти сигналів від часу та виявляти зміни в моделях, що поширені в кількох сигналах. Цей набір інструментів також надає можливість виконувати мультирезонансний аналіз для виділення дрібномасштабних або великомасштабних функцій, виявлення розривів та точок зміни або подій, які не помітні на необроблених даних.

Wavelet Toolbox також можна використовувати для ефективного стиснення даних, зменшуючи шум у сигналах та зображеннях, при цьому зберігаючи важливі функції, які часто загладжуються іншими методами. Інструменти пакету включають функції для шумозаглушення та стиснення сигналів та зображень. Wavelet Toolbox дозволяє застосовувати різні стратегії порогоування для даних і порівнювати результати. Оскільки шум у сигналі не завжди є рівномірним у часі, можна використовувати порогові значення, що залежать від часу, для обробки даних з непостійною дисперсією. Пакет також дозволяє накопичувати та стискати колекції сигналів за допомогою сплесків, використовуючи кореляції між окремими сигналами. За допомогою розріджених вейвлет-представлень можна групувати сигнали та фільтрувати незначущі дані. Іншими методами можна стискувати дані, встановлюючи нульові значення для неважливих вейвлетів та вейвлет-коефіцієнтів та відновлюючи дані. У пакеті Wavelet Toolbox доступний додаток Wavelet Design and Analysis, який дозволяє вивчати шумозаглушення та стиснення сигналів та зображень. Основні властивості пакету включають вдосконалений графічний

									Анк
									56
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				

користувацький інтерфейс, набір команд для аналізу, синтезу та фільтрації сигналів та зображень, підтримку багатовимірних безперервних і дискретних перетворень сигналів, можливість декомпозиції та аналізу сигналів та зображень, вибір базисних функцій, пакетну обробку сигналів та зображень, аналіз пакетів сигналів на основі ентропії, фільтрацію з можливістю встановлення жорстких та нежорстких порогів та оптимальне стиснення сигналів.

Пакет MATLAB Wavelet Toolbox є потужним інструментом для вейвлет-аналізу та обробки сигналів, що надає можливість ефективно стискати дані, зменшувати шум та зберігати важливі функції. Він має широкий набір функцій і можливостей для аналізу сигналів і зображень за допомогою вейвлет-перетворень.

4.2.2. Моделювання методу SPIHT

Код, який знаходиться в Додатку А було виконано на мові та в середовищі Matlab.

Алгоритм SPIHT базується на ідеї розбиття зображення на групи (sets) і подальшому кодуванні їх з використанням ієрархічних дерев. Під час кодування використовуються розширення множини декомпозиції (Extended Set Partitioning) та аналіз пікселів на різних рівнях деталізації.

У цьому коді зображення спочатку завантажується з файлу (imageFile), конвертується в чорно-біле, а потім подвоюється для подальшого оброблення. Задаються максимальна кількість бітів (maxBits) та максимальне значення пікселів (maxPixel). Також створюється порожня рядкова змінна bitstream, яка використовується для зберігання бітового потоку під час кодування.

Потім ініціалізується кодер SPIHT шляхом створення кореня дерева (root) за допомогою функції createTree. У цій функції створюється дерево, де кожен вузол має по чотири дочірніх вузли, які також є деревами.

Далі виконується кодування SPIHT у циклі, поки кількість бітів у бітовому потоці не досягне максимальної кількості бітів (maxBits). У циклі

										Анк
										57
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ					

обробляються рівні декомпозиції зображення, розширюються множини декомпозиції, обчислюються пороги та оновлюються буфери та дерево залежно від значень пікселів. Потім виконується компресія зображення шляхом обнулення пікселів, які не були кодовані. На виході повертаються стиснуте зображення (compressedImage) та бітовий потік (bitstream).

4.3. Аналіз отриманих результатів моделювання стиснення зображення

Після проведення моделювання було отримано стисненні зображення та їх наступні параметри:

M.S.E.– середньоквадратична помилка (Mean Square Error)[18].

Обчислюється за формулою:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n |X(i, j) - X_c(i, j)|^2, \quad (4.1)$$

де X - вхідний сигнал, X_c - стиснутий.

Max. Error – максимально допущена помилка при стисненні зображення:

$$\max_{ij} |X(i, j) - X_c(i, j)|. \quad (4.2)$$

P.N.S.R. (Peak Signal to Noise Ratio)[19] – пікове значення сигнал/шум, міра помилки у децибелах. Чим вище PNSR, тим краще якість стиснутого чи відновленого зображення. Розраховується за формулою:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{MSE} \right). \quad (4.3)$$

B.P.P. (Bit Per Pixel)[20] - це показник, який вказує на кількість бітів, необхідних для збереження одного пікселя зображення, без втрати інформації.

Comp. Ratio, % - це коефіцієнт стиснення, що показує, який відсоток від розміру початкового зображення займає стиснутий образ.

Вага зображ., кб - це загальна кількість бітів, необхідних для збереження повного зображення.

									Анк
Змн.	Адж.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП. ДС91.08. 000. ПЗ				58



Рис. 4.5(а) Перший рівень розкладання



Рис. 4.5(б) Четвертий рівень розкладання

					<i>ДП. ДС91.08. 000. ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>60</i>



Рис. 4.5(в) Сьомий рівень розкладання

Для кількісної оцінки якості обробки зображень з обнулінням коефіцієнтів було використано дві числові характеристики.

1. PSNR, або пікове відношення сигнал-шум, між двома зображеннями (оригіналом та отриманим зображенням). Обчислюється дана характеристика за формулою:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{R^2}{MSE} \right), \quad (4.4)$$

$$\text{де } MSE = \frac{\sum_{M,N} [I_1(m,n) - I_2(m,n)]^2}{M \cdot N}$$

середньоквадратична помилка порівняння якості встановленого зображення;
 R - максимальне коливання вхідного сигналу зображення. Оскільки величина PSNR має логарифмічну природу, одиницею її виміру є децибел (Дб). Чим більша величина PSNR, тим краще якість відновленого зображення для тотожно рівних зображень PSNR = так. При дослідженні алгоритмів стиснення та очищення від шуму зображень у відтінках сірого практично придатною вважається величина PSNR, що змінюється в межах від 20 Дб до 50 Дб. Для наведених випадків стиснення зображення величина PSNR обчислювалася між зображенням, отриманим при використанні традиційної двійкової системи

числення і зображенням, отриманим за допомогою обнуління певної кількості коефіцієнтів.

2. SSIM[21], або індекс структурної подібності між двома зображеннями, визначається на основі повного зіставлення вихідного та отриманого зображень. Ця характеристика обчислюється за такою формулою:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)}, \quad (4.5)$$

де σ_x^2 – дисперсія x,

σ_y^2 – дисперсія y,

σ_{xy} – коваріація x і y,

μ_x – середнє x,

μ_y – середнє y,

$c_1 = (k_1L)^2$, $c_2 = (k_2L)^2$ - дві змінні, L – динамічний діапазон пікселів, $k_1 = 0,01$ і $k_2 = 0,03$ константи. Величина SSIM знаходиться в межах між 0 і 1 і дорівнює 1 для тотожно рівних зображень. Для випадків, що ми розглядаємо, стиснення зображення величина SSIM обчислювалася між зображенням, отриманим при використанні традиційної двійкової системи числення і зображенням, отриманим за допомогою обнуління певної кількості коефіцієнтів.

Результати обнуління коефіцієнтів в зображені в табл. 4.2 та рис. 4.6(а, б, в, г).

Таблиця 4.2

Кількість обнулених коефіцієнтів	PSNR, Дб	SSIM
95%	36.81 dB	0.9716
75%	37.06 dB	0.9725
50%	37.14 dB	0.9731
25%	37.79 dB	0.9737
0%	39.70 dB	0.9769



Рис 4.6(а) Кількість обнулених коефіцієнтів 0%



Рис 4.6(б) Кількість обнулених коефіцієнтів 25%

					<i>ДП. ДС91.08. 000. ПЗ</i>	<i>Арк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>63</i>



Рис 4.6(в) Кількість обнулених коефіцієнтів 50%



Рис 4.6(г) Кількість обнулених коефіцієнтів 95%

Розроблена принципова схема пристрою обробки відеозображень на базі МК ESP32-CAM з камерою OV2640, на вхід надходить зображення з камери. МК виконує стиснення зображення та передає результат по інтерфейсу UART на блок керування БПЛА

					ДП. ДС91.08. 000. ПЗ	Анк
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата		64

Розроблено алгоритми стиснення зображення на базі вейвлет перетворення Хаара з наступною обробкою кодером SPIHT.

Аналіз отриманих результатів стиснення зображення проводився по наступним параметрам середньоквадратична помилка MSE, максимально допущена помилка при стисненні зображення Max. Error , пікове значення сигнал/шум, міра помилки у децибелах. PSNR, дБ

Визначено кількість рівнів розкладання вейвлета Хаара (7) та кількість нульових коефіцієнтів (95%) алгоритму SPIHT для забезпечення заданого коефіцієнта стиснення

					<i>ДП. ДС91.08. 000. ПЗ</i>	<i>Анк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Анк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		65

ВИСНОВКИ

В ході виконання поставленого завдання було розглянуто можливості сучасних БПЛА, їх класифікація та характеристики. Обрані вимоги до передачі даних.

Проведений огляд вейвлет-перетворень та існуючих методів стиснення відеозображень становлять основу моделювання методів стиснення та оцінки їх параметрів .

Показано переваги використання вейвлет перетворення Хаара для стиснення інформації. Розглянуто алгоритми кодування вейвлет коефіцієнтів - алгоритм вкладеного нуль-дерева (Embedded Zerotree Wavelet coder - EZW) розроблений Шапіро та алгоритм встановлення підрозділів в ієрархічних деревах(Set Partition In Hierarchical Trees - SPIHT). Показано переваги кодера SPIHT.

Розроблено алгоритми стиснення зображення на базі вейвлет перетворення Хаара з наступною обробкою кодером SPIHT.

Розроблена принципова схема пристрою обробки відеозображень на базі МК ESP32-CAM з камерою OV2640.

					ДП. ДС91.08. 000. ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докum.	Підпис	Дата		66

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Техніка авіаційна військової призначеності. Апарати літальні безпілотні. Основні терміни, визначення понять і класифікація: ДСТУ В 7371:2013 / Міністерство економічного розвитку і торгівлі України [Наказ № 1010 від 22.08.2013]. – К., 2014. – С. 2.

2. Knysh B. The classification of the certain types of the unmanned aerial vehicles / Knysh B., Brovko P., Popil D. // International periodic scientific journal. Modern engineering and innovative technologies. Heutiges ingenieurwesen und innovative technologien. – 2017. – №2. – С. 34 – 39.

3. Тимочко О. І. Класифікація безпілотних літальних апаратів / О. І. Тимочко, Д. Ю. Голубничий, В. Ф. Третяк, І. В. Рубан // Системи озброєння і військова техніка. – 2007. – випуск 1(9) – С. 61 – 66.

4. R. Beard and T. McLain, "Small unmanned aircraft: theory and practice," Princeton University Press, 2012.

5. STANAG 4609/AEDP-8. NATO Digital Motion Imagery Format. – www.nato.int/structur/AC/224/standard/4609/4609.htm.

6. STANAG 7023/AEDP-9 NATO Primary Image Format. – www.nato.int/structur/AC/224/standard/7023/7023.htm.

7. STANAG 4607/AEDP-7. NATO Ground Moving Target Indicator Format. (GMTIF). – www.nato.int/structur/AC/224/standard/4607/4607.htm.

8. Негода А. М. Аналіз сучасних алгоритмів стиснення відео / ISSN 1990-5548 Електроніка та системи управління / ІАЕУ НАУ. – 2010 – С. 23-27.

9. Мещанінов С. К. конспект лекцій з дисципліни "Стохастика електронних систем" для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 171 "Електроніка" за освітньо-професійною програмою "Електроніка" зі спеціальності: 171 "Електроніка" за освітньо-професійною програмою "Електроніка". /Укл.: С.К. Кам'янське: ДДТУ. – 2019 – С. 28.

					ДП. ДС91.08. 000. ПЗ	Анк
Змн.	Адж.	№ докум.	Підпис	Дата		67

10. Білінський Й. Й. Методи стиснення зображень [Електронний ресурс] / Й. Й. Білінський, К. В. Огородник, М. Й. Юкиш [Електронний ресурс]: – Електрон. дані (1 файл). – Режим доступу: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/firen/6bilynskij_elektronni_systemy/57.htm

11. Джала Р. М. Засоби передачі інформації в системах технічного захисту інформації [Електронний ресурс]: Нац ун-ту “Львівська політехніка”. – Електрон. дані (1 файл). – 2011 – [9 с.]. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/9958439/page:3/>. – Назва з екрану.

12. Дискретне косинус перетворення [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://bit.ly/3NuOVWF>.

13. Терещенко Т. О. Вейвлет-перетворення для фільтрації зображень із відеокамер спостереження / Т. О. Терещенко, Ю. С. Ямненко, О. Л. Мельниченко, М. В. Панченко // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2018. – Том 29(68) Ч.2 №3 – С. 14 – 18.

14. Erlebacher, G. Wavelets: theory and applications / G. Erlebacher, M. Y. Hussaini, L. M. Jameson (Eds.). – New York: Oxford University Press, 1996, p.42-54

15. Стеганографія основний підручник / [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/16435716/page:6/>

16. Патлаєнко. М. О. Підвищення ступення стиснення тв-зображень за допомогою рекурентних перетворень і хвильових алгоритмів / ОНАК ім. О. С. Попова – 2020. – С. 236.

17. The MathWorks. MATLAB Wavelet Toolbox Documentation / [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/>.

18. Mean squared Error(MSE) / [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://statisticsbyjim.com/regression/mean-squared-error-mse/>.

19. The MathWorks. MATLAB PSNR / [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/vision/ref/psnr.html>.

20. Wikipedia / / [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Color_depth.

									ДП. ДС91.08. 000. ПЗ	Анк
Змн.	Адж.	№ докum.	Підпис	Дата						68

21. Попович. П. В. Удосконалення методів керування відеопотоком у системах цифрового телебачення за критерієм якості відеозображення / КПІ ім. І. Сікорського – 2017 – С. 74.

					<i>ДП. ДС91.08. 000. ПЗ</i>	Анк
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		69

ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ

Код для реалізації алгоритму SPIHT

```

function [compressedImage, bitstream] = spiht(imageFile, maxBits, compressedFile)

    imageFile = ('test.jpg');
    image = imread(imageFile);
    [rows, cols, ~] = size(image);
    image = rgb2gray(image);
    image = double(image);
    maxBits=10000;
    maxPixel = max(max(image));
    bitstream = '';

    LIP = 2^ceil(log2(maxPixel + 1));
    buffer = zeros(rows, cols);

    root = createTree(rows, cols);

    while numel(bitstream) < maxBits

        level = min(floor(log2(maxPixel)), floor(log2(maxBits) -
log2(numel(bitstream)) + 1));

        for i = 1:2^level:rows
            for j = 1:2^level:cols
                if ~buffer(i, j)
                    subband = image(i:min(i+2^level-1, rows), j:min(j+2^level-1,
cols));

                    threshold = max(abs(subband(:))) / 2;
                    positiveSet = find(subband >= threshold);
                    negativeSet = find(subband <= -threshold);

                    if ~isempty(positiveSet) || ~isempty(negativeSet)
                        bitstream = strcat(bitstream, '1');
                    else
                        bitstream = strcat(bitstream, '0');
                    end

                    buffer(i:i+2^level-1, j:j+2^level-1) = 1;
                    buffer(i:i+2^(level-1)-1, j:j+2^(level-1)-1) = 1;
                    if ~isempty(positiveSet)
                        buffer(i+positiveSet-1) = 0;
                    end
                    if ~isempty(negativeSet)
                        buffer(i+negativeSet-1) = 0;
                    end

                    root = updateTree(root, i, j, level, buffer);
                end
            end
        end
    end
end

```

```

compressedImage = image;
compressedImage(buffer == 0) = 0;

imshow(uint8(compressedImage));
end

function node = createTree(rows, cols)
    node = struct('parent', [], 'children', [], 'bit', '', 'isEmpty', true);
    node.children = repmat(node, 2, 2);

    if rows > 1 && cols > 1
        halfRows = ceil(rows / 2);
        halfCols = ceil(cols / 2);

        for i = 1:2
            for j = 1:2
                node.children(i, j) = createTree(halfRows, halfCols);
            end
        end
    end
end

function root = updateTree(root, row, col, level, buffer)
    if level == 0
        root.isEmpty = buffer(row, col) == 0;
        return;
    end

    childRow = mod(ceil(row / 2^(level - 1)), 2) + 1;
    childCol = mod(ceil(col / 2^(level - 1)), 2) + 1;

    root.children(childRow, childCol) = updateTree(root.children(childRow,
childCol), mod(row - 1, 2^(level - 1)) + 1, mod(col - 1, 2^(level - 1)) + 1, level -
1, buffer);

    if all([root.children(1, 1).isEmpty, root.children(1, 2).isEmpty,
root.children(2, 1).isEmpty, root.children(2, 2).isEmpty])
        root.isEmpty = true;
    end
end
end

```

S U M M A R YUnmanned Aerial Vehicle`s Video Images Processing Device

The diploma project of first educational level "Bachelor" by specialty 171 Electronics, specialization electronic components and systems Yehor Kuschinskiy. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Faculty of Electronics, Department of Electronic Devices and Systems. Academic group DS-91. - Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2023. - 5 p., Ill., tables.

Keywords: Discrete cosine transforms, wavelet coefficients, image decomposition, wavelet transforms, encoding, decoding, compression algorithms.

Summary of the project: 2 pages

S U M M A R Y

The aim of the thesis is to develop a device and information compression algorithms for transmission over a communication channel with relatively low bandwidth without significant loss of signal quality.

In recent years, unmanned aerial vehicles (UAVs) have become an integral and highly relevant part of modern aviation. They are used for various purposes, including military, commercial, and scientific applications. Active research and development related to UAVs are currently taking place worldwide. In particular, the possibility of using UAVs to perform tasks that were previously inaccessible to manned aircraft, such as gathering information from high altitudes or dangerous zones for humans, is being investigated.

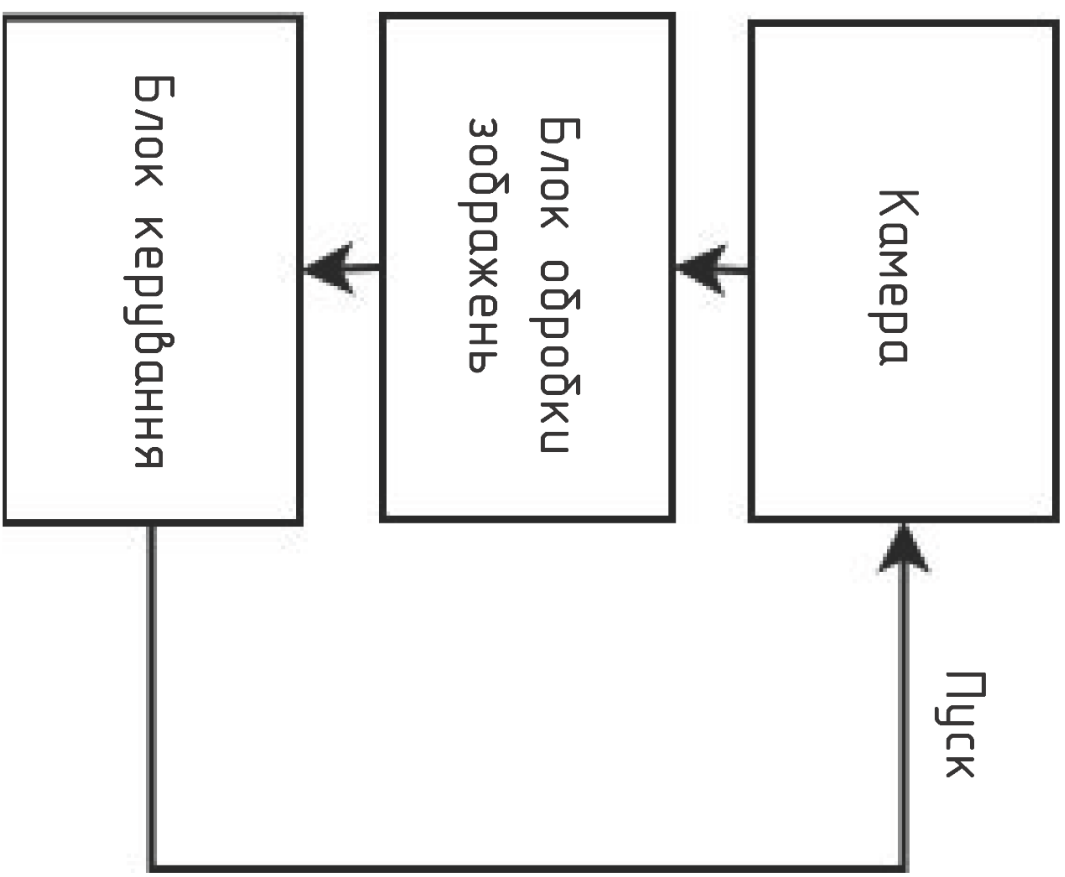
One of the key functions of UAVs is the collection and processing of video data transmitted from onboard cameras. Advances in this field allow for the collection of more information and real-time transmission, which helps improve flight safety and provide more accurate information about the surrounding environment. New algorithms for video data processing are also being developed to reduce processing time and improve the quality of the obtained information.

Currently, there are numerous modern UAV developments and variations, differing in size, functionality, and purpose. This includes UAVs for monitoring environmental conditions, search and rescue operations during disasters, as well as commercial purposes such as package delivery and securing oil and gas facilities. UAVs are also used by the military for reconnaissance, battlefield support, and carrying out dangerous missions without a pilot onboard.

The goal of the diploma project is to develop a device and information compression algorithms for transmission over a low-bandwidth communication channel without significant loss of signal quality. During the execution of the diploma project, types and characteristics of UAVs and their requirements were reviewed. An analysis of digital image processing by UAV hardware was conducted. Wavelet transforms were selected and utilized for information compression. A device for processing UAV video images was developed and its operation was simulated.

As a result of the work, image compression results were obtained using an algorithm for establishing hierarchical tree subdivisions. Simulation was performed to verify the capabilities of this algorithm for video image compress.

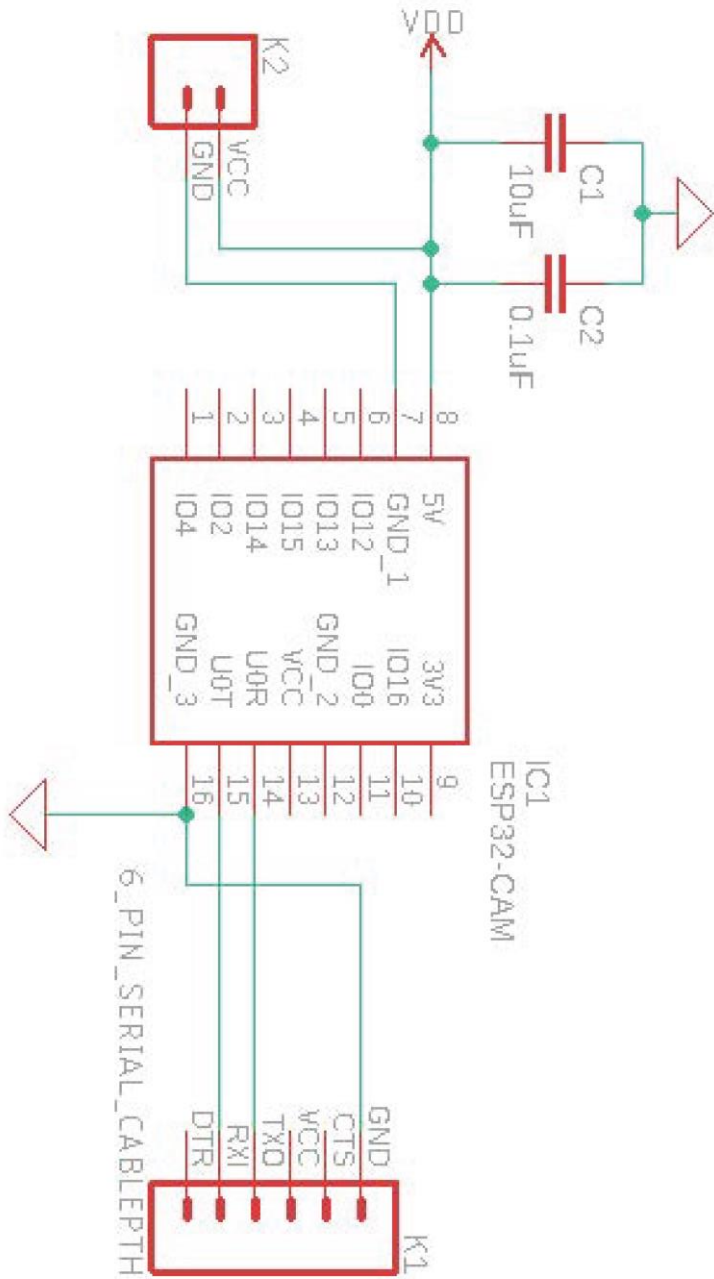
ДП ДС91.08.000 Е1



№ п/п	№ п/п	№ п/п	№ п/п	№ п/п	№ п/п	№ п/п	№ п/п

ДП ДС91.08.000 Е1		Головне управління державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України		Київ	
№	Видаток	№	Видаток	№	Видаток
ДП ДС91.08.000 Е1		Головне управління державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України		Київ	
№		Видаток		№	
ДП ДС91.08.000 Е1		Головне управління державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України		Київ	
№		Видаток		№	

ДП ДС9108.000 Е2



Лист №	Лист №	Лист №	Лист №	Лист №	Лист №
--------	--------	--------	--------	--------	--------

ДП ДС9108.000 Е2		Проект: ДС9108.000 Е2		Версия: 1.0	
№	Имя файла	№	Имя файла	№	Имя файла
1	...	2	...	3	...
4	...	5	...	6	...
7	...	8	...	9	...
10	...	11	...	12	...
13	...	14	...	15	...
16	...	17	...	18	...
19	...	20	...	21	...
22	...	23	...	24	...
25	...	26	...	27	...
28	...	29	...	30	...
31	...	32	...	33	...
34	...	35	...	36	...
37	...	38	...	39	...
40	...	41	...	42	...
43	...	44	...	45	...
46	...	47	...	48	...
49	...	50	...	51	...
52	...	53	...	54	...
55	...	56	...	57	...
58	...	59	...	60	...
61	...	62	...	63	...
64	...	65	...	66	...
67	...	68	...	69	...
70	...	71	...	72	...
73	...	74	...	75	...
76	...	77	...	78	...
79	...	80	...	81	...
82	...	83	...	84	...
85	...	86	...	87	...
88	...	89	...	90	...
91	...	92	...	93	...
94	...	95	...	96	...
97	...	98	...	99	...
100	...	101	...	102	...

	О.			відеозображень безпілотного літального апарата. Перелік елементів				Т	В	
Перевір.	Терещенко Т. О.							1	1	
					НТУУ “КПІ”, ФЕЛ каф. ПЕ					
Н.контр.	Батрак Л.М.									
Затверд.	Терещенко Т. О.									

