

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій
(повна назва)

Кафедра Інформаційно-мережної інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Дослідження методу кодування без втрат сегментів зображення
у бітовому форматі представлення

(тема)

Виконав: студент 2 курсу, групи ІМІм-20-1
Спеціальність 172 Телекомунікації та
радіотехніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформаційно-мережна
інженерія

(повна назва освітньої програми)

Калініченко В.М.

(прізвище, ініціали)

Керівник ст. викл. Твердохліб.В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Безрук В.М.

(прізвище, ініціали)

2021 р.

Не містить відомостей, заборонених
до відкритого публікування

Керівник _____ / *В.В.Твердохліб*

Студент _____ / *В.М.Калініченко*

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Інфокомунікацій

Кафедра Інформаційно-мережної інженерії

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Тип програми освітньо-професійна
(код і повна назва)

Освітня програма Інформаційно-мережна інженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри «ІМІ»

проф. Безрук В.М.
(підпис)
« 08 » листопада 2021 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Калініченко Владиславу Максимовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження методу кодування без втрат сегментів зображення у бітовому форматі представлення
керівник роботи ст.викл, к.т.н. Твердохліб.В.В.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом ВНЗ від « 08 » листопада 2021 р. № 1674 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 13.12 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи Дослідити проблематику ведення дистанційного зондування землі. Визначити ключові напрямки її вирішення. Обґрунтувати доцільність підходу до збільшення ступеня стиснення зображень за рахунок скорочення структурної надмірності. Дослідити метод кодування бітового опису сегментів зображень на основі нерівновагових позиційних конструкцій. Довести його переваги відносно існуючих методів

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі Вступ

1. Завдання та особливості процесу дистанційного зондування землі
2. Аналіз особливостей технології jpeg-ls та loseless режиму jpeg
3. Дослідження підходу, орієнтованого на кодування сегментів зображення у бітовому

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслень, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій слайди презентації в форматі Power Point (назва та мета роботи, завдання та специфіка ДЗЗ, аналіз існуючих алгоритмів кодування без втрат, кодування бітового опису сегментів, схеми кодування на базі нерівновагових позиційних конструкцій)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз завдання та літературних джерел	08.11.21-13.11.21	
2	Виконання розділу 1	14.11.21-19.11.21	
3	Виконання розділу 2	20.11.21-25.11.21	
4	Виконання розділу 3	26.11.21-01.12.21	
5	Виконання розділу 4	02.12.21-07.12.21	
6	Висновки	08.12.21-10.12.21	
7	Оформлення пояснювальної записки	11.12.21-13.12.21	

Дата видачі завдання 08 листопада 2021 р.

Студент

_____ (підпис)

Калініченко В.М.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

ст. викл. Твердохліб В.В.

_____ (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 90 с., 21 рис., 19 посилань, 2 додатка.

Мета роботи – дослідження можливостей удосконалення існуючих методів стиснення зображень за рахунок кодування бітового опису сегментів зображень з використанням нерівновагових позиційних конструкцій.

Проаналізовано існуючу проблематику ведення дистанційного зондування землі в умовах зростання обсягів даних, що фіксуються, та росту вимог до якості отримуваних зображень. Показано доцільність застосування методів кодування без втрат для рішення означеної проблематики. У зв'язку з цим доведено необхідність модифікації платформи JPEG. Досліджено метод кодування бітового опису сегментів зображення на базі нерівновагового позиційних конструкцій.

КОДУВАННЯ БЕЗ ВТРАТ, ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ,
JPEG-LS, LOSELESS JPEG, КОДОВЕ СЛОВО

ABSTRACT

Explanatory note: 90 p., 21 fig., 1 tabl., 19 reference, 2 app.

Object of work - methods of encoding images without loss. The purpose of the work is to study the possibilities of improving the existing methods of image compression by encoding the bit description of image segments using non-equilibrium positional structures.

The existing problems of remote sensing of the earth in the conditions of growth of the volumes of the fixed data and growth of requirements to quality of the received images are analyzed. The expediency of application of lossless coding methods for the decision of the specified problems is shown. Therefore, the need to modify the JPEG platform has been proven. The method of coding the bit description of image segments on the basis of nonequilibrium positional constructions is investigated.

LOSSLESS ENCODING, REMOTE SENSING OF THE EARTH, JPEG-LS, LOSELESS JPEG, CODE WORD

ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	11
ВСТУП.....	13
1 ЗАВДАННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ	15
1.1 Головні завдання, які вирішує дистанційне зондування, та їхня специфіка	15
1.1.1 Зондування поверхні.....	16
1.1.2 Дослідження гідросфери, сейсмоактивності земної кори та рельєфу світового океану	18
1.1.3 Моніторинг атмосфери та атмосферних явищ природного та штучного походження	19
1.2 Засоби ведення ДЗЗ.....	19
1.3 Фіксація та обробка даних ДЗЗ	21
1.4 Показники, що впливають на рівень якості даних, отриманим за результатами ДЗЗ	24
2 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЇ JPEG-LS ТА LOSELESS РЕЖИМУ JPEG.....	30
2.1 Загальні можливості технології JPEG-LS	30
2.2 Архітектура JPEG-LS	31
2.3 Особливості режиму loseless технології JPEG	34
2.4 Напрямки модифікації платформи JPEG	36
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДХОДУ, ОРІЄНТОВАНОГО НА КОДУВАННЯ СЕГМЕНТІВ ЗОБРАЖЕННЯ У БІТОВОМУ ФОРМАТІ ОПИСУ	38
3.1 Формування вимог до характерної ознаки, яка відображає закономірності формуванні ланцюжків довжин двійкових серій	38
3.2 Оцінка потенційної продуктивності підходу до кодування сегментів зображення на базі їх бітового опису за найгірших умов	39
3.3 Побудова коду бітового представлення сегментів кадру на базі нерівновагових позиційних чисел як його структурних одиниць	46
3.4 Дослідження підходу до побудови схеми кодування бітового представлення компонент сегменту зображення	49

4	ПРОГРЕСИВНА СХЕМА КОДУВАННЯ БІТОВОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ СЕГМЕНТУ ЗОБРАЖЕННЯ	55
4.1	Умови ефективного використання механізмів кодування бітового опису сегментів кадру у складі технологій обробки зображень	55
4.2	Узгодження вимог щодо ефективного виявлення меж кодових слів та мінімізації кодової надмірності	64
4.3	Формування кодової конструкції бітового опису сегменту зображення на базі нерівновагових позиційних чисел	66
	ВИСНОВКИ.....	70
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	73
	ДОДАТОК А СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ	75
	ДОДАТОК Б ПУБЛІКАЦІЯ	85

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- FullHD – (full-high definition) – повноформатне відео та зображення високої роздільної здатності;
- UHD – (ultra-high definition) – формат відео та зображення надвисокої роздільної здатності;
- 4K – роздільна здатність класу UHD, що приблизно у 4 рази перевищує формат FullHD;
- RLE – (run-length encoding) – технологія кодування ланцюжків двійкових символів;
- JPEG – технологія кодування зображень;
- JPEG2000 – технологія кодування зображень;
- JPEG-LS – технологія кодування зображень без втрат;
- RAW – формат зображення, що містить необроблені дані, отримані з фотоматриці;
- PNG – (portable network graphic) - технологія кодування зображень;
- RGB – (red, green, blue) – трьохколірна модель;
- YCrCb – (y, chromatic red, chromatic blue) – яскравісно-хроматична колірна модель;
- MSE – (mean square error) – середньоквадратичне відхилення (СКВ);
- PSNR – (Puse to Signal Noise Rate) – пікове відношення сигнал/шум (ПВСШ);
- ДВП – дискретне вейвлет-перетворення;
- ДКП – дискретно-косинусне перетворення;
- УЗД – ультразвукове дослідження;
- LIDAR – (Light Detection and Ranging) - технологія вимірювання відстаней шляхом випромінювання світла (лазер) з наступним заміром часу повернення відбитого світла на ресивер;
- БПЛА – безпілотний літальний апарат;
- УФ – ультрафіолетовий діапазон;
- іЧ – інфрачервоний діапазон;
- BSQ – (Band Sequential) - режим послідовного запису зон у ході проведення ДЗЗ;
- BIL – (Band Interleaved by Line) - режим черезрядкового запису зон у ході проведення ДЗЗ;

BIP – (Band Interleaved by Pixel) – режим черезпіксельного запису зон у ході проведення ДЗЗ;

GIS – (Geoinformation System) – геоінформаційна система;

LOCO-I - (Low Complexity Lossless Compression for Images) – алгоритм стиснення без втрат.

ВСТУП

Розвиток аерокосмічної галузі починаючи з другої половини ХХ століття став одним як з прямих, так і з опосередкованих чинників розвитку технологічної сфери у широкому розумінні, що, у свою чергу, сприяло удосконаленню майже усіх прикладних та наукових галузей, важливих для людства.

При цьому, одна з головних ролей у розвитку багатьох галузей належить технологіям дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), що стали базисом для удосконалення геодезії та картографії, геології та гідрографії. ДЗЗ вивело на якісно новий рівень сферу екології та захисту природних ресурсів, дозволило принципово по-новому та більш ефективно вести розвідку корисних копалин, передбачати природні катаклізми та усувати наслідки стихійних лих. Важлива роль ДЗЗ належить оборонній сфері, аграрній сфері, навігації та метеорології.

На сьогодні понад 40% мешканців планети щоденно напряму, а близько 70% - опосередковано користуються результатами ДЗЗ.

Так, перша група користувачів щонайменше використовує сервіси та додатки GIS (навігація, пошук об'єктів, контроль стану доріг тощо) та прогнозу погоди.

У свою чергу, друга група користувачів також отримує означені попередньо відомості, але не у результаті власного запиту, а іншими каналами – радіо, телебачення, інформаційні табло, сайти інформаційного спрямування та портали.

Водночас, змін та розвитку зазнають і самі технології ДЗЗ, що викликано:

- потребами технологій інтелектуального аналізу даних, на які покладається завдання інтерпретації та подальшого використання забраних даних;
- розширенням функціоналу GIS-сервісів;
- взаємним інтегруванням багатьох технологічних галузей, що тією чи іншою мірою базуються на даних ДЗЗ, чи взаємодіють з системами, які таку інформацію використовують напряму.

Зараз ДЗЗ реалізовано на рівні наземного спостереження (незначний сегмент), авіамоніторингу та моніторингу з використанням космічних

апаратів. Два останніх формати ведення ДЗЗ, з одного боку, вносять найбільший відсоток даних щодо земної поверхні, а з іншого боку – мають ряд технологічних обмежень щодо можливості зберігання та/або передавання постійно зростаючих обсягів зафіксованих даних ДЗЗ.

Таким чином, дослідження шляхів розвитку та удосконалення методів ДЗЗ та їх утілення, з огляду на їх важливість, сьогодні є актуальним.

1. ЗАВДАННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

1.1 Головні завдання, які вирішує дистанційне зондування, та їхня специфіка

Одним з найбільш потужних інструментів дослідження поверхні Землі сьогодні є дистанційне зондування. При цьому, основні завдання, які виконує дистанційне зондування, зводяться до [1]:

- спостереження за земною поверхнею та станом атмосфери у реальному часі;
- збору інформації для побудови уточненої моделі поверхні на різних рівнях деталізації.

Якщо говорити більш детально, то дистанційне зондування застосовується у таких галузях, як:

- геодезія;
- геологія;
- оборона;
- екологія та метеорологія;
- агротехніка та ін.

При цьому, дистанційне зондування Землі може здійснюватися:

- наземними;
- авіаційними;
- космічними засобами.

У процесі зондування може бути застосовано значний перелік різнотипних апаратних засобів. Унаслідок цього робочий діапазон довжин хвиль, які можуть приймати засоби зйомки, варіюється від частин мікрометрів, що відповідає оптичному випромінюванню видимої області, до метрів на випадок використання радіохвиль.

У свою чергу, широко використовуються як активні, так і пасивні методи дослідження. Перша група методів орієнтована на застосування вимушеного випромінювання об'єктів спостереження, яке спричинюється впливом штучного джерела спрямованої дії. На відміну від такого підходу, пасивні методи базуються на використанні природно відбитого або

вторинного теплового випромінюванні об'єктів поверхні, що зумовлене наявністю сонячної активності.

На випадок використання космічних апаратів, а також авіації (літаки та БПЛА) для ведення дистанційного зондування застосовується оптичне та радіолокаційне обладнання.

Умовно ДЗЗ ведеться за такими напрямками, як [1, 2]:

- зондування поверхні;
- дослідження процесів гідросфери, сейсмоактивності та земних надр;
- моніторинг атмосфери та атмосферних явищ природного та штучного походження.

1.1.1 Зондування поверхні

Даний напрямок ДЗЗ є прикладом одного з найбільш важливих та затребуваних його застосувань. Дані, отримані таким чином, може бути використано для визначення фізичного стану поверхні, наприклад, лісу, пасовищ, дорожнього покриття тощо. Також сюди відноситься дослідження результатів діяльності людини – стан ландшафту у межах промислових зон та жилих секторів, стан сільськогосподарських територій і т. ін. (рис.1.1).

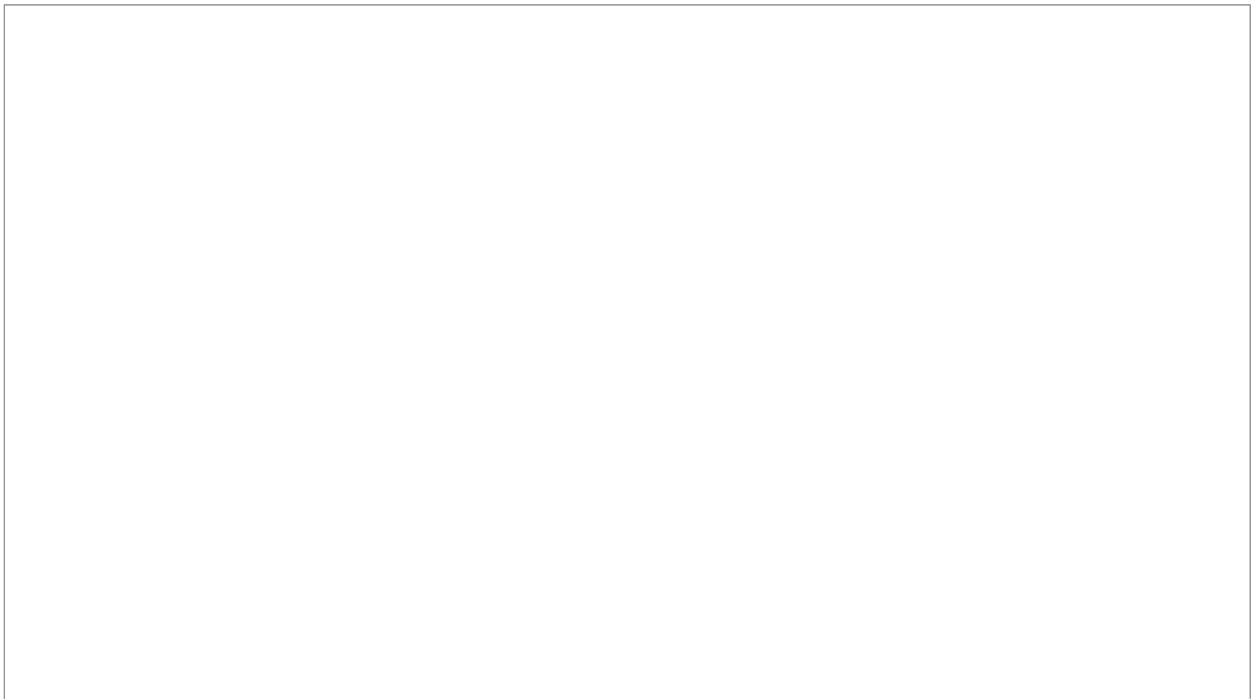


Рисунок 1.1 – Знімок земної поверхні, отриманий з літального апарату на висоті 2,5 км

У розрізі досліджень поверхні з точки зору геодезичних та геологічних завдань ведеться збір та уточнення відомостей відносно [1]:

- розміщених природних та штучних об'єктів;
- рельєфу поверхні, включаючи типи ґрунтів, їхній стан, висоту відносно рівня умовного нуля;
- рослинний покрив поверхні тощо.

У свою чергу, ведення ДЗЗ в інтересах профільних відомств, спрямованих на забезпечення безпеки держави ведеться збір інформації про стан стратегічних об'єктів та прилеглих територій, державного кордону, виконується моніторинг потенційно небезпечних зон – зокрема, зон високої соціальної напруженості та/або територій небезпечних виробництв. Більш детально це стосується:

- шляхопроводів;
- територій районування власних збройних сил та угруповань ймовірного або реального супротивника і прилеглих зон;
- промислових зон;
- електростанцій, ТЕЦ, ГЗК, хімічних комбінатів;
- адміністративних будівель тощо.

При цьому, ДЗЗ для рішення завдань агротехнічного спрямування включає у себе:

- моніторинг рослинності (зокрема, класифікацію типу культур, дослідження стану посівів, оцінка шкоди у наслідок природних або техногенних катаклізмів, аналіз та прогнозування врожайності
- дослідження ґрунтів (тип, характеристики, рівень ерозії, стан вологості, відображення практики обробки).

Дещо функціонально схожим з ДЗЗ агротехнічного спрямування є моніторинг лісового покриву та ідентифікація видів.

Карти лісового покриву можуть займати значні території, при цьому досить детально відображаючи виявлені характеристики території та їх зміни, що стосується типу рослинності, її висоти, щільності тощо.

1.1.2 Дослідження гідросфери, сейсмоактивності земної кори та рельєфу світового океану

Уточнення відомостей щодо особливостей поверхні океанського дна дає можливість не лише побудувати безпечний фарватер у прибережній зоні, але також виявити потенційно небезпечні природні утворення, такі як розломи та вулканічні хребти, що знаходяться на стадії утворення та активності [2, 3].

Це, у свою чергу, дозволить убезпечити морські судна, а також населення берегових територій у разі виникнення ймовірності катаклізмів, викликаних їхнім впливом.

У разі ж виникнення землетрусів, моніторинг сейсмоактивності дозволяє виявити джерело коливань та його інтенсивність, на базі чого далі сповістити відповідні відомства.

Окрім дослідження океанського рельєфу ДЗЗ дозволяє вести моніторинг підводних об'єктів (переміщення підводних човнів, сезонні міграції китів і т.ін.).

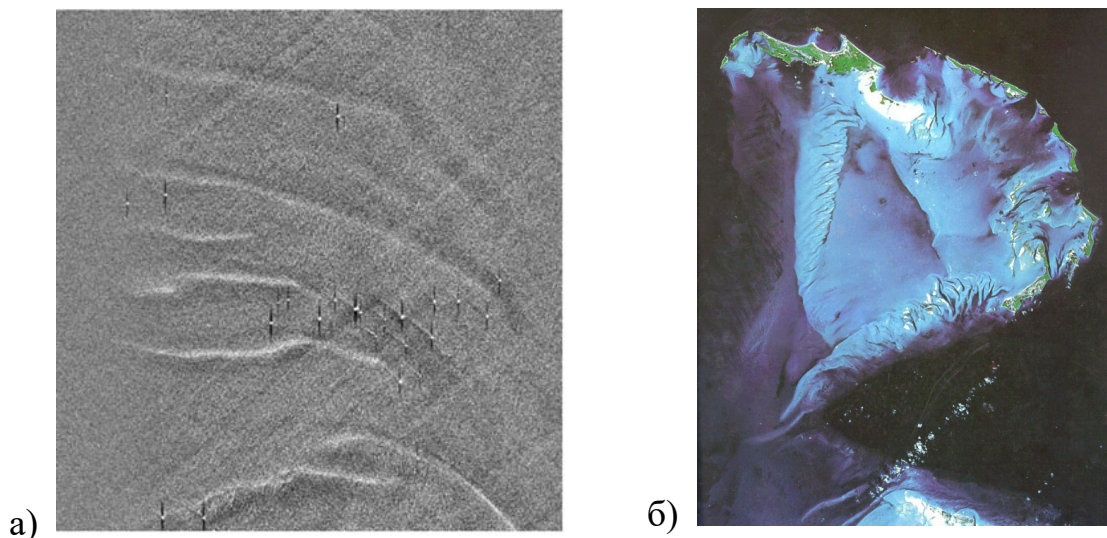


Рисунок 1.2 – Рельєф поверхні дна Північного моря а) та Багамської банки б)

1.1.3 Моніторинг атмосфери та атмосферних явищ природного та штучного походження

Окрім переліченого вище, ДЗЗ дає змогу виявити емісійний спектр хімічних речовин у атмосфері, за рахунок чого є можливим визначення їх концентрації [2].

Також визначається стан вологості атмосфери, її температурний стан та градієнти температури і вологості, що є важливим для метеорології та деяких класів екологічних досліджень.

Разом з тим, у ході проведення ДЗЗ за даним напрямком може бути виявлено факт переміщення літальних апаратів, їхній тип, швидкість та маршрути.

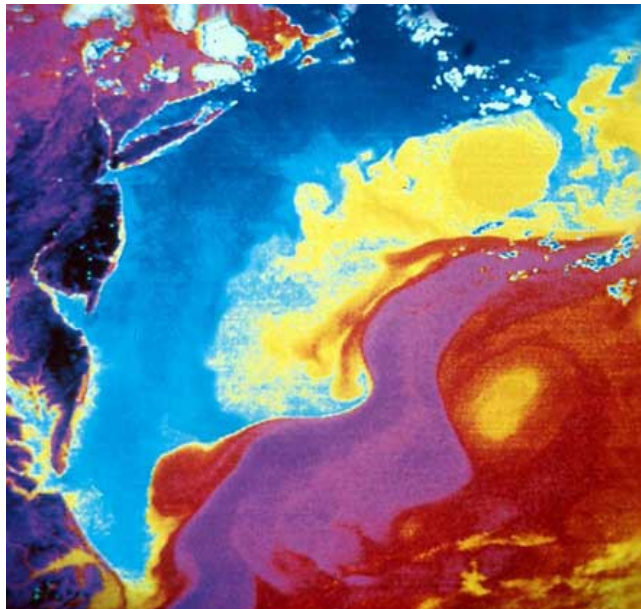


Рисунок 1.3 – Зйомка в інфрачервоному діапазоні розподілу температур на локальній ділянці течії Гольфстрім

1.2 Засоби ведення ДЗЗ

Умовно усі засоби, які застосовуються для ведення ДЗЗ з борту атмосферного чи космічного літального апаратів може бути поділено на [1]:

- радіолокаційні, включаючи лазерні, УЗД та ін.;
- оптичні.

До першої групи засобів належать:

1. Радари (Доплера, інтерферометричні тощо).
2. Лазерні та радіолокаційні висотоміри.
3. Акустичні датчики.
4. Системи LIDAR.
5. Радіометри, зокрема:
 - датчики мікровипромінювання;
 - датчики гамма-промінів.

У свою чергу, до оптичних пристроїв відносяться:

1. Пристрої фото- та відеофіксації видимого та інфрачервоного діапазонів.
2. Датчики ультрафіолетового випромінювання.

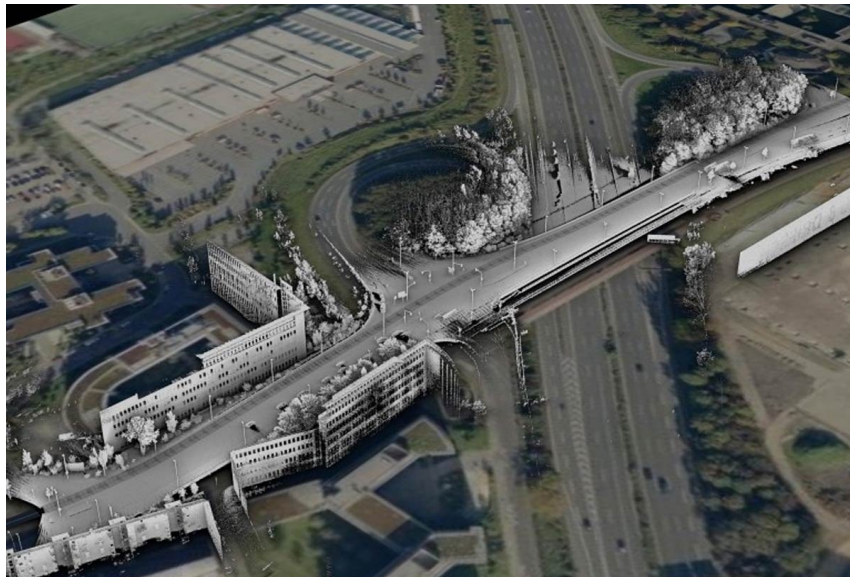


Рисунок 1.4 – Фрагмент просторової 3D моделі земної поверхні, отриманої у ході лазерного сканування з використанням БПЛА

Зараз найбільш ефективним є підхід на базі мультиспектральних систем, прикладами яких можуть бути, зокрема, Landsat та IKONOS.

Дані про земну поверхню, які отримуються з їх використанням, являють собою масиви зображень, отриманих для кількох довжин хвиль електромагнітного спектру, та видимого діапазону.

У такий спосіб отримується вичерпна та найбільш повна інформація щодо стану ділянки поверхні, яка досліджується, та об'єктів на ній.

Разом з тим, у деяких випадках може застосовуватися основний канал збору інформації та дублюючий (додатковий).

При цьому, фіксація даних здійснюється у різних ділянках спектру.

Такий підхід є доцільним на той випадок, коли існує ймовірність впливу сторонніх завад в одному з каналів.

Наприклад, якість даних, отриманих з використанням оптичних систем, може погіршуватися у наслідок впливу:

- стану атмосфери (рівень забруднення повітря, загазованість, вплив атмосферних умов);
- рівня освітленості поверхні.

Зазначені фактори можуть бути критичними критично для фото- та відеофіксації як видимого діапазону (400-780 нм), так і УФ (10-400 нм) та ІЧ (0,74 мкм-1-2 мм) – діапазонів відповідно. Тому разом з оптичною системою використовуються, наприклад, радари або радіометри.

У підсумку, виходячи з зазначеного недоліку, на сьогодні оптичні та радіолокаційні системи використовуються спільно. Також використовується фото- та відеофіксація видимого діапазону (основний канал) разом з фіксацією даних в ІЧ-діапазоні (дублюючий канал).

1.3 Фіксація та обробка даних ДЗЗ

Отже, як бачимо з аналізу попередньо викладених даних, у загальному випадку за результатами ДЗЗ формуються масиви інформації, отримані з використанням ряду різномірних систем, що функціонують паралельно.

При цьому, одиниця даних, отримана у ході ДЗЗ, являє собою зображення – двовимірний масив $m \times n$, що формується числами $I_{m,n}$ що відповідають рівню інтенсивності випромінювання, яке було прийнято тим чи іншим типом датчиків від ділянки поверхні чи об'єкту на ній, якому відповідає піксель утвореного зображення.

У загальному випадку величина $I_{m,n}$ є цілочисельною та інтерпретується як спектральна яскравість пікселя.

Відповідно, на той випадок, коли таке зображення отримується за участю кількох діапазонів спектру, для його опису використовується тривимірна структура розмірністю $m \times n \times k$, де k являє собою номер того чи іншого спектрального каналу.

У свою чергу, коректне зчитування зображень потребує відомостей відносно структури сформованих даних та роздільної здатності. Так, на сьогодні використовується 4 типи форматів даних, а саме [1-3]:

- BSQ, або послідовний запис зон (Band Sequential,);
- BIL, або черезрядковий запис зон (Band Interleaved by Line);
- BIP - запис зон з чергуванням за пікселями (Band Interleaved by Pixel);
- запис послідовності зон з ущільненням в файл з груповим кодуванням, може використовуватися ряд форматів, зокрема, формат JPEG.

На випадок використання BSQ окреме зональне зображення зберігається як окремий файл. Такий підхід є доцільним тоді, коли необхідність одночасної обробки усіх зон відсутня. Перевагами такого підходу є:

- швидке зчитування та візуалізація окремої зони;
- можливість доступу до будь-якої зони у будь-якому порядку.

На відміну від розглянутого підходу, формат BIL передбачає, що дані кожної з наявних зон розміщуються в одному файлі порядково відповідно до структури, принцип формування якої зображено рис. 1.5.

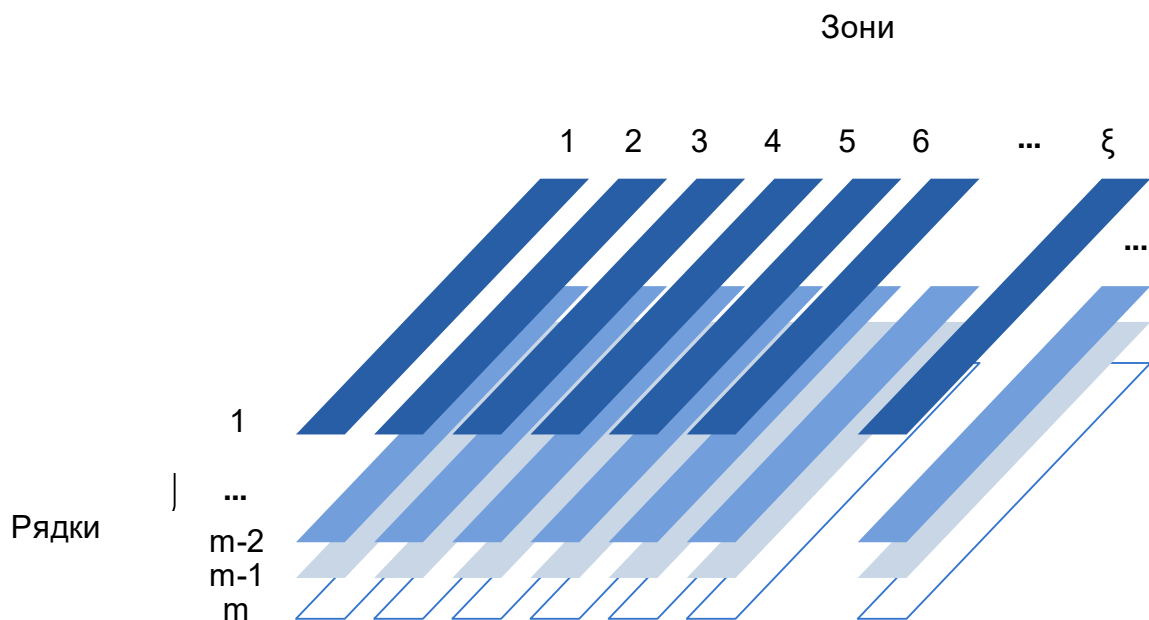


Рисунок 1.5 – Формат запису BIL даних ДЗЗ

Тобто, за принципом, зображеним рис. 1.5 спочатку виконується запис 1 рядку зон з 1 по ξ з наявних, потім – 2 рядку кожної з зон і далі таким же чином до m -х рядків усіх зон.

Зазначений спосіб представлення даних ДЗЗ є доцільним тоді, коли є необхідність проводити одночасний аналіз усіх зон.

При цьому, відповідно до VIP-запису, виконується послідовний попиксельний запис величин зональної яскравості (рис.1.6), що у загальних рисах аналогічно формату ВІЛ. Даний підхід ефективний у випадку необхідності попиксельного аналізу мультizonальних зображень.

Водночас, групове кодування сприяє зменшенню обсягу даних, отриманих за результатами ДЗЗ, що є актуальним для знімків високої роздільної здатності. При цьому, файли зображень для коректного виконання ряду технологічних операцій, таких, зокрема, як фільтрація, мають доповнюватися переліком службової інформації, а саме:

- статистичні дані (рівень дисперсії, найбільший та найменший рівень яскравості тощо);
- умови зйомки (фокусна відстань, чутливість, експозиція, витримка);
- відомості щодо картографічної проекції.

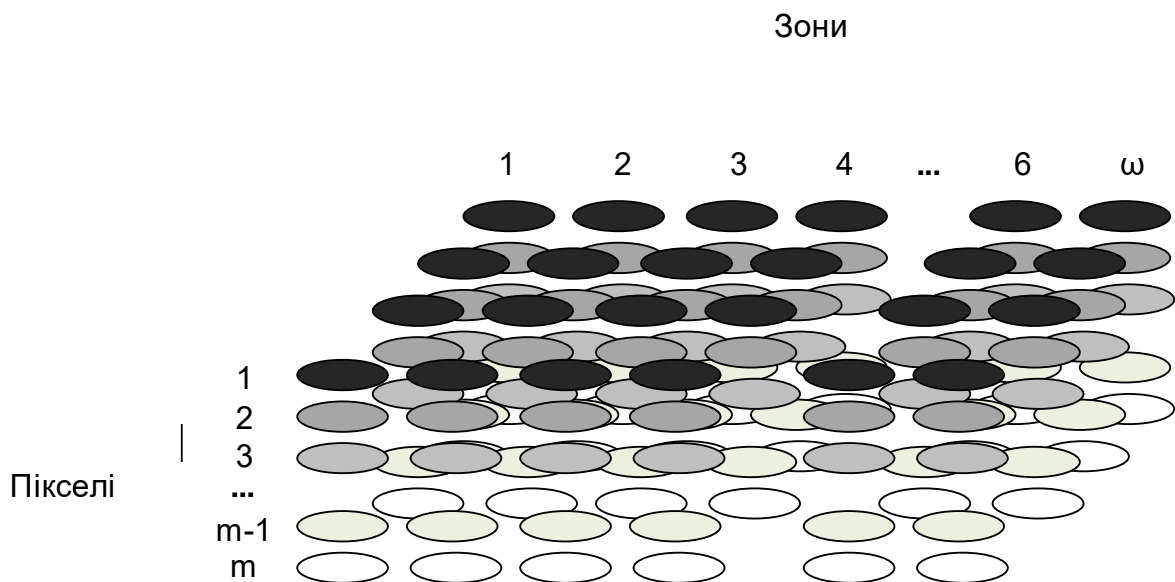


Рисунок 1.6 – Формат запису VIP даних ДЗЗ

Підсумкова якість даних, які збираються у ході ДЗЗ, визначається такими показниками, як:

- просторова роздільна здатність;
- спектральна роздільна здатність;
- радіометрична та часова роздільна здатність.

1.4 Показники, що впливають на рівень якості даних, отриманим за результатами ДЗЗ

Один з головних показників якості даних ДЗЗ, а саме - **просторова роздільна здатність**, є величиною, дещо відмінною від традиційного трактування даного терміну, прийнятого у галузі обробки графічної та відеоінформації [4].

Тут мова йдеться не про фактичний розмір розваження, а розмір пікселя (на земній поверхні), що являє собою елемент растрового зображення.

Зазвичай зараз пікселю відповідає ділянка поверхні від 1 метру до 4000-4500 метрів.

У свою чергу, **радіометрична роздільна здатність** є показником, який свідчить про те, яку кількість рівнів сигналу можуть розпізнавати сенсори.

Сьогодні застосовуються сенсори, які здатні фіксувати від 256 градацій, до 16384 градацій рівня сигналу. Це, у свою чергу, відповідає від 8 до 14 біт/піксель візуалізованого радіометричного зображення.

Наступний якісний показник, **часова роздільна здатність**, інтерпретується як частота проходження літального апарату, за допомогою якого виконується ДЗЗ, над досліджуваною ділянкою поверхні.

Даний показник є більш критичним для космічних апаратів, оскільки у їхньому випадку моніторингу може підлягати зона, для якої суттєвим буде вплив викривлення поверхні Землі.

Це проявляється у тому, що центральна частина отриманих знімків не матиме викривлень, доті як по мірі руху до його периферії рівень геометричних викривлень зростатиме.

Для усунення викривлень такого роду застосовуються процедури **фотограметрії**, ефективність якої напряму залежить від часової роздільної здатності.

Нарешті, *спектральна роздільна здатність* – це можливість системи сприймати той чи інший діапазон частот усього можливого спектру, а також її чутливість.

Наприклад, для випадку системи Landsat сприймається діапазон, що включає у себе 7 спектральних ділянок – від 0,07 до 2.1 мкм, що, як бачимо, включає у себе також ІЧ-діапазон.

Водночас, космічні апарати класу Earth Observing-1 та їм подібні обладнані сенсорами, які можуть фіксувати 220 спектральних смуг, що відповідає діапазону довжин хвиль 0,4-2.5 мкм. При цьому, рівень чутливості сенсору складає від 0,1 до 0,11 мкм.

Таким чином, розглянувши завдання, які виконує ДЗЗ, а також засоби, які при цьому використовуються, можемо зробити такі попередні висновки:

- ДЗЗ на сьогодні широко застосовується для ведення досліджень у багатьох галузях діяльності людини;
- дані, отримані за результатами ДЗЗ, являють собою масиви зображень – як у видимому спектрі, так і у інших діапазонах; таке зображення являє собою матрицю пікселів різного рівня спектральної яскравості, кожному з яких відповідає елементарна ділянка земної поверхні;
- найбільш вичерпну інформацію відносно досліджуваної ділянки поверхні може бути отримано у наслідок мультиспектрального зондування, тобто, у підсумку застосування такого підходу одній ділянці буде відповідати щонайменше деяка кількість зображень, що рівняється кількості каналів отримання даних та доступним їм спектральним діапазнам.

Водночас, на сьогодні відносно всього діапазону завдань, які покладено на заходи з ДЗЗ, висуваються ряд вимог щодо показників просторової, спектральної та радіометричної роздільної здатностей для забезпечення якості отримуваних даних [2].

При цьому, збільшення хоча б одного з перелічених показників веде до зростання кількості біт, необхідних для представлення зображень, які одержує система ДЗЗ.

Разом з тим, вимоги щодо збільшення часової роздільної здатності спричинюють утворення великої кількості зображень однієї ділянки поверхні у кожному з діапазонів фіксації.

Тобто, обсяг підсумкових даних відносно ділянки поверхні, які необхідно передати у центр обробки, багаторазово зростає.

У той же час, розвиток GIS-систем, впровадження систем інтелектуальної обробки даних, необхідність моніторингу ділянок з великим скупченням об'єктів у зоні спостереження накладає додаткові вимоги щонайменше щодо просторової роздільної здатності знімків. Зрозуміло, що для таких умов прийнятною є роздільні здатності UHD-порядку, значно вищі, ніж 4K, не кажучи вже про FullHD.

Це, у свою чергу, веде до:

- зростання розміру файлу для збереження знімку;
- необхідності розширення файлової системи для тимчасового зберігання зібраних даних;
- необхідності забезпечення високого рівня пропускної спроможності каналу зв'язку до центру збору та обробки даних.

Деякою мірою означену проблематику може бути усунено шляхом застосування стиснення зображень.

Так, вага зображення, яке кодовано з використанням технології JPEG, потребує для опису до 30 разів менше об'єму біт, ніж для випадку RAW зображення [5].

До того ж, з огляду на необхідність разом з безпосередньо даними зберігати відомості про умови зйомки, також доцільним для використання є формат JPEG, оскільки він дає змогу автоматично фіксувати та зберігати означену службову інформацію у відповідних полях файлу без необхідності додаткового та окремого запису зовні.

Однак, допустима межа коефіцієнту Ξ_{comp} стиснення для випадку ущільнення знімків ДЗЗ є суттєво нижчою, що зумовлюється тим, що принцип JPEG-обробки передбачає втрату деякої частини інформації, що для зображень, у яких піксель відповідає ділянці земної поверхні, є неприйнятним [2, 4].

На сьогодні відсутній єдиний стандарт, який би визначав вимоги щодо рівня якості зображень, кодованих за тим чи іншим алгоритмом.

Це пов'язано з тим, що у ряді випадків, коли для зображення JPEG забезпечується показник PSNR на рівні 35-40 дБ ($MSE \approx 0$), рівень втрат може бути критичним для деяких систем інтелектуальної обробки, та може зумовити їхнє некоректне функціонування [1].

На той же випадок, коли застосовується кодування на базі технології JPEG-LS (без втрат), величина Ξ_{comp} не забезпечує суттєвого скорочення вихідної кількості біт для представлення зображення [6, 7].

Розглянемо для прикладу фрагмент знімку високої роздільної здатності (рис.1.7). У даному випадку у результаті фотофіксації ділянки міста розміром 5х4,5 км створено зображення розміром 4000х3458. При цьому вага утвореного RAW-зображення дорівнює 40 Мб.

Далі припустимо, що найгіршому випадку має місце вплив недосконалості пристроїв оптичної фіксації, що спричинило викривлення зображення на периферії, та змусило виконати п знімків ділянки для виконання фотограметрії.

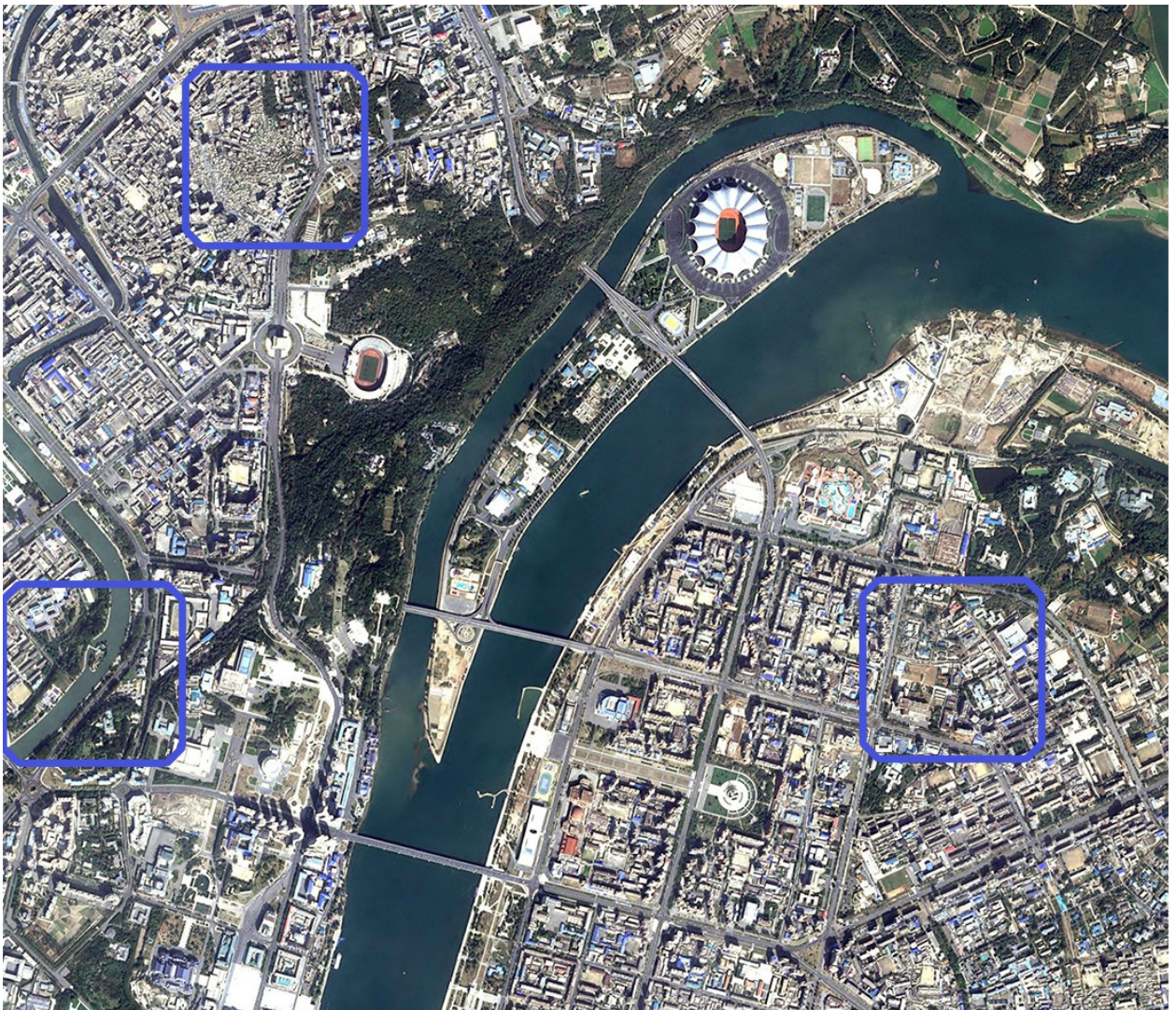


Рисунок 1.7 – Вихідний знімок земної поверхні з виділеними тестовими зонами (40 Мб, 4000х3458)

Отже, для зберігання усіх знімків лише цієї ділянки поверхні потребується обсяг біт, рівний $R = n \times 40$ Мб.

Зрозуміло, що за таких умов доцільним є скорочення кількості біт для опису фотографічних даних, наприклад – застосувавши JPEG стиснення.

За результатом цього кодований файл матиме вагу приблизно 2 Мб, але якість зображення порушиться, що можна бачити з порівняння ділянок високої насиченості об'єктами поверхні, як показано рис. 1.8 а-в, та 1.9 а-в.



Рисунок 1.8 – Тестові ділянки високої насиченості об'єктами вихідного (RAW) знімку земної поверхні



Рисунок 1.9 – Тестові ділянки високої насиченості об'єктами знімку земної поверхні, стисненого на базі JPEG з рівнем якості 10

Якщо стиснення вихідного файлу виконувати з використанням, наприклад, PNG формату, утвориться файл, розмір якого буде у загальному випадку близький за вагою до початкового RAW [8].

Так, у нашому випадку це 20,6 Мб. Тому доцільніше для стиснення знімків застосовувати версію JPEG, яка передбачає кодування без втрат.

При цьому, у випадку використання алгоритму JPEG-LS вага одного знімка рівняється 17,4 Мб.

Такий підхід є, безумовно, ефективнішим, ніж застосування PNG. Проте в умовах, коли необхідно постійно збільшувати просторову роздільну здатність знімків, продуктивність JPEG-LS є недостатньою.

Відтак, необхідно дослідити підходи, що потенційно дають змогу збільшити коефіцієнт стиснення без втрат якості. Для цього спочатку виконаємо аналіз особливостей даного алгоритму.

У перспективі можливо розглядати як можливу альтернативу – застосування технології JPEG2000 у режимі виконання ДВП без втрат та квантуванням на базі одиничних матриць, що не вносять викривлення та не сприяють скороченню вихідної кількості даних. Проте, на сьогодні, з причини недостатньої поширеності даної платформи JPEG2000, більш доцільним є дослідження можливостей JPEG-LS та JPEG у режимі кодування без втрат [8, 9]

2. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЇ JPEG-LS ТА LOSELESS РЕЖИМУ JPEG

2.1 Загальні можливості технології JPEG-LS

Функціонально JPEG-LS базується на використанні алгоритму LOCO-I, тобто - LOw COmplexity LOssless COmpression for Images (стисненні зображень з низькою складністю) [8, 9, 10].

Технологія дозволяє виконувати стиснення зображень різних типів, наприклад, як:

- повноколірні;
- напівтонові;
- бінарні.

При цьому, JPEG-LS передбачає можливість кодування зображень у таких режимах, як:

- без втрат (lossless);
- з лімітованими втратами (near lossless), для якого може бути задано ступінь відмінності вихідного та відновленого пікселів зображення.

Характерними особливостями JPEG-LS є:

- суттєва залежність коефіцієнту Ξ_{comp} стиснення від того, до якого саме типу належить вихідне RAW-зображення;
- деяке зростання коефіцієнту Ξ_{comp} стиснення при збільшенні розміру вихідного зображення.

Так, на той випадок, коли зображення, наведене на рис.1.7, було отримано у режимах бінарної, напівтонової та повно колірної зйомки, його вихідна вага RAW-масиву є незмінною, проте підсумкова вага та, відповідно, коефіцієнт стиснення, будуть такими, як демонструє табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Величини коефіцієнту стиснення та підсумкової ваги зображення (40 Мб RAW) у наслідок кодування на базі JPEG-LS

Режим	Повноколірний	Напівтоновий	Бінарний
Показни			
к			
Розмір кодованого файлу, Мб	17,4	17,4	1,6
Ξ_{comp}	2,2	2,2	25

Таким чином, найбільше ущільнення, що приблизно відповідає ущільненню у разі застосування JPEG, досягається для бінарних знімків, тобто, таких, які описуються 1 розрядом для представлення пікселя.

Водночас, застосовуваність бінарних знімків як для ДЗЗ у видимому, так і у інших діапазонах фіксації, зараз є досить обмеженою, при цьому існує тенденція до їх повного скорочення. Окрім цього, коефіцієнт Ξ_{comp} стиснення для випадку обробки 8-бітних RAW-зображень (256 градацій відтінку/піксель), є у середньому більшим, ніж для напівтонового зображення, кожен піксель якого описано за допомогою 24 біт.

У випадку ж обробки 24-розрядного повноколірного та на півтонового RAW- знімків коефіцієнт стиснення є незмінним та приблизно дорівнює 2.

2.2 Архітектура JPEG-LS

Узагальнену схему алгоритму JPEG-LS ілюструє рис.2.1

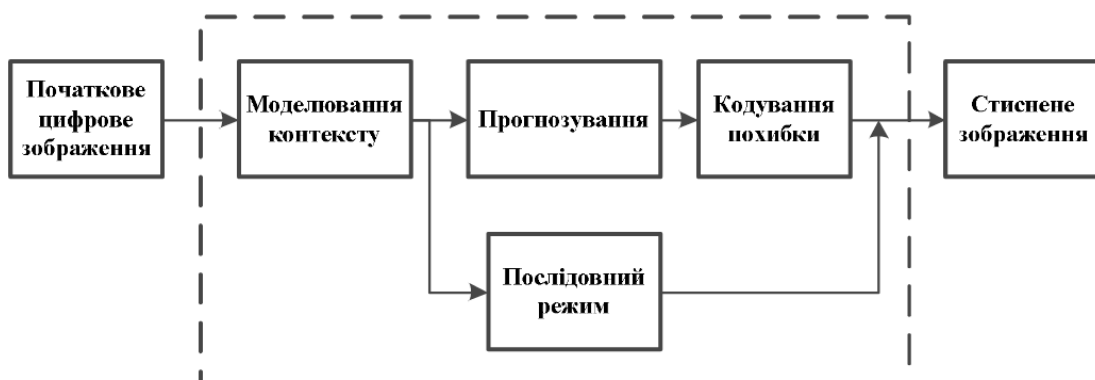


Рисунок 2.1 – Узагальнена схема алгоритму JPEG-LS на рівні ключових технологічних етапів

На відміну від JPEG, JPEG-LS виконує перетворення у просторі RGB, замість YCrCb.

Аналіз рис. 2.1 показує, що алгоритм містить у собі такі ключові кроки, як:

- моделювання;
- прогнозування;
- безпосередньо кодування.

При цьому, на відміну від класичного JPEG, до його складу входять механізми побудови прогнозу а також контекстного моделювання. Так, у ході побудови прогнозу пікселя x беруть участь пікселі a-d, як показано рис.4.2.

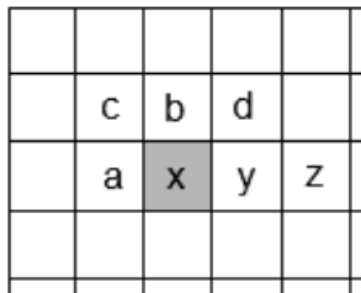


Рисунок 4.2 – Пікселі, на базі яких визначається контекст для поточного (x)

При цьому, виходячи з наявного контексту, на етапі кодування може бути застосовано такі режими обробки, як:

- run mode, або послідовний режим;
- regular mode або регулярний.

Вибір для обробки run mode застосовується тоді, коли справедливим є наступне співвідношення:

$$y = z, \quad (2.1)$$

В інших же випадках буде застосовано режим regular mode.

На випадок застосування regular mode, у ході кодування здійснюється сканування рядку, що кодується у поточний час, починаючи пікселем x (рис.2.3). При цьому шукається серія пікселів з максимальною довжиною, яка збігається з пікселем a. Таким чином, на базі поточного рядка зображення формується масив однакових пікселів, значення кожного з яких відповідає контекстному пікселю a. Далі виконується процедура кодування довжини сформованого масиву.

У цьому режимі кодування прогноз величини P_x (прогнозованого пікселя x) потребує для обчислень відомостей щодо числових значень a , b і c . Окрім самого прогнозу, на даному етапі кодування виконується розрахунок величини похибки прогнозу (Δx), що може бути обчислена як:

$$\Delta x = x - P_x. \quad (2.2)$$

На наступному кроці обробки виконується корекція значення Δx , яке далі підлягає кодуванню на базі алгоритму Голомба. У свою чергу, код Голомба формується на базі значень пікселів a , b , c , d а також масиву величин Δa , Δb , Δc та Δd , які їм відповідають.

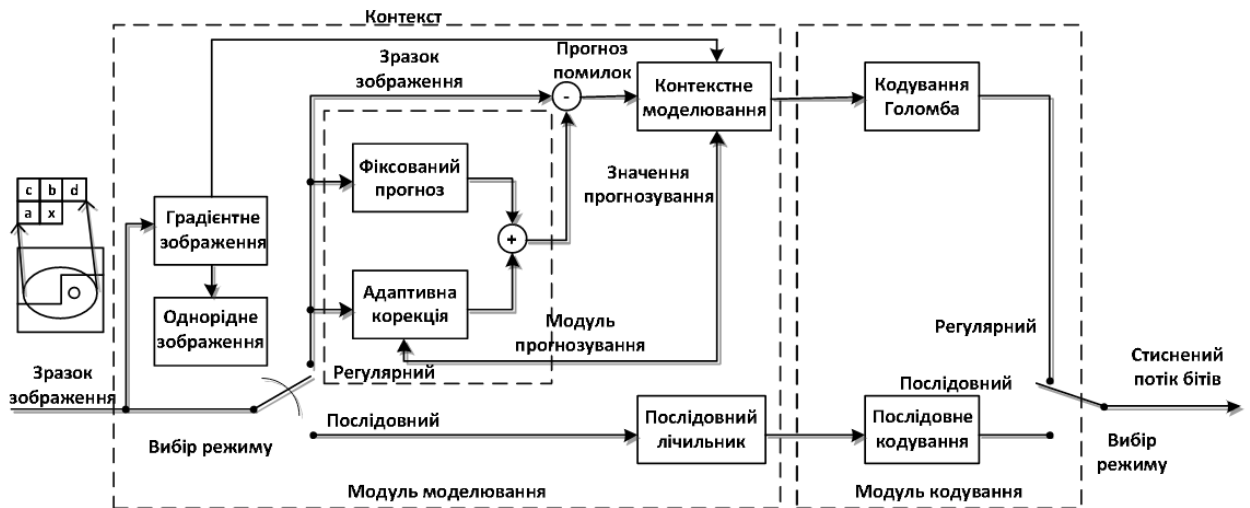


Рисунок 2.3 – Схема функціонування алгоритму JPEG-LS

У свою чергу величина прогнозованого значення P_x пікселя x визначається залежно від значень a , b , та c відповідно до наступної системи нерівностей:

$$P_x = \begin{cases} \min(a, b) & | c \geq \max(a, b); \\ \max(a, b) & | c \leq \min(a, b); \\ a + b - c & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.3)$$

Іншими словами, у рамках LOCO-I у процесі прогнозування виконується вибір одного з трьох типів прогнозу, а саме:

- величина b за тих умов, що вертикальне ребро локалізовано зліва щодо поточного поточної позиції;
- величина a тоді, коли має місце горизонтальне ребро вище поточної позиції пікселя;
- сума величин $a+b-c$, в усіх інших випадках.

Таким чином, ключовими механізмами скорочення кількості біт для опису графічного файлу у рамках технології JPEG-LS є кодування довжин серій (run mode) та стиснення на базі алгоритму Голомба (regular mode). При цьому, етапи прогнозування та побудови контекстної моделі є сервісними (підготовчими) по відношенню технологічного етапу кодування, що сприяють збільшенню його ефективності.

Отже, у даному випадку стиснення вихідного зображення здійснюється за рахунок скорочення його ймовірно-статистичної надмірності.

При цьому, як було виявлено раніше, коефіцієнт Ξ_{comp} стиснення для повноколірних знімків, одержаних у ході ДЗЗ, який забезпечується JPEG-LS, приблизно дорівнює 2 та є з незначними відмінностями аналогічним для випадку кодування зображень, отриманих у ході зйомки поверхні з одними і тими ж величинами роздільних здатностей.

Таким чином, в умовах постійного збільшення роздільної здатності знімків та зростанні вимог до їх якості необхідно застосовувати більш ефективну альтернативу технології JPEG-LS

У свою чергу, такою альтернативою теоретично може бути класичний JPEG за умови його використання у режимі *loseless*, тобто, без втрат.

2.3 Особливості режиму *loseless* технології JPEG

На відміну від JPEG-LS, JPEG є технологією, яка орієнтована на обробку зображень не у просторовому, а у спектральному форматі опису. Для цього відносно сегментів вихідного зображення $s_{x,y}^{(p)}$ розміром 8×8 пікселів попередньо виконується операція ортогонального перетворення, після чого подальші дії виконуються відносно сегментів $s_{x,y}^{(p) \prime}$ у спектральному представленні [5, 10, 12-14].

У свою чергу, алгоритмом, за яким виконується ортогональне перетворення, є ДКП – дискретне косинусне перетворення.

При цьому, стиснення може досягатися на трьох технологічних етапах JPEG-перетворення, зокрема:

- унаслідок прорідження кількості колірно-різницевих компонент у межах сегменту $s_{x,y}^{(p)}$;
- на етапі квантування;
- на етапі ймовірнісно-статистичного кодування.

У свою чергу, косинус не є цілочисельною функцією. Тому навіть на випадок, що відносно сегменту $s_{x,y}^{(p)}$ не було задіяно квантування та прорідження кількості колірно-різницевих компонент, а стиснення забезпечувалося виключно за рахунок ймовірнісно-статистичного кодування (за Хафманом або арифметичним), справедливим буде наступний вираз:

$$s_{x,y}^{(p)} \neq \bar{s}_{x,y}^{(p)}, \quad (2.4)$$

де $\bar{s}_{x,y}^{(p)}$ - відновлений сегмент зображення.

Разом з тим, ступінь відмінності Δs , що утворилася між вихідним $s_{x,y}^{(p)}$ та відновленим $\bar{s}_{x,y}^{(p)}$ сегментом зображення, кодованим за технологією JPEG, у загальному випадку є незначною. Тобто, виконується наступна умова:

$$|\Delta s| = s_{x,y}^{(p)} - \bar{s}_{x,y}^{(p)} < |\Delta s|_{\text{critical}}, \quad (2.5)$$

де $|\Delta s|_{\text{critical}}$ - величина критичного відхилення реконструйованих даних від оригіналу.

Це дає потенційну можливість використання *loseless* JPEG як альтернативу JPEG-LS.

При цьому, у результаті кодування вихідного зображення 1.7 у режимі *loseless*, тобто, з вихідним обсягом інформації про колір та без квантування отримано коефіцієнт стиснення рівний $\Xi_{\text{comp}} = 2,6$.

Таким чином, у межах *loseless* JPEG ключовим механізмом забезпечення скорочення початкової кількості біт є ймовірнісно-статистичне кодування.

Отже, як для *loseless JPEG*, так і для *JPEG-LS* існує теоретична можливість збільшення величини Ξ_{comp} модифікацією алгоритму кодування без втрат.

У той же час, архітектура *JPEG-LS* передбачає 2 режими а відтак – 2 паралельні алгоритми стиснення. Тому з позицій внесення мінімальних змін у базову технологію більш доцільним є дослідження можливості модифікації платформи *JPEG*.

2.4 Напрямки модифікації платформи *JPEG*

Технологічний етап стиснення без втрат, який містить у собі технологія *JPEG*, як і у випадку *JPEG-LS* спрямований на усунення ймовірнісно-статистичної надмірності. Даний етап може бути реалізовано на базі алгоритму Хафмана, або арифметичного кодування [12, 15].

Також спільно з даними алгоритмами стиснення застосовується процедура трансформування масиву компонент сегменту $s_{x,y}^{(p) \prime}$ у вектор та RLE-кодування, які, у сутності, виконують функції контекстного моделювання, яке передує самому етапові стиснення безпосередньо.

При цьому, на етапі стиснення за Хафманом, або арифметичного, кодується компонентна форма опису сегменту $s_{x,y}^{(p) \prime}$. Такий підхід дозволяє урахувати особливості розподілу величин компонент, а саме – зменшення їх значень у напрямку від низьких до високих частот, та ймовірність існування певної кількості нульових ВЧ-компонент.

Разом з тим, означений підхід повністю ігнорує можливу надмірність структурного представлення сегменту $s_{x,y}^{(p) \prime}$, як матриці компонент. Це зумовлено тим, що компонентний (десятковий) опис сегменту не дозволяє жодним чином виконувати пошук такої надмірності, та не надає інструментів, за допомогою яких структурну надмірність може бути скорочено.

Таким чином, має сенс дослідити підхід, у рамках якого передбачається кодування сегментів $s_{x,y}^{(p) \prime}$ зображення у двійковому, тобто, бітовому форматі

опису [16]. Такий підхід розглядає сегмент $s_{x,y}^{(p) \prime}$ як тривимірну структуру розміром $u \times v \times \eta$, де η - кількість розрядів на опис компоненти. Це створює умови для можливості виявлення і подальшого кодування довжин двійкових серій у межах усіх частотних зон сегменту. Тобто, даний підхід потенційно здатен забезпечити коефіцієнт стиснення на рівні вищому, ніж дозволяють існуючі методи.

Для того, щоб спростувати чи підтвердити означену гіпотезу, далі виконаємо дослідження підходу, орієнтованого на кодування бітового представлення сегментів зображень.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДХОДУ, ОРІЄНТОВАНОГО НА КОДУВАННЯ СЕГМЕНТІВ ЗОБРАЖЕННЯ У БІТОВОМУ ФОРМАТІ ОПИСУ

3.1. Формування вимог до характерної ознаки, яка відображає закономірності формуванні ланцюжків довжин двійкових серій

Як зазначалося раніше, можливості сучасних алгоритмів стиснення, орієнтованих на зниження рівня надмірності ймовірно-статистичного типу, обмежені у плані можливості подальшого збільшення коефіцієнта стиснення без суттєвого падіння якості реконструйованих даних.

Виходячи з цього, являють собою науковий та практичний інтерес підходи, що передбачають скорочення надмірності тих типів, які ігноруються традиційними методами кодування.

Відтак, у першу чергу має сенс виконати аналіз можливості досягнення росту коефіцієнта стиснення довжин двійкових серій за рахунок зменшення, або взагалі усунення надмірностей структурного опису відеосегментів.

Щоб вирішити означене вище завдання, спочатку маємо знайти ті чи інші закономірності у формуванні ланцюжків довжин двійкових серій. Для цього, у свою чергу, потрібно виявити характерну ознаку, для якої справедливо:

1) ознака залишається достатньо інформативною для найгіршого випадку, коли довжини двійкових серій формуються у межах сусідніх бітових площин;

2) низька ресурсоемність, або мінімізація обчислювального навантаження, тобто, знаходження закономірностей за даною характерною ознакою повинно витратити мінімум обчислювальних операцій;

3) можливість створення умов для усунення надлишковості структурного опису на рівні довжин двійкових серій за умови високої ймовірності перепадів у двійковій послідовності (тобто, тоді, коли довжина серії буде наближатися до 1).

Отже, керуючись зазначеними вимогами до характерної ознаки, розглянемо підхід, що має на меті зменшення надлишковості бітового

представлення спектральних сегментів $s_{x,y}^{(p) \prime}$ зображення, отриманих унаслідок виконання ДКП відносно вихідних сегментів $s_{x,y}^{(p)}$.

Спочатку проаналізуємо бітовий опис сегменту $s_{x,y}^{(p) \prime}$ за найгірших умов, таких, що відповідають першій вимозі до методу кодування.

3.2 Оцінка потенційної продуктивності підходу до кодування сегментів зображення на базі їх бітового опису за найгірших умов

У загальному випадку потенційна можливість зниження надмірності визначається розмірами ланцюжків двійкових елементів, а також кількістю переходів між двійковими серіями [17].

У цьому сенсі більш складною є оцінка бітового представлення сегментів $s_{x,y}^{(p) \prime}$, яке здійснюється умовно вертикально – тобто, у напрямку бінарного опису компонент $s^{(p)}_{x,y}$. На цей випадок має місце кодування вертикально орієнтованих біт, що формуються у послідовності вигляду $\{s^{(p)}_{x,y}^{(v_{bp})}, s^{(p)}_{x,y}^{(v_{bp}-1)}, \dots, s^{(p)}_{x,y}^{(1)}\}$, де $x = \overline{1, u}$, $y = \overline{1, v}$ (рис.3.1).

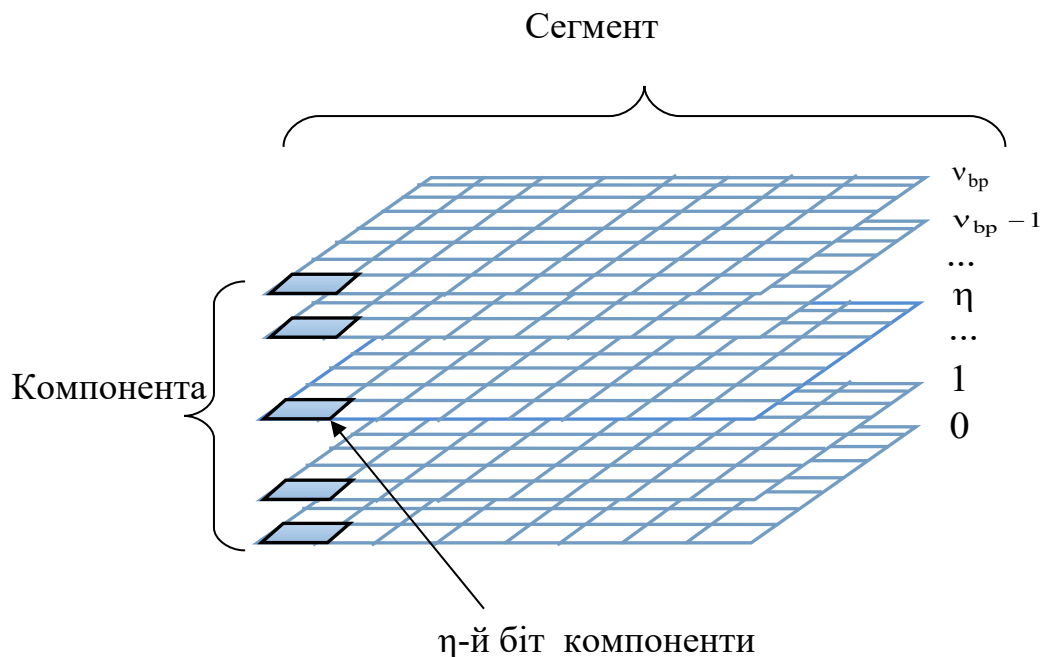


Рисунок 3.1 – Сутність бітового опису компонент сегменту відеокадру

Зазначені послідовності біт являють собою двійкове представлення компонент $s(p)_{x,y}$ сегменту $s_{x,y}^{(p)}$, що може бути описано виразом:

$$s(p)_{x,y} = s(p)_{x,y}^{(v_{bp})} 2^{v_{bp}-1} + s(p)_{x,y}^{(v_{bp}-1)} 2^{v_{bp}-2} + \dots \\ \dots + s(p)_{x,y}^{(v_{bp}-\eta)} 2^{v_{bp}-\eta-1} + \dots + s(p)_{x,y}^{(2)} 2 + s(p)_{x,y}^{(1)}, \quad (3.1)$$

де $s(p)_{x,y}^{(v_{bp}-\eta)}$ - $(v_{bp}-\eta)$ -й двійковий елемент $(x;y)$ -ї компоненти p -го сегменту $s_{x,y}^{(p)}$, для якого справедливо $(v_{bp}-1) \geq \eta \geq 0$;

$2^{v_{bp}-\eta-1}$ - ваговий коефіцієнт двійкового елемента $s(p)_{x,y}^{(v_{bp}-\eta)}$;

v_{bp} - кількість бітових площин, (обсяг розрядів, що використовуються для представлення компонент сегменту $s_{x,y}^{(p)}$).

У процесі опрацювання вертикальних послідовностей $\{s_{x,y}^{(v_{bp})}, s_{x,y}^{(v_{bp}-1)}, \dots, s_{x,y}^{(1)}\}$ елементів бітового представлення сегменту $s_{x,y}^{(p)}$ здійснюється виявлення довжин двійкових серій, в результаті чого утворюється послідовність $\{\ell_{x,y}^{(1)}, \dots, \ell_{x,y}^{(\theta)}, \dots, \ell_{x,y}^{(\Theta)}\}$.

У наведеній послідовності $\ell_{x,y}^{(\theta)}$ являє собою довжину θ -ї двійкової серії, виявленої для двійкового представлення $(x;y)$ -ї компоненти $s(p)_{x,y}$ сегменту $s_{x,y}^{(p)}$.

У свою чергу, процес виявлення двійкових серій буде виконуватися, починаючи з елемента $s(p)_{x,y}^{(v_{bp})}$.

Припустимо, що елементу $s(p)_{x,y}^{(v_{bp})}$ передуює серія нульових елементів. При цьому довжина кожного такого елемента дорівнює 1.

У цьому випадку, якщо $s(p)_{x,y}^{(v_{bp})} = 1$, то довжина серії $\ell_{x,y}^{(1)} = 1$, в інакшому випадку - $\ell_{x,y}^{(1)} \geq 2$.

Очевидно, що коли величина $2^{v_{bp}}$ перевищуватиме значення коду $E_{x,y}$, утвореного для $(x;y)$ -ї послідовності довжин двійкових серій, надлишковість зменшуватиметься, як зазначає наступна нерівність [16]:

$$E_{x,y} < 2^{v_{bp}}, \quad (3.2)$$

як наслідок того, що тут для опису послідовності довжин двійкових серій необхідно задіяти менший обсяг розрядів ніж тоді, коли виконується представлення початкової компоненти $s(p)_{x,y}$ сегменту $s_{x,y}^{(p) \prime}$. При цьому, код $E_{x,y}$, що являє собою десяткове число, відіграє роль кодового слова.

Якщо при цьому зробити припущення про те, що всі значення довжин серій рівні 1, $\ell_{x,y}^{(\theta)} = 1$, $\theta = 1, \overline{\Theta}$ (вимога 3), на цей випадок буде спостерігатися однакова кількість змін δ_{bt} між двійковими послідовностями та їх найбільшою кількістю, а саме:

$$\delta_{bt} = v_{bp}, \quad (3.3)$$

тоді, відповідно, можна стверджувати про рівність між кількістю серій а також необхідним обсягом розрядів на опис компоненти, що еквівалентно виразу:

$$\Theta = v_{bp}. \quad (3.4)$$

За таких умов послідовність серій $\{\ell_{x,y}^{(1)}, \dots, \ell_{x,y}^{(\theta)}, \dots, \ell_{x,y}^{(\Theta)}\}$ належатиме простору бінарних чисел. Вони, в свою чергу, відображають E_{mn} у вигляді позиційного числа, якому відповідає основа 2, як зазначає наступний вираз:

$$E_{x,y} = \ell_{x,y}^{(1)} 2^{\Theta-1} + \ell_{x,y}^{(2)} 2^{\Theta-2} + \dots + \ell_{x,y}^{(\theta)} 2^{\Theta-\theta} + \dots + \ell_{x,y}^{(\Theta-1)} 2 + \ell_{x,y}^{(\Theta)}. \quad (3.5)$$

При цьому, справедливою є нерівність $E_{x,y} > s(p)_{x,y}$, тобто, кількість біт кодового представлення компоненти перевищуватиме її фактичну величину. Причиною цього є те, що для максимальної кількості двійкових переходів $\frac{1}{2}$ усього обсягу елементів $s(p)_{x,y}^{(\eta)}$ є нульовими.

У той же час, заздалегідь відомо про те, що мінімальне значення довжини серії дорівнює 1.

Відповідно, за таких умов величина динамічного діапазону довжин серій двійкових елементів за замовчуванням може бути знижена на 1 [17].

У результаті такої операції буде одержано величину коду E'_{mn} , що дорівнює 0, а саме:

$$E'_{x,y} = (t_{x,y}^{(1)} - 1)2^{\Theta-1} + \dots + (t_{x,y}^{(\Theta)} - 1)2^{\Theta-\Theta} + \dots + (t_{x,y}^{(\Theta-1)} - 1)2 + (t_{x,y}^{(\Theta)} - 1) = 0. \quad (3.6)$$

Таким чином, буде виконуватися нерівність $E_{mn} < s(p)_{x,y}$. При цьому також нерівність (3.2), що описує умови зменшення надлишковості коду, буде справедливою.

Якщо далі зробити припущення про те, що у розглядуваній послідовності буде присутня хоча б одна двійкова серія $\{s(p)_{x,y}^{(v_{bp}-\eta)}, \dots, s(p)_{x,y}^{(v_{bp}-\eta-b+1)}\}$, якій відповідатиме значення довжини $t_{x,y}^{(\Theta)}$, рівне $t_{x,y}^{(\Theta)} = b \geq 2$, тоді $\delta_{bt} < v_{bp}$, а відтак $\Theta < v_{bp}$. Значить, послідовність довжин двійкових серій $\{t_{x,y}^{(1)}, \dots, t_{x,y}^{(\Theta)}, \dots, t_{x,y}^{(\Theta)}\}$ не належатиме множині двійкових чисел [18].

Відповідно, за таких умов величина основи $t_{x,y}^{(\Theta)}$ дорівнюватиме $(b+1)$.

На базі виразу для двійкового представлення компоненти (2.1), оцінка вкладу $\Delta_{\eta,b}$ послідовності двійкових елементів $\{s(p)_{x,y}^{(v_{bp}-\mu)}, \dots, s(p)_{x,y}^{(v_{bp}-\eta-b+1)}\}$ в величину компоненти $s(p)_{x,y}$ може бути розраховано за наступною формулою:

$$\Delta_{\eta,b} = s(p)_{x,y}^{(v_{bp}-\eta)} 2^{v_{bp}-\eta-1} + \dots + s(p)_{x,y}^{(v_{bp}-\eta-b+1)} 2^{v_{bp}-\eta-b}, \quad (3.7)$$

де $s(p)_{x,y}^{(v_{bp}-\eta)}$ та $s(p)_{x,y}^{(v_{bp}-\eta-b+1)}$ - відповідно перший і останній елементи двійкової серії ;

$2^{v_{bp}-\eta-1}$ та $2^{v_{bp}-\eta-b}$ - вагові коефіцієнти, що відносяться до елементів $s(p)_{x,y}^{(v_{bp}-\eta)}$ а також $s(p)_{x,y}^{(v_{bp}-\eta-b+1)}$ відповідно.

Якщо при цьому виконується умова $v_{bp} < \eta$, тобто двійкова серія локалізується усередині двійкового опису компоненти, $b > 1$. Відповідно, справедливим при цьому є залежність $1 < \theta < \Theta$.

Тоді кодове представлення послідовності довжин двійкових серій відповідно до формули (3.5), буде наступним:

$$E_{x,y} = \ell_{x,y}^{(1)} (b+1)2^{\Theta-2} + \ell_{x,y}^{(2)} (b+1)2^{\Theta-3} + \dots + \ell_{x,y}^{(\theta)} 2^{\Theta-\vartheta} + \dots \quad (3.8)$$

$$\dots + \ell_{x,y}^{(\Theta-1)} 2 + \ell_{x,y}^{(\Theta)}$$

де $(b+1)2^{\Theta-\vartheta}$ - ваговий коефіцієнт довжини $(\vartheta+1)$ -й серії, розташованої раніше, ніж величина $\ell_{mn}^{(\theta)}$, що є більш старшою відносно неї, тобто при цьому $\vartheta < \theta$.

Виконаємо перетворення виразу (3.8), таким чином, щоб досягти відповідності порядку позиціонування двійкових елементів $s(p)_{x,y}^{(\eta)}$.

У ході перетворення необхідно брати до уваги те, що порядок двійкових елементів $\{s(p)_{x,y}^{(v_{bp})}, \dots, s(p)_{x,y}^{(v_{bp}-\eta+1)}\}$, що розміщуються у послідовності раніше елементу $s(p)_{x,y}^{(v_{bp}-\eta)}$ буде менше на довжину серії, тобто на величину, рівну b .

У такому випадку значення коду позиційного числа буде визначатися відповідно до наступного виразу:

$$E_{x,y} = \ell_{x,y}^{(1)} (b+1)2^{v_{bp}-b-1} + \ell_{x,y}^{(2)} (b+1)2^{v_{bp}-b-2} + \dots + (b+1)2^{v_{bp}-b-\vartheta} + \dots \quad (3.9)$$

$$\dots + \ell_{x,y}^{(\theta)} 2^{v_{bp}-\eta-b} + \dots + \ell_{x,y}^{(\Theta-1)} 2 + \ell_{x,y}^{(\Theta)}$$

де $(b+1)2^{v_{bp}-b-\vartheta}$ - ваговий коефіцієнт, що відповідає довжині ϑ -ї серії, яка розташована раніше величини $t_{x,y}^{(\theta)}$;

$2^{v_{bp}-\eta-b}$ - ваговий коефіцієнт довжини $t_{x,y}^{(\theta)}$, що відноситься до θ -ї двійкової серії.

Разом з тим вираз, на базі якого може обчислюватися величина $E'_{x,y}$ коду позиційного числа, має враховувати зменшення його динамічного діапазону на 1. У цьому випадку за умовою маємо:

- довжини двійкових серій, що слідують раніше θ -ї серії, рівні $(t_{mn}^{(\theta)} - 1) = 0$, де $\gamma < \theta$;

- довжини двійкових серій, розташованих після θ -ї серії, рівні $(t_{mn}^{(\gamma)} - 1) = 0$, де $\gamma > \theta$.

На базі цього, обчислення величини коду $E'_{x,y}$ позиційного числа за умови попереднього скорочення динамічного діапазону на 1, може виконуватися за виразом:

$$E'_{x,y} = (t_{x,y}^{(\theta)} - 1) 2^{v_{bp}-\eta-b}. \quad (3.10)$$

Враховуючи залежність $t_{x,y}^{(\theta)} - 1 = b - 1$ і 1, можемо число $(b-1)$, раніше подане у десятковому вигляді, описати у двійковому вигляді [19]:

$$(t_{x,y}^{(\theta)} - 1) = b - 1 = \sum_{\omega=0}^{[\log_2(b-1)]} \zeta_{[\log_2(b-1)]+1-\omega} 2^{[\log_2(b-1)]-\omega}, \quad (3.11)$$

де $[\log_2(b-1)]+1$ - кількість значущих розрядів, необхідних для представлення величини $(b-1)$.

Якщо у виразі (2.10) величину $(t_{mn}^{(\theta)} - 1)$ змінити виразом (2.11), тоді обчислити кодове число можливо буде наступним чином:

$$E'_{x,y} = \left(\sum_{\omega=0}^{[\log_2(b-1)]} \gamma_{[\log_2(b-1)]+1-\omega} 2^{[\log_2(b-1)]-\omega} \right) 2^{v_{bp}-\eta-b} =$$

$$= \sum_{\omega=0}^{\lceil \log_2(b-1) \rceil} Y_{\lceil \log_2(b-1) \rceil + 1 - \omega} 2^{v_{bp} - \eta - b + \lceil \log_2(b-1) \rceil - \omega}. \quad (3.12)$$

Далі, як можна бачити з аналізу формули (3.12), двійковому елементу, що розміщується на старшій позиції, відповідає ваговий коефіцієнт $2^{v_{bp} - \mu - b + \lceil \log_2(b-1) \rceil}$. Тобто, судячи з цього, представлення значення коду $E'_{x,y}$ потребує використання деякого обсягу двійкових розрядів, який, у свою чергу, визначається згідно з формулою:

$$\lceil \log_2 E'_{x,y} \rceil + 1 = v_{bp} + \lceil \log_2(b-1) \rceil - \eta - b. \quad (3.13)$$

Оскільки при цьому величина $\lceil \log_2(b-1) \rceil$ апіорі є меншою b , а водночас, за умовою $\eta > 1$, виконуватиметься наступна нерівність:

$$(v_{bp} + \lceil \log_2(b-1) \rceil - \eta - b) < v_{bp}. \quad (3.14)$$

Таким чином, умова (3.2) (умова зменшення надлишковості) за даних умов буде справедливою. Відтак, коефіцієнт $\Xi_{x,y}$ стиснення для компоненти з координатами $(x; y)$ у сегменті $s_{x,y}^{(p) \prime}$ буде визначатися на базі виразу:

$$\Xi_{x,y} = \frac{v_{bp}}{(v_{bp} + \lceil \log_2(b-1) \rceil - \eta - b)}. \quad (3.15)$$

У свою чергу, з виразу (2.15) можна бачити, що збільшення коефіцієнту $\Xi_{x,y}$ стиснення може сприяти:

- ріст величини b (довжини двійкової серії):
- переміщення відносного індексу η -ї серії, (її позиції) до

молодших розрядів двійкового опису компоненти $s_{x,y}^{(p)}$ сегменту $s_{x,y}^{(p) \prime}$.

Отже, окрім того, що розглянутий спосіб опису бітового представлення компонент $s_{x,y}^{(p)}$ сегменту $s_{x,y}^{(p) \prime}$ забезпечує коефіцієнт стиснення на рівні

$\Xi_{x,y} > 1$, тобто, досягається стиснення даних, його може бути збільшено за зазначених умов. У зв'язку з цим має сенс дослідити ймовірний діапазон значень $\Xi_{x,y} = (\Xi_{x,y}^{(\min)}; \Xi_{x,y}^{(\max)})$. Для цього спочатку необхідно дослідити частковий випадок, а саме – коли $\Xi_{x,y} = \Xi_{x,y}^{(\min)}$, що характерно для умов, коли серія (довжина якої перевищує 2) локалізується у старших розрядах двійкового представлення компоненти $s(p)_{x,y}$ сегменту $s_{x,y}^{(p)}$. Тоді $\eta = 0$ при $\theta = 1$, а двійкова серія складається з елементів $\{s(p)_{x,y}^{(v_{bp})}, \dots, s(p)_{x,y}^{(v_{bp}-b+1)}\}$. Тоді за виразом (3.10) величина $E'_{x,y}$ обчислюється як:

$$E'_{x,y} = (\ell_{x,y}^{(1)} - 1) 2^{v_{bp}-b}. \quad (3.16)$$

У свою чергу, мінімальне значення коефіцієнта стиснення $\Xi_{x,y}^{(\min)}$ визначатиметься як:

$$\Xi_{x,y}^{(\min)} = \frac{v_{bp}}{(v_{bp} + [\ell \log_2(b-1)] - b)}. \quad (3.17)$$

Відповідно, з виразу (3.17) можна бачити, що навіть при $b=2$ маємо $\Xi_{x,y}^{(\min)} = v_{bp} / (v_{bp} - 2)$.

Таким чином, вже при $v_{bp}=8$ забезпечується $\Xi_{x,y}^{(\min)}$ на рівні $\Xi_{x,y}^{(\min)} = 1,34$. Тобто, вихідна кількість двійкових розрядів, необхідних для опису компоненти $s(p)_{x,y}$, зменшується при цьому на 34% [17].

3.3 Побудова коду бітового представлення сегментів кадру на базі нерівновагових позиційних чисел як його структурних одиниць

Для випадку, коли двійковий опис компоненти $s(p)_{x,y}$ містить у собі довільний обсяг Θ двійкових серій, для яких справедливими є наступні твердження:

- двійкові серії можуть бути рівними між собою;
- довжини двійкових серій рівні:

$$b_\theta \geq 1, \quad (3.18)$$

разом з тим, існує ймовірність нерівності двійкових серій, а саме:

$$b_\phi \neq b_\gamma, \text{ де } \gamma = \overline{1, \Theta} \text{ а } \gamma \neq \phi. \quad (3.19)$$

з урахуванням цього, кодове відображення $E_{x,y}$ послідовності серій довжин двійкових елементів $\{\ell_{x,y}^{(1)}, \dots, \ell_{x,y}^{(\theta)}, \dots, \ell_{x,y}^{(\Theta)}\}$, у вигляді позиційного числа визначатиметься виразом:

$$\begin{aligned} E_{x,y} &= \ell_{x,y}^{(1)} \prod_{\phi=2}^{\Theta} (b_\phi + 1) + \ell_{x,y}^{(2)} \prod_{\phi=3}^{\Theta} (b_\phi + 1) + \dots + \ell_{x,y}^{(\theta)} \prod_{\phi=\theta+1}^{\Theta} (b_\phi + 1) + \dots + \ell_{x,y}^{(\Theta-1)} b_\Theta + \ell_{x,y}^{(\Theta)} = \\ &= \sum_{\theta=1}^{\Theta} \ell_{x,y}^{(\theta)} \prod_{\phi=\theta+1}^{\Theta} (b_\phi + 1), \end{aligned} \quad (3.20)$$

де $\prod_{\phi=\theta+1}^{\Theta} (b_\phi + 1)$ - ваговий коефіцієнт довжини θ -ї двійкової серії.

Отриманий при цьому вираз (3.20) відрізняється від (3.5). Ключова відмінність при цьому полягає у тому, що на базі умов (3.18) та (3.19) відсутня рівність між відношеннями вагових коефіцієнтів двох сусідніх довжин двійкових серій, що еквівалентно виразу:

$$\frac{\prod_{\phi=\theta}^{\Theta} (b_\phi + 1)}{\prod_{\phi=\theta+1}^{\Theta} (b_\phi + 1)} = u_\theta \neq \frac{\prod_{\phi=\gamma}^{\Theta} (b_\phi + 1)}{\prod_{\phi=\gamma+1}^{\Theta} (b_\phi + 1)} = b_\gamma, \quad (3.21)$$

де $\prod_{\phi=\theta}^{\Theta} (b_\phi + 1)$ та $\prod_{\phi=\theta+1}^{\Theta} (b_\phi + 1)$ - значення вагових коефіцієнтів $(\theta+1)$ -ї та θ -ї довжин серій двійкових елементів відповідно;

$\prod_{\phi=\gamma}^{\ominus} (b_{\phi} + 1)$ та $\prod_{\phi=\gamma+1}^{\ominus} (b_{\phi} + 1)$ - величини вагових коефіцієнтів $(\gamma+1)$ -ї та

γ -ї довжин серій двійкових елементів відповідно;

b_{θ} , b_{γ} - значення основ θ -ї та γ -ї довжин серій двійкових елементів відповідно.

З аналізу виразу (3.21) можна зробити такі висновки:

- довжини двійкових серій характеризуються нерівними основами;
- існує залежність між позицією довжини двійкової серії та величиною вагового коефіцієнта, який їй відповідає.

Далі, керуючись виявленими залежностями, можемо дати визначення **нерівновагового позиційного числа**, яким є масив величин $\{t_{kl}^{(1)}, \dots, t_{kl}^{(\theta)}, \dots, t_{kl}^{(\ominus)}\}$, які відповідають умовам (3.18), (3.19), при цьому його кодове значення описується виразом (3.20) [17, 19].

На випадок, коли виконується кодування компонентного представлення сегменту з використанням нерівноважного-позиційних конструкцій, також забезпечується коефіцієнт стиснення на рівні, що перевищує 1.

Аналіз виразу (3.20) показує, що величина $E_{x,y}$ буде меншою, ніж значення $\prod_{\theta=1}^{\ominus} (b_{\theta} + 1) - 1$, що являє собою добуток основ $(b_{\theta} + 1)$ довжин двійкових серій, тобто:

$$E_{x,y} \leq \prod_{\theta=1}^{\ominus} (b_{\theta} + 1) - 1. \quad (3.22)$$

Якщо взяти до уваги те, що мало місце скорочення динамічного діапазону довжин на 1, відповідно, побудова довжин серій здійснюватиметься починаючи з нульового елемента, тоді вираз (3.22) може бути подано у вигляді:

$$E'_{x,y} \leq \left(\prod_{\theta=1}^{\ominus} b_{\theta} \right) - 1. \quad (3.23)$$

У свою чергу, при цьому умова зменшення надлишковості та забезпечення компресії, подана формулою (3.2) буде справедливою, коли наступна нерівність виконуватиметься:

$$[\log_2 E'_{x,y}] + 1 \leq [\log_2 (\prod_{\phi=1}^{\Theta} b_{\phi} - 1)] + 1. \quad (3.24)$$

Разом з тим, у нашому випадку розглядається побудова коду на базі бітового представлення компоненти $s(p)_{x,y}$ сегменту $s_{x,y}^{(p) \prime}$ у напрямку

зменшення індексу її двійкових розрядів, тоді $\sum_{\theta=1}^{\Theta} b_{\theta} = v_{bp}$, тобто, сума довжин двійкових серій відповідає кількості розрядів компоненти. При цьому очевидно, що $([\log_2 b_{\theta}] + 1) \leq b_{\theta}$. Відтак, виконуватиметься наступна нерівність:

$$\sum_{\theta=1}^{\Theta} ([\log_2 b_{\theta}] + 1) < \sum_{\theta=1}^{\Theta} b_{\theta} = v_{bp}. \quad (3.25)$$

Таким чином, як видно з виразу (3.25), що умови компресії виконуються.

3.4 Дослідження підходу до побудови схеми кодування бітового представлення компонент сегменту зображення

Отже, на базі кодових конструкцій, що формуються за нерівновагово-позиційним принципом, може бути забезпечено компресію для випадку, коли виконується кодування бітового представлення компонент $s(p)_{x,y}$ сегменту $s_{x,y}^{(p) \prime}$ у напрямку зменшення індексу двійкових розрядів.

На цей випадок ймовірна схема кодоутворення для сегменту буде такою, як показано рис.3.2.

При цьому, відповідно до обробки на засадах JPEG, виконується сканування біт двійкового опису компонент з урахуванням наступних особливостей:

- першою скануються біти DC-компоненти;
- сканування виконується у зигзаг-напрямку;
- у ході виявлення довжин двійкових серій зчитування біт компоненти виконується у напрямку від MSB, тобто, починаючи зі старшого біта.

Такий підхід за умови його формальної реалізації дозволяє забезпечити компактний опис сегменту $s_{x,y}^{(p)}$ лише шляхом безпосереднього стиснення двійкового представлення компонент.

Для цього випадку кодове представлення $E_{i,j}$ сегменту $s_{x,y}^{(p)}$ на позиції (i, j) у кадрі може бути утворено поєднанням кодових значень $E_{x,y}$ окремих нерівновагових позиційних чисел, кожне з яких є сформованим на базі бітового опису $s^{(p)}_{x,y}$ компоненти, тобто:

$$E_{i,j} = \prod_{\xi=1}^{64} E_{x,y}^{(\xi)} \quad (3.26)$$

При цьому у єдиному технологічному циклі виконується зигзаг-сканування компонент кодованого сегменту, як видно зі схеми 3.2, що потенційно спрощує загальний процес кодування відеокадру у цілому.

Разом з тим, як свідчить один із наслідків залежності, наведеної виразом (3.15), ріст довжини двійкової серії b сприяє збільшенню коефіцієнту стиснення $\Xi_{x,y}$.

У той же час, величину b може бути збільшено, якщо процес виявлення довжин двійкових серій не обмежувати межами кодового слова, тобто, кількістю біт V_{bp} .

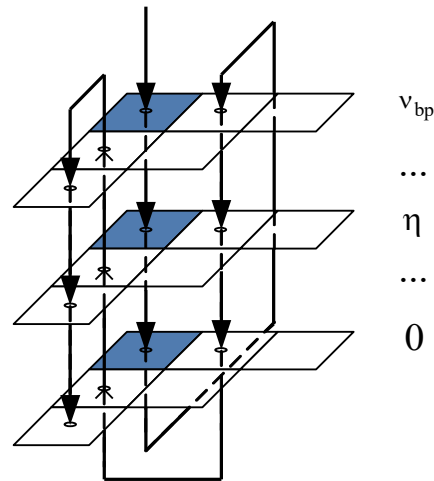


Рисунок 3.2 - Схема кодоутворення на прикладі ділянки сегменту, що містить компоненту DC, на базі кодування бітового представлення компонент

Тоді для збільшення ймовірної величини b може бути виконано трансформацію просторової структури сегменту $s_{x,y}^{(p)'}$ відповідно до принципу, зазначеного на рис. 3.3

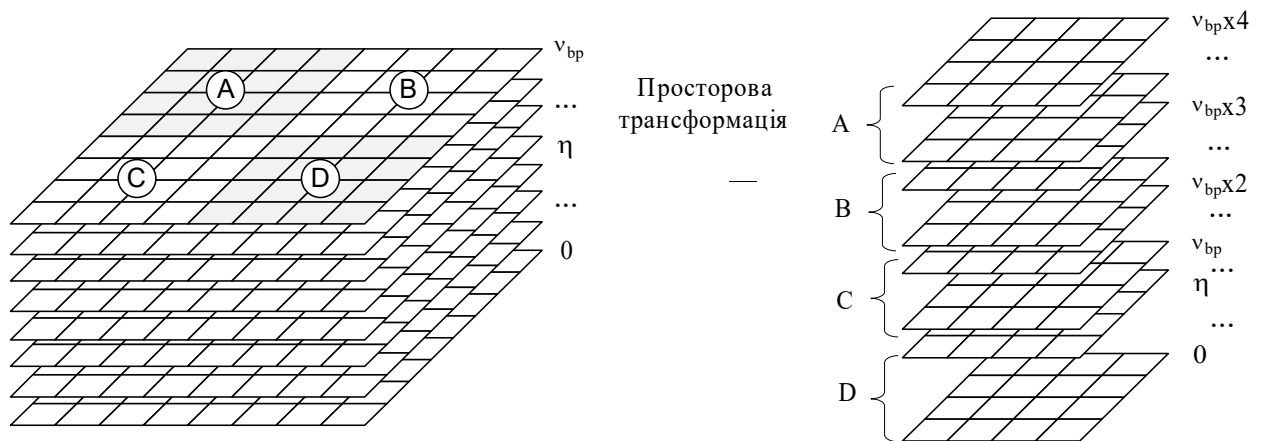


Рисунок 3.3 – Схема просторової трансформації сегменту зображення шляхом поділу на умовні квадранти

У результаті такого трансформування двійкової структури опису вихідного сегменту $s_{x,y}^{(p)'}$, замість 64 компонент $s_{x,y}^{(p)}$ утворюється 16

макрокомпонент $s(p)_{x,y}'$, бітовий опис кожної з яких, у свою чергу, формується 32 бітами.

При цьому, макрокомпонента $s(p)_{x,y}'$ формується на базі компонент квадратів А, В, С та D відповідно до схеми на рис.2.3. Це еквівалентно виразу:

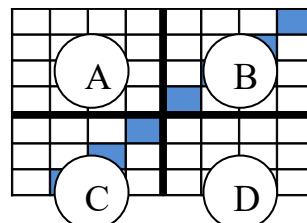
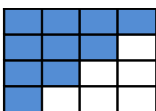
$$s(p)_{x,y}' = s(p)_{x,y}^{(A)} \& s(p)_{x,y}^{(B)} \& s(p)_{x,y}^{(C)} \& s(p)_{x,y}^{(D)}, \quad (3.27)$$

де $s(p)_{x,y}^{(A)}$, $s(p)_{x,y}^{(B)}$, $s(p)_{x,y}^{(C)}$ та $s(p)_{x,y}^{(D)}$ - компоненти з координатами (x, y) квадратів А, В, С та D відповідно.

Сенс такої трансформації, як вже зазначалося вище, у загальному випадку пояснюється збільшенням ймовірності зростання величини b довжин двійкових серій, що можуть бути виявлені у ході сканування біт макрокомпонент $s(p)_{x,y}'$.

Водночас, важливим є порядок розміщення квадратів відповідно до схеми 3.3. Зазначений порядок зумовлюється тим, що [5]:

- у будь-якій формі опису сегменту $s_{x,y}^{(p)'}$ кадру найбільша енергія сигналу локалізовано у його НЧ-області, яка відповідає бітам, які локалізовано вище головної діагоналі квадрату А, включаючи також біти головної діагоналі (рис.3.4 а);
- квадрати В і С чітко поділяються головною діагоналлю сегменту, при цьому верхня частина кожного з них (тут головна діагональ квадрату співпадає з головною діагоналлю (рис.3.4.б) сегменту $s_{x,y}^{(p)'}$) статистично містить значимі компоненти – тобто, з великим відсотком ймовірності – ненульові біти;
- квадрат D відповідає ВЧ-області сегменту, яка після квантування компонент містить велику кількість нулів.



а)



б)

Рисунок 3.4 – Найбільш значима область (виділена тлом) у межах квадранту А а), позиціонування квадрантів відносно головної діагоналі вихідного сегменту б)

Таким чином, у загальному випадку можна стверджувати, що для сегменту $s_{x,y}^{(p)''}$, сформованого макрокомпонентами $s(p)'_{x,y}$ справедливими є наступні залежності [11]:

- ймовірність збільшення середньої довжини b θ -ї двійкової серії вища ніж для сегменту $s_{x,y}^{(p)'}$;

- ураховуючи взаємне розташування квадрантів, існує висока ймовірність того, що величина b для макрокомпонент $s(p)'_{x,y}$ нижче головної діагоналі буде зростати;

- значення b збільшується по мірі обробки макрокомпонент від 11-ї до 16-ї у сегменті $s_{x,y}^{(p)''}$.

У свою чергу, кодові числа $E_{x,y}$ на базі макрокомпонент $s(p)'_{x,y}$ розраховуються таким же чином, як показано виразом (3.20).

Далі на прийомному боці після декодування двійкової послідовності біт $s(p)^{(vbp-n)}_{x,y}$ макрокомпонент виконується відновлення вихідної просторової структури сегменту $s_{x,y}^{(p)'}$.

Недоліком такої схеми обробки бітового опису компонент зображення є неможливість гарантувати значення коефіцієнту $\bar{E}_{x,y}$ стиснення на рівні, який перевищує середнє значення для традиційних методів ймовірнісно-статистичного кодування, як, наприклад, у випадку використання арифметичного кодування чи кодування за Хафманом.

Дана ситуація характерна для випадків, коли на обробку надходять високонасичені сегменти.

Для таких сегментів властива наявність великої кількості ненульових компонент i у ВЧ-області, i нижче головної діагоналі взагалі. Це, у свою

чергу, веде до зменшення середньої довжини b двійкової серії, виявленої у межах макрокомпонент $s(p)_{x,y}$.

Така залежність може бути показана виразом:

$$\Lambda \uparrow \rightarrow b \downarrow; \quad (3.28)$$

де Λ - рівень насиченості сегменту.

Беручи до уваги означений недолік розглянутої схеми кодування бітового опису компонент на базі нерівновагових позиційних конструкцій, можна зробити висновок про необхідність застосування альтернативної схеми.

4. ПРОГРЕСИВНА СХЕМА КОДУВАННЯ БІТОВОГО ПЕРЕДАВАННЯ СЕГМЕНТУ ЗОБРАЖЕННЯ

4.1 Умови ефективного використання механізмів кодування бітового опису сегментів кадру у складі технологій обробки зображень

Наведений схемами на рис. 3.2. та 3.3 підхід щодо побудови алгоритму кодування бітового опису сегментів зображення шляхом компактного представлення двійкової форми компонент має обмеження (3.28).

У свою чергу, для того, щоб мати можливість нівелювати вплив зазначених обмежень, необхідно застосовувати інший підхід до побудови схеми кодування з використанням нерівновагових позиційних конструкцій.

При цьому, такий підхід повинен відповідати ряду вимог, як зображено рис. 4.1.



Рисунок 4.1 – Формування умов, за яких можливе ефективне використання механізмів кодування бітового представлення сегментів у складі технологій стиснення зображень

При цьому, забезпечення виконання умови щодо відсутності протиріч між особливостями, властивими бітовому представленню сегментів зображення та вимогами до нерівновагово-позиційного коду може бути досягнуто, якщо брати до уваги специфіку технологічного процесу виявлення двійкових серій, а також принципів формування нерівновагово-позиційних чисел.

Тут слід ураховувати наступне [16]:

- існування можливостей щодо розширення середнього значення довжини двійкової серії;
- особливості наявних напрямків потоків біт, що спрямовуються на обробку.

Виходячи з зазначеного, очевидно, що за таких умов найбільш раціональним підходом є зміна напрямку сканування бітових ланцюжків.

Так, якщо попередньо розглядалася схема кодоутворення, у рамках якої довжини двійкових серій виявлялися у напрямку зменшення розрядності біт на рівні окремих компонент $s(p)_{x,y}$ та макрокомпонент $s(p)_{x,y}'$, то ефективною альтернативою такої схемі є виконання обробки сегментів $s_{x,y}^{(p)'}$ у бітовому форматі представлення за напрямком бітових площин.

У свою чергу, **бітовою площиною** є сукупність двійкових елементів одного розряду [14].

Для випадку сегменту базового розміру це може бути показано наступним виразом як:

$$S(p)_\eta = \prod_{x=1}^8 \prod_{y=1}^8 s(p)_{x,y}^{(\eta)} \quad (4.1)$$

де $s(p)_{x,y}^{(\eta)}$ - біт η -го розряду з координатами (x, y) у межах p -го сегменту зображення.

Доцільність такого способу обходу бітового опису сегментів зумовлено тим, що ймовірність появи одиничних біт у межах бітових площин з індексом V_{bp} та сусідніми (тобто, старшими) для компонент ВЧ-групи є мінімальною.

Окрім зазначеного, такий спосіб сканування бітового представлення сегменту $s_{x,y}^{(p) \prime}$ дає можливість ієрархічної реконструкції кодованих зображень.

У свою чергу, процес ієрархічної реконструкції передбачає поступове відтворення зображення, у ході чого кадр повністю завантажується за декілька послідовних сканів (рис 3.2).

Кожен такий скан при цьому містить у собі $\delta \in [1; v_{bp})$ бітових площин $S(p)_\eta$, які формуються бітами старших розрядів компонент $s(p)_{x,y}$ сегменту $s_{x,y}^{(p) \prime}$.

Відповідно, на базі перших сканів здійснюється відтворення огрубленого представлення зображення, тоді як наступні скани його уточнюють та збільшують візуальну та об'єктивну якість безпосередньо до одержання зображень без помилки.

При цьому, усі наступні скани, що деталізують та уточнюють зображення, тут містять у собі бітові площини $S(p)_\eta$ молодших розрядів

У загальному випадку компоненти $s(p)_{x,y}$, що належать ВЧ-зонам сегментів $s_{x,y}^{(p) \prime}$, на рівні окремих бітових площин $S(p)_\eta$, містять у собі значні ділянки нульових біт (або формуються ними повністю).

Таким чином, беручи до уваги вищезазначене, може бути розширено довжини двійкових серій, які виявляються у межах бітової площини $S(p)_\eta$, якщо сканування бітової площини $S(p)_\eta$ виконується наступним чином:

- за алгоритмом зигзаг (рис.4.2);
- перший елемент бітової площини $S(p)_\eta$, що йде на обробку, має координати (1; 1) у сегменті.

У таким спосіб буде забезпечено виконання умови щодо відсутності протиріч між особливостями, властивими бітовому представленню сегментів $s_{x,y}^{(p) \prime}$ відеокадру та вимогами до нерівноважного-позиційного коду.

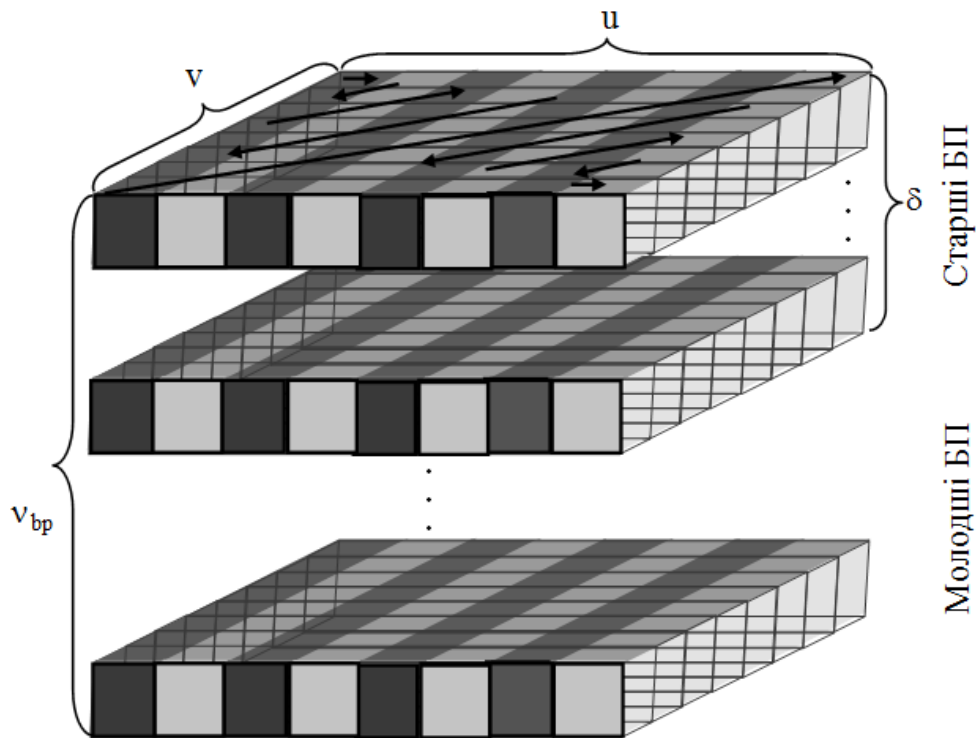


Рисунок 4.2 – Закономірність обробки бітових площин

У свою чергу для того, щоб створити умови для виконання умов відносно скорочення кодової надмірності та виключення ймовірності переповнення кодового слова, використовується особливий порядок розрахунку величини нерівновагово-позиційного числа $E(p)_\alpha^{(\eta)}$ для α -ї послідовності довжин двійкових серій, що належить бітовій площині з індексом η , яка відноситься до P -го сегменту $s_{x,y}^{(p) \prime}$, отриманого за результатами ортогонального перетворення на базі ДКП відносно сегменту $s_{x,y}^{(p)}$ у просторовому представленні. При цьому використовується вираз (3.20) як базис.

Для цього випадку принцип обчислення величини $E(p)_\alpha^{(\eta)}$ показано наступним виразом [19]:

$$E(p)_\alpha^{(\eta)} = \sum_{\theta=1}^{\Theta_\alpha} t_{\alpha,\theta}^{(\eta)} \prod_{\phi=\theta+1}^{\Theta_\alpha} (b_\phi + 1) \quad (4.2)$$

де $t_{\alpha,\theta}^{(n)}$ - довжина θ -ї двійкової серії, яка належить послідовності з індексом α , що локалізована у рамках η -ї бітової площини;

$(b_\theta + 1)$ - значення основи складника $t_{\alpha,\theta}^{(n)}$ нерівновагово-позиційного числа;

$\prod_{\phi=\theta+1}^{\Theta_\alpha} (b_\phi + 1)$ - величина вагового коефіцієнту, що відповідає значенню

довжини θ -ї двійкової серії; Θ_α - число довжин двійкових серій у складі α -ї послідовності.

Як видно з виразу (4.2), з ростом значення довжини Θ_α двійкових серій збільшується величина $E(q)_\alpha^{(n)}$ нерівновагового позиційного числа. Водночас, розрахунок значень $(b_\theta + 1)$ основи проводиться відносно кожної довжини двійкових серій незалежно від інших.

Це, у свою чергу, спричинює наступні недоліки:

- існує ймовірність переповнення кодового слова, якщо його розмірність є попередньо встановленою та фіксованою;

- для того, щоб мати змогу однозначного відокремлення кодових слів, які побудовано для послідовностей довжин двійкових серій, потрібно застосовувати додаткові службові дані, що, у свою чергу, викликає збільшення розміру підсумкового коду;

- так як при кодоутворенні застосовується кількість основ $(b_\theta + 1)$, рівна обсягу виявлених довжин двійкових серій, відповідно, створюються умови для зростання обсягу необхідної службової інформації.

Таким чином, має бути виявлено перелік ймовірних умов, у випадку виконання яких перелічені недоліки, що виявлені для процедури обчислення значення $E(q)_\alpha^{(n)}$ буде нівельовано.

Зокрема для того, щоб кодове слово не переповнилося, для представлення значення нерівновагового позиційного числа $E(q)_\alpha^{(n)}$ має бути застосовано обсяг розрядів $W(E(p)_\alpha^{(n)})$, який на перевищує початково заданого розміру W кодового слова, що еквівалентно наступному виразу:

$$W(E(p)_\alpha^{(n)}) \leq W. \quad (4.3)$$

У свою чергу для того, щоб досягти розмежування кодових слів, кожне з яких несе у собі і інформацію щодо величини $E(q)_\alpha^{(\eta)}$, найбільш доцільним є застосування системи основ $V(p)_\alpha^{(\eta)} = \{b_1, \dots, b_{\Theta_\alpha}\}$, яким у процесі формування нерівновагових позиційних чисел належить роль службових даних.

Інакше кажучи, при цьому $W(E(q)_m^{(\mu)})$ повинна знаходитися з використанням множини основ. Загальний вираз для опису такої залежності є наступним:

$$W(E(p)_\alpha^{(\eta)}) = \Psi_{cb}(b(p)_\alpha^{(\eta)}), \quad (4.4)$$

де $\Psi_{cb}(b(p)_\alpha^{(\eta)})$ - функціонал, на базі якого здійснюється розрахунок меж кодових слів з використанням величин основ елементів нерівновагово-позиційних чисел.

Разом з тим, щоб скоротити ймовірність росту обсягу службової інформації, визначення основ нерівновагово-позиційних чисел здійснюється для деякої множини довжин двійкових серій одночасно, що еквівалентно виразу:

$$b_\theta = \Psi_{bm}(\ell_{\alpha,\theta,1}^{(\eta)}, \dots, \ell_{\alpha,\theta,\varphi}^{(\eta)}), \quad (4.5)$$

де $\Psi_{bm}(\ell_{\alpha,\theta,1}^{(\eta)}, \dots, \ell_{\alpha,\theta,\varphi}^{(\eta)})$ - функціонал, на базі якого розраховуються основи b_θ . Параметрами даного функціоналу є довжини серій бінарних елементів;

Φ - множина довжин двійкових серій, відносно яких розраховується величина спільної основи b_θ .

При цьому щоб створити умови, у яких можливим є розрахунок основ нерівновагових позиційних чисел для певної множини довжин двійкових серій, попередньо необхідно побудувати двовимірний масив $L_p^{(\eta)}$, елементами якого є довжини двійкових серій, як ілюструє наступний вираз:

$$L_p^{(\eta)} = \begin{vmatrix} \ell_{1,1} & \ell_{1,2} & \dots & \ell_{1,\beta} & \dots & \ell_{1,\varepsilon} \\ & & \dots & & & \\ \ell_{\alpha,1} & \ell_{\alpha,2} & \dots & \ell_{\alpha,\beta} & \dots & \ell_{\alpha,\varepsilon} \\ & & \dots & & & \\ \ell_{\nu,1} & \ell_{\nu,2} & \dots & \ell_{\nu,\beta} & \dots & \ell_{\nu,\varepsilon} \end{vmatrix}, \quad (4.6)$$

де $\ell_{\alpha,\beta}$ - величина $(\alpha;\beta)$ -ї довжини двійкової серії;

ν, ε – розмірність масиву $L_p^{(\eta)}$, тобто, обсяг рядків та, відповідно, стовпців масиву.

У цьому випадку розрахунок значень основ нерівновагових позиційних чисел здійснюється для деякої сукупності довжин двійкових серій, що формують рядок масиву $L_p^{(\eta)}$ [17].

На цей випадок функціональну залежність буде уточнено до наступного вигляду:

$$b(p)_\alpha^{(\eta)} = \max \{ \ell_{\alpha,1} \ell_{\alpha,2} \dots \ell_{\alpha,\beta} \dots \ell_{\alpha,\varepsilon} \} + 1, \quad \alpha = \overline{1, \varepsilon}. \quad (4.7)$$

Аналіз виразу (4.6) свідчить про те, що на базі масиву $L_p^{(\eta)}$ може бути утворено ν основ. Відповідно, система B_ℓ основ довжин двійкових серій за цих умов розглядатиметься наступним чином:

$$B_\ell = \{ b(p)_1^{(\eta)}, \dots, b(p)_\nu^{(\eta)} \}. \quad (4.8)$$

Отже, формування нерівновагого-позиційних чисел у даному випадку, здійснюється на основі стовпців масиву $L_p^{(\eta)}$. Такий підхід дає змогу зменшити обсяг основ у ε разів.

Звідси виходить, що ріст величини ε (числа стовпців для опису масиву $L_p^{(\eta)}$ створює умови, за яких можливо мінімізувати необхідний обсяг $W(B_\ell)$ розрядів, на базі яких здійснюється представлення основ нерівновагових позиційних чисел до відносно незначної величини щодо сумарної довжини кодових слів $W(E(p)_\alpha^{(\eta)})$. Тобто, це дає можливість знехтувати величиною $W(B_\ell)$.

У свою чергу, передбачається можливість здійснювати формування масиву $L_p^{(n)}$ як за рядками, так і за стовпцями.

Зокрема, на той випадок, коли масив $L_p^{(n)}$ будується у напрямку рядків, розрахунок величини основ нерівновагових позиційних чисел виконується послідовно, синхронно з побудовою рядків масиву.

Разом з тим, означеному підходу до побудови двовимірного масиву довжин двійкових серій, властивий ряд обмежень, що викликано впливом таких факторів, як:

- загальний обсяг довжин двійкових серій, на базі яких формується бітове представлення сегменту, є величиною, априорі невідомою;
- кількість довжин двійкових серій є наближено рівною υ .

Зазначені вище фактори теоретично можуть спричинювати виникнення затримок при виявленні двійкових серій, на базі яких формується бітове представлення сегменту $s_{x,y}^{(p)}$ зображення.

У свою чергу, використовуючи побудовані серії, далі створюється масив $L_p^{(n)}$. Приймаючи до уваги дані закономірності, можемо зробити висновок про те, що за таких умов більш ефективним є підхід, у рамках якого масив $L_p^{(n)}$ формується за стовпцями.

Водночас, по-перше, так як нерівновагово-позиційні числа будуються на основі стовпців масиву $L_p^{(n)}$, розмірність υ , тобто розмірність стовпця, має бути такою, щоб умови, подані виразом (4.3), виконувалися.

По-друге, слід пам'ятати, про те, що кодове значення нерівновагового позиційного числа $E(q)_\alpha^{(\mu)}$ на етапі побудови масиву є невідомою величиною.

У зазначених умовах може бути використано специфіку процесу виявлення довжин двійкових серій, а саме – те, що побудова довжин двійкових серій здійснюється для кожної бітової площини $S(p)_n$ окремо. Отже найбільше можливе значення довжини L_{\max} двійкових серій за будь-яких умов буде не більшим, ніж добуток υv , а саме [16, 19]:

$$L_{\max} \leq \upsilon v, \quad (4.9)$$

де uv - загальний обсяг двійкових елементів, що знаходяться у межах бітової площини.

При цьому, аналіз виразу (4.9), показує, що:

- максимальна кількість розрядів, які необхідно задіяти для представлення v елементів стовпцю масиву рівняється $v(\lceil \log_2 L_{\max} \rceil + 1)$;
- значення $v(\lceil \log_2 L_{\max} \rceil + 1)$ зверху обмежується величиною $v(\lceil \log_2 uv \rceil + 1)$ (рис.4.3).

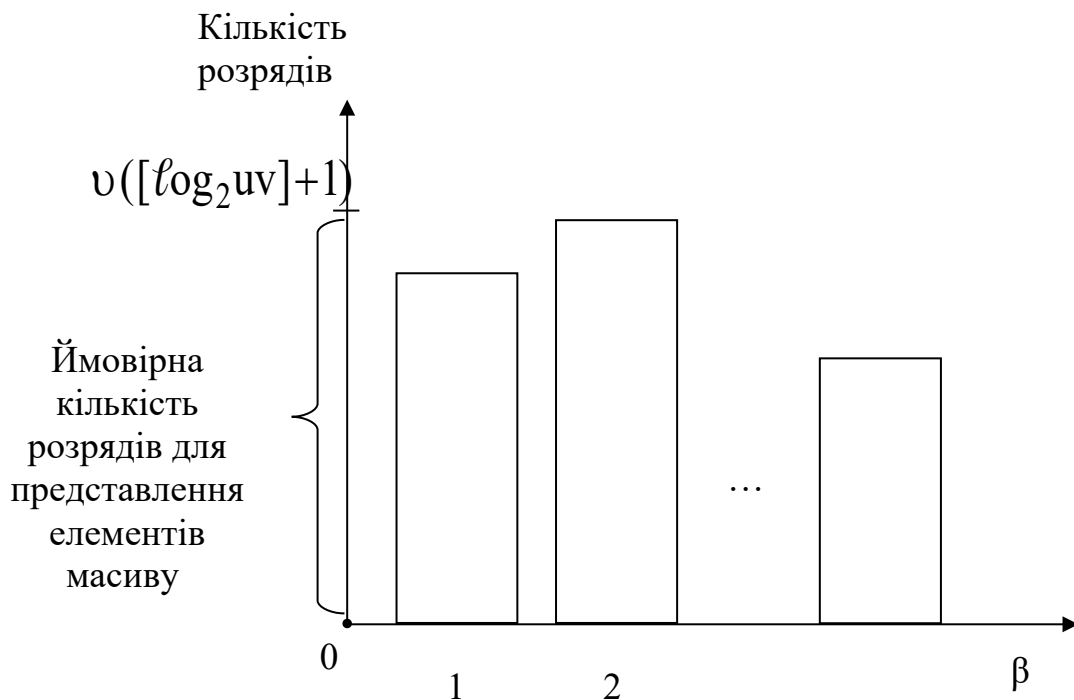


Рисунок 4.3 – Приклад співвідношення між значеннями $v(\lceil \log_2 L_{\max} \rceil + 1)$ та $v(\lceil \log_2 uv \rceil + 1)$ для довільного сегменту $s_{x,y}^{(p)}$

У свою чергу, нерівновагові позиційні числа $E(p)_\alpha^{(\eta)}$, утворені на основі стовпця масиву $L_p^{(\mu)}$ довжин двійкових серій, обчислюватимуться відповідно до наступного виразу:

$$E(p)_\alpha^{(\eta)} = \prod_{\alpha=1}^v \ell_{\alpha,\beta} \prod_{\varphi=\alpha+1}^v h_\varphi, \quad (4.10)$$

де h_φ - величина основи рядку $(\alpha - 1)$ -го рядку у складі двовимірного масиву $L_p^{(\eta)}$ довжин двійкових серій.

4.2 Узгодження вимог щодо ефективного виявлення меж кодових слів та мінімізації кодової надмірності

Підхід до обчислення нерівновагових позиційних чисел, зазначений виразом (4.10) може породжувати невідповідність між раніше зазначеними вимогами, а саме:

- вимогою, щодо можливості однозначного та безпомилкового виявлення меж кодових слів, кожне з яких несе у собі дані відносно величини $E(p)_\alpha^{(\eta)}$;

- вимогою щодо необхідності зменшення кодової надлишковості.

Так, як свідчить рисунок 4.3, межі кодових слів може бути виявлено без застосування додаткових службових даних.

Водночас, це зумовлює ріст надлишковості Ω коду.

У свою чергу, надлишковість коду являє собою різницю між мінімально необхідним обсягом розрядів $(\lceil \log_2 E(p)_\alpha^{(\eta)(\min)} \rceil + 1)$, які може бути задіяно для опису значення $E(q)_\alpha^{(\mu)}$ тоді, коли розраховуються основи кожного елемента нерівновагового позиційного числа, та обсягом розрядів $\nu(\lceil \log_2 \nu \rceil + 1)$, тобто, найбільшою кількістю розрядів, що витрачаються для представлення стовпця масиву $L_p^{(\eta)}$, який сформований ν елементами, тобто [17, 19]:

$$\Omega = \nu(\lceil \log_2 \nu \rceil + 1) - (\lceil \log_2 E(p)_\alpha^{(\eta)(\min)} \rceil + 1), \quad (4.11)$$

де $E(p)_\alpha^{(\eta)(\min)}$ - мінімальне значення коду нерівновагового позиційного числа, що може бути обчислене наступним чином:

$$E(p)_\alpha^{(\eta)(\min)} = \sum_{\alpha=1}^{\nu} t_{\alpha,\beta} \prod_{\phi=\alpha+1}^{\alpha} (t_{\phi,\beta} + 1). \quad (4.12)$$

При цьому $\Omega > 0$, тобто, кодова надмірність є відмінною від нуля, що є наслідком впливу таких чинників, як:

- визначення величини h_α здійснюється за елементом рядку довжин двійкових серій, якому відповідає максимальне значення. Відтак, справедливим є співвідношення $(\ell_{\alpha,\beta} + 1) \leq h_\alpha$;

- розрахунок розмірності кодового слова передбачає вибір найбільшої теоретично допустимої довжини двійкової серії.

Разом з тим, протиріччя між вимогами відносно необхідності зменшення кодової надлишковості та вимогою щодо можливості однозначного та безпомилкового виявлення меж кодових слів може бути вирішено, керуючись при цьому однією з ключових властивостей позиційних кодів з нерівною вагою.

Відповідно до цієї властивості, максимальна величина $E(p)_\alpha^{(\eta)}$ нерівновагового позиційного числа буде не більшою, ніж значення добутку основ його елементів (3.22). Таку властивість ілюструє рис.4.4

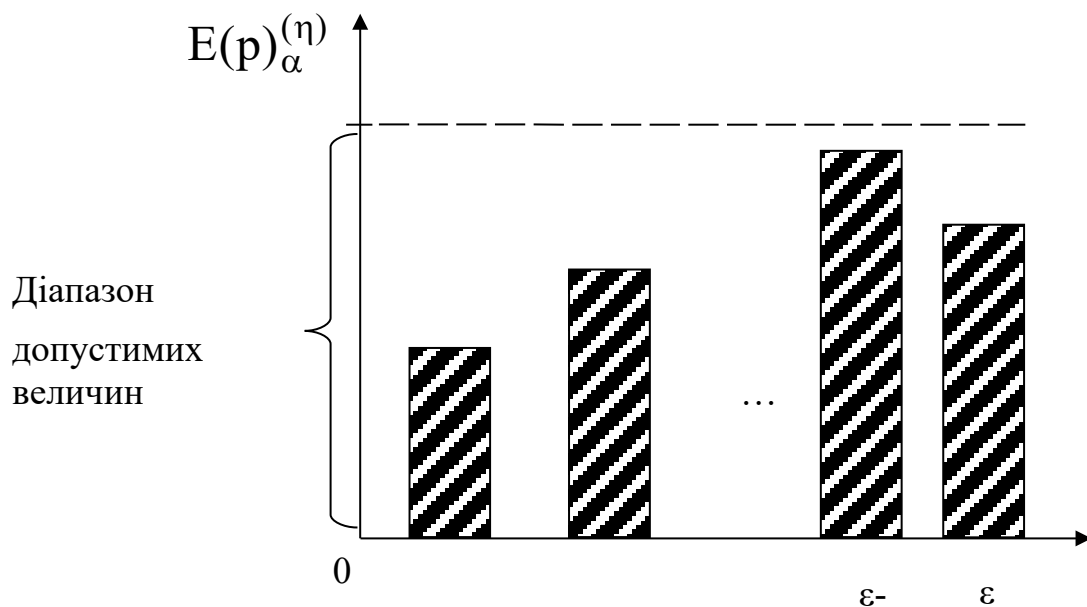


Рисунок 4.4 – Схематичне зображення характерної залежності між величинами добутку основ та значенням нерівновагово-позиційних чисел

Властивість позиційних кодів з нерівною вагою, яку наочно зазначено на рис.4.4, дозволяє:

- забезпечити можливість знаходження меж кодових слів без застосування додаткових службових даних, так як розрахунок кодового значення нерівновагового позиційного числа виконується на базі відомостей відносно значень його основ, тобто:

$$W(E(p)_\alpha^{(n)}) \leq [\log_2 \prod_{\alpha=1}^v h_\alpha - 1] + 1; \quad (4.13)$$

- зменшити рівень кодової надлишковості Ω , що є наслідком справедливості такої нерівності:

$$h_\alpha \leq uv. \quad (4.14)$$

У свою чергу, нерівність (4.14) зумовлена тим, що величини довжин двійкових серій є обмеженими.

Тобто, беручи до уваги дану нерівність, можемо отримати наступне співвідношення:

$$[\log_2 \prod_{\alpha=1}^{v_\varepsilon} h_\alpha - 1] + 1 \leq v_\varepsilon ([\log_2 uv] + 1) \quad (4.15)$$

Таким чином, виявлення меж кодових слів, які несуть у собі дані відносно значення $E(p)_\alpha^{(n)}$, доцільно виконувати згідно з формулою (4.13). Отже, розглянутий підхід до формування коду нерівновагових позиційних чисел відповідає вимогам, за яких можливе ефективне використання механізмів кодування бітового представлення сегментів у складі технологій стиснення зображень [17, 19].

4.3 Формування кодової конструкції бітового опису сегменту зображення на базі нерівновагових позиційних чисел

Розглянутий спосіб нерівновагового позиційного кодування бітового представлення сегментів зображення дозволяє формувати на базі β -го стовпця η -ї бітової площини $S(p)_\eta$, що належить p -му сегменту $s_{x,y}^{(p) \prime}$ кодове

число $E(p)_\alpha^{(n)}$. Це дає можливість формувати кодовий опис бітової площини $S(p)_\eta$ на базі \cup нерівновагових позиційних чисел, тобто:

$$E(p)_\eta = \bigcup E(p)_\alpha^{(n)}, \quad (4.16)$$

де $E(p)_\eta$ - кодове представлення бітової площини $S(p)_\eta$

Виходячи з чого, кодова конструкція $E_{x,y}^{(p)'}$ сегменту може бути описана, як:

$$E_{x,y}^{(p)'} = \bigcup_{\eta=1}^{v_{bp}} E(p)_\eta. \quad (4.17)$$

Схематичне зображення конструкції $E_{x,y}^{(p)'}$ сегменту ілюструє рисунок 4.5.

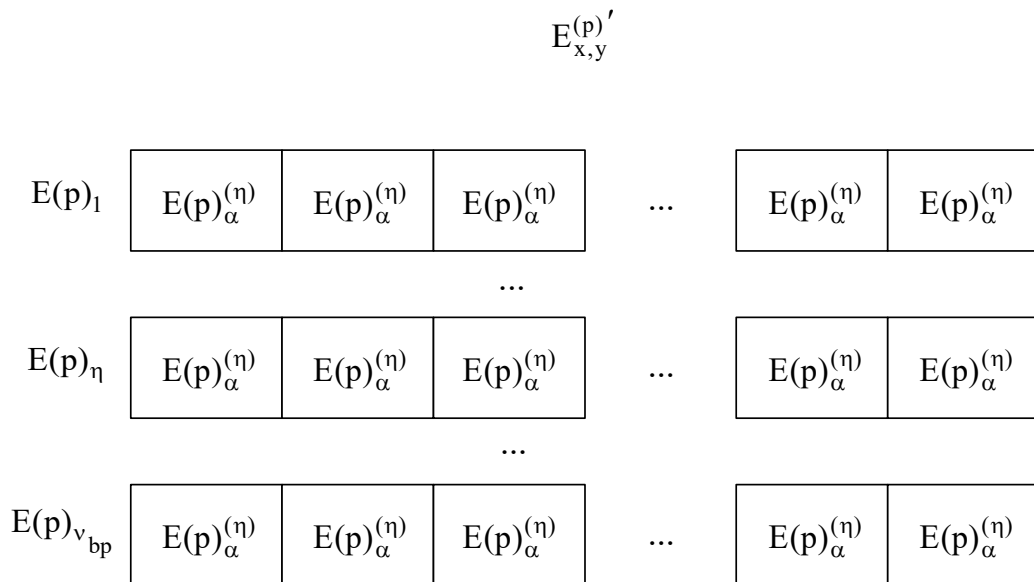


Рисунок 4.5 – Схема формування коду $E_{x,y}^{(p)'}$ сегменту зображення на базі нерівновагових позиційних конструкцій

Розглянутий підхід до побудови коду бітового опису сегментів зображення дозволяє забезпечити коефіцієнт Ξ_{comp} стиснення на рівні 3-3,5, що перевищує даний показник для PNG, JPEG-LS та класичного JPEG у режимі loseless. При цьому, досліджений процес стиснення є повністю зворотнім, тобто, не вносить викривлень у реконструйовані дані.

За результатами дослідження підходу до кодування сегментів відеокадру у нерівноваговому позиційному просторі можна зробити висновки про наступне:

- розглянутий підхід дозволяє здійснити компактне представлення сегментів за рахунок скорочення структурно-комбінаторної надмірності;
- обробка сегментів у бітовому форматі представлення є потенційно менш ресурсоемною порівняно з підходами, у рамках яких виконується обробка на рівні компонентного опису. Це викликано, по-перше, тим, що максимальні числа, які беруть участь у розрахунках кодових чисел, є щонайменше на порядок нижчими ніж ті, які формують компонентне представлення. По-друге, скорочення динамічного діапазону довжин двійкових серій додатково скорочує ймовірний простір обчислень;
- кодування бітового опису сегментів у нерівноваговому позиційному просторі може бути реалізовано як у напрямку розрядів компонент, так і у напрямку бітових площин сегментів. Другий підхід є більш доцільним, так як менше залежить від особливостей змісту оброблюваних сегментів;
- величина коефіцієнта стиснення, яка досягається у разі кодування бітового опису сегментів у нерівноваговому позиційному просторі, збільшується з ростом середньої довжини двійкових серій, виявлених у межах бітових площин. Середня величина коефіцієнта стиснення при цьому може бути більшою до 2,5 разів ніж за умов застосування стандартизованих методів ймовірнісно-статистичного кодування;
- досліджений підхід до кодування бітового опису сегментів зображення не потребує застосування етапів контекстного моделювання, як це виконується у рамках традиційних підходів. Це дозволяє скоротити час на кодоутворення та зменшити обчислювальне навантаження, а також, як наслідок, зменшити енергетичні витрати на функціонування кодеку, що є важливим для випадків, коли ДЗЗ здійснюється на базі літальних апаратів, які мають обмежений енергетичний ресурс, зокрема – БПЛА;

- кодові конструкції бітових площин, утворені шляхом поєднання кодових чисел, є самостійними структурними одиницями, які не залежать одна від іншої. Це створює умови для можливості забезпечення корегування балансу зображення відносно показників якості та обсягу біт, необхідних для його опису.

ВИСНОВКИ

У відповідності до умов технічного завдання, у ході опрацювання матеріалів кваліфікаційної роботи було виконано:

- аналіз ролі та особливостей процесу ДЗЗ;
- дослідження специфіки ведення ДЗЗ та засобів, які при цьому використовуються;
- дослідження проблемних аспектів розвитку методів ведення ДЗЗ в умовах збільшення обсягу даних, що підлягають фіксації у ході зондування та зростання вимог до рівня якості одержуваних даних;
- розгляд ймовірних шляхів забезпечення росту ступеню ущільнення зображень за рахунок модифікації базових технологій стиснення;
- обґрунтування доцільності підходу до кодування сегментів зображень на базі їх бітового опису;
- дослідження схем кодоутворення бітового опису сегментів зображень з використанням нерівновагових позиційних конструкцій.

Зокрема, було виявлено, що:

1. На сьогодні для зберігання результатів ДЗЗ локальної ділянки земної поверхні розміром декілька квадратних кілометрів потребується об'єм пам'яті від сотень мегабайт до десятків гігабайт.

2. Результати ДЗЗ являють собою масиви зображень, отриманих у різних діапазонах спектру.

3. Застосування методів інтелектуальної обробки інформації накладає відповідні вимоги щодо якості зображень, що спричинює ріст роздільних здатностей зображень та як наслідок – суттєве збільшення об'єму біт для їх опису.

4. Для забезпечення ефективного використання пропускну здатності каналів зв'язку у ході трансляції даних ДЗЗ, та скорочення рівня завантажувальності локальних файлоховищ літальних апаратів, необхідно забезпечити ущільнення зібраної графічної інформації, для чого використовуються методи кодування.

5. Умовою стиснення графічних даних без втрат якості є використання відповідних методів кодування, якими на сьогодні можуть бути PNG, JPEG-LS та класичний алгоритм JPEG, за умов функціонування у режимі loseless.

Разом з тим, рівень стиснення, який забезпечують перелічені технології, в умовах зростання обсягів даних є недостатнім. Відтак, необхідно дослідити можливість модифікації однієї з зазначених технологій для збільшення коефіцієнту стиснення.

6. Найбільший потенціал щодо стиснення графічних даних серед досліджуваних технологій відповідає JPEG у режимі *loseless*, за рахунок удосконалення алгоритму кодування без втрат на останньому етапі JPEG-перетворення. Це пояснюється тим, що принцип стиснення PNG не дозволяє виконати модифікацію алгоритму без суттєвої його зміни.

Водночас, архітектура JPEG-LS базується на адаптивному використанні двох кодуєчих алгоритмів, які функціонують паралельно, при цьому вибір певного з них здійснюється у залежності від характеристик та особливостей даних, що надходять на обробку. Це також утруднює модифікацію методу, так як вимагає заміни не одного функціонального модулю, а схеми у цілому.

Виконано дослідження підходу до модифікації технологічного етапу стиснення без втрат за рахунок зміни початкового режиму кодоутворення – на рівні компонент, режимом формування кодового представлення для бітового опису сегментів зображень.

Зокрема, у ході цього було здійснено:

- обґрунтування потенційної можливості підходу до обробки бітового опису сегментів зображень з використанням нерівновагових позиційних конструкцій;
- дослідження методу нерівновагового позиційного кодування бітового представлення сегментів зображення з використанням фронтальної та прогресивної схем, перша з яких орієнтується на послідовну обробку біт компонент у вертикальному напрямку, тобто, - у напрямку зменшення їх розрядності.

Доведено, що навіть за найгірших умов – коли кодуються вертикальні послідовності біт компонент, для досліджуваного методу забезпечується стиснення на рівні, що перевищує показники стандартизованих методів.

Показано доцільність використання прогресивної схеми кодування бітового опису сегментів зображення, яка забезпечує:

- величину коефіцієнта стиснення, яка перевищує у 1,5 – 2,5 разів значення коефіцієнтів стиснення для традиційних методів;

- можливість балансування між показниками обсягу кодованого файлу та рівнем помилки , таким чином дозволяючи виконувати кодування з контрольованим рівнем якості.

Отже, усі завдання кваліфікаційної роботи виконано.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Шовенгердт Р. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений / Р. Шовенгердт. – М. : Техносфера, 2013. – 560 с.
2. Груздов В., Колковский Ю., Криштопов А., Кудря А. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса. Методы и модели обработки изображений / В. Груздов. – М. : Техносфера, 2016. – 482 с.
3. Чандра А., Гош С. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А. Чандра. – М. : Техносфера, 2008. – 312 с.
4. Naas, Erik. (2002). Aeronautical Channel Modeling. Vehicular Technology, IEEE Transactions on. 51. 254 - 264. 10.1109/25.994803.
5. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1073 с.
6. Overview of JPEG LS [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://jpeg.org/jpegls>.
7. JPEG Lossless Compression (ISO/IEC 14495) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000151.shtml>
8. Айфичер Эммануил С. Цифровая обработка сигналов: практический поход / Эммануил С. Айфичер, Барри У. Джервис. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2008. – 992 с.
9. Ватолин Д. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. – М. : ДИАЛОГ – МИФИ, 2003. – 384 с.
10. ДИСКРЕТНАЯ МАТЕМАТИКА: АЛГОРИТМЫ. JPEG, JPEG2000, JPEG-LS. Сжатие изображений с потерями и без [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://rain.ifmo.ru/cat/view.php/theory/data-compression/jpeg-2006>
11. Чемпен Н., Чемпен Д. Цифровые технологии мультимедиа. – М.: Вильямс, 2006. – 624 с.

12. Ричардсон Ян. H.264 and MPEG-4 Video Compression: Video Coding for Next-Generation Multimedia / Ян Ричардсон. – Город. : Издательство, 2005. – 368 с.
13. Shi, Yun Q. Image and video compression for multimedia engineering: fundamentals, algorithms, and standards / Yun Q Shi, Huifang Sun.
14. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
15. Красильников Н.Н. Цифровая обработка изображений. – М.: Вузовская книга, 2011. – 320 с.
16. Баранник В.В. Кодирование трансформированных изображений в инфокоммуникационных системах / В.В. Баранник, В.П. Поляков – Х.: ХУПС, 2010. – 234 с.
17. Ryabukha Yu., Barannik D., Tverdokhle V., Barannik V., Kulitsa O., Faure E., Odarchenko R. Method for Encoding Video Frame Fragments Based on Non-Equilibrium Codes with Minimization of Service Data. International Workshop on Cyber Hygiene (CybHyg-2019 : proceedings of the International Conference. (Kyiv, Ukraine, November 30, 2019). Kyiv. 2019. P. 304-314.
18. Андерсон Д. Дискретная математика и комбинаторика. – М.: Вильямс, 2004. – 960 с.
19. Tarasenko D., Barannik V., Ryabukha Y., Tverdokhlib V., Dodukh A., Suprun O.. Integration the non-equilibrium position encoding into the compression technology of the transformed images. IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS): proceedings of 15th IEEE Intern. Symp., (Novi Sad, Serbia, September 29–October 2, 2017). Novi Sad. 2017. P. 337-339. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110030