

**ПОЛТАВСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ СПОЖИВЧОЇ
КООПЕРАЦІЇ УКРАЇНИ**

РІЗУНЕНКО
Андрій Олексійович

**ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ
ЗОБРАЖЕНЬ**

МОНОГРАФІЯ

ПОЛТАВА-2008

ББК 32.973.26-018.2
Р 49
УДК 004.92

*Рекомендовано Вченою радою
Полтавського університету споживчої
кооперації України протокол № 7
від 01.07.08 р.)*

Рецензенти: *Смердов А.А.* – д.т.н., професор, лауреат державної премії України в галузі науки і техніки, академік Академії інженерних наук України і Академії наук прикладної радіоелектроніки, завідувач кафедри фізики, автоматизації та механізації виробничих процесів Полтавської державної аграрної академії;
Галай М.В. – д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматики та електроприводу Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка;
Кожушко Г.Ф. – д.т.н., завідувач кафедри товарознавства та експертизи непродовольчих товарів Полтавського університету споживчої кооперації України.

А.О. Різуненко

Р 49 Теорія та практика цифрової обробки зображень: Монографія. – Полтава: РВВ ПУСКУ, 2009. – 195 с.

ISBN 978-966-7971-92-2

У монографії розглядаються теоретичні та практичні аспекти побудови методів цифрової обробки сигналів. Викладені особливості психовізуального сприйняття кольорів людиною, способи подання кольорових зображень, методи перетворення (декореляції) елементів кольірних компонент зображень. Детально висвітлюються питання створення нових і удосконалення сучасних архіваторів графіки, методів стеганографічного приховування повідомлень у кольорових фотореалістичних зображеннях.

Монографія стане в нагоді як початківцям, так і професіоналам в галузі цифрової обробки зображень. Її матеріал буде корисним для практиків, розробників новітніх методів компресії графіки без втрат інформації та методів стеганографічного захисту інформації в нерухомих зображеннях.

ISBN 978-966-7971-92-2

Р 49
ББК ББК 32.973.26-018.2
УДК 004.92

© А.О. Різуненко, 2009 р.
© РВВ ПУСКУ, 2009 р.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА

1. ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ

ВИСНОВКИ

2. КОМПРЕСІЯ ТА СТЕГАНОГРАФІЧНІ ДОДАТКИ – ГОЛОВНІ ЗАВДАННЯ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ

2.1. Головні поняття теорії компресії зображень

2.2. Аналіз існуючих систем цифрової стеганографії

2.2.1. Мета приховування одного виду інформації в іншому та області застосування методів приховування інформації

2.2.2. Класифікація методів цифрової стеганографії

2.2.3. Аналіз видів атак на стего

2.2.4. Формулювання задачі інформаційного приховування при активній протидії противника

ВИСНОВКИ

3. ОСОБЛИВОСТІ ПСИХОВІЗУАЛЬНОГО СПРИЙНЯТТЯ КОЛЬОРІВ ЛЮДИНОЮ

3.1. Особливості сприйняття зображень людським оком

3.2. Фізіологічна природа зору людини

3.3. Особливості системи людського зору, що враховуються при побудові пристроїв відображення інформації

3.4. Суб'єктивне оцінювання сприйняття кольорових зображень

ВИСНОВКИ

4. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПОДАННЯ КОЛЬОРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

4.1. Цифрове представлення зображень

4.2. Векторна і растрова графіка

4.3. Програми векторної графіки

4.4. Параметри цифрового зображення

ВИСНОВКИ

5. КОЛІРНІ МОДЕЛІ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ У ТЕЛЕБАЧЕННІ ТА МЕТОДАХ КОМПАКТНОГО ПОДАННЯ

5.1. Поняття колірних моделей зображень та їх місце в методах цифрової обробки зображень

5.2. Аналіз колірних моделей зображень

5.2.1. Колірна модель RGB

5.2.2. Колірна модель CMYK

5.2.3. Колірна модель HSB

5.2.4. Колірні моделі HSL, HSV

5.2.5. Колірна модель LAB

5.3 Колірні моделі, що використовуються у форматах компактного подання зображень

5.3.1. Колірна модель YCbCr

5.3.2. Колірна модель YUV

5.3.3. Модель YIQ

5.4. Колірні моделі зображень, що не призводять до втрат інформації

ВИСНОВКИ

6. ДЕКОРЕЛЯЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЗОБРАЖЕННЯ – СУЧАСНІ ПІДХОДИ, ПРИКЛАДИ ТА ПРОГРАМНІ РЕАЛІЗАЦІЇ

6.1. Аналіз основних видів перетворень компонент зображень

6.1.1. Аналіз основних базисних функцій перетворення Фур'є

6.1.2. Обґрунтування переваг вейвлет-перетворень при декореляції відліків компонент графічних зображень

6.1.3. Двовимірні вейвлети та компресія зображень

6.2. Алгоритми виконання вейвлет-перетворень

6.2.1. Обчислення дискретних вейвлет-перетворень у часовій області

6.2.2. Обчислення дискретних вейвлет-перетворень у частотній області

6.3. Обмеження, що накладаються на базисні функції вейвлет-перетворень

6.4. Аналітичні вирази прямих та зворотних вейвлет-перетворень

6.5. Оцінювання властивостей базисних функцій вейвлет-перетворень

6.5.1. Аналіз статистичних характеристик зображення при застосуванні до нього вейвлет-перетворень

6.5.2. Аналіз характеристик відповідності відновленого зображення початковому

6.6. Реалізація програмного пакета дослідження статистичних характеристик зображень

ВИСНОВКИ

7. ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ТЕОРІЇ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ

7.1. Приклад створення інформаційної технології компресії зображень без втрат якості

7.1.1. Особливості ітераційного виконання вейвлет-розкладання зображень

7.1.2. Розкладання високочастотних трансформант вейвлет-перетворення на блоки старших та молодших бітових площин

7.1.3. Розробка процедури компресії зображень

7.1.4. Розробка процедури відновлення зображень

7.1.5. Розробка методу арифметичного кодування джерел з великим і малим алфавітом

7.1.6. Реалізація інтерфейсу інформаційної технології підтримки процесів компресії і відновлення зображень у телекомунікаційних мережах

7.2. Приклад реалізації стеганографічного алгоритму при використанні зображення-контейнера

7.2.1. Розробка методу приховування даних при дії активного противника

7.2.2. Аналіз стеганографічного методу центрування значень кольірних компонент зображення

7.2.3. Аналіз можливості виправлення помилок та вибір завадостійкого коду

7.2.4. Програмна реалізація розробленого методу

ВИСНОВКИ

ЗАКЛЮЧЕННЯ

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

ДОДАТКИ

ПЕРЕДМОВА

Всебічне впровадження цифрової техніки перетворення, зберігання та передавання інформації зумовлює активний розвиток цифрових методів обробки сигналів. Підсилює цей процес інтеграція сучасних комп'ютерних та телекомунікаційних технологій. Особливого розвитку в умовах сьогодення набувають методи цифрової обробки зображень, оскільки вони становлять значну частину загального трафіку мультисервісних мереж.

Активний розвиток методів цифрової обробки зображень пов'язаний з рядом факторів, найважливішими серед них є:

1. Спеціалісти вважають, що до 85 % від загальної кількості інформації людина одержує саме за допомогою зору.

2. Головною складовою трафіку (до 80–85 %) сучасних телекомунікаційних мереж є мультимедійна інформація (статичні зображення, аудіо- та відеоінформація).

3. Методи цифрової обробки зображення знаходять широке застосування серед багатьох верств населення:

- для учнів середніх шкіл – це в основному додатки, пов'язані з 3D-графікою, що використовуються для розробки комп'ютерних ігор;

- для студентів середніх та вищих навчальних закладів (будь-яких спеціальностей) – архіватори, компресори графіки, програми для перегляду зображень, прості утиліти для створення власної машинної графіки, програми первинної обробки цифрових фотокарток тощо;

- для науковців, що працюють у галузі обробки графічної інформації, – це професійна графічні редактори, спеціалізовані програми для використання в поліграфії тощо;

- для домогосподарок та пенсіонерів – цифрове телебачення, технології одержання та відображення графіки через мережу Інтернет;

- для спеціалістів, що працюють з технологіями критичного застосування – це розробка спеціалізованого програмного забезпечення з використанням методів цифрової обробки зображень;

- для спеціалістів у області захисту мультимедійної інформації – розробка стеганографічних методів для приховування інформаційного каналу, захисту прав власності на інформацію, захисту від незаконного копіювання тощо.

Таким чином, доцільним та актуальним науково-практичним завданням є діяльність, що пов'язана з удосконаленням сучасних та розробкою нових методів цифрової обробки зображень.

1. ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ

Розвиток сучасної телекомунікаційної техніки та технологій впливає на швидке становлення та розвиток інформаційної інфраструктури окремих держав, корпорацій, підприємств середнього та малого бізнесу тощо. Особливістю надпотужного розвитку інформаційних мереж різного гатунку є економічна доступність технічної компоненти та достатньо легка можливість реалізації протокольної (програмної) компоненти мережі. Це зумовлює можливість одержання широкого спектра послуг, що надаються обчислювальними мережами малих підприємств, установ і навіть окремих користувачів.

Розповсюдженість та структурна насиченість телекомунікаційних мереж організацій приводить до різкого збільшення об'ємів інформаційного трафіку, що передаються по них. А як відомо [1, 2], «левова» (до 80–85 %) частка трафіку припадає на передавання мультимедіа. Слід нагадати, що до мультимедійної інформації належить звук, статичні зображення та відео, які за своєю природою займають значні об'єми у порівнянні з, наприклад, текстовими даними.

У зв'язку з цим монографію присвячено особливостям обробки саме зображень як одного із видів мультимедійних даних. Це пов'язано, наприклад, з тим, що дослідження органів людського сприйняття [3, 4] свідчать про те, що більшість інформації людина сприймає саме за допомогою зору.

Вважається, що вже хоча б цих фактів достатньо для того, щоб переконати суспільство у необхідності удосконалення та розробці якісно нових методів цифрової обробки зображень (ЦОЗ).

У даному розділі мова піде про найпопулярніші аспекти застосування технологій та методів ЦОЗ, про їх актуальність та практичне значення. У цілому область використання методів ЦОЗ охоплює такі види діяльності організацій та установ державної та приватної форми власності (рис. 1.1).

Аналіз рис. 1.1 говорить про те, що ЦОЗ проникла майже у всі види інформаційної діяльності людини. Однак, можна виділити окремі галузі, де подання, зберігання та передавання зображень особливо важливі (рис. 1.2).

Коротко розглянемо кожне із завдань ЦОЗ для відповідних галузей застосування.

Компресія (стиснення, компактне подання) цифрових зображень, далі просто компресія зображень – одна з найактуальніших проблем ЦОЗ (див. рис. 1.2). Вона пов'язана з необхідністю економії місця на фізичних носіях інформації і зі зниженням вимог до використаних каналів зв'язку.



Рис. 1.1. Галузі застосування ЦОЗ

Прикладами практичного використання завдання компресії зображень можуть бути такі: стиснення зображень на штучному супутнику Землі з метою збільшення об'єму інформації, що передається за сеанс зв'язку; зменшення об'ємів зображень для швидкого і дешевшого завантаження веб-сторінок; компактне представлення зображень оптоелектронними пристроями (фотоапаратами, камерами тощо) для економного використання дискового простору; застосування графічних архіваторів для зберігання архівних, історичних, художніх та ін. документів; стиснення зображень як окремих кадрів відеопотоку для зменшення об'ємів носіїв та скорочення вимог до якості каналів зв'язку тощо.

Фільтрація шумів – одне із часткових завдань ідентифікації об'єктів у військовій справі, важливе значення це завдання має при підвищенні чіткості зображень у цифровому телебаченні, фільтруванні сигналів у відповідних блоках сучасної приймально-передавальної апаратури і т. ін.

Завдання виділення особливостей доволі часто виникає у багатьох додатках ЦОЗ, під час реставрації архівних фотодокументів, аналізу різноманітних знімків (мікроструктур металів або зварних швів) та ін.

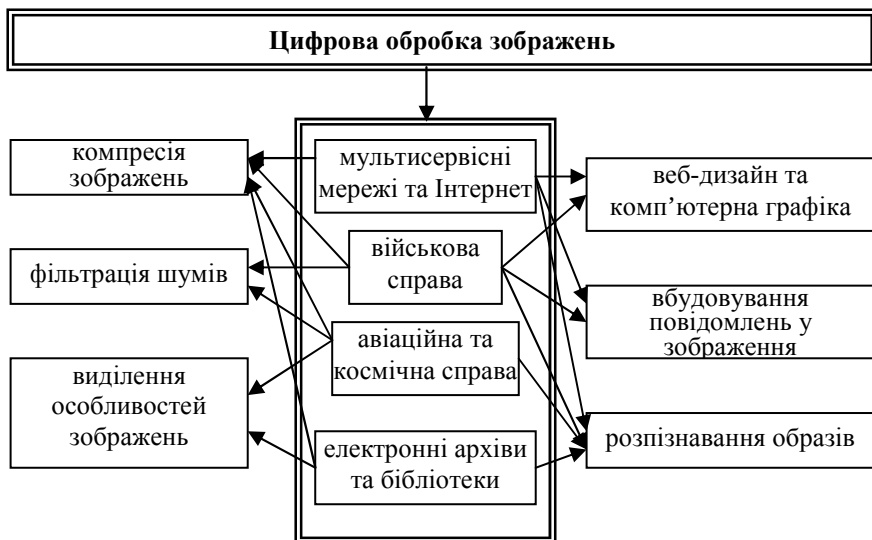


Рис. 1.2. Важливі для ЦОЗ галузі використання та завдання, що ними вирішуються

Пошук неоднородностей є одним із початкових етапів вирішення поставлених завдань.

Веб-дизайн та комп'ютерна графіка. Ці завдання актуальні для розробників штучної графіки (комп'ютерні ігри, анімація, зображення веб-сторінок) та, наприклад, розробників спеціалізованих програм для автоматизованих систем управління (АСУ) військами, об'єктів критичного застосування (управління атомними станціями, залізничним та авіаційним транспортом, центрами космічних польотів) тощо.

Вбудовування повідомлень у зображення. Тут ідеться про стеганографічні методи, в яких як контейнер використовується зображення [5]. При цьому контейнер-зображення знаходить своє застосування у методах вбудовування:

- інформації з метою скритного передавання;
- цифрових водяних знаків (ЦВЗ);
- ідентифікаційних номерів;
- заголовків.

Розпізнавання образів. Особливо актуальним це завдання є у військовій справі, коли правильна ідентифікація того чи іншого військового об'єкта може кардинально змінити хід бою чи локальної операції [6]. Крім цього, завдання розпізнавання образів знаходить своє місце в археології та архівній справі, допомагає відтворити історично цінні документальні знахідки і т. ін.

Сучасних методів ЦОЗ, що забезпечують вирішення зазначених завдань, досить велика кількість. Значний внесок у розвиток технологій цифрової обробки графіки зробили такі відомі вчені як [7, 8]: Котельников А., Шеннон К., Хартлі Р., Фур'є Ж., Хаар А., Адамар Ж., Уолш Т., Зів Д., Лемпел А. та ін. Видатними науковцями останніх десятиліть, що досягли вагомих успіхів у області ЦОЗ є [1, 9–16]: Претт У., Добеші І., Малла С., Ватолін Д., Грібунін В., Мاستрюков Д., Коен А., Свелденс В., Шапіро Д., Кундур Д., Рошал Є. та ін. До українських розробників методів ЦОЗ слід віднести таких спеціалістів як [17–21]: Корольов А., Бараннік В., Конахович Г., Рубан І., Стрюк О. та ін.

Спектр вирішених та запланованих завдань щодо удосконалення та розробки нових методів ЦОЗ, що виконуються цими науковцями, величезний і охоплює майже всі галузі застосування. Звісно, вже відомі надбання у цій області описати у монографії неможливо. Тому в роботі буде розглянуто та досліджено лише частину методів ЦОЗ, ту, що стосується розробки графічних обробників без втрат якості зображень або, як говорилося вище, – графічних архіваторів. Це пов'язано із зростаючим інтересом саме до архіваторів, оскільки інформаційні втрати оброблених зображень не доцільні при вирішенні завдань у військовій справі (наприклад, при розпізнаванні образів); у бібліотечній, архівній та археологічній справах (наприклад, при компресії зображень); у промисловості (при виявленні неоднорідностей у твердих об'єктах); у медицині (при зберіганні рентгенівських знімків); у авіаційній та космічній справі (при картографуванні місцевості та передаванні інформації зі штучних супутників Землі); у стеганографії (при розробці ЦВЗ, скритному передаванні даних, розробці методів захисту авторських прав на мультимедіа).

У монографії детально будуть відображені результати досліджень, які охоплюють матеріали стосовно створення методів компресії зображень без втрат інформації та використання методів ЦОЗ у стеганографії.

ВИСНОВКИ

1. У розділі показано роль та місце методів цифрової обробки зображень серед видів інформаційної діяльності людини.
2. Підкреслено важливість дослідження та розвитку таких областей цифрової обробки зображень, як створення графічних архіваторів та синтез стеганографічних методів.

2. КОМПРЕСІЯ ТА СТЕГАНОГРАФІЧНІ ДОДАТКИ – ГОЛОВНІ ЗАВДАННЯ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ

Як було зазначено у попередньому пункті, одним з важливих завдань ЦОЗ є компресія зображень.

Не менш важливим та відповідальним аспектом є захист цифрової інформації, особливо мультимедіа і, зокрема, зображень. Тому у монографії розкриваються ці проблемні питання. Інші завдання ЦОЗ не розглядаються, оскільки обсяг роботи обмежений.

2.1. Головні поняття теорії компресії зображень

З практичної точки зору *компресія інформації* взагалі і *зображень* зокрема – це або зменшення об'ємів пам'яті, що необхідна для зберігання даних, або збільшення об'ємів даних, які передаються за одиницю часу. Ефект від цього очевидний – економія на мікросхемах пам'яті чи на оплаті за інформаційний трафік.

Сутність методів компактного подання цифрових зображень полягає у тому, що елементам початкового масиву, які зустрічаються частіше, привласнюється коротший код ніж тим, що зустрічаються рідше [17].

Взаємозв'язок між різноманіттям кодів та ймовірностями їх появи вперше описано в кінці 40-х років XX століття Клодом Шенноном у його роботі «Математична теорія зв'язку». Теорема стверджує, що в каналі зв'язку без завад можна так перетворити послідовність символів джерела в послідовність символів коду, що середня довжина символів коду може бути наскільки завгодно близькою до ентропії джерела повідомлень $H(S)$, що дорівнює

$$H(S) = -\sum_{i=1}^N p(s_i) \times \log_2 p(s_i), \quad \text{біт / символ}, \quad (2.1)$$

де $p(s_i)$ – ймовірність появи конкретного повідомлення s_i із N можливих символів алфавіту джерела.

Число N називають об'ємом (потужністю) алфавіту джерела. Ентропія джерела $H(S)$ виступає кількісною мірою різноманітності повідомлень, що видаються джерелом, і є його основною характеристикою. Чим різноманітніший алфавіт S повідомлень і порядок їх появи, тим більша ентропія $H(S)$ і тим складніше цю послідовність повідомлень стиснути. Ентропія джерела максимальна, якщо апріорна вірогідність повідомлень і вірогідність їх видачі рівні між собою. Максимальне значення ентропії визначається виразом.

$$H_{\max}(S) = \log_2 N, \quad \text{біт / символ}.$$

З іншого боку, $H(S) = 0$, якщо одне з повідомлень видається постійно, а поява інших повідомлень неможлива. Одиницею вимірювання ентропії є біт. 1 біт – це та невизначеність, яку має джерело з рівномірною видачею двох можливих повідомлень (звичайно символів «0» і «1»). Ентропія $H(S)$ визначає середнє число двійкових знаків, необхідних для кодування початкових символів (повідомлень) джерела. Так, якщо початковими символами є російські букви ($N = 32$) і вони передаються рівномірно і незалежно, то $H_{\max}(S) = 5$ біт. Кожну букву можна закодувати послідовністю з п'яти двійкових символів, оскільки існують 32 такі послідовності.

Якщо початкові символи передаються нерівномірно і залежно (як і відбувається у більшості реальних джерел інформації), то ентропія джерела буде нижчою за свою максимальну величину $H(S) < H_{\max}(S)$. У цьому випадку ентропія джерела буде визначатися виразом:

$$H(S) = - \sum_{i=1}^N p(s_i) \sum_{j=1}^N p(s_i / s_j) \times \log_2 p(s_i / s_j), \quad \text{біт / символ}, \quad (2.2)$$

де $p(s_i/s_j)$ – імовірність появи символу s_i після символу s_j .

Вираз (2.2) дозволяє визначити ентропію джерела, в якому взаємозв'язок існує тільки між сусідніми символами повідомлення. На практиці взаємозв'язок тягнеться на більшу кількість символів, розташованих поряд. Вираз для визначення ентропії джерела, в якому існує взаємозв'язок між n – символами, передуючими тим, що розглядаються, набуває вигляду:

$$H(S) = - \sum_{i=1}^N p(s_i) \sum_{j=1}^{N'} p(s_i / C_j) \times \log_2 p(s_i / C_j), \quad \text{біт / символ},$$

де N' – кількість дозволених для даного джерела кодових комбінацій, які можуть бути сформовані із n – елементів; $p(s_i/C_j)$ – імовірність появи символу s_i після комбінації C_j .

Надмірність джерела інформації визначається співвідношенням ентропії даного джерела до максимальної ентропії джерел даного типу. При цифровому кодуванні інформації максимальна ентропія по суті рівна кількості розрядів, що відводяться для кодування елементів повідомлення. Кількісно надмірність джерела інформації визначається коефіцієнтом надмірності

$$K_{\text{над}} = \frac{H(S)}{H_{\max}(S)}. \quad (2.3)$$

Надмірність властива більшості джерел інформації. Наприклад, експериментально встановлено, що для російського літературного тексту $H(S) = 1,5$ біт, для віршів $H(S) = 1,0$ біт, а для текстів телеграм $H(S) = 0,8$ біт. Отже, можливий спосіб кодування, в якому в середньому на букву російського тексту затратуватиметься не більше ніж 1,5, 1,0 або навіть 0,8 двійкових символів.

У докторській дисертації професора Корольова А.В. [17], а також у роботах [1, 3, 4] детально описано усі види надмірності інформації.

Семантична надмірність визначається якісними ознаками, що містяться у повідомленні. Такими ознаками можуть бути цінність, терміновість, смисловий зміст.

Комбінаторна надмірність обумовлена недосконалістю кодування в двійковій системі одиниць.

Статистична надмірність виникає в результаті нерівної вірогідності появи різних символів повідомлення і статистичних взаємозв'язків між ними.

Кореляційна надмірність викликана схожістю (іноді повною ідентичністю) різних ділянок повідомлення, наявність груп символів, що повторюються.

Структурна надмірність є наслідком неоптимальної форми представлення інформації (роздутістю службової інформації і т.д.).

Психофізіологічна надмірність обумовлена недосконалістю органів сприйняття людини. Особливо актуальна для звуку, зображень і відеоінформації.

Надмірність може бути зменшена за рахунок використання програмних або апаратних засобів компресії даних, що реалізують той або інший метод компактного подання даних.

Під *методом компресії даних* розуміється сукупність дій, що дозволяє однозначно зіставити початковий набір даних з набором стиснутих даних. Причому об'єм отриманих в результаті компресії даних менший об'єму початкових даних [1]:

$$y(t) = F_{\text{ком}}(x(t)), \quad V_{y(t)} < V_{x(t)},$$

де $x(t)$ – початковий набір даних;

$y(t)$ – набір стиснутих даних;

$F_{\text{ком}}$ – сукупність дій, що складають метод стиснення;

$V_{x(t)}$ – об'єм початкових даних;

$V_{y(t)}$ – об'єм стиснутих даних.

Застосовуючи до стиснутого набору даних метод відновлення («зворотний» методу компресії), можна отримати набір даних, ідентичний початковому набору даних (для компресії з втратами приблизно відповідний початковому), тобто

$\tilde{x}(t) = F_{\text{відн}}(y(t))$, $\tilde{x}(t) = x(t)$, а при компресії з втратами $\tilde{x}(t) \approx x(t)$,
де $\tilde{x}(t)$ – відновлений після компресії набір даних;

$F_{\text{відн}}$ – сукупність дій, що складають метод відновлення.

Виходячи з функціонального призначення засобів компресії даних, основними одиничними показниками їх порівняльної оцінки є [1, 3, 17].

Ступінь стиснення (коефіцієнт компресії). Значення даного показника визначається як відношення об'єму початкових даних до об'єму їх стиснутого подання

$$C = \frac{V_{\text{исх}}}{V_{\text{сж}}}, \text{ разів}, \quad (2.4)$$

де $V_{\text{поч}}$ – об'єм початкових даних (у двійкових одиницях);

$V_{\text{ком}}$ – об'єм стиснутих даних.

Максимально можливий ступінь стиснення зображення без втрат, згідно з теорією інформації [1], зворотний коефіцієнту надмірності

$$C_{\text{max. можл}} = \frac{1}{K_{\text{над}}} = \frac{H_{\text{max}}(X)}{H(X)}, \text{ разів},$$

де $K_{\text{над}}$ – коефіцієнт надмірності;

$H_{\text{max}}(X)$ – максимальне значення ентропії;

$H(X)$ – значення ентропії зображення.

Для методів компресії з втратами максимально можливий ступінь стиснення не визначається коефіцієнтом надмірності, оскільки виключається з повідомлення інформаційна частина, що міститься в цій інформації [22]. Максимально можливий ступінь стиснення в даному випадку визначається тим рівнем спотворення повідомлення, який людина-оператор визнає прийнятним для вирішення завдань, що стоять перед ним.

Максимальний і мінімальний ступінь стиснення даних для кожного конкретного методу компресії може бути визначений шляхом аналізу особливостей побудови методу і підбирання такого набору даних, на якому метод стиснення дасть максимальний (мінімальний) ступінь стиснення. Для більшості методів компресії поява таких наборів даних серед реальних повідомлень маловірогідна.

Необхідно відзначити, що для одного і того ж методу компресії, значення ступеня стиснення повідомлень з різним ступенем надмірності можуть відрізнятися в десятки, а то і сотні разів. Тому для порівняльної оцінки методів компресії даних необхідна побудова залежності ступеня стиснення від надмірності повідомлення або визначення

середніх показників на повідомленнях фіксованого типу (мова, текст, графіка, відео і т.д.).

Нижче описано ряд показників, які дозволяють оцінити спотворення, що вносяться компресором при стисненні зображень.

Показники відповідності відновленого зображення початковому. Показники даної групи дозволяють оцінити ступінь відповідності відновлених після компресії з втратами даних і початкових даних.

Максимальна різниця. Максимальне відхилення значень відновленого повідомлення від значень початкового

$$\Delta x_{\max} = \max_i |x_i - \tilde{x}_i|, \quad i \in 0, \dots, n-1, \text{ рівнів квантування,}$$

де x_i – значення елементів початкового зображення;

$\tilde{x}_i$ – значення елементів відновленого після компресії зображення;

$n = M \times K$ – кількість елементів (пікселів) у повідомленні, M – ширина зображення в елементах або пікселях (під елементом зображення розуміється значення пікселя в одній з кольірних компонент зображення), K – висота зображення в елементах або пікселях.

Середня абсолютна різниця.

$$\Delta \bar{x} = \frac{1}{M \times K} \sum_{i=0}^{n-1} |x_i - \tilde{x}_i|, \text{ рівнів квантування.}$$

Нормована середня абсолютна різниця.

$$\|\Delta \bar{x}\| = \sum_{i=0}^{n-1} |x_i - \tilde{x}_i| / \sum_{i=0}^{n-1} |x_i|.$$

Середньоквадратичне відхилення значень відновленого повідомлення від значень початкового.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i - \tilde{x}_i)^2}, \text{ рівнів квантування.} \quad (2.5)$$

Нормоване середньоквадратичне відхилення.

$$\|\sigma\| = \sqrt{\sum_{i=0}^{n-1} (x_i - \tilde{x}_i)^2 / \sum_{i=0}^{n-1} (x_i)^2}.$$

L^p - норма.

$$L^p = \left(\frac{1}{M \times K} \sum_{i=0}^{n-1} |x_i - \tilde{x}_i|^p \right)^{1/p}.$$

Лапласове середньоквадратичне відхилення.

$$\Delta L = \sum_{i=0}^{n-1} (\Delta^2 x_i - \Delta^2 \tilde{x}_i)^2 \Big/ \sum_{i=0}^{n-1} (\Delta^2 x_i)^2,$$

де $\Delta^2 x_i = x_{m+1,k} + x_{m-1,k} + x_{m,k+1} + x_{m,k-1} - 4x_{m,k}$; $m=1,\dots, M$; $k=1,\dots, K$.

Співвідношення сигнал/шум у відновленому повідомленні. Під шумом розуміють спотворення, що вносяться у відновлене повідомлення в результаті процедур компресії і декомпресії

$$P_{s/n} = 10 \log \left(\frac{\sum_{i=0}^{n-1} (x_i)^2}{\sum_{i=0}^{n-1} (x_i - \tilde{x}_i)^2} \right), \text{ дБ}.$$

Пікове співвідношення сигнал/шум у відновленому повідомленні.

$$P_{s/n}^{\max} = 20 \log \left(\frac{255^2}{\sum_{i=0}^{n-1} (x_i - \tilde{x}_i)^2} \right), \text{ дБ}, \quad (2.6)$$

Якість зображення.

$$Q = 1 - \sum_{i=0}^{n-1} (x_i - \tilde{x}_i)^2 \Big/ \sum_{i=0}^{n-1} (x_i)^2.$$

Для графічних архіваторів значення максимальної різниці, середньої абсолютної різниці, середньоквадратичного відхилення рівні нулю; співвідношення сигнал/шум і пікове співвідношення сигнал/шум рівні нескінченності; а значення якості зображення дорівнює одиниці. Для методів компресії з втратами значення перерахованих показників визначаються, як правило, ступенем стиснення: чим він вище, тим більше рівень спотворень у відновленому повідомленні. В окрему групу необхідно виділити методи стиснення зображень «майже без втрат», для яких значення перших трьох показників коливаються в межах 1–2-го рівня квантування, а співвідношення сигнал/шум і пікове співвідношення сигнал/шум більше 50–55 дБ. Подібний рівень

спотворень не може бути визначений людиною з причини недосконалості органів сприйняття. Незначні спотворення в даній групі методів стиснення частіше за все пояснюються приведенням у процесі компресії і (або) декомпресії даних дійсних значень до цілого вигляду.

Кореляційні показники спотворення зображень.

Нормована взаємна кореляція.

$$\|R\| = \sum_{i=0}^{n-1} x_i \times \tilde{x}_i / \sum_{i=0}^{n-1} (x_i)^2.$$

Якість кореляції.

$$Q_R = \sum_{i=0}^{n-1} x_i \times \tilde{x}_i / \sum_{i=0}^{n-1} x_i.$$

Розглянуті дві групи показників називають об'єктивними, оскільки вони дозволяють кількісно оцінити якість відновленого зображення. Їх недоліком є те, що вони слабо пов'язані із суб'єктивним (за допомогою системи людського зору) оцінюванням зображень.

Проблема поєднання об'єктивних і суб'єктивних показників у повній мірі не вирішена й на сьогодні, хоча деякі вчені досягли певних успіхів у цьому. Наприклад, Фаррелл (J.E. Farrell) та Ван ден Бранден Ламбрехт (C.J. van den Branden Lambrecht) [23] запропонували використати показник, що враховує чутливість системи людського зору (СЛЗ), явище маскування СЛЗ та базується на багатоканальності просторового зору людини. Послідовність знаходження показника така:

1. Розділення зображення на сегменти.
2. Розкладення початкового зображення і помилок кодування на компоненти (які враховують особливості органів сприйняття людини), використовуючи гребінчасті фільтри.
3. Знаходження порогу виявлення для кожного пікселя на основі початкового зображення-маски.
4. Розподілення фільтрованої помилки за допомогою порогу прийняття рішення.
5. Об'єднання помилок за усіма кольорними компонентами зображення.

Загальна формула для обчислення комплексного показника записується так:

$$Q_{FL} = 10 \lg \left(\frac{255^2}{\mathcal{E}^2} \right), \text{ ВдБ},$$

де $\mathcal{E}$ – обчислене спотворення; ВдБ – «візуальний децибел».

Іншим способом сумісного врахування об'єктивних і суб'єктивних показників якості відновлених після компресії зображень є використання нормалізованої оцінки якості $\|Q\|$ відповідно до рекомендацій сектора радіозв'язку Міжнародного Союзу Електрозв'язку (МСЕ) – ITU-R Rec. 500:

$$\|Q\| = \frac{5}{1 + N \cdot \varepsilon},$$

де ε – обчислене спотворення;

N – коефіцієнт нормування, який вибирається таким, щоб характеристика спотворення відображала відповідну якісну оцінку.

Суб'єктивні показники оцінювання якості зображень будуть розглянуті більш детально у наступному пункті.

Часові показники..

Група показників, що дозволяє оцінити час, необхідний для виконання компресії і декомпресії даних з використанням засобів, що реалізують досліджуваний метод стиснення.

Час, необхідний для компресії (декомпресії) – $T_{стис}$ ($T_{віднов}$), с.

При оцінюванні значень даних показників обов'язково необхідно враховувати об'єм даних, що піддавався компресії, і продуктивність програмно-апаратних засобів, з використанням яких виконувалося стиснення. Продуктивність може бути оцінена за показниками синтетичних тестів на продуктивність або, в крайньому випадку, при виконанні компресії на персональному комп'ютері (ПК) – за частотою і типом центрального процесора.

Швидкість виконання компресії (декомпресії).

$$U_{стис} = \frac{V_{поч}}{T_{стис}}, \text{ біт / с } \text{ і } U_{відн} = \frac{V_{поч}}{T_{відн}}, \text{ біт / с },$$

де $V_{поч}$ – об'єм початкового повідомлення;

$T_{стис}$ – час, необхідний для компресії повідомлення;

$T_{відн}$ – час, необхідний для відновлення повідомлення.

Перевага даного показника в тому, що є можливість отримання середньої швидкості компресії (декомпресії), що дозволяє абстрагуватися від об'єму даних і враховувати тільки продуктивність засобів, на якій отримана дана середня швидкість.

Показники симетричності засобів компресії даних.

Показники, що дозволяють оцінити відношення характеристик, отриманих при компресії, до аналогічних характеристик при декомпресії даних [1]. Як правило, визначають симетричність за часом, іноді за необхідною для функціонування засобів компресії і декомпресії

об'єму пам'яті. Коефіцієнт симетричності за часом може бути визначений як

$$K_{\text{сим } t} = \frac{T_{\text{стис}}}{T_{\text{відн}}} = \frac{U_{\text{ср стис}}}{U_{\text{ср відн}}},$$

де $U_{\text{ср стис}}$ – середня швидкість компресії;

$U_{\text{ср відн}}$ – середня швидкість декомпресії.

Показники, що враховують характерні особливості методу.

Показники даної групи враховують споживацькі властивості методів компресії, здатні вплинути на вибір того або іншого методу. Найбільш часто використовувані показники даної групи є:

- клас даних, до якого може бути застосовний метод. Ряд методів компресії показує прийнятні результати за ступенем стиснення тільки на даних певного класу;

- можливість попереднього перегляду зображення з низькою роздільною здатністю. Дана вимога особливо критична для систем, у яких зображення передаються по низькошвидкісних каналах зв'язку з високою вірогідністю виникнення помилок, або для систем довготривалого зберігання великих архівів зображень;

- стійкість до помилок. Відповідність даних вимозі означає локальність спотворень у відновленому повідомленні при трансформації стиснутого представлення повідомлення;

- можливість редагування.

Важливість даних показників потребує приділення їм більшої уваги, тому розглянемо кожен із них більш детально.

Класи зображень.

Ватолін Д.С. у методичному посібнику [11] виділяє такі класи зображень.

Клас 1. Зображення з невеликою кількістю кольорів (4-16) і значними областями, що заповнені одним кольором. Плавні переходи кольорів відсутні. Приклади: ділова графіка – гістограми, діаграми, графіки, тощо.

Клас 2. Зображення з плавними переходами кольорів, побудовані на комп'ютері. Приклади: графіка презентацій, ескізні моделі в системах автоматизованого проектування тощо.

Клас 3. Фотореалістичні зображення. Приклад: відскановані фотокартки.

Клас 4. Фотореалістичні зображення з накладенням ділової графіки. Приклад: реклама.

Можливість попереднього перегляду зображення з низькою роздільною здатністю.

Ця можливість актуальна для мережних додатків, де перекачування зображень може зайняти багато часу. Тому бажано, щоб за початком файлу було зрозуміло сутність об'єкта для подальшого прийняття рішення щодо його передавання. Дослідження особливостей використання цього показника буде показано нижче.

Стійкість до помилок.

Вимога означає локальність спотворення зображення при виникненні помилки або втраті фрагмента файлу, що передається. Дана можливість використовується при ширококомовному передаванні зображень по мережі. Вимога має протиріччя з високим ступенем компресії, оскільки при цьому потрібно вводити надлишкову інформацію. Дослідження особливостей використання завадостійкості методу компресії зображень буде розглянуто нижче.

Можливість редагування.

Під можливістю редагування розуміють мінімальне спотворення повідомлення при його повторному стисненні з використанням даного методу компресії. Показник актуальний тільки для компресорів графіки з втратами, тому в подальшому не розглядається.

Окрім чотирьох основних показників, що враховують характерні особливості методу компресії, ряд спеціалістів [11, 24] виділяють ще два.

Масштабування зображень.

Вимога передбачає легкість зміни розмірів зображення до розмірів вікна активного додатка. Наприклад, одні алгоритми дозволяють легко масштабувати зображення прямо під час декомпресії, в той час як інші не тільки не дозволяють легко масштабувати, але й збільшують імовірність появи шкідливих артефактів після застосування стандартних алгоритмів масштабування. До таких алгоритмів належить формат JPEG. Характер спотворень, що вносяться алгоритмом JPEG такий, що зменшення або збільшення зображення може значно змінити деякі ділянки початкового файлу.

Невелика вартість апаратної реалізації. Ефективність програмної реалізації.

Дуже часто вказані показники враховують розробники 3D-графіки, спеціалісти з розробки програмного забезпечення в системах критичного застосування тощо. Обидва показники будуть мати різні значення при використанні того чи іншого алгоритму чи навіть формату (як конкретної реалізації алгоритму) компресії. Вибір та застосування потрібного формату з точки зору мінімальної апаратної реалізації або максимальної ефективності програмної реалізації для зменшення об'ємів зображень буде залежати від вимог користувача.

Останніми роками врахуванням описаних показників все важче підвищити ефективність методів ЦОЗ за якимось із критеріїв. Тому

необхідно використовувати додаткові специфічні особливості зображень та системи людського зору (СЛЗ) для удосконалення методів компресії.

До таких особливостей можуть належати високорівневі властивості СЛЗ [25]:

- чутливість до контрасту. Висококонтрастні ділянки зображення, перепади яскравості звертають на себе значну увагу;
- чутливість до розміру. Великі ділянки зображення «помітніші» менших розмірів. Причому існує межа насиченості, коли подальше збільшення розміру несуттєве;
- чутливість до форми. Довгі і тонкі об'єкти викликають більшу увагу, ніж круглі однорідні;
- чутливість до кольору. Деякі кольори (наприклад, червоний) «помітніші» за інші. Цей ефект підсилюється, якщо фон заднього плану відрізняється від кольору фігур на ньому;
- чутливість до місця розташування. Людина схильна в першу чергу розглядати центр зображення;
- уважність до зображень переднього плану, ніж заднього;
- якщо на зображенні є люди, в першу чергу спостерігач звертає свою увагу на них. На фотокартці спостерігач звертає першочергову увагу на обличчя, очі, рот, руки;
- чутливість до зовнішніх подразників. Рух очей спостерігача залежить від конкретної обстановки, від одержаних ним перед переглядом або під час нього інструкцій, додаткової інформації.

Врахування тих чи інших високорівневих властивостей СЛЗ у методах компресії зображень може значно підвищити ступінь чи час стиснення. Підтвердженням цього факту є формат JPEG-2000, який враховує деякі з вказаних властивостей СЛЗ.

Запропоновані в даному пункті одиничні показники оцінювання засобів компресії даних дозволяють побудувати комплексні показники оцінювання засобів компресії зображень, що залежать від конкретних умов функціонування підсистеми компресії зображень і системи зв'язку в цілому [4].

Як основний показник, що визначає область застосування того або іншого методу, можна виділити наявність втрат інформації при компресії. Методи компресії з втратами, незважаючи на високі коефіцієнти стиснення, незастосовні для інформації у вигляді тексту або цифрових послідовностей. Не можуть застосовуватися вони також для даних, на основі яких ухвалюються важливі управлінські рішення. Отже, методи компресії з втратами можуть знайти лише обмежене застосування в системах зв'язку універсального призначення.

2.2. Аналіз існуючих систем цифрової стеганографії

У даному підрозділі з'ясовуються основні причини, які привели до розвитку досліджень в області цифрової стеганографії, проводиться аналіз областей застосування методів приховування інформації. Наведена класифікація систем стеганографії за різними критеріями. Показано аналіз найбільш поширених атак на стегосистеми. У завершенні розділу розглядається та формулюється завдання інформаційного приховування при активній протидії противника.

2.2.1. Мета приховування одного виду інформації в іншому та області застосування методів приховування інформації

Скільки існує людство, стільки існує і проблема обміну інформацією. З одного боку люди намагаються спілкуватися і обмінюватися один з одним інформацією, а з іншого боку – приховати від сторонніх не тільки суть інформації, але й факт її передавання. Тому людство інтенсивно розвиває як засоби передавання, так і засоби приховування інформації. Для цього застосовуються методи криптографії та стеганографії.

Криптографія – система зміни інформації з метою зробити її незрозумілою (зашифрованою) для сторонніх осіб.

Стеганографія – система зміни інформації з метою приховування самого факту існування секретного повідомлення. Вона не замінює криптографію (шифрування даних), а доповнює її ще одним рівнем безпеки. При обробці даних стеганографічними методами здійснюється приховування інформації, що передається, в інших об'єктах (файлах, дисках і т. п.) таким чином, щоб стороння особа не здогадувалась про існування прихованого секретного повідомлення. При цьому виявити таке повідомлення достатньо складно, але якщо це і відбудеться, то повідомлення може бути до того ж ще й надійно зашифроване.

Методи стеганографії, враховуючи природні неточності пристроїв оцифрування та надлишковість аналогового відео- або аудіосигналу, дозволяють приховати повідомлення в комп'ютерних файлах.

Таким чином, виникає питання – в чому полягає необхідність приховування одного виду інформації в іншому і коли взагалі доцільно приховувати повідомлення, а коли застосовувати методи криптографії?

Як було зазначено вище, основною метою стеганографії є приховування факту існування інформаційного повідомлення. Перевага перед криптографією у даному випадку полягає в тому, що противник не знає, чи інформація взагалі існує, чи ні. Тому завдання аналізу ускладнюється, оскільки тепер доводиться шукати не тільки способів приховування змісту, як це було б при використанні криптографії, а ще й

наявність таємного повідомлення і метод (ключ), яким це повідомлення було приховане. Використання цих методів стеганографії особливо доцільно в тих країнах, де заборонено застосовувати засоби криптографії.

На сьогодні основними напрямками програмних реалізацій стегоалгоритмів є такі [26]:

1. Алгоритми, що засновані на властивостях текстової інформації.

Наприклад, методи, засновані на схожості написання кирилиці і латинських символів (одні символи вважаються одиницями, а інші – нулями). Також можна виділити окремі букви або слова із тексту за визначеним алгоритмом. Це один із небагатьох напрямків інформаційної безпеки, де власні алгоритми можуть доволі успішно конкурувати з відомими, адже чим менш вивчений буде алгоритм, тим важче буде визначити наявність прихованого повідомлення.

2. Методи, що використовують особливості комп'ютерних форматів.

Дані методи прості в реалізації і часто не вимагають спеціального програмного забезпечення (ПЗ). Наприклад, поле коментарів у форматі JPEG і поле «Comrapu» у властивостях файлів з розширенням *.EXE. Платою за простоту реалізації є просте виявлення прихованого повідомлення. Хоча і ці алгоритми можуть використовуватися, коли у зловмисників немає навіть підозри про наявність секретної інформації.

3. Алгоритми, що використовують надмірність аудіовізуальної інформації.

Часто цю групу методів називають методами заміни молодших біт контейнера або методами найменш значущих біт (LSB – Least Significant Bit). Основними контейнерами у цьому випадку є формати так званого прямого кодування (нестиснутий формат), наприклад, BMP для графіки, або WAV для звуку. У них кожен мінімальний елемент, наприклад, піксель в BMP, описується окремим записом і ніяк не пов'язаний з іншими. Так, у звичайному форматі BMP на кожен піксель відводиться 24 біти – по 8 біт на канал. При заміні молодшого біта зображення візуально практично не змінюється. У всякому випадку, не кожна людина і не завжди зможе помітити різницю між пустим і заповненим контейнером.

Досить вдалим є порівняння існуючих методів стеганографії (табл. 2.1) у статті Барсукова В.С. та Романцова А.П. [26].

Однак, останнім часом все більш актуальним стає новий напрямок стеганографії – цифрові водяні знаки (ЦВЗ). Розвиток цього напрямку був викликаний проблемою захисту мультимедійної інформації, яка представлена у цифровому вигляді, від несанкціонованого доступу (до

неї також можна віднести проблему захисту авторських прав на цифрову продукцію).

Таблиця 2.1

Порівняльні характеристики стеганографічних методів

Стеганографічні методи	Коротка характеристика методів	Недоліки	Переваги
1. Методи використання спеціальних властивостей комп'ютерних форматів даних			
1.1. Методи використання зарезервованих для розширення полів комп'ютерних форматів даних	Поля розширення є в багатьох мультимедійних форматах, вони заповнюються нулями і не враховуються програмою	Низький ступінь прихованості, передавання невеликих обмежених об'ємів інформації	Простота використання
1.2. Методи спеціального форматування текстових файлів			
1.2.1. Методи використання відомого зміщення слів, речень, абзаців	Методи, засновані на зміщенні положення рядків і розстановки слів в реченні, що забезпечується вставкою додаткових пробілів між словами	1. Слабка продуктивність методу, передавання невеликих об'ємів інформації. 2. Низький ступінь скритності	Простота використання. Існує опубліковане програмне забезпечення реалізації даного методу
1.2.2. Методи вибору визначених позицій букв (нульовий шифр)	Акрівірш – частковий випадок цього методу (наприклад, початкові букви кожної строчки утворюють повідомлення)		
1.2.3. Методи використання спеціальних властивостей полів форматів, що не відображаються на екрані	Методи засновані на використанні спеціальних «невидимих», скритих полів для організації посилань (наприклад, використання чорного шрифту на чорному фоні)		

Стеганографічні методи	Коротка характеристика методів	Недоліки	Переваги
1.3. Методи приховування в місцях гнучких дисків, які не використовуються	Інформація записується у невикористані місця дисків (наприклад, на нульову доріжку)	1. Слабка продуктивність методу, передавання невеликих об'ємів інформації. 2. Низький ступінь прихованості	Простота використання. Існує опубліковане програмне забезпечення реалізації даного методу
1.4. Методи використання функцій імітації (mimic-function)	Метод заснований на генерації текстів і є узагальненням акровірша. Для секретного повідомлення генерується змістовний текст, що приховує саме повідомлення	1. Слабка продуктивність методу, передавання невеликих об'ємів інформації. 2. Низький ступінь прихованості	Утворений текст не є підозрілим для систем моніторингу мережі
1.5. Методи видалення заголовку, який ідентифікує файл	Повідомлення, що приховується, шифрується і в утвореному блоці видаляється заголовок ідентифікації, залишаються тільки шифровані дані. Одержувач раніше знає про передавання повідомлення і має заголовок, якого не вистачає	Проблема приховування вирішується тільки частково. Необхідно спочатку передати частину інформації одержувачу	Простота реалізації. Багато засобів (White Noise Storm, S-Tools), забезпечують реалізацію цього методу з PGP шифроалгоритмом

Стеганографічні методи	Коротка характеристика методів	Недоліки	Переваги
<i>2. Методи використання надмірності аудіо і візуальної інформації</i>			
2.1. Методи використання надмірності цифрових фотокарток, цифрового звуку і цифрового відео	Молодші розряди цифрових відліків містять дуже мало корисної інформації. Їх заповнення додатковою інформацією практично не впливає на якість сприйняття, що і дає можливість приховування конфіденційної інформації	За рахунок уведення додаткової ін.-формації спотворюються статистичні характеристики цифрових потоків. Для зниження оз-нак, які б могли компрометувати, необхідна корекція статистичних характеристик	Можливість прихованого передавання великого об'єму інформації. Можливість захисту авторського права, прихованого зображення товарної марки, реєстраційних номерів і т.п.

ЦВЗ – це спеціальна мітка, яка непомітно вбудовується в зображення або інший сигнал з метою тим чи іншим чином контролювати його використання.

Сучасні системи формування ЦВЗ використовують принцип вбудовування мітки, яка є вузькосмуговим сигналом, у широкому діапазоні частот зображення, що маркується. Вказаний метод реалізується за допомогою двох різних алгоритмів і їх можливих модифікацій. У першому випадку інформація приховується шляхом фазової модуляції інформаційного сигналу (несучої) з псевдовипадковою послідовністю чисел. У другому – наявний діапазон частот ділиться на декілька каналів і передавання проводиться між цими каналами. Відносно початкового зображення мітка є деяким додатковим шумом, але оскільки шум у сигналі присутній завжди, його незначне зростання за рахунок упровадження мітки не дає візуально помітних спотворень. Крім того, мітка розсіюється по всьому початковому зображенню, внаслідок чого стає більш стійкою до вирізання.

ЦВЗ можуть застосовуватись для захисту від копіювання і несанкціонованого використання. У зв'язку з бурхливим розвитком технологій мультимедіа гостро стало питання захисту авторських прав і інтелектуальної власності. Прикладами можуть бути фотографії, аудіо- та відеозаписи тощо. Переваги, які дають способи представлення і передавання повідомлень у цифровому вигляді, можуть виявитися пере-

кресленими з легкістю, внаслідок викрадення або модифікації. Одним з найбільш ефективних технічних засобів захисту мультимедійної інформації є вбудовування в об'єкт захисту невидимих міток – ЦВЗ. Невидимі ЦВЗ аналізуються спеціальним декодером, який виносить рішення про їхню коректність. ЦВЗ можуть утримувати деякий автентичний код, інформацію про власника або деяку керуючу інформацію. Найбільш доцільними об'єктами захисту за допомогою ЦВЗ є нерухомі зображення, файли аудіо- та відеопослідовностей.

Розглянемо більш детально проблему захисту інформації, що представлена у цифровому вигляді. На сьогодні основними проблемами в цьому напрямку є піратство, незаконне втручання та проблема шахрайства [27].

Піратством називається незаконне копіювання або комерційний перепродаж цифрових носіїв. Легкість копіювання даних, здатність створювати ідентичні копії та зростаюче використання цифрових носіїв робить піратство істотною проблемою в області інформаційного захисту. На рис. 2.1 демонструється, як власник зображення продає його порушнику. Хоча інформація при передаванні порушнику може бути захищена шифруванням, але цей захист знімається після розшифрування. Тобто немає ніякого механізму проти утримання порушника від незаконного виробництва копій повідомлень виробника і продажу їх стороннім особам. Тому існує необхідність у додатковому рівні захисту, який направлено на захист інтелектуальної власності.

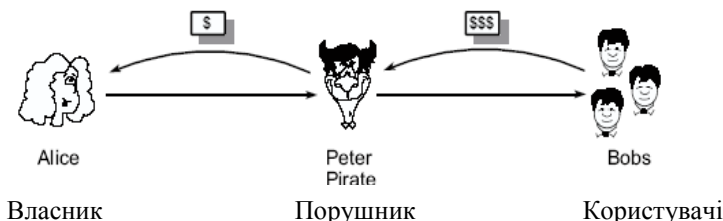


Рис. 2.1. Обмеження звичайного захисту в проблемі піратства

Звичайні методи автентифікації також повністю не забезпечують захист мультимедійної інформації від її спотворення. До спотворення відносять будь-який вид модифікації або підробки даного сигналу. На рис. 2.2 демонструється такий випадок. Виробник передає інформацію користувачеві. Перед доставкою зображення може бути спотворене, наприклад, компресією з втратами, випадковими розрядними помилками або втратою пакета, який забезпечує цілісність сигналу. Крім того, можливо, що інформація викривлена навмисно порушником,

який має доступ до даних, з метою введення в оману особи, що повинна отримати повідомлення.



Рис. 2.2. Обмеження звичайного захисту в проблемі автентифікації

Відомі методи автентифікації підтверджують достовірність інформації за допомогою односторонньої функції (так званої хеш-функції), яка створює послідовність біт – цифровий підпис. Цифровий підпис передається разом з сигналом одержувачу. На приймальному боці одержувач може отримати сигнал за допомогою тієї самої односторонньої функції і порівняти отриману розрядну послідовність з отриманим цифровим підписом. Якщо ці дві послідовності ідентичні, то сигнал не викривлявся, в іншому випадку відбулося викривлення. Такий метод автентифікації хоч і є ефективним для деяких типів даних, але не для мультимедійних, тому що немає можливості розрізнити між собою непередбачені законні модифікації (наприклад, законний користувач може стиснути звуковий файл, при цьому необхідно, щоб збереглась можливість його подальшого законного використання) та несанкціоновані викривлення. В обох ситуаціях цифрове подання змінюється і підпис може бути змінений. Здатність ідентифікувати викривлення в сигналі полегшує деякі рішення відносно цілісності змісту інформації, що необхідно в багатьох випадках.

На рис. 2.3 показано процес шахрайства, до якого відносять процес обману або незаконного вбудовування повідомлень. На схемі видно, що порушник посилає інформацію користувачеві. Він хоче подати її такою, ніби вона надійшла від власника. З метою захисту від таких дій можна окремо пересилати автентичну інформацію у формі зашифрованих повідомлень з гарантіями законного відправника. Але зображення при передаванні часто форматується і переміщується з одного носія на інший. Такі зміни можуть ненавмисно зіпсувати інформацію про її автентичність, що створює труднощі для користувача при ідентифікації законного автора. У таких ситуаціях виникає необхідність в альтернативному методі легалізації сигналу.

Через те, що інформація про автентифікацію передається окремими даними, то вона часто знищується при перетворенні формату або зміні носія.

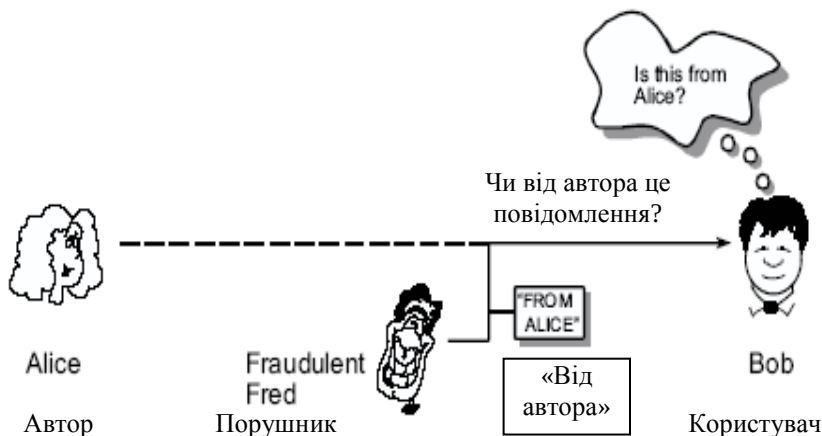


Рис. 2.3. Обмеження звичайного захисту в проблемі шахрайства

Для усунення недоліків звичайних методів захисту, які були розроблені раніше, багато дослідників запропонували застосовувати технології цифрових водяних знаків. Технології ЦВЗ найкраще розроблені для зображень, аудіо та відео, тому що вони направлені на захист інтелектуальної власності, тобто фактично захищено зміст інформації, а не її цифрове подання. У такому випадку прихована інформація передається разом із сигналом навіть після перетворення формату або зміни носія.

Розробка ЦВЗ також викликає інтерес і в несекретних галузях. Тут виділяється два основних напрями: вбудовування заголовків та ідентифікаційних номерів. Вбудовування заголовків найбільш характерне для цифрового підписування фотознімків, схем, аудіо- та відеозаписів. Як приклад можна навести технологію підписування рентгенівських фотознімків, адже набагато легше зберігати лише електронні копії зображень, ніж окремо до кожної з них ще й пояснення. До таких повідомлень висуваються вимоги високої стійкості до стиснення, обрізання, масштабування тощо (напевно, електронну фотокопію намагатимуться стиснути або зменшити).

Технологія вбудовування ідентифікаційних номерів має багато спільного з технологією ЦВЗ. Відмінність полягає лише в тому, що в першому випадку кожна захищена копія має свій унікальний номер. Цей ідентифікаційний номер дозволяє виробнику відстежувати подальшу долю свого продукту: чи не зайнялась особа, що придбала інформацію, незаконним тиражуванням?

На рис. 2.4 зображені загальні галузі застосування ЦВЗ. Вони були згруповані в чотири основні класи: захист від копіювання, скрита анонція, аутентифікація інформації та стійкий таємний зв'язок [5].

Таким чином, стеганографія – один з найдавніших методів захисту інформації. Якщо спочатку методи стеганографії застосовувались лише з метою ведення прихованого зв'язку, то зараз все більше уваги приділяється методам захисту інформації, поданій у цифровому вигляді. Особливо активно ведуться роботи в області захисту мультимедійної інформації від незаконного копіювання, поширення, підробки тощо. Про актуальність даних розробок свідчить все більше поширення алгоритмів ЦВЗ в таких стандартах, як DVD, MP3, MPEG-4, JPEG2000.

2.2.2. Класифікація методів цифрової стеганографії

З метою більш повного розуміння і систематизації накопичених в області стеганографії даних, а також з метою закріплення термінології понять у цій області науки, необхідно провести класифікацію її методів.

Цифрова стеганографія довгий час не мала єдиної термінології. Лише у 1996 році на конференції Information Hiding було визначено єдину термінологію.

Таким чином, *стегосистема* – сукупність засобів та методів, які застосовуються для формування скритого каналу передавання інформації.

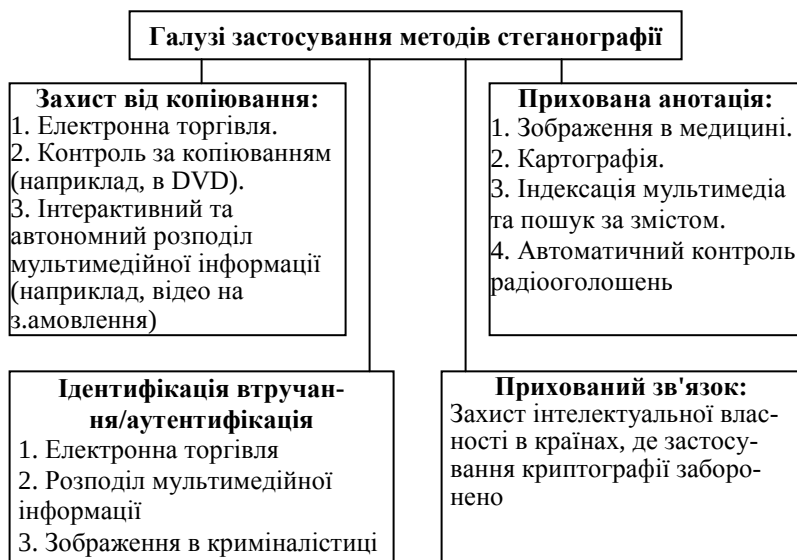


Рис. 2.4. Галузі застосування технологій приховування одного виду інформації в іншому

Узагальнена модель стегосистеми показана на рис. 2.5.



Рис. 2.5. Узагальнена модель стегосистеми

Розглянемо для початку детальніше поняття контейнера. *Контейнер* – будь-яка інформація, призначена для приховування секретних повідомлень. До стегокодера це пустий контейнер, після нього – заповнений, або *стего*. Стего не повинен візуально відрізнятися від пустого контейнера. Розрізняють два основні типи контейнерів: поточковий і фіксований.

Потоковий контейнер являє собою безперервну послідовність біт. Повідомлення вкладається в нього в реальному часі так, що в кодері невідомо заздалегідь, чи вистачить розмірів контейнера для передавання всього повідомлення. В один контейнер великого об'єму може бути вбудовано декілька повідомлень. Інтервали між бітами, що вбудовуються, визначаються генератором псевдовипадкової послідовності з рівномірним розподілом інтервалів між відліками. Основна складність полягає в здійсненні синхронізації, виявленні початку і кінця послідовності. Якщо в даних контейнера є біти синхронізації, заголовки пакетів тощо, то інформація, що приховується, може знаходитись відразу ж після них. Недолік забезпечення синхронізації перетворюється на перевагу з точки зору забезпечення прихованості передавання. Крім того, потоковий контейнер має велике практичне значення: уявіть собі, наприклад, стегоприставку до звичайного телефону. Під прикриттям звичайної незначущої телефонної розмови можна було б передавати іншу розмову, дані і т.п. Не володіючи секретним ключем, неможливо було б не тільки дізнатися про зміст прихованого повідомлення, але і про сам факт його існування. Не випадково, що дослідження, присвячені розробкам стегосистем з потоковим контейнером, майже не зустрічаються [5].

У фіксованого контейнера розміри і характеристики заздалегідь відомі. Це дозволяє здійснити вкладання даних оптимальним чином у

деякому розумінні. У роботі будемо розглядати зображення як приклад фіксованого контейнера (далі просто – контейнер).

Контейнер може бути обраним, випадковим або нав'язаним. Обраний контейнер залежить від повідомлення, що вбудовується, а в граничному розумінні є його функцією [5]. Цей тип контейнера більш характерний для стеганографії. Нав'язаний контейнер може з'явитися тоді, коли особа, що надає контейнер, підозрює про можливість прихованого листування і бажає упередити його. На практиці найчастіше зустрічаються з випадковим контейнером.

Іншим критерієм класифікації стеганосистем є стеганодетектор та вимоги до нього. Розрізняють стеганодетектори, призначені для виявлення факту наявності ЦВЗ і пристрої, призначені для виділення цього ЦВЗ (стеганодекодери). У першому випадку можливі детектори з жорстким (так/ні) або м'яким рішенням. Для винесення рішення про наявність/відсутність ЦВЗ зручно застосовувати такі міри, як відстань за Хеммінгом, або взаємну кореляцію між прийнятим сигналом та оригіналом (зрозуміло ж, при наявності останнього). А що робити, коли у нас немає вихідного сигналу? Тоді в справу вступають більш тонкі статистичні методи, які засновані на побудові моделей класу сигналів, що досліджуються.

У залежності від того, яка інформація необхідна детектору для виявлення прихованого повідомлення, стеганосистеми поділяються на три класи: відкриті, напівзакриті і закриті системи. Ця класифікація наведена в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Класифікація стеганографічних систем за типом інформації, що потрібна детектору

		Що потрібно детектору		Вихід детектора	
		початковий сигнал	початковий ЦВЗ	так/ні	ЦВЗ
Закриті	Тип I	+	+	+	–
	Тип II	+	–	–	+
Напіввідкриті		–	+	+	–
Відкриті		–	–	–	+

Як видно за табл. 2.2, відкриті стеганосистеми дозволяють виділити ЦВЗ (повідомлення) за відсутності будь-яких відомостей про контейнер та дані, які приховувались. Такі декодери найбільш поширені і найбільш відповідають вимогам системи скритого передавання даних (ПД).

Напіввідкриті системи дозволяють виявити ЦВЗ в контейнері, якщо «знають» його зміст. Вони можуть застосовуватися, наприклад, в мультимедійних програвачах для аутентифікації даних.

Закриті системи II-го типу можуть виділити повідомлення при наявності початкового контейнера. Такий спосіб ПД рідко застосовується через малу продуктивність та захищеність.

Нарешті, закриті стеганосистеми I-го типу при наявності початкового сигналу і повідомлення роблять висновок про присутність ЦВЗ у контейнері. Вони мають найбільшу стійкість по відношенню до зовнішніх впливів, але, як і II-й тип закритих систем, – малу продуктивність.

За реакцією ЦВЗ до різного роду впливів стеганосистеми можуть бути трьох типів: робастні, крихкі і напівкрихкі. Під робастністю в даному випадку розуміють стійкість ЦВЗ до різних впливів. Робастним методам присвячено найбільшу кількість робіт [5, 28].

Крихкі ЦВЗ руйнуються при незначних модифікаціях заповненого контейнера. Вони застосовуються для аутентифікації сигналів. Ці ЦВЗ повинні не тільки відобразити факт модифікації контейнера, а також вид і місце цієї зміни. Також ці системи застосовуються при необхідності знищення даних, якщо їх перехопила особа, від якої це повідомлення приховується.

Напівкрихкі ЦВЗ стійкі по відношенню до одних видів впливів і нестійкі по відношенню до інших. У загальному випадку всі ЦВЗ можуть бути віднесені до цього класу. Однак напівкрихкі ЦВЗ спеціально проектується так, щоб бути нестійкими по відношенню до певного роду операцій. Наприклад, вони можуть дозволяти виконувати стиснення зображення, але забороняти вирізання з нього або вставлення в нього фрагментів.

Наступний критерій класифікації, який розглядається в даному розділі, – місце приховування даних у сигналі. Виділяють два найбільш поширених способи: приховування даних в області початкового сигналу (в просторову область) і в області перетворення (частотну область). Схема приховування даних у просторовій області сигналу зображена на рис. 2.6, де $S(t)$ – початковий сигнал (контейнер), з якого виділяється область приховування повідомлення $m(t)$ та область залишку $M(t)$. Після вбудовування утворюється область з прихованим повідомленням $m^*(t)$. Далі з неї та залишку $M(t)$ утворюється стего $S^*(t)$ та передається в стегоканал. Цей спосіб має перевагу в простоті створення кодера та декодера через малу обчислювальну складність. Однак, недоліком такої системи є слабке врахування систем людського сприйняття, що призводить або до зменшення надійності, або малої стійкості до атак (активних та пасивних) на контейнер, або до зменшення прихованості.

Схема приховування даних в частотній області показана на рис. 2.7. На відміну від попереднього способу, виділення областей приховування відбувається після розкладання початкового сигналу на компоненти (трансформанти). Залежно від стійкості, яку необхідно мати прихованому повідомленню, обирається трансформанта $m_i(t)$ (наприклад, для створення робастного прихованого повідомлення в зображенні може застосовуватися низькочастотна область перетворення, а для створення крихкого – високочастотна область [5]). Така стего-система дозволяє врахувати властивості системи людського сприйняття, що дозволяє покращити показники в області надійності, стійкості та прихованості стеганосистеми. Недолік – збільшується розрахункова складність кодера та декодера.

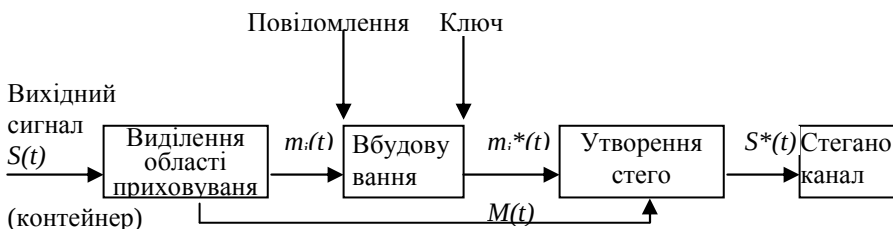


Рис. 2.6. Схема приховування даних у просторовій області сигналу

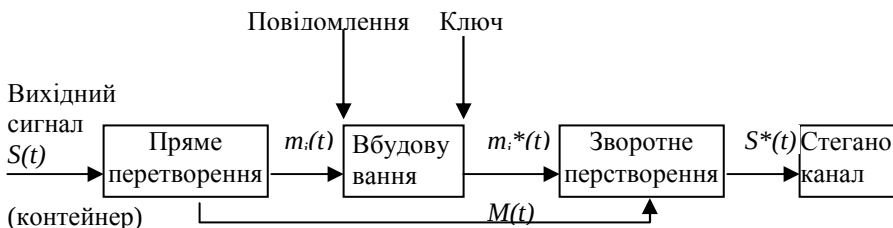


Рис. 2.7. Схема приховування даних в області перетворення

Тож одним із головних завдань під час розробки стеганосистеми є вибір оптимальних перетворень, які забезпечують належну надійність, стійкість та прихованість системи ПД при допустимій розрахунковій складності.

Ряд спеціалістів [19, 29] виділяють ще одну ознаку для класифікації цифрових стеганоалгоритмів – за способом вибору контейнера. У цьому випадку стеганоалгоритми поділяються на ерзац-методи (сурогатні), методи відбракування (селективні) та методи імітації.

В ерзац-методах немає можливості скористатися вибором оптимального контейнера для вбудовування повідомлень. У селективних

стеганографічних методах передбачається, що статистичні властивості повідомлення близькі до властивостей контейнера. Крім того, існує можливість вибору (відбракування) відповідного контейнера із сукупності можливих. В імітаційних методах контейнер виробляється самою стеганографічною системою [30, 31].

У повному обсязі класифікація методів цифрової стеганографії показана на рис. 2.8 [19].

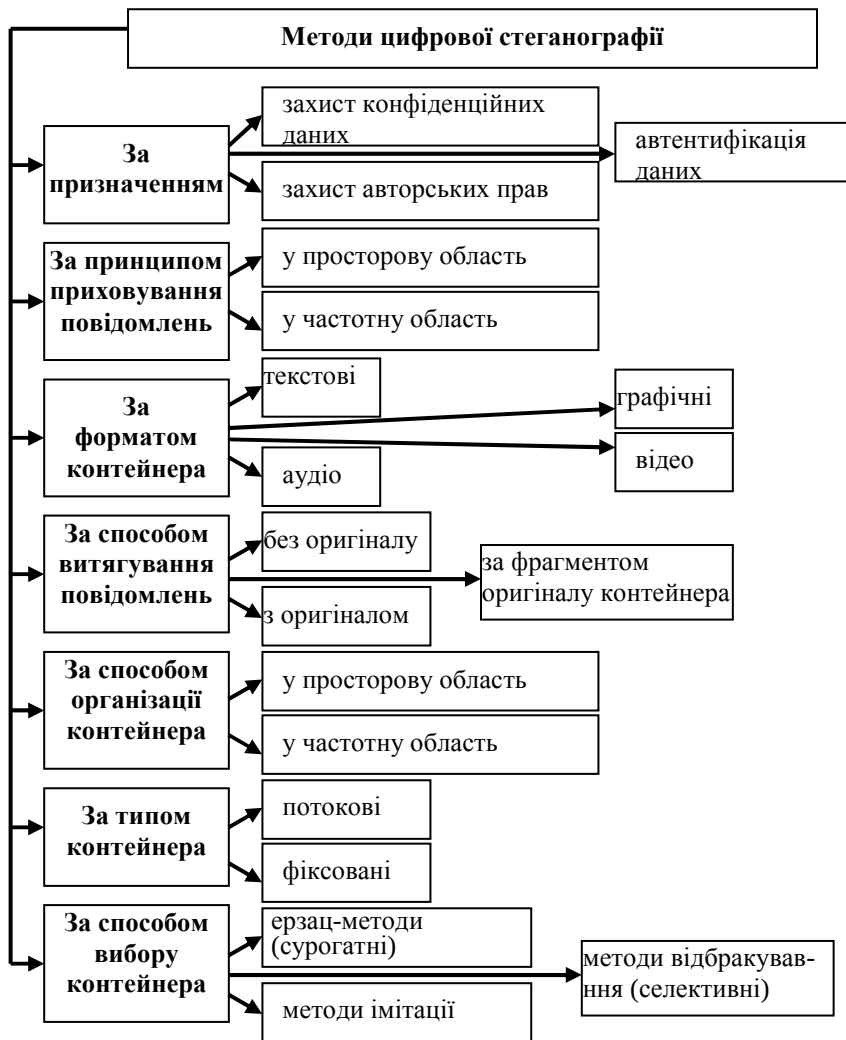


Рис. 2.8 Класифікація систем цифрової стеганографії

Даний приклад не є однозначним, існують й інші способи упорядкування методів цифрової стеганографії.

У роботі будуть розглядатися реалізації стеганографічних методів, які призначені для захисту конфіденційних даних; приховуватись повідомлення будуть як в просторову, так і в частотну області зображення; контейнери обираються фіксованими за методом відбракування; витягування секретного повідомлення буде відбуватись як з наявним оригіналом контейнера, так і без нього.

2.2.3. Аналіз видів атак на стего

Якщо порушнику вдається довести існування прихованого каналу в перехопленому контейнері, то така стеганосистема вважається розкритою. Для розкриття стеганосистеми він має необмежені обчислювальні ресурси та може здійснювати всі можливі атаки на стего.

Всі атаки на стеганосистему розділяються на дві групи – пасивні та активні. До пасивних атак відноситься виявлення факту наявності прихованого каналу та витягування прихованого повідомлення. Діапазон дій активного порушника значно ширший і передбачає можливість модифікування, знищення, блокування вбудовування повідомлення, а також можливість непомітного вбудовування іншого (хибного) повідомлення [5, 19, 29]:

- *на основі відомого заповненого контейнера.* У цьому випадку у порушника є одне або декілька стего. В останньому випадку передбачається, що вбудовування інформації здійснювалося одним способом. Завдання порушника полягає у виявленні стеганоканалу, витягуванні повідомлень та визначення ключа;

- *на основі відомого вбудованого повідомлення.* Цей тип атак у більшій мірі характерний для систем захисту інтелектуальної власності, коли як ЦВЗ використовується відомий логотип фірми. Завдання порушника – визначення ключа;

- *на основі обраного прихованого повідомлення.* У цьому випадку порушник має можливість пропонувати для передавання свої повідомлення і аналізувати утворені стего (такі стеганосистеми зустрічаються досить рідко).

- *адаптивна атака на основі обраного прихованого повідомлення.* Ця атака є різновидом попередньої. Відмінність лише у тому, що порушник має можливість обирати повідомлення для нав'язування, в залежності від результатів аналізу попередніх стего.

- *на основі обраного заповненого контейнера.* Цей тип атак більш характерний для систем ЦВЗ. Стегоаналітик має детектор стего у вигляді «чорного ящика» і декілька стего. Аналізуючи приховані повідомлення, що детектуються, порушник намагається визначити ключ.

– Крім того, для стегосистем можливо виділити ще три атаки, які не мають аналогів у криптосистемах:

– *на основі відомого пустого контейнера*. Якщо він відомий порушнику, то шляхом порівняння з утвореним стего він завжди може встановити факт наявності стеганоканалу. В такому випадку порушник завжди виявить факт передавання інформації. Але частіше буває, коли контейнер відомий лише приблизно, з деякими неточностями. Тоді існує можливість побудови стійкої стегосистеми [5];

– *на основі обраного пустого контейнера*. У цьому випадку порушник здатний примусити користуватися запропонованим контейнером. Наприклад, контейнер може мати великі однорідні області, і тоді буде важко забезпечити прихованість;

– *на основі відомої математичної моделі контейнера або його частини*. При цьому порушник намагається визначити відмінність підозрілого повідомлення від відомої йому моделі. Наприклад, припустимо, що біти в середині послідовності відліків зображення корельовані. Тоді відсутність такої кореляції може стати сигналом про те, що є приховане повідомлення. Завдання того, хто вбудовує повідомлення, полягає в збереженні статистики контейнера.

Розглянуті вище атаки мають одну особливість – вони не змінюють стеганографічного повідомлення, яке вбудовується.

Розглянемо активні атаки на стеганосистему, або, як їх називають, атаки на системи ЦВЗ проти:

– *вбудованого повідомлення* – направлені на видалення або модифікацію ЦВЗ шляхом маніпуляції стего. Атаки такого типу не намагаються оцінити та виділити ЦВЗ. Прикладами таких атак можуть бути лінійна фільтрація, стиснення зображення, додавання шуму, вирівнювання гістограм, зміна контрастності, гами тощо;

– *стеганодетектора* – направлені на те, щоб ускладнити або зробити неможливою правильну роботу детектора. При цьому ЦВЗ у зображенні залишається, але втрачається можливість його виділення. У цю категорію входять такі атаки, як: афінні перетворення (тобто масштабування, зсуви, обертання), відсічення зображення, перестановка пікселів і т.д.;

– *протоколу використання ЦВЗ*. Дані атаки в основному пов'язані зі створенням хибних ЦВЗ, хибних стего, інверсій ЦВЗ, додаванням декількох ЦВЗ;

– *самого ЦВЗ*. Направлені на оцінювання і декодування ЦВЗ із стеганографічного повідомлення, по можливості без спотворення контейнера. У цю групу входять такі атаки, як: статистичного усереднення, методи очищення сигналів від шумів, деякі види нелінійної фільтрації, тощо.

Однак, така класифікація атак на стеганосистеми не є єдиною і повною. Крім того, деякі атаки (наприклад, видалення або додавання шуму) можуть бути віднесені до декількох категорій. Більш повною і більш поширеною є класифікація, запропонована в роботі [28]. У відповідності до неї, атаки поділяються на чотири групи:

- 1) направлені на видалення ЦВЗ;
- 2) геометричні, направлені на викривлення контейнера;
- 3) криптографічні;
- 4) проти протоколу вбудовування і перевірки ЦВЗ.

Розглянемо детальніше кожен з пунктів класифікації.

До атак, направлених на видалення ЦВЗ відносять очищення сигналів-контейнерів від шумів, перемодуляція, стиснення з втратами, усереднення і колізії. Ці атаки засновані на тому, що ЦВЗ є шумом, який можна описати статистично. Найбільш поширеними з них є стиснення, усереднення і мозаїчна атака. Перша з них значно збільшує пропускну спроможність стеганоканалу, особливо для однотонних областей зображення, коефіцієнти перетворення яких можуть бути прирівняні до нуля без помітного зниження якості відновленого зображення.

У випадку наявності великого числа копій стего з різними ЦВЗ (наприклад, кадри відеосигналу можуть мати різні ЦВЗ) є можливість застосувати атаку усереднення. Якщо всі ЦВЗ мають нульове середнє, то після усереднення він буде відсутній у зображенні.

Мозаїчна атака направлена на пошукові системи, які відслідковують зображення, що поширюються незаконно. Зображення розбивається на декілька часток, так що пошукова система не знаходить ЦВЗ. Інтернет-браузер демонструє фактично декілька часток зображення, що щільно прилягають один до одного, так що в цілому зображення виглядає не спотвореним. Для протиборства такій атаці ЦВЗ повинен виявлятися навіть у малих частках зображення. Цю вимогу дуже важко виконувати, тому вважається, що простіше створити «інтелектуальні» браузери, які змогли б скласти зображення з часток і перевірити наявність у ньому ЦВЗ.

Геометричні атаки, на відміну від попередніх, намагаються не видалити ЦВЗ, але змінити його розташування шляхом внесення просторових часових спотворень. Геометричні атаки математично моделюються як афінні перетворення з невідомим декодеру параметром. Всього є п'ять афінних перетворень: масштабування, зміна пропорцій, повороти, зсуви, вирізання. Ці атаки призводять до втрати синхронізації в детекторі ЦВЗ і можуть бути локальними або глобальними (тобто, застосовані до всього контейнера). Основним методами протидії таким атакам є вбудовування додаткового (опорного) ЦВЗ або використання блочного детектора. У першому випадку вбудований

ЦВЗ не несе в собі інформації і призначений для визначення типу перетворення, застосованого до стего. Другий метод передбачає аналізування всіх можливих афінних перетворень з оцінкою коефіцієнта кореляції ЦВЗ для невеликих блоків пікселів, наприклад 8x8 або 16x16. Перетворення, після якого коефіцієнт кореляції виявився найменшим, вважається таким, що було проведено порушником.

Криптографічні атаки на стегосистему названі за аналогією в криптографії. До них відносять атаки із застосуванням «оракула», а також зламу застосуванням «грубої сили».

Атака з використанням оракула дозволяє створити незахищене цифровим знаком зображення при наявності у порушника детектора. Метод полягає в експериментальному вивченні поведінки детектора для зрозуміння того, на які зображення він реагує, а на які ні. Наприклад, якщо детектор виносить «м'яке» рішення, тобто показує ймовірність наявності стего в сигналі, то противник може вяснити, як невеликі зміни зображення впливають на поведінку детектора. Модифікуючи піксел за пікселем, він може взагалі з'ясувати, який алгоритм використовує детектор. У випадку детектора з «жорстким» рішенням атака здійснюється біля межі, де детектор змінює своє рішення з «присутнє» на «відсутнє».

Атаки проти протоколу впровадження і перевірки на сьогоднішній день найменш досліджені і захиститися від них найважче. Прикладом такої атаки може бути наступне: нехай користувачеві дозволено зробити тільки одну копію з оригіналу, але заборонено робити копії з копії. Пристрій запису повинен змінити ЦВЗ з «копіювання дозволено» на «копіювання заборонено». У такому випадку той, хто атакує, має доступ до повідомлення до і після вбудовування ЦВЗ. Значить він може обчислити різницю між початковим та модифікованим повідомленням. Додаючи цю різницю до отриманих копій, утворюються копії, дуже близькі до оригіналу. Методом захисту від таких атак може бути, наприклад, не видалення, а вбудовування додаткових ЦВЗ таким чином, що стає незрозуміло, який із них ідентифікує істинного власника контенту.

У загальному випадку, жодна з перерахованих атак на ЦВЗ не дозволяє гарантовано досягти поставлених цілей, так само як жоден з методів захисту не дозволяє гарантовано захистити контейнер. Застосування ж комплексних атак у більшості випадків призводить до видалення ЦВЗ або його модифікації таким чином, що стає неможливим його виявлення та декодування. Тому розробка алгоритмів побудови ЦВЗ, стійких до комплексних атак, – найважче на сьогодні завдання, яке, поки що, повністю не вирішене.

У даній роботі буде розглянуто розроблений метод боротьби з атакою, направленою на видалення прихованого повідомлення методом

стиснення. Такий вид атак на сьогоднішній день є найбільш поширеним, хоча і вважається досить неефективним. В якості агента стиснення обраний «бенчмарк» сьогодення – стандарт JPEG2000, як найбільш розповсюджений та перспективний.

Отже, необхідно розробити метод вбудовування та детектування ЦВЗ, який би дозволяв виявляти та декодувати повідомлення із зображення після стиснення його вищезазначеним стандартом.

2.2.4. Формулювання завдання інформаційного приховування при активній протидії противника

З метою визначення принципів побудови стегосистеми сформулюємо вимоги до неї.

До стегосистеми висуваються наступні вимоги [5]:

1. Безпека системи повинна цілком визначатися секретністю ключа. Це означає, що порушник може повністю знати всі алгоритми роботи стеганосистеми і статистичні характеристики множин повідомлень і контейнерів, але це не надає йому ніякої додаткової інформації про наявність або відсутність повідомлення в даному контейнері.

2. Знання порушником факту наявності повідомлення в якому-небудь контейнері не повинно допомогти йому при виявленні повідомлень в інших контейнерах.

3. Заповнений контейнер повинен візуально не відрізнятися від незаповненого. Для задоволення цієї вимоги потрібно вбудовувати сховане повідомлення у візуально незначущі області сигналу. Однак, при необхідності створення робастних ЦВЗ цей спосіб не є доцільним, оскільки надалі сигнал буде піддаватися стисненню з втратами, тобто приховане повідомлення може зруйнуватися. Отже, в такому випадку біти повинні вбудовуватися у візуально значимі області, а відносна непомітність може бути досягнута за рахунок використання спеціальних методів.

4. Стеганосистема повинна мати низьку ймовірність помилкового виявлення прихованого повідомлення в сигналі. У деяких випадках таке виявлення може призвести до серйозних наслідків. Наприклад, помилкове виявлення ЦВЗ на DVD-диску може викликати відмову його відтворення програвачем.

5. Повинна забезпечуватися необхідна пропускна спроможність (ця вимога актуальна, в основному, для стеганосистем прихованого передавання інформації).

6. Стеганосистема повинна мати прийнятну обчислювальну складність реалізації. При цьому можлива асиметрична по складності реалізації система, тобто обчислювально складний стеганокодер і простий стеганодекодер.

Таким чином, завдання побудови стеганосистеми доволі складне і потребує врахування багатьох факторів.

Інформаційно-теоретична модель стегосистеми була сформульована у 1998 році в протоколі 2-ї Конференції з Інформаційного Приховування (Proceedings of 2nd Workshop on Information Hiding) [32]. Вважається, що найкраще завдання інформаційного приховування від пасивного противника проілюстрована в «Проблемі в'язнів» Сіммонса [33] (Simmons' «Prisoners Problem»). Аліса і Боб – ув'язнені і намагаються розробити план втечі. Весь їхній зв'язок контролюється противником (тюремним наглядачем) Євою, яка зруйнує всі їхні плани, перевіривши їх у в'язницю суворого режиму, якщо помітить будь-які ознаки секретного повідомлення. Аліса та Боб досягнуть успіху, якщо Аліса зможе переслати інформацію Бобу таким чином, що наглядач не зможе запідозрити цього. Тобто, Аліса повинна модифікувати вихідний контейнер C і, перетворивши його в заповнене стего S , відправити Бобу. Подібно до криптографії, передбачається, що наглядач має повну інформацію про систему передавання. Завдання інформаційного приховування від пасивного противника відрізняється від завдання з активним противником тим, що наглядач Єва не буде намагатися знищити, модифікувати або внести хибне повідомлення. Тобто, як було сказано вище, противник намагається тільки виявити факт існування каналу прихованого передавання.

Завдання приховування інформації при активній протидії ускладнюється тим, що противник, підозрюючи можливий факт передавання прихованого повідомлення, намагатиметься знищити, модифікувати його, або внести хибне повідомлення, але при цьому незначно ушкодити контейнер. Тобто, необхідно утворити таке повідомлення, яке навіть при модифікації стего збереже свій зміст.

Таким чином, необхідне одночасне виконання умов приховування даних при пасивній та активній протидії.

Методика вирішення завдання приховування при пасивній протидії формулюється в так званій теорії гіпотетичних випробувань: при детальному вивченні повідомлення, переданого Алісою, противник повинен визначити, чи це звичайне повідомлення C , чи стего S з вбудованими даними. Для вирішення цього завдання характерні два методи: статистичне та візуальне вивчення повідомлення. Особливості візуального вивчення повідомлення будуть розглянуті нижче. У даному пункті розглянемо способи статистичного вивчення.

Зрозуміло, що початковий контейнер та утворене стего відрізняються один від одного. Чим більше інформації приховано та чим менша робастність методу, тим більші викривлення. У роботі [5] наведено наближений графік залежності робастності методу від об'єму прихованого повідомлення (рис. 2.9).

Таким чином, для збільшення захищеності прихованого повідомлення, доводиться «жертвувати» його об'ємом.

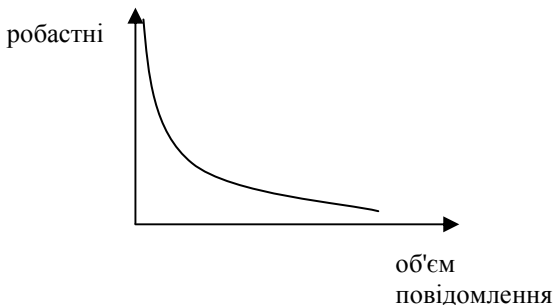


Рис. 2.9. Наближена залежність робастності

Для об'єктивного оцінювання якості утвореного стего можна використовувати міру середньоквадратичного відхилення σ , яка визначається за формулою (2.5), або для зображення як двовимірної матриці значень елементів:

$$\sigma = \log_2 \left(\sqrt{\frac{1}{n \times m} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} (x_{i,j} - \tilde{x}_{i,j})^2} \right), \text{ рівнів кв,}$$

де n та m – розміри матриці, $x_{i,j}$ – елемент матриці до приховування (елемент контейнера), $\tilde{x}_{i,j}$ – елемент модифікованої матриці (стего).

Таким чином, чим менший об'єм модифікованої частини контейнера, тим менше його середньоквадратичне відхилення і тим менша помітність внесених змін.

Часто на практиці застосовується інша міра оцінки відповідності початкових даних модифікованим – пікове співвідношення сигнал/шум [5], яке визначається за формулою (2.6), тоді модифікована формула для двовимірної матриці зображення запишеться так:

$$P_{s/n}^{\max} = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2 \times n \times m}{\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} (x_{i,j} - \tilde{x}_{i,j})^2} \right), \text{ дБ,}$$

де 255 – максимальне значення яскравості напівтонового зображення (тобто, 8 біт/компоненту). На відміну від середньоквадратичного відхилення, чим менший рівень спотворень, тим більше значення

$P_{s/n}^{\max}$. Якість перетвореного зображення вважається допустимою, якщо $P_{s/n}^{\max} \geq 28 - 30$ дБ [28].

Проблема невідповідності об'єктивних та суб'єктивних показників оцінювання якості контейнера та стего така ж, як і при стисненні зображень. Нижче описано приклад, що дозволяє довести розходження результатів об'єктивного та суб'єктивного оцінювання модифікованих зображень.

Нехай є два зображення, які мають однакову піксельну структуру, окрім невеликої області (рис. 2.10). Для них пікові співвідношення сигнал/шум дорівнюють 33, 40 та 45 дБ для червоної, зеленої та синьої компонент відповідно. Тобто, хоч значення $P_{s/n}^{\max}$ і відповідає допустимим вимогам, але візуально зміна дуже помітна. Врахування властивостей СЛЗ у схемі приховування повідомлення є достатньо складним завданням. Було проведено велику кількість досліджень, але через труднощі математичного опису людського зору більш прийнятною міри не знайдено і досі.

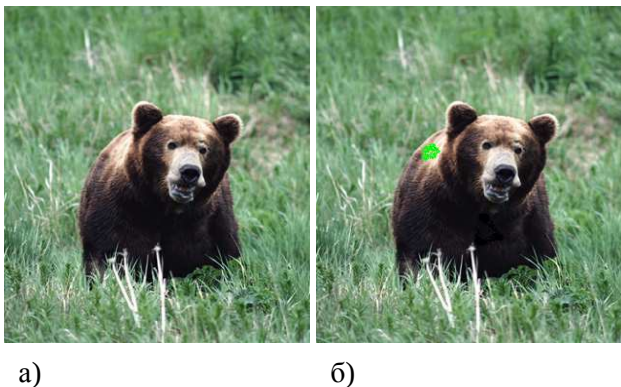


Рис. 2.10. Особливості об'єктивної оцінки спотворень зображення:
а) початкове зображення; б) спотворене зображення

При активній протидії порушника необхідно провести аналіз відповідності прихованого повідомлення до утвореного в результаті модифікації. Для оцінювання цієї відповідності пропонується ввести коефіцієнт помилок $K_{ном}$:

$$K_{ном} = \frac{\sum_{i=1}^N |I_i \oplus \tilde{I}_i|}{N},$$

де $|I_i, \tilde{I}_i|$ – інформаційні біти вбудованого та декодованого повідомлення відповідно, N – кількість вбудованих біт повідомлення, $\oplus$ – сума за модулем 2. Більш зручною є оцінка у процентному відношенні:

$$K_{ном} = \frac{\sum_{i=1}^N |I_i \oplus \tilde{I}_i|}{N} \times 100 \% . \quad (2.9)$$

При застосуванні цієї величини необхідно враховувати той факт, що при кількості спотворень приблизно 50 % вважається, що повідомлення, які порівнюються, абсолютно некорельовані між собою, тому що при значенні $K_{ном} = 100 \%$ ці тексти просто інвертовані один відносно одного.

Розглянемо процес утворення стего та сформулюємо вимоги до результатів приховування при активній протидії.

Нехай пустий контейнер позначається як $K_C(t)$, повідомлення, що приховується – $I(t)$, а утворене стего – $K_S(t)$. Процес виділення місця приховування повідомлення (як для приховування в просторовій області, так і для області перетворення) позначимо як:

$$K_C(t) = M_C(t) + m_C(t),$$

де $m_C(t)$ – область приховування даних, $M_C(t)$ – решта контейнера. Процес вбудовування позначимо як $\oplus$. Тоді модифікована область приховування $m_S(t)$ одержується з виразу:

$$m_S(t) = m_C(t) \oplus I(t).$$

Стего утворюється після зворотного перетворення елементів сигналу:

$$K_S(t) = M_C(t) + m_S(t).$$

Модифікацію контейнера позначимо $\Delta(K)$. У результаті атаки на стего контейнер та повідомлення будуть модифіковані:

$$\Delta(K_S(t)) = \Delta(M_C(t)) + \Delta(m_S(t)) = \Delta(M_C(t)) + \Delta(m_C(t)) \oplus \tilde{I}(t)$$

де $\tilde{I}(t) = \Delta(I(t))$ – модифіковане повідомлення. Зрозуміло, що для гарантованого виявлення та декодування повідомлення область $m_S(t)$ повинна бути така, що $\Delta(m_S(t)) \approx m_S(t)$.

На основі вищеперерахованих методів оцінювання спотворень та коефіцієнта помилок, сформулюємо завдання для створення стегано-системи з активним противником. Отже, спотворення, що вносяться в

процесі вбудовування повідомлення в контейнер не повинні перевищувати допустимих:

$$K_C(T) = M_C(t) + m_C(t) \Leftrightarrow M_C(t) + m_S(t) = K_S(t),$$

коефіцієнт помилок між вбудованим та утвореним у результаті модифікації повідомленнями не повинен перевищувати заданого:

$$I(t) \Leftrightarrow \tilde{I}(t),$$

де знак $\Leftrightarrow$ означає:

$$\begin{cases} P_{s/n}^{\max}(K_C(t)/K_S(t)) \geq P_{s/n}^{\min}, \\ \sigma(K_C(t)/K_S(t)) \leq \sigma_{\max}, \\ K_{\text{ном}}(I(t)/\tilde{I}(t)) \leq K_{\text{ном}}^{\max}. \end{cases}$$

У загальному випадку, значення $P_{s/n}^{\min}$ і σ завжди будуть менші нескінченності і більші нуля відповідно, а значення коефіцієнта помилок теоретично можливо довести до нуля, але це значно ускладнює завдання побудови стеганосистеми та зменшує пропускну спроможність стеганоканалу. Тому $P_{s/n}^{\min}$, $\sigma_{\max}$ та $K_{\text{ном}}^{\max}$ обираються залежно від вимог до прихованості та робастності стеганосистеми.

ВИСНОВКИ

1. Таким чином, для розробки надійної стеганосистеми з активним противником необхідне точне врахування всіх вимог до стеганосистем.

2. Оцінювання візуальної прихованості можна провести об'єктивно та суб'єктивно, а оцінювання стійкості до модифікацій можна провести об'єктивно за допомогою різноманітних коефіцієнтів спотворень.

3. Стеганосистему будемо вважати працездатною, якщо вона задовольняє умови максимальності пікового співвідношення сигнал/шум, мінімальності середньоквадратичного відхилення та мінімальності спотворень вбудованого повідомлення.

III. ОСОБЛИВОСТІ ПСИХОВІЗУАЛЬНОГО СПРИЙНЯТТЯ КОЛЬОРІВ ЛЮДИНОЮ

3.1 . Особливості сприйняття зображень людським оком

Після перетворення оптоелектронним пристроєм електричного сигналу в зображення останнє відображається на екрані монітора, на папері, електронному табло тощо, яке може сприймати людина. Тому для розробки та удосконалення пристроїв формування та передавання зображень важливо знати принцип функціонування системи людського зору (СЛЗ) [34]. Розглянемо будову людського ока (рис. 3.1).

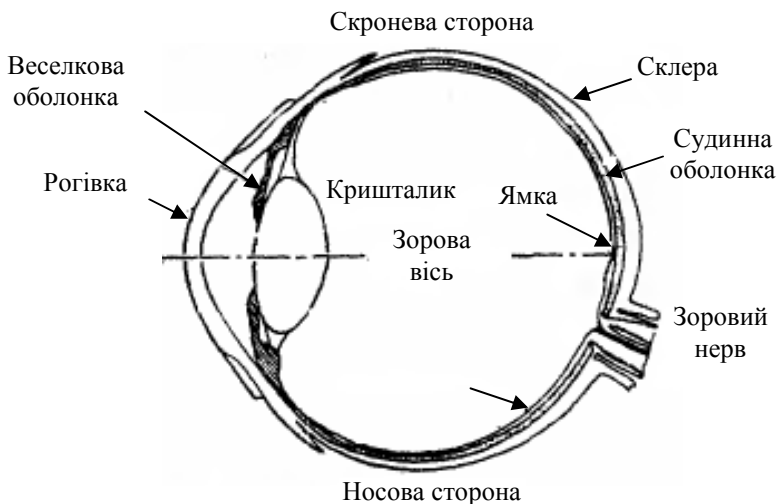
Око є склоподібним тілом, укладеним у непрозору оболонку, склеру 2, яка в передній частині переходить в прозору рогівку 3. За рогівкою розташована веселкова оболонка 4 з отвором у центрі – зіницею, а за нею – кришталик 5. Простір між рогівкою і кришталиком заповнений рідиною. Всі разом вони утворюють оптичну систему ока, за допомогою якої зображення проектується на внутрішню поверхню склери, покриту світлочутливою оболонкою 6, так званою сітківкою. Сітківка містить два види світлочутливих рецепторів колби і палички, а також декілька шарів нервових клітин, які з ними пов'язані. Колби утворюють апарат денного зору і працюють при освітленні більше 0,01 лк. Палички утворюють апарат смеркового зору, володіють значно вищою чутливістю і здатні відрізнити білу поверхню від чорної при освітленості близько 0,000001 лк. Зате апарат денного зору володіє вищою роздільною здатністю і уміє розрізнити кольори.

Під впливом м'язової дії на кришталик, у результаті якого змінюється його кривизна, здійснюється наведення на різкість – акомодация. При максимальному розслабленні м'язів акомодаций заломлююча сила кришталика мінімальна – око сфокусоване на нескінченність. Адаптація, тобто пристосованість до різного освітлення, виробляється завдяки зміні діаметра зіниці, що виконує роль діафрагми в оптичній системі ока, і перемиканню апаратів денного і смеркового зору [1].

Характерно, що світлочутливі елементи на сітківці розподілені нерівномірно. Найбільша густина розподілу колб спостерігається в області жовтої плями і в її центральному поглибленні – фовеа (ямка на рис. 3.1). Кутівий розмір фовеа близько одного градуса, кількість колб у ньому – приблизно 4 000, а густина їх розподілу – 180 тис. на мм². Жовта пляма визначає область денного зору. Вона має овальну форму, подовжену в горизонтальному напрямі. Її кутові розміри – в межах 6° на 8°. При розгляді зображень очі автоматично суміщають найцікавішу (інформативну) для спостерігача ділянку зображення з фовеа. Тому зорова вісь ока, яка проходить від фовеа через центр кришталика до об'єкта спостереження, відхиляється зображення приблизно

но на 5° від оптичної осі, що співпадає з віссю симетрії оптичної системи ока.

Функція сітківки полягає не тільки в сприйнятті зображення, але і в попередній обробці зорових сигналів перед їх надходженням у зоровий нерв (рис. 3.1).



Ця обробка відбувається в результаті передавання сигналу від одного шару нервових клітин до іншого. Останній шар, безпосередньо пов'язаний із зоровим нервом, складається з так званих гангліозних клітин. Кожна гангліозна клітина сполучена з волокном зорового нерва. У області фовеа на одну колбу доводиться одна гангліозна клітина, а у області периферійного зору одна гангліозна клітина обслуговує рецептивне поле, що складається з великої кількості світлочутливих елементів.

Про механізм обробки сигналів у сітківці, де відбувається, як вважають, осмислення видимого і пізнання знайомих предметів, відомо ще дуже мало. Інтенсивне вивчення цього механізму та інших фізіологічних особливостей зору і обробки інформації в організмі людини і тварин, можливо, відкриє нові шляхи у вирішенні завдань ЦОЗ.

З початком розвитку цифрових компресорів графіки та цифрової стеганографії пропонувалось обробляти за допомогою того чи іншого алгоритму найменш значущі біти зображення з метою зменшення візуальної помітності спотворень зображень. Однак, розвиток методів ЦОЗ призвів до того, що майже кожен спосіб компресії зображення веде до повної втрати вбудованої інформації. Сучасні підходи до вбу-

довування даних у зображення враховують можливість модифікацій стего. Не випадково стеганоалгоритми враховують властивості СЛЗ, аналогічно до алгоритмів стиснення зображень. Зазвичай в стеганоалгоритмах застосовуються ті ж самі перетворення, що і в сучасних алгоритмах компресії (наприклад, дискретне косинусне перетворення в JPEG, вейвлет-перетворення в JPEG-2000).

3.2. Фізіологічна природа зору людини

У процесі еволюції у людини сформувався *орган зору* та *зоровий аналізатор* як система, що забезпечує різностороннє *зорове сприйняття* навколишнього середовища завдяки зоровим функціям – світловідчуттю, кольоровому відчуттю, центральному (предметному, формовому) зору, периферичному зору і стереоскопії [35].

Світловідчуття – це здатність сприймати світло як специфічний подразник в діапазоні сонячного випромінювання і пристосовуватися до сприйняття навколишнього середовища при різних рівнях освітленості.

Механізм сприйняття світла, або *фоторецепція*, починається з розпаду молекул зорових речовин, або зорового пурпуру, в нейронах сітківки – *паличках* та *колбочках*. Світлочутливі, тобто ті, що розпадаються під дією світла, речовини (наприклад, хлористе срібло, яке використовується при створенні фотокарток) здатні не тільки розпадатися, але й відновлюватися при зниженні інтенсивності опромінювання.

Кожна молекула зорового пурпуру може десять разів розпастися і відновитися, а потім здатність до ресинтезу втрачається і синтезується молода молекула. Крупномолекулярні білки – родопсин, що міститься в паличках та йодопсин – в колбочках при розпаді молекул утворюється неоднакова кількість додатних та від’ємних іонів. У зв’язку з цим виникає електричне заряджене середовище, різниця потенціалів та подальше передавання збудження (біострум).

Функція світловідчуття людини має певні кількісні характеристики.

1. *Межа подразнення*. Визначається мінімальною кількістю світлової енергії, яка викликає відчуття світла.
2. *Світлочутливість* – величина, зворотна межі подразнення.
3. *Межа розрізнення*. Визначається мінімальною помітною для ока різницею освітленості.
4. Швидкість *світлової адаптації*.
5. Швидкість *темнової адаптації*.

Питання адаптації розглянемо більш детально.

Сітківка у своєму складі має палички та колбочки. Палички володіють високою світлочутливістю, тобто низькою межею подразнення,

і використовуються в умовах низької освітленості, забезпечуючи *смерковий і нічний зір*. Колбочки, навпаки, мають більш високу межу подразнення і меншу світлочутливість, порівняно з паличками, і працюють при яскравому світлі, забезпечуючи *денний зір*. Завдяки наявності подвійного апарату світлового сприйняття людина може сприймати оточення в будь-який час доби.

Пристосованість до змінних умов освітленості називається **адаптацією**. Пристосованість до більш яскравого світла називається *світловою*, а до менш інтенсивної освітленості – *темною адаптацією*.

Кольорове відчуття. *Хроматичний зір*, що дозволяє сприймати більше 2 000 кольорових відтінків [35], реалізовується завдяки *кольоровому відчуттю* – здатність сприймати хвильову природу світла, тобто диференціювати його за довжиною хвилі. Кожен колір має три характеристики – *тон, насиченість і яскравість*.

Кольоровий *тон* визначається довжиною хвилі чистого спектрального кольору, *насиченість* забезпечується вмістом у ньому чистого тону, а *яскравість* залежить від домішок білого.

Все різноманіття кольорових відтінків виникає в результаті змішування семи чистих тонів спектра, які в свою чергу по закону оптичного змішування кольорів утворюються із трьох основних – червоного, зеленого та синього.

Центральний або предметний зір. Величезне значення в повсякденній діяльності людини має здатність розрізняти форму і величину предмета, тобто *центрального або предметного зіра*.

Дана зорова функція здійснюється центральною ямкою жовтої плями, де розсунені всі шари сітківки, крім зовнішніх, і знаходяться тільки тісно прилягаючі колбочки. Ці колбочки формують окремий пучок у зоровому нерві.

Кожен предмет у просторі обмежується площинами, межею яких є лінії, що складаються із точок. Тому в основі центрального зору лежить здатність роздільного сприйняття точок. Кількісною характеристикою центрального зору є *гострота зору*. Вона залежить від діаметра колбочки та аномалії оптичного апарату ока та атрофії зорового нерва.

Периферичний зір. Одночасно з отриманням зображення предмета в центральній ямці жовтої плями виникає його сприйняття і частини оточення. При фіксації одного ока на точці, що розглядається, сприймається частина простору кругом неї, вона називається *полем зору*.

Здатність сприймати частину простору кругом фіксованої точки і є *периферійним зором* – функція, що забезпечує просторове орієнтування.

Стереоскопія. Можливості просторового орієнтування розширюються за допомогою *стереоскопії* – здатності сприймати об’єм та відстань між об’єктами, а також між спостерігачем та об’єктом у спокої та у русі.

3.3. Особливості системи людського зору, що враховуються при побудові пристроїв відображення інформації

Розглянемо особливості СЛЗ, які відіграють визначальну роль при проектуванні та синтезі технічних пристроїв відображення графічної інформації.

Людське око сприймає колірну інформацію в діапазоні хвиль приблизно від 380 нм (синій колір) до 770 нм (червоний колір), причому найкращу чутливість має в діапазоні 510 – 530 нм (зелений колір).

Гроссман відкрив закони природи сприйняття кольору [36, 37]:

1. *Тривимірність природи кольору.* Око реагує на три різних кольорних складових – червону, зелену та синю. Крім того, людський зір чутливий до колірному тону (домінуючої довжини хвилі), насиченості (чистоти кольору) та яскравості (світлості кольору).

2. *Колірний простір безперервний..* Якщо в суміші трьох кольорів один безперервно змінюється, а інші залишаються постійними, то колір суміші буде змінюватися безперервно.

На відміну від об’єктивного оцінювання кольорів, суб’єктивне сприйняття кольору є складною проблемою. Ще не запропоновані алгоритми оцінювання кольору, що сприймається візуально.

Експериментальні дослідження показують, що на візуально сприйманий колір впливають наступні фактори:

1. Спектральний склад світла, що випромінює джерело.
2. Спектральний розподіл випромінювання, що сприймає око спостерігача від усіх об’єктів, які знаходяться в полі зору.
3. Просторовий розподіл і форма об’єктів.
4. Наявність колірної пам’яті ока та ін.

Кількісне оцінювання всіх цих факторів є нездійсненним завданням. Експериментально доведено, що сприйняття кольору можна характеризувати трьома факторами (як і в попередньому пункті): для джерел світла – світлістю, колірним тоном і насиченістю, а для об’єктів – освітленістю, колірним тоном і насиченістю.

Світлість характеризується інтенсивністю світлового потоку, що випромінюється джерелом, а *освітленість* визначає частку відбитого чи пропущеного об’єктом падаючого світла. Ці два поняття відбивають ту саму характеристику колірного сприйняття об’єкта – *яскравість*.

Колірний тон – ознака кольору, що сприймається суб’єктивно, це дозволяє віднести його до того чи іншого спектрального чи пурпур-

ного кольору. Чисельно його визначають домінуючою довжиною хвилі, тобто довжиною хвилі монохромного випромінювання, що у змішуванні з білим дає даний колір (для пурпурних кольорів задають довжину хвилі додаткового кольору, що дає білий колір у змішуванні з даним).

Насиченість – властивість кольору, що виражає ступінь його відмінності від білого кольору тієї ж яскравості. Чисельно вона характеризується чистотою кольору P , обумовленою відношенням яскравості домінуючого спектрального кольору до повної яскравості суміші. За визначенням насиченість максимальна для спектральних і пурпурних кольорів ($P = 1$) і мінімальна для білого кольору.

Колірний тон і насиченість зображення досить просто можна оцінити з використанням діаграми кольоровості.

Для практичного застосування діаграми кольоровості важливо знати пороги кольоророзрізнення, тобто мінімальну зміну кольоровості, яка помічається оком людини. Як показали виміри Мак-Адама і Райта, кольоророзрізнення СЛЗ має нелінійний характер.

Наприклад, перехід від координат X, Y до координат u, v здійснюється лінійним перетворенням:

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}; \quad v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3},$$

середня межа кольоророзрізнення встановлена рівною 0,0038 одиниць шкал u, v . При цьому ділянкою нерозрізнюваних на оком кольорів на діаграмі u, v вважається коло з діаметром, рівним одному порогу.

На основі вищесказаного виділяють дві групи властивостей системи людського зору: низькорівневі („фізіологічні») і високорівневі («психофізіологічні»). Аж до середини 90-х років дослідники брали до уваги, головним чином, низькорівневі властивості зору. В останні роки з'явилася тенденція побудови компресорів та стегоалгоритмів з урахуванням і високорівневих характеристик СЛЗ [5].

Виділимо три найбільш важливі низькорівневі властивості, які впливають на помітність стороннього шуму в зображенні: чутливість до зміни яскравості зображення, частотна чутливість і ефект маскування.

Чутливість до зміни яскравості можна визначити таким чином [38]. Особі, яка тестується, показують деяке однотонне зображення. Після того, як око адаптувалося до його освітленості I , «налаштувалося на нього», поступово змінюють яскравість навколо центральної плями. Зміну освітленості ΔI продовжують доти, поки вона не буде виявлена. На рис. 3.2, б показана залежність мінімального контрасту $\Delta I/I$ від яскравості. Як видно з даного рисунка, для середнього діапазону зміни

яскравості контраст приблизно постійний, тоді як для малих і великих яскравостей значення порогу нерозрізненості зростає. Було встановлено, що $\Delta I \approx 0.01 - 0.03I$ для середніх значень яскравості.

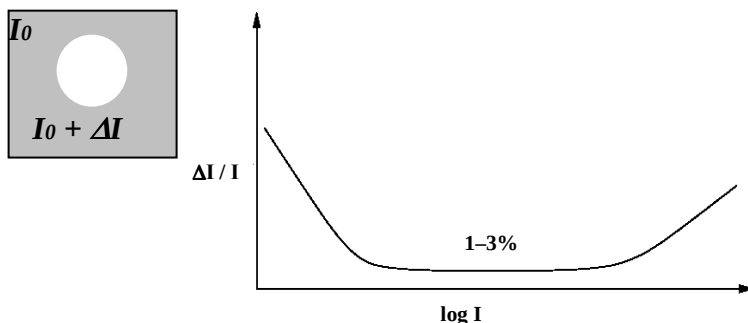


Рис. 3.2. Чутливість до контрасту та межа нерозрізненості людського зору

Необхідно звернути увагу, що результати новітніх досліджень суперечать «класичній» точці зору і показують, що при малих значеннях яскравості межа нерозрізненості зменшується, тобто СЛЗ більш чутлива до шуму в цьому діапазоні.

Частотна чутливість СЛЗ виявляється в тому, що людина набагато більш сприйнятливіша до низькочастотного (НЧ), ніж до високочастотного (ВЧ) шуму. Це пов'язано з нерівномірністю амплітудно-частотної характеристики системи зору людини. Експериментально її можна визначити за допомогою того ж досліді, що і при чутливості до яскравості. Але цього разу в центральному квадраті змінюються просторові частоти доти, поки зміни не стануть помітними.

Елементи СЛЗ розділяють відеосигнал, що надходить, на окремі компоненти. Кожна складова збуджує нервові закінчення ока через ряд підканалів. Компоненти, які виділяються оком, мають різні просторові і частотні характеристики, а також різну орієнтацію (горизонтальну, вертикальну, діагональну) [39]. У випадку одночасного впливу на око двох компонент з подібними характеристиками збуджуються ті самі підканали. Це приводить до ефекту маскування, що полягає в збільшенні межі виявлення відеосигналу в присутності іншого сигналу, що володіє аналогічними характеристиками. Тому адитивний шум набагато помітніший на гладких ділянках зображення, ніж на високочастотних, тобто в останньому випадку спостерігається *маскування*. Найкраще ефект маскування виявляється тоді, коли обидва сигнали мають однакову орієнтацію і місце розташування.

Можна показати, що частотна чутливість тісно пов'язана з чутливістю до яскравості. Відомий також і вираз для визначення межі маскування на основі відомої чутливості до яскравості, що дозволяє знайти метрику перекручування зображення, що враховує властивості СЛЗ. Такого типу математичні моделі добре розроблені для випадку квантування коефіцієнтів дискретного косинусного перетворення зображення, тому що саме воно застосовується в стандарті JPEG.

Ефект маскування в просторовій області може бути пояснений шляхом побудови стохастичних моделей зображення. При цьому зображення подається у виді маркового випадкового поля, розподіл ймовірностей якого підпорядковується, наприклад, узагальненому гаусівському закону.

Таким чином, найчастіше зустрічається наступна узагальнена схема вбудовування даних у зображення:

1. Виконання фільтрації зображення за допомогою орієнтовних смугових фільтрів. При цьому одержимо розподіл енергії за частотно-просторовими компонентами.

2. Обчислення межі маскування на основі знання локальної величини енергії.

3. Масштабування значення енергії повідомлення, що вбудовується, у кожному компоненту так, щоб вона була меншою межі маскування.

Багато алгоритмів вбудовування інформації так чи інакше використовують цю схему. Високорівневі властивості СЛЗ поки що рідко враховуються при побудові стегаалгоритмів. Їхньою відмінністю від низькорівневих є те, що ці властивості виявляються в другу чергу, тому що мозок, обробивши первинну інформацію від СЛЗ, «видає команди» на її «підлаштування» під зображення.

Перерахуємо основні з цих властивостей [5]:

1. *Чутливість до контрасту*. Висококонтрасні ділянки зображення, перепади яскравості звертають на себе значну увагу.

2. *Чутливість до розміру деталей*. Великі ділянки зображення «помітніші» менших за розміром. При цьому існує межа насичення, коли подальше збільшення розміру не суттєве.

3. *Чутливість до форми*. Довгі і тонкі об'єкти викликають більше уваги, ніж круглі однорідні.

4. *Чутливість до кольору*. Деякі кольори (наприклад, червоний) «помітніші» за інші. Цей ефект підсилюється, якщо фон заднього плану відрізняється від кольору фігур на ньому.

5. *Чутливість до місця розташування*. Людина схильна у першу чергу розглядати центр зображення. Люди, зазвичай, уважніші до зображень переднього плану, ніж заднього. Якщо на зображенні є люди, у першу чергу людина зверне свою увагу на них. На фотографії людина звертає першочергову увагу на обличчя, очі, рот, руки.

6. *Чутливість до зовнішніх подразників.* Рух очей спостерігача залежить від конкретної обстановки, від отриманих ним перед переглядом або під час його інструкцій, додаткової інформації.

Одними з властивостей СЛЗ є сприйняття дрібних деталей зображення і сприйняття кольору. Розглянемо кожну з них окремо.

Сприйняття дрібних деталей зображення

Здатність ока розрізнити дрібні деталі зображення називається роздільною здатністю і оцінюється кутом розрізнення ν , тобто тим мінімальним кутом, у межах якого дві розташовані поряд точки, що спостерігаються оком, ще не зливаються в одну. Величина, зворотна куту розрізнення, називається *силою розрізнення*, або *гостротою зору*. Мінімальний кут розрізнення ока у області фовеа ν_0 складає близько 1,5. У міру віддалення від фовеа гострота зору різко падає. На рис. 3.3 для правого ока зображена крива залежності відносної гостроти зору ν від кута периферійності θ , що відрховується від зорової осі (зачорнена область сліпої плями – вхід зорового нерва). Аналітично ця залежність добре апроксимується формулою:

$$\nu = \frac{1/2 \theta \text{ при } 0,5 < \theta < 50}{0 \text{ в іншому випадку}}.$$

Нерівномірний розподіл колб по сітківці, а також здатність ока майже самовільно повертатися усередині очної орбіти і при цьому фіксувати зір на найбільш інформативних деталях зображення забезпечує можливість при відносно малій кількості фоторецепторів спостерігати зображення з високою чіткістю і одночасно оглядати простір у межах кута до 140°

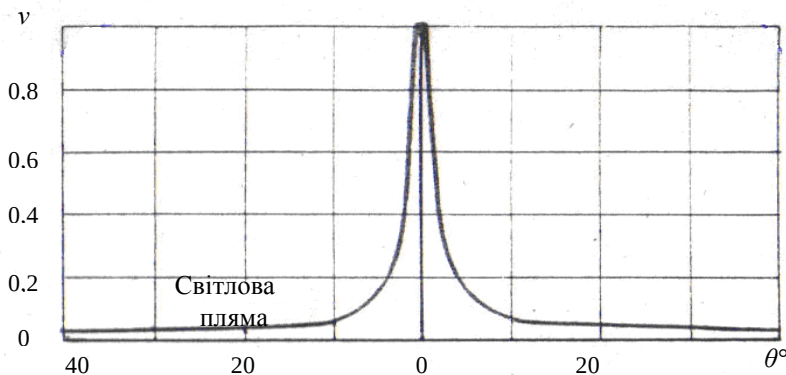


Рис 3.3. Крива залежності відносної гостроти зору ν від кута периферійності θ

Гострота зору істотно залежить від поєднання кольорів (табл. 3.1), від контрасту між деталями зображення і фоном, а також від яскравості фону. При спостереженні зображення на світлому фоні зі зменшенням контрасту і яскравості фону гострота зору падає. У той же час при спостереженні світлих об'єктів на темному фоні зі збільшенням яскравості фону гострота зору спочатку росте, а потім при яскравості більше 2 кд/м^2 починає падати унаслідок іррадіації (світлорозсіювання) в очному середовищі, що приводить до «розповзання» розмірів білих плям. Саме тому білий круг на чорному фоні здається більшим за діаметром, ніж аналогічний чорний круг на білому фоні.

Залежність гостроти зору від поєднання кольорів.

Таблиця 3.1.

Залежність гостроти зору від поєднання кольорів

Поєднання кольорів	Відносна гострота зору, %
Чорно-біле	100
Чорно-зелене	94
Чорно-червоне	90
Зелено-червоне	40
Чорно-синє	26
Червоно-синє	23
Зелено-синє	19

Сприйняття кольору

Дія на око світлового випромінювання певної довжини хвилі визначається у вигляді кольору. Короткохвильовій межі світлового діапазону відповідає фіолетовий колір, який із збільшенням довжини хвилі поступово переходить у синій, потім у блакитний, зелений, жовтий, помаранчевий і, нарешті, червоний, що замикає довгохвильову межу світлового діапазону.

Відносна спектральна чутливість ока – крива видимості (рис. 3.4) – має максимум на хвилі 555 нм, що відповідає жовто-зеленому кольору, і падає при віддаленні від цієї ділянки, практично досягаючи нуля при довжинах хвиль 380 і 770–800 нм.

Як було показано у підрозділі 3.2 фізіологічно колір оцінюється світністю, колірним тоном і насиченістю колірного тону. Наприклад, білий, світло-сірий і темно-сірий кольори відрізняються світлістю, жовтий і зелений – колірним тоном, червоний і рожевий – насиченістю.

Фізіологічні характеристики суб'єктивні і дають лише якісну оцінку випромінювання.

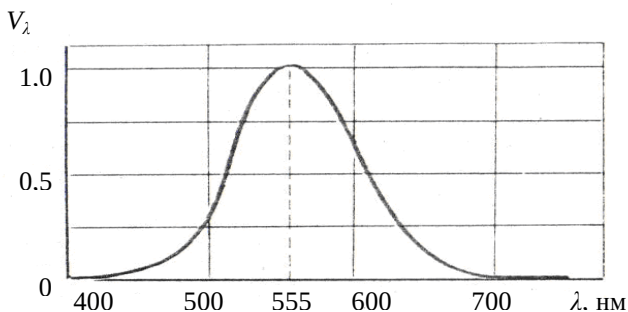


Рис. 3. 4. Крива видимості людського ока

Об'єктивну характеристику кольору оцінюють за яскравістю; колірним тоном – за домінуючою довжиною хвилі, тобто за довжиною хвилі того спектрального кольору, який, будучи змішаний в певній пропорції з білим, забезпечує зорову тотожність кольору суміші з кольором досліджуваного випромінювання; насиченістю – за чистотою кольору p , під якою розуміють частку спектрального кольору (для якого $p = 1$), яка забезпечує в суміші з білим (для якого $p = 0$) зорову тотожність з досліджуваним випромінюванням.

Також слід ще раз відзначити особливості зорового апарату, що стосується адаптації яскравості і колірної адаптації. Остання виражається у тому, що колір, на який адаптується око, ніби «вицвітає». Це приводить до зміни кольору в результаті попередньої дії на око інших кольорів (послідовний колірний контраст) або до уявної зміни кольору при зміні кольору фону (одночасний колірний контраст). Наприклад, сіре на червоному набуває зеленуватого відтінку, а на синьому – жовтуватого, жовте на червоному здається зеленуватим, а на зеленому – помаранчевим і т. ін.

Характерно і те, що в будь-яких умовах освітлення (свічка, лампа розжарювання, денне світло) білі деталі завжди легко упізнаються, оскільки вони найсвітліші, а вже по відношенню до них око оцінює всю решту кольорів. Це явище називається константою кольору, або поправкою на освітлення, і виконує важливу роль у пристосуванні зору до різних умов освітлення. Здатність апарату денного зору розрізняти кольори пояснюється наявністю трьох груп колб. Вважають, що одна з груп чутлива до червоного, інша – до синього, а третя – до зеленого кольору. Сукупність подразнень цих груп світлочутливих елементів створює враження реального кольору.

Людське око може по-різному реагувати на світло. Розглянемо таке поняття як *відчуття інтенсивності світла*.

Око сприймає світлове випромінювання в дуже широкому інтервалі яскравості. Відношення максимальної яскравості L_{max} , що відповідає больовому відчуттю, до мінімальної L_{min} , ще помітної оком, досягає 10^{11} – 10^{12} . Цей діапазон яскравості охоплюється неодноразово. Око кожного разу адаптується до тієї або іншої середньої яскравості.

Зорове відчуття яскравості безпосередньо виміряти неможливо, тому його оцінюють непрямим методом. При розгляді двох півкіл, які торкаються один одного (рис. 3.5) з яскравістю L і $L+\Delta L$, розташованих у центрі поля з яскравістю L_{ϕ} , що визначає рівень адаптації ока, виникає відповідне зорове відчуття A і $A+\Delta A$. Око починає помічати відмінність яскравості півкіл при деякому пороговому значенні дельта $L=\Delta L_{nor}$, яке створює відчуття порогової помітності ока ΔA_{nor} . Відношення $\Delta L_{nor}/L$ називається диференціальним порогом, або пороговим контрастом, а зворотна величина $L/\Delta L_{nor}$ – контрастною чутливістю ока. Ці поняття характеризують здатність ока знайти відмінності між яскравостями суміжних полів.

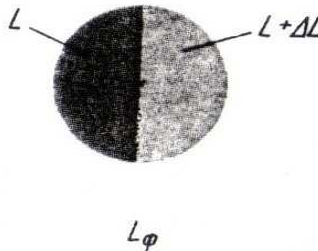


Рис. 3.5. Експеримент для визначення рівня адаптації ока

Закон Вебера-Фехнера – емпіричний психофізіологічний закон, який полягає у тому, що інтенсивність відчуття пропорційна логарифму інтенсивності стимулу.

У ряді експериментів, починаючи з 1834-го року, Вебер показав, що новий подразник, щоб відрізнитися за відчуттями від попереднього, повинен відрізнитися від початкового на величину, пропорційну початковому подразнику. Так, щоб два предмети сприймалися як різні за вагою, їх вага повинна розрізнитися на $1/30$, для розрізнення яскравості двох джерел світла необхідно, щоб їх яскравість відрізнялася на $1/100$.

3.4. Суб'єктивне оцінювання сприйняття кольорових зображень

Як було зазначено вище, об'єктивні та суб'єктивні способи оцінювання якості відновлених після компресії зображень або стего часто

дають суперечливі результати. Для суб'єктивного оцінювання якості оброблених зображень будемо застосовувати табл. 3.2. За допомогою програмного моделювання створено приклади зображень (рис. 3.6), які можуть відповідати суб'єктивному оцінюванню згідно з табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Суб'єктивна шкала оцінювання оброблених зображень

Шкала якості	Шкала погіршень
5 – відмінно	5 – не помітно
4 – добре	4 – помітно, але не заважає
3 – задовільно	3 – помітно, не дуже заважає
2 – погано	2 – заважає
1 – дуже погано	1 – суттєво заважає (неможливість відновлення або розпізнавання)

Розглянемо приклад використання даної шкали (рис. 1 додатку А):

ВИСНОВКИ

1. Таким чином, сприйняття візуальної інформації людиною – достатньо складний і багатогранний процес. Врахування якомога більшої кількості особливостей системи людського зору дозволяє удосконалювати сучасні методи цифрової обробки зображень.

2. Невпинний розвиток методів цифрової обробки зображень (зокрема, цифрової стеганографії та методів компресії інформації) приводить до постійного поповнення знань про систему людського зору.

3. Для побудови ефективної стеганосистеми необхідно враховувати як низькорівневі (амплітудна, частотна чутливість, ефект маскування), так і високорівневі властивості системи людського зору.

IV. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПОДАННЯ КОЛЬОРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

4.1. Цифрове подання зображень

Одним із видів інформації, що циркулює в телекомунікаційних системах, є мультимедіа, зокрема, *статичні зображення* (фотографії, комп'ютерна графіка та ін.). *Зображення* – це своєрідний тип даних, які характеризуються трьома особливостями [24].

1. Значний обсяг пам'яті, що займає зображення. Наприклад, зображення розміром 500x800 точок займає 1,2 МБ, стільки ж, скільки 400 сторінок тексту (60 знаків у рядку, 42 рядки на сторінці).

2. Другою особливістю зображень є те, що зір людини при аналізі зображення оперує контурами, загальним переходом кольорів і порівняно слабо відчутний до малих змін у зображенні.

3. Зображення, на відміну, наприклад, від тексту, має надмірність у 3-х вимірах. Це означає, що сусідні точки по горизонталі, вертикалі і по діагоналі в зображенні близькі за кольором.

Значна надмірність зображень змушує дослідників створювати й удосконалювати процедури її усунення – **методи компактного подання зображень**.

Одноколірне дискретне зображення можна описати деякою матрицею, точки або елементи якої (*пікселі*) представляють собою отримані в результаті просторової дискретизації відліки функції, що описує розподіл яскравості на безперервному зображенні [40]. Цифровим зображенням будемо називати матрицю, отриману в результаті поелементного квантування (з кінцевим числом рівнів) значень відліків дискретного зображення.

Кожен піксель займає на екрані комп'ютерних дисплеїв невелику прямокутну область, що у будь-який момент часу відображається одним кольором. Пікселі упорядковані у вигляді двовимірного масиву.

На екрані об'єкти відображаються шляхом установки кольорів окремих пікселів. Піксельне представлення відрізняється зубчастими краями, що не особливо комфортно для ока (рис. 4.1). Чим щільніше упаковані пікселі пристроєм відображення, тим менш помітна нерівність країв.

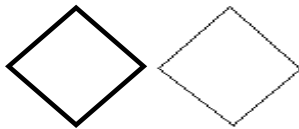


Рис. 4.1. Ідеальне зображення та його піксельне представлення (справа)

За останні роки кількість пікселів, що відображуються на моніторах комп'ютерів, значно зросла. Не дуже давно стандартним вважалося розрізнення монітору 640x480 (370 200) пікселів. Зараз звичайне розрізнення складає 1 024x768 (786 432), 1 280x1 024 (1 310 720) пікселів і навіть більше [40]. Кількість пікселів, що може відображати комп'ютерна система, обмежується обсягом відеопам'яті і можливостями монітора і відеоадаптера.

Буфер кадрів – це блок відеопам'яті, що керує кольором кожного пікселя на моніторі. У відеопам'яті кожному пікселу відповідає чарунка, розмір якої варіюється в межах від 1 до 32 бітів. У багатьох системах допускається як читання, так і запис відеопам'яті, так само як для будь-якого іншого виду пам'яті. Програма може змінювати колір, що відображується на моніторі, шляхом простої заміни значення відповідної чарунки пам'яті.

4.2. Векторна і растрова графіка

Формати графічних файлів можна розділити на два загальні класи [4]: *векторні* (об'єктно-орієнтовані) і *растрові* (піксельні). Растрові формати призначені для відображення зображень зі складними гамами кольорів, відтінків і форм, а саме: фотореалістичні зображення, малюнки, відскановані дані. Векторні формати добре пристосовані для креслень зображень із простими формами, тінями і забарвленнями.

У *векторному* представленні зображення будуються за допомогою математичних описів об'єктів (так званих примітивів). Примітивом можуть виступати лінії, дуги, кола, багатокутники, криві, текст і т. п. Векторну графіку називають також «об'єктно-орієнтованою», тому що файл зображення формується з дискретних, не зв'язаних між собою елементів зображення, розміри, форма і колір яких можуть бути незалежно один від одного змінені швидко і без втрати якості.

Найпростішою аналогією векторного зображення може бути аплікація. Все зображення складається з окремих шматочків різної форми і кольору (навіть, частини растра), «склеєних» між собою. Зрозуміло, що таким чином важко отримати фотореалістичне зображення, оскільки на ньому складно виділити кінцеву кількість примітивів, проте, істотними перевагами векторного способу представлення зображення, в порівнянні з растровим, є:

- векторне зображення може бути легко масштабоване без втрати якості, оскільки це вимагає перерахунку порівняно невеликої кількості координат вузлів;

- графічні файли, в яких зберігаються векторні зображення, мають істотно менший, у порівнянні з растровими, об'єм (близько декількох кілобайт).

Сфери застосування векторної графіки дуже широкі [41]. У поліграфії – від створення насичених ілюстрацій до роботи зі шрифтами. Все, що називається машинною графікою, 3D-графікою, графічними засобами комп'ютерного моделювання і САПР – усе це сфери пріоритету векторної графіки розглядають зображення винятково з позиції його математичного уявлення.

Як видно, векторним можна назвати тільки спосіб описання зображення, а саме зображення для нашого ока завжди растрове. Таким чином, завданнями векторного графічного редактора є растрове прорисовування графічних примітивів і надання користувачеві сервісу по зміні параметрів цих примітивів. Все зображення є базою даних примітивів і параметрів макета (розміри полотна, одиниці вимірювання і т. д.).

Векторна графіка має два основних недоліки. По-перше, вона не здатна відтворити фотореалістичне зображення чи живопис. По-друге, відтворення складних зображень вимагає багато часу. У більшості систем відображення кожен векторний об'єкт повинен перетворюватися в піксельне зображення.

Під *растровим* (bitmap, raster) розуміють спосіб подання зображення у вигляді сукупності окремих точок (пікселів). Пікселі сформовані у двовимірний масив, де кожному елементу матриці ставиться у відповідність своє значення кольору. При виводі на екран комп'ютера кожен елемент масиву звичайно відображається одним екранним пікселем. Кожен піксель характеризується розміром, тоновим значенням, глибиною кольору і позицією. Редагування растрових зображень полягає в зміні кольору визначеної групи пікселів, тим самим досягається зміна форм об'єктів.

Якщо в пристрої відображення пікселі розташовані досить щільно, то людському оку важко помітити структуру масиву точок, що складають зображення.

Найбільша перевага растрових зображень полягає в їхній якості. В умовах збільшення швидкодії процесорів, обсягу дискового простору і пам'яті розширюється і використання растрових зображень. Одним із найпомітніших прикладів цього є галузь комп'ютерних ігор.

Основний недолік растрових зображень у великому обсязі даних, необхідних для їхнього відтворення. Розмір зображення в байтах (без урахування надлишкових бітів) обчислюється за формулою (4.1):

$$V_{\text{зобр.}} = \frac{h \times d \times r + 7}{8},$$

де h – висота зображення в пікселях;
 d – ширина зображення в пікселях;
 r – глибина кольору (кількість біт на піксель).

Таким чином, для відображення чи збереження зображення розміром 600x800, з 24 бітами на піксель, буде потрібно 1 440 000 байтів пам'яті чи дискового простору. Для зменшення простору займаного файлом зображення на диску зазвичай застосовується компресія, що дозволяє зберігати більшу кількість зображень на тому ж об'ємі дискового простору.

Іншим недоліком растрових зображень є те, що вони залежні від розміру і непридатні для значного редагування. Під час роботи з векторними форматами програмі для відображення зображення неважно додавати, видаляти і модифікувати окремі елементи. Крім того, над векторними зображеннями нескладно виконувати афінні перетворення, такі як урізання і масштабування.

Для растрових зображень навіть зміна розміру пов'язана з проблемами. При зменшенні розмірів об'єкта частина інформації втрачається; при збільшенні зображення виникають мозаїчні ефекти. Існують методи згладжування, що дозволяють поліпшувати зовнішній вигляд зображень, що масштабуються.

У табл. 4.1 наведено узагальнені переваги векторної і растрової графіки. Жодному з методів не можна віддати повної переваги – для кожного з них існують свої області застосування. У дійсності деякі програми використовують комбінацію двох технологій.

Таблиця 4.1

Зіставлення переваг растрової і векторної графіки

	Растрова графіка	Векторна графіка
Швидкість відображення	+	–
Якість зображення	+	–
Використання пам'яті	–	+
Легкість редагування	–	+
Апаратна незалежність	–	+

4.3. Програми векторної графіки

Описані вище особливості подання зображень обґрунтовують необхідність правильного вибору графічного редактора для обробки інформації – растровий або векторний. Зрозуміло, у них є загальні риси – можливість відкривати і зберігати файли в різних форматах, використовувати інструменти з однаковими назвами (олівець, перо і т.д.) або функціями (виділення, переміщення, масштабування і т.д.), вибирати потрібний колір або відтінок. Проте принципи реалізації процесів малювання і редагування різні і обумовлені природою відповідного

формату. Так, якщо в растрових редакторах говорять про виділення об'єкта, то мають на увазі сукупність точок у вигляді області складної форми. Процес виділення дуже часто є трудомістким і копітким.

У векторному ж редакторі об'єкт – це сукупність графічних примітивів, і для його виділення досить вибрати мишкою кожен з них. А якщо ці примітиви були згруповані відповідною командою, то досить «клацнути» один раз у будь-якій з точок згрупованого об'єкта. Переміщення виділеного об'єкта оголяє нижні елементи.

Проте існує тенденція до зближення. Більшість сучасних векторних редакторів здатна використовувати растрові зображення як фон або навіть переводити у векторний формат частини зображення вбудованими засобами (трасування). Причому є засоби редагування завантаженого фонового зображення.

Починаючи з 8-ї версії Illustrator, програма здатна завантажувати *.psd-файли пакета Photoshop і використовувати кожний з отриманих шарів. Крім того, для використання тих же фільтрів може здійснюватися безпосередній переклад сформованого векторного зображення в растровий формат і подальше використання як нередагованого растрового елементу.

Деякі растрові редактори здатні вантажити один з векторних форматів (зазвичай *.wmf) як фон або відразу переводити їх в растр з можливістю безпосереднього редагування.

На сьогодні створено безліч пакетів ілюстративної графіки, які містять прості в застосуванні, розвинені і потужні інструментальні засоби векторної графіки, призначеної як для підготовки матеріалів до друку, так і для створення сторінок в Інтернеті [41].

Для створення графічного об'єкта потрібно мати програму ілюстративної векторної графіки. Якість і корисність засобів векторної графіки визначаються, головним чином, можливостями масштабування.

Пакети векторної або ілюстративної графіки завжди ґрунтувалися на об'єктноорієнтованому підході, що дозволяє малювати контури об'єктів, а потім закрашувати їх або заповнювати узорами. Існує можливість дуже точно відтворювати ці контури, задаючи будь-який розмір, оскільки вони формуються за допомогою математичної моделі з точок і кривих, а не як растрові зображення – у вигляді сітки, заповненої прямокутними пікселями.

До нових можливостей відноситься багатоколірне градієнтне зафарбовування. Такі примітиви, як багатокутники, зірки і спіралі, стали звичайними атрибутами подібних пакетів. Зв'язані кольори дозволяють замінити червоний колір троянди на жовтий, змінивши тільки базовий колір; усі зв'язані відтінки зміняться автоматично. Багатошарові інтерактивні кольорові «діапозитиви» забезпечують раніше недосягну глибину і є можливість перетворювати векторні зображення в растрові

у рамках векторного графічного файлу. Якщо вчорашні пакети векторної графіки дозволяли тільки поміщати растрове зображення у файл, то за допомогою сучасних програм можна вбудовувати представлені в растровій формі зображення, змінювати їх розміри і навіть накладати спеціальні ефекти і маски. Це полегшує процес отримання остаточного зображення засобами багатопарової графіки – об'єднанням векторних і растрових файлів, необхідних для створення логотипів, друкарських рекламних оголошень і зображень для Web.

Зі всіх нововведень найбільший інтерес представляють фірмові зовнішні модулі (plug-ins) Web, що збагачують Інтернет засобами векторної графіки і навігації. Об'єм файлу векторної графіки набагато менший за растровий файл і це дозволяє збільшувати масштаб фрагментів зображення до 25 тис. відсотків. Тепер з'явилася можливість призначати URL (уніфікований покажчик ресурсу) будь-якому об'єкту.

Принципи, що лежать в основі останніх пакетів, повністю змінюють уявлення про векторну графіку. Corel Xara 1.5 реалізовує якісно новий підхід до візуалізації, має в своєму розпорядженні приголомшливі засоби створення вихідних файлів GIF і JPEG і феноменально швидким зовнішнім модулем браузера для роботи з векторною графікою. Пакет Expression 1.0 фірми Fractal Design дозволяє будувати контури з інших складних векторних графічних зображень, надаючи в розпорядження користувача нескінченну різноманітність візуальних можливостей, недосягну за допомогою інших програм.

На відміну від призначеного для початківців-користувачів програмного забезпечення настільних видавничих систем або програм редагування фотозображень, де, як правило, містяться найбільш часто використовувані засоби редагування, графічні пакети для новачків, зазвичай орієнтовані на рішення конкретних задач, наприклад, побудови діаграм або технічне креслення. Набути навичок вільного малювання кривих Без'є важко навіть для професіонала; не менш складно засвоїти і основні принципи машинного креслення, наприклад зображення розрізів і перетинів. Крім того, багато початківців-користувачів не відчують відмінностей між растровою і векторною графікою і можуть не знати, в яких випадках якими пакетами користуватися. З цих причин початківці повинні порівнювати свої завдання з можливостями програми і переходити до повнофункціонального пакета малювання, тільки коли будуть готові до цього.

У більшості випадків для створення простих ілюстрацій початківцям досить уміти працювати з тими програмними засобами, які, можливо, у них вже є. Комплекти програм Microsoft, Corel і Lotus містять інструменти малювання в своїх модулях текстового процесора і презентаційної графіки, а також спеціальні бібліотеки (наприклад, Clip-

Art). У Microsoft Office передбачена лінійка завдань, що містить безліч варіантів вибору створення малюнків, логотипів і тексту під час роботи з різними додатками. Крім того, за допомогою функцій Auto-Shape можна створювати велику кількість стандартних форм і символів для побудови діаграм (які можуть мати тінь), а галерея WordArt надає цікаві і кольорові стилі тексту, якими можна користуватися для заголовків або ярликів.

Corel Draw.

Пакет Corel Draw – один із найпотужніших графічних редакторів. У комплект фірма Corel включила безліч програм, зокрема Corel Photo-Paint. Новий пакет має у своєму розпорядженні добрий інструментарій серед усіх програм огляду. Проте, що стосується нових функцій, зокрема підготовки публікацій для Web, то тут Corel Draw поступається Corel Xara [42].

Робота Corel Draw з кольорами моделі СМΥК (детально розглянута в наступному розділі) залишає бажати кращого. Кольори файлів GIF і JPEG помітно відрізнялися від кольорів на моніторі та папері, тоді як пакет FreeHand відтворював однакові кольори на екрані, у файлах Web і на принтері.

Переваги Corel Draw.

У даному пакеті без зусиль будується тривимірне зображення з двовимірними контурами. Дозволяється призначати інтерактивні градієнтні діапазитиви растровим зображенням і простим векторним об'єктам; для кожної з двох вказаних точок задається ступінь прозорості у відсотках. Ця технологія була запозичена з Corel Xara 1.0, проте Corel Draw не дозволяє вказувати більше двох значень прозорості для кожного об'єкта або групи, тоді як за допомогою Corel Xara 1.5 можна задавати удвічі більше значень прозорості.

Художні можливості оформлення тексту в Corel Draw бездоганні, а параметри, що приймаються за умовчанням, не вимагають налаштування, на відміну від пакетів Canvas і FreeHand. Інструмент «лупа» не має собі рівних – він дозволяє отримати безліч спеціальних ефектів, зокрема можливість збільшення тільки фрагмента зображення і автоматичного налаштування кольорів тексту залежно від кольору фону.

Існує можливість вирізання зображення, накладання кольорових фільтрів і надання растровим зображенням вигляду зігнутої сторінки, використовуючи дво- і тривимірні ефекти, зовнішні модулі PhotoShop. Для редагування пікселів Corel Draw автоматично перемикається на пакет Corel Photo-Paint, де можливо редагувати файл і зберігати його безпосередньо в Corel Draw. Проте, крім базових можливостей масштабування і засобів динамічного призначення розмірів, Corel Draw не містить спеціальних засобів підготовки технічних ілюстрацій, подібних Smart Mouse в Canvas або копіювання масивів в Designer.

Недоліки Corel Draw.

Слабкі можливості пакета при реалізації зображень в моделі СМΥК, хоча програма тепер може працювати з системою управління кольором Kodak CMS. По-перше, для збереження сумісності з попередніми версіями Corel Draw потрібно кожного разу при відкритті пакета в меню View відключати колірну корекцію Kodak. По-друге, якщо принтер користувача не входить в обмежений список дозволених для застосування периферійних пристроїв, немає гарантії, що завжди знайдеться відповідний груповий драйвер. Це означає, що кольори на моніторі друкувалися: синій – блакитним, кораловий – яскраво-рожевим, а колір стиглої сливи – фіолетовим.

При використанні художньої ілюстрації для вузла Web виявляється ще один недолік. Corel Draw експортує кольори так само, як вони відображаються при відключених засобах колірної корекції, тому в растрових файлах GIF і JPEG були ті ж неправильні кольори, що і при виводі на принтер, який не входить у дозволений список. З'ясувалося, що для отримання якісного зображення на Web-сторінці краще всього вибрати режим супердискретизації при експортуванні растрових файлів. Програма перегляду Corel CMX працювала достатньо повільно, а файли CMX виявилися за розміром більші, ніж файли CDR, з чим не можна погодитися при роботі з Web.

Не дивлячись на потужний інструментарій, Corel Draw все-таки має ряд недоліків. Широкий набір інструментальних засобів робить Corel Draw виключно зручним для малювання, але спотворений вигляд друкованих сторінок і сторінок Web обмежує можливості застосування цього пакета.

Adobe Illustrator.

За функціональними можливостями Illustrator сьогодні поступається пакета Corel Draw, не говорячи вже про Macromedia FreeHand. Тому не рекомендується використовувати цей пакет для професійних художників графіки [43, 44].

Ветеран векторної графіки – пакет Illustrator – колись був видатним досягненням у цій області і послужив моделлю, яка лягла в основу всіх представлених в даному огляді програм. Однак з тих пір в кожному новому продукті з'являлося яке-небудь удосконалення. Наприклад, Macromedia FreeHand краще виконує імпортування файлів EPS і AI і при цьому забезпечує високу точність перенесення кольорів у форматі СМΥК, якою завжди відрізнявся Illustrator. У Corel Draw передбачено градієнтне зафарбовування, булеві операції і спеціальні ефекти. Canvas 5 має у своєму розпорядженні засоби редагування растрових зображень на рівні пікселів, а його робоча область досягає майже 140 м², тоді як для Illustrator ця область складає всього 0,2 м². Micrografx Designer надає чудовий інструментарій для малювання, ін-

тегрується Microsoft Office і містить засоби для підготовки технічних ілюстрацій, а CorelXara забезпечує прозорість для векторних об'єктів і можливість вбудовування растрових зображень. У свою чергу Fractal Design Expression за допомогою інструменту Skeletal Strokes дозволяє отримувати найнезвичайніші ефекти і видозмінювати зображення.

Illustrator не дозволяє експортувати файли GIF і JPEG для використання в Web. І хоча якість кольорового друку залишається найсильнішою стороною пакета Illustrator, можливості обробки кольорів моделі CMYK аналогічні можливостям пакета FreeHand (крім того, одна і та ж версія FreeHand може працювати в середовищі Windows Mac).

Пакет Illustrator, що став попередником сучасних графічних пакетів, сьогодні відійшов на другий план.

Micrografx Designer.

Програми Micrografx Designer разом з FlowCharter і Picture Publisher утворює ядро пакета Micrografx Graphics Suite, який є одним з найдешевших програм серед даного огляду [45].

Інструментальні засоби малювання пакета Designer – одні з найпростіших для засвоєння і застосування. На контекстно-залежному рядку інструментарію у верхній частині екрана розташовані кнопки для створення і редагування ліній, кривих, зірок і навіть багатокутників з криволінійними сторонами. Інструментарій його пакета дозволяє з легкістю створювати об'єкти в тривимірному просторі. Діалогове вікно форматування об'єкта містить незвично крупні піктограми і області вибору зразків внутрішнього зафарбовування, стилю ліній і заповнень, тексту і таких характеристик об'єкта, як ім'я, розмір і розташування. На жаль, іноді діалогове вікно форматування об'єкта не показує заповнення об'єкта, що призводить до неправильного використання заповнення.

Так як і в Corel Xara в Designer не передбачено вікно редагування тексту, що примушує користувача редагувати його постійно в режимі повної відповідності WYSIWYG. Переміщення між шарами дуже незручні і хоча можна користуватися декількома сторінками різного формату, для переміщення об'єктів між сторінками потрібний монтажний буфер.

Переваги Micrografx Designer.

Унікальний засіб Reference Point дає можливість встановлювати обмеження на відстані уздовж осей x і y і на величину кута повороту або примусово розміщувати всі об'єкти на певній відстані від певної точки.

Пакет Designer наділений безліччю функцій, таких, наприклад, як ітеративне змішування кольорів.

У комплект постачання пакета Designer входять цікаві растрові фільтри і ефекти, він дозволяє редагувати пікселі в Picture Publisher

засобами технології OLE. Designer формує якісні файли GIF із змішуванням кольорів, що нагадують плетені корзини, а також аномальні файли JPEG із зображеннями, що мають вигляд бульбашок. Designer дозволяє також приєднувати URL до об'єктів, щоб використовувати їх разом із зовнішнім модулем браузерів.

Недоліки Micrografx Designer.

Пакет Designer іноді неправильно імпортує логотипи EPS і перетворює кольори моделі CMYK у кольори моделі RGB при імпортуванні файлу Adobe Illustrator. У програмі не передбачено також колірного розділення і корекції кольорів на екрані.

Designer 7 за допомогою простого інтерфейсу дозволяє легко впоратися з багатьма типовими для офісу графічними роботами, але принципові обмеження інструментальних засобів і мізерні можливості для чотириколірного друку CMYK можуть примусити професійних художників графіки утриматися від його придбання. Однак, якщо необхідний потужний засіб для технічного креслення або існує необхідність розміщувати матеріали на своїх Web-сторінках, обходячись при цьому без програмування, то, можливо, слід зупинити свій вибір саме на цьому пакеті.

Macromedia FreeHand.

Пакет Macromedia FreeHand вражає бездоганною якістю виводу на екран і чотириколірного друку зображень у моделі CMYK, наявністю декількох форматів для Web. Пакет FreeHand завжди відображає кольори так само, як вони виглядають при друкуванні [46].

У списку кольорів FreeHand указуються тільки ті кольори, які були використані або створені користувачем. Програма дозволяє відбирати кольори з декількох бібліотек, зокрема Pantone і Hexachrome для друку, і з палітри Web, оптимізованої як для Mac, так і PC.

Інструментарій FreeHand для малювання і роботи з текстом відповідає необхідним вимогам, але дещо обмежений. У інтерфейсі FreeHand віддана перевага редагуванню вузлів, а не редагуванню об'єкта в цілому. Кожна з операцій масштабування, повороту, дзеркального відображення і деформації, що виконуються в Corel Draw маніпуляціями в робочому вікні об'єкта – вимагає окремого інструмента з набору інструментарію FreeHand. При виборі об'єкта його точки (вузли) завжди доступні для безпосереднього редагування, але це означає, що користувач спостерігає вузли і траєкторії об'єкта, а не його «закінчений» вигляд.

Переваги Macromedia FreeHand.

Засоби FreeHand для роботи з текстом абзаців надають достатньо широкі можливості. Існує можливість розташування тексту навколо об'єктів. Якщо Corel Draw дивним чином розбиває слова, навіть не вставляючи знака перенесення, то FreeHand не здійснює нічого подіб-

ного. FreeHand дозволяє управляти заливкою тексту усередині об'єкта. Пакет дозволяє ретельно підбирати відстані між буквами і компонувані копії, але ширина колонок повинна бути однаковою.

Недоліки Macromedia FreeHand.

Проте можливості виділення тексту в FreeHand обмежені. Серед всіх програм огляду тільки FreeHand не передбачає градієнтного зафарбовування тексту без попереднього перетворення його в криві. У програмі немає засобів попереднього перегляду шрифтів, і, хоча можна використовувати такі спеціальні ефекти, як зміну масштабу тривимірного тексту, ці ефекти не експортуються у вигляді об'єктів Shockwave. При розміщенні тексту уздовж кривої витрачаються великі зусилля на послідовне регулювання відстаней між буквами; ці зусилля виявляються марними, якщо виникає необхідність редагування тексту.

У програмі FreeHand відсутні інструментальні засоби, що спеціально призначені для роботи з технічними ілюстраціями. Крім того, немає інструментів викреслювання розмірних або паралельних ліній.

Засоби виводу для Web, зокрема експортування файлів GIF і JPEG, працювали бездоганно, проте немає змоги здійснити змішування кольорів або визначити палітру. За допомогою невеликої програми, що визначає положення лінійки інструментарію і розмір вікна, можна вставити стислий формат FHC програми Macromedia Shockwave Graphics у сторінку HTML.

Corel Xara.

Простий і ясний інтерфейс Corel Xara перш за все викличе у вас питання: чому вважається, що користуватися пакетами ілюстративної графіки дуже складно?

Пакет CorelXara служить, у першу чергу, для створення графічного зображення на сторінці за один раз і формування блоку тексту за один раз. Хоча Corel і рекламує Corel Xara як доповнення до Corel Draw, починаючи з сьомої версії, проте створення графіки Web спеціалізованим інструментарієм у Corel Xara перевершує Corel Draw у багатьох відношеннях [47].

Завдяки можливостям масштабування векторної графіки і створення текстур растрових зображень двовимірні об'єкти починають усе більш нагадувати тривимірні.

Інтерфейс Corel Xara елегантний і простий. Піктограми у верхньому ряду забезпечують доступ до повнокольорових візуальних наборів кольорів, заповнень, штрихувань, растрових зображень, шрифтів і графічних вставок. Corel Xara полегшує управління кольором шляхом створення сімейств зв'язаних відтінків. При зміні основного кольору, наприклад, з синього на зелений, об'єкт змінить всю гамму відтінків. Програма добре обробляє кольорові растрові зображення.

У комплект постачання CorelXara входять шаблони Web і палітри кольорів; тільки за допомогою цього графічного пакета можна безпосередньо створювати анімаційні файли GIF. Анімаційні файли GIF не вимагають наявності зовнішнього програмного модуля і автоматично відтворюються в браузері.

Якщо потрібно створити складні оригінал-макети, працювати з прозорими шарами, за умови, що користувач не має професійних навичок роботи з графічними редакторами, то пакет Corel Xara стане незамінним інструментом при вирішенні таких задач.

4.4. Параметри цифрового зображення

Цифрове зображення представляється декількома параметрами. Це, у першу чергу, геометричні розміри (ширина, висота), розрізнення і глибина кольору [48, 49].

Геометричні розміри зображення вказуються в одиницях вимірювання довжини (дюйми, сантиметри) і відповідають розмірам оригіналу. При скануванні розмір визначається автоматично. Чим більший розмір зображення, тим більший обсяг буде займати отриманий файл.

Розрізнення – кількість точок (елементів зображення, пікселів) на одиницю лінійного розміру зображення (наприклад, дюйм). Чим вищий цей параметр, тим детальніше зображення повторює оригінал і тим більший обсяг отриманого файлу. Розрізнення нижче 150 DPI (точок на дюйм), звичайно, недостатньо для того, щоб текст чітко читався з відсканованого зображення. Розрізнення вище 400 DPI надмірне для відображення тексту. Оптимальним є розрізнення 200–300 DPI.

Глибина кольору визначає кількість кольорів, яку може приймати кожна точка в зображенні. Глибина вимірюється кількістю біт, що відводяться для збереження інформації про колір одного пікселя, і характеризує кількість кольорів і відтінків, якими представлене зображення. Ця кількість кольорів визначається як 2^n , де n – глибина кольору.

Один біт відповідає двом кольорам (чорно-біле зображення). Два біти дають уже чотири кольори, три – вісім, чотири – шістнадцять і т. д. Широко використовуються наступні значення глибини кольору:

- 1 біт – двоколірне (чорно-біле) зображення, складається тільки з чорних і білих точок. Займає мінімальний об'єм, однак, використовується тільки для дуже контрастних оригіналів.
- 8 біт – сіре (напівтонове) зображення, кожна точка може приймати один з 256 відтінків сірого кольору – від чорного до білого. Займає прийнятний обсяг і використовується для більшості оригіналів
- 8 біт – кольорове зображення з низькою глибиною кольору, забезпечує грубе передавання колірних тонів. Займає прийнятний об'єм,

однак глибина кольору недостатня для повноцінного відображення колірної палітри. Застосовується тільки для дуже контрастних оригіналів, коли передавання кольору має важливе значення.

- 16 біт – кольорове зображення із середньою глибиною кольору, забезпечує прийнятну якість (крім обробки фотореалістичних зображень) передавання колірних тонів. Займає значний обсяг. Застосування припустиме тільки коли колір несе ключову інформацію.

- 24/32 біт – кольорове зображення з великою глибиною кольору, забезпечується передавання тонів на рівні чутливості людського ока. Займає великий обсяг, застосовується для зображень фотореалістичної якості, недоцільно використовувати для передання текстових оригіналів.

- 48/64 біт – кольорове зображення з дуже великою глибиною кольору, що забезпечує перекриття можливостей людського ока. Займає величезний обсяг, застосовується в поліграфії.

Відповідно, величина файлу, що містить графічний об'єкт, може бути визначена за формулою (4.2).

$$V = a \cdot b \cdot r^2 \cdot c, \quad (4.2.)$$

де V – об'єм файлу (в бітах чи байтах);

a, b – лінійні розміри зображення (одиниці довжини – дюйми, сантиметри);

r – розрізнення (точок на одиницю довжини);

c – глибина кольору (в бітах чи байтах).

Розглянемо приклад комп'ютерного подання фотореалістичного зображення в кольоровій моделі RGB (розглядається в наступному розділі) з глибиною кольору 24 біти/піксель. У цьому випадку оптико-електронний пристрій сформує зображення, що складається з трьох восьми розрядних компонент (червоної, зеленої та синьої) представлених двовимірними матрицями значень у діапазоні від 0 до 255. Приклад такого зображення показано на рис. 2 додатку А. Подання фрагменту даного зображення у вигляді двовимірних матриць елементів колірних компонент показано на рис. 4.2.

ВИСНОВКИ

1. Особливістю зображень є те, що вони займають значний об'єм пам'яті, це викликає необхідність використання методів їх обробки спрямованих на:

- усунення надмірності зображень;
- створення методів приховування інформації в кольорових зображеннях тощо.

– векторний об’єкт повинен перетворюватися в піксельне зображення.

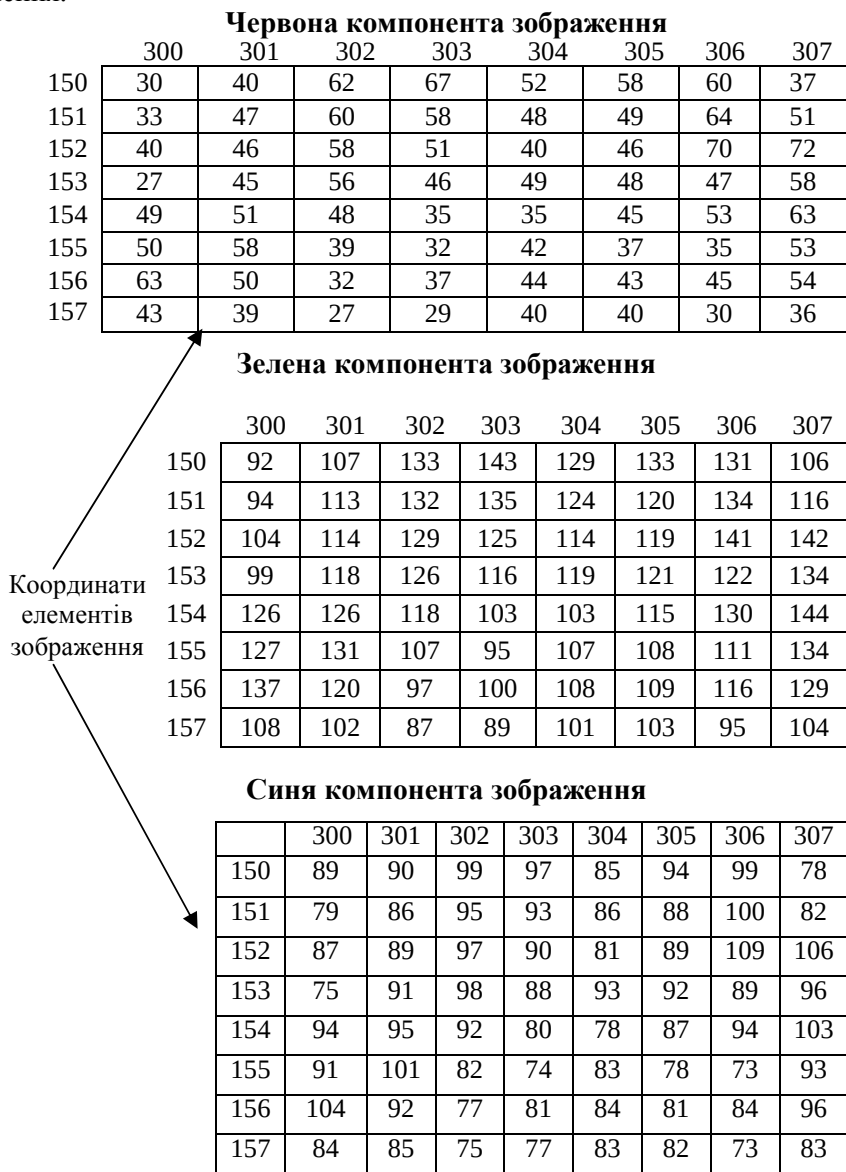


Рис. 4.2. Цифрове подання фрагмента фотореалістичного кольорового зображення

2. Перевагами векторного подання зображень у порівнянні з растровим є:

- легкість масштабування графічних об'єктів;
- менший об'єм файлів;
- зручність виводу зображення на монітор незалежно від його розрізнення.

Недоліками векторних зображень є:

- їх деяка штучність;
 - нездатність відтворити фотореалістичне зображення чи живопис;
 - відтворення складних зображень вимагає багато часу;
- у більшості систем відображення кожен

3. Деякі із недоліків векторних зображень вдається уникнути завдяки можливостям сучасних графічних редакторів.

4. До переваг растрових зображень відносяться: простота відтворення і реалістичність; до недоліків – значний об'єм пам'яті для їх збереження, проблеми з масштабуванням. Оскільки у роботі розглядаються методи цифрової обробки фотореалістичних зображень, то векторна графіка у подальшому розглядатися не буде.

V. КОЛІРНІ МОДЕЛІ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ У ТЕЛЕБАЧЕННІ ТА МЕТОДАХ КОМПАКТНОГО ПОДАННЯ

5.1. Поняття колірних моделей зображень та їх місце в методах цифрової обробки зображень

Початковий об'єм зображень залежить від способу їх подання. Як показано у попередньому розділі, растрові зображення представляються у вигляді двовимірної матриці значень, що задають колір пікселя. Існує безліч способів числового подання кольорів. Система подання кольорів називається *колірною моделлю* або *колірним простором* [11, 24, 40].

Колірна модель зазвичай створюється так, щоб використовувати переваги пристроїв відображення інформації. Наприклад, комп'ютерні зображення відтворюються на спеціальних пристроях: моніторах, принтерах, проекторах. Більшість цих пристроїв є матричними, тобто все поле виводу ділиться на множину точок. На моніторах часто використовується розрізнення 1 024x768. Це означає, що для виводу застосовується матриця, що має 1 024 точки по горизонталі і 768 точок по вертикалі (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Зображення монітора з розрізненням 1 024x768 точок

Особливістю сприйняття людським оком і мозком кольорів є те, що видимий спектр розділяється на червону, синю і зелену складові. Тому зображення, що виводиться на дисплей, формується з червоних, зелених і синіх елементів з різним рівнем свічення, що дозволяє обійтися без додаткового перекодування при видачі цифрового подання зображення на відображення. Даний спосіб подання зображень характерний для колірної моделі RGB (red, green, blue – червоний, зелений, синій).

Значення пікселів у моделі RGB представляються 24-бітовими цілими додатними числами по 8 біт на кожен колірну компоненту. Цілочислові значення компонент можуть знаходитися в діапазоні від 0 до $2^n - 1$, де n – точність дискретизації (у даному випадку $n = 8$).

У більшості випадків колірна модель RGB не дуже ефективна для подання фотореалістичних зображень. Усі три RGB компоненти пови-

нні мати рівну смугу пропускання для генерації будь-якого кольору. У результаті цього зображення займає не тільки значний об'єм, але і вимагає порівняно великих обчислювальних ресурсів для роботи з ним. Наприклад, для зміни інтенсивності кольору даного пікселя з буфера повинні бути прийняті всі три значення компонент RGB моделі. Після їх обчислення нові розраховані значення записуються назад у буфер пам'яті. Збільшення швидкості обробки зображень досягається при застосуванні інших кольорних просторів, що складаються з компонент, які відповідають інтенсивності й кольоровості пікселя.

Серед безлічі кольорних моделей, таких як HSB, CMYK, CIE XYZ та ін., існують ті, які приводять до зменшення об'єму даних. До них відносяться кольорні простори YUV, YIQ, YCbCr, YDbDr [2]. Деякі з них знаходять застосування в телебаченні: YIQ – у системі NTSC, YUV – у системі PAL, YDbDr в системі SECAM [50, 51]; кольорна модель YCbCr використовується у форматі стиснення JPEG [1, 4, 40]. Дані кольорні моделі можуть бути отримані з RGB простору за допомогою таких пристроїв як камери і сканери.

Загальний вид прямого і зворотного перетворення кольорної моделі RGB в іншу модель виконується так:

– пряме перетворення

$$\begin{pmatrix} X(i, j) \\ Y(i, j) \\ Z(i, j) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} R(i, j) \\ G(i, j) \\ B(i, j) \end{pmatrix},$$

– зворотне перетворення

$$\begin{pmatrix} R'(i, j) \\ G'(i, j) \\ B'(i, j) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11}^{-1} & c_{12}^{-1} & c_{13}^{-1} \\ c_{21}^{-1} & c_{22}^{-1} & c_{23}^{-1} \\ c_{31}^{-1} & c_{32}^{-1} & c_{33}^{-1} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X(i, j) \\ Y(i, j) \\ Z(i, j) \end{pmatrix},$$

де R, G, B – матриці значень кольорних координат точок зображення в кольорній моделі RGB;

X, Y, Z – матриці значень кольорних координат точок зображення у новій кольорній моделі;

C – матриця прямого перетворення;

C^{-1} – матриця зворотного перетворення.

Розглянемо більш детально найрозповсюдженіші кольорні моделі, їх застосування та особливості.

5.2. Аналіз кольірних моделей зображень

Система подання кольорів називається кольірною моделлю, або іншими словами, правило, за яким кожному кольору ставиться у відповідність набір чисел.

Розглянемо наступні кольірні моделі:

- RGB (використовується в кольорових електронно-променевих трубках моніторів і телевізорів);
- CMYK (використовується в поліграфічній промисловості);
- YUV (використовується в каналах телебачення і для стиснення графіки);
- YCbCr (використовується для стиснення графіки у форматі JPEG);
- YDbDr (використовується для стиснення графіки);
- YIQ (використовується в телевізійних передавальних системах, що підтримують північноамериканський стандарт NTSC);
- HSB (використовують комп'ютерні художники і дизайнери).

Корекція кольору в різних кольірних моделях має свої специфічні особливості.

Людське око сприймає кольірну інформацію в діапазоні хвиль приблизно від 380 нм (фіолетовий колір) до 770 нм (червоний колір). Причому найкращу чутливість має в районі 520 нм (зелений колір) (рис. 3. додатку А).

Існують два методи описання кольору: система адитивних і субтрактивних кольорів.

Система адитивних кольорів працює з випроміненим світлом. Систему називають адитивною, тому що зі збільшенням яскравості окремих кольорів результуючий колір також стає яскравішим. У системі використовуються три основних кольори: червоний, зелений і синій (Red, Green, Blue – RGB). При змішуванні їх у різних пропорціях утворюється відповідний колір. Відсутність цих кольорів представляє в системі чорний колір.

У системі субтрактивних кольорів відбувається зворотний процес: який-небудь колір утворюється відніманням інших кольорів із загального променя світла. При цьому білий колір утворюється у результаті відсутності всіх кольорів, а присутність усіх кольорів дає чорний колір. Система субтрактивних кольорів працює з відбитим кольором, наприклад, від аркуша паперу. Основними кольорами є блакитний, пурпурний і жовтий (Cyan, Magenta, Yellow – CMY) – додаткові червоний, зелений і синій. Коли ці кольори змішують на папері в рівній пропорції, утворюється чорний колір.

5.2.1. Колірна модель RGB

Дана модель у найбільшій мірі відповідає будові людського ока. Вона зручна для поверхонь, що світяться (монітори, телевізори, кольорові лампи і т.п.). В основі її лежать три кольори: Red – червоний, Green – зелений і Blue – синій [40].

У моделі RGB (рис. 4. додатку А) кольори утворюються додаванням трьох компонент, що представляють відносні яскравості червоного, зеленого і синього кольорів. Ці компоненти називаються первинними (primary). При попарному змішуванні первинних кольорів утворюються вторинні (secondary) кольори: Cyan (голубий), Magenta (пурпурний) і Yellow (жовтий). Первинні і вторинні кольори відносяться до базових (basic) кольорів, за допомогою яких можна одержати практично весь спектр видимих кольорів.

У комп'ютерній RGB-моделі кожен основний колір може мати 256 градацій яскравості, що відповідає 8-бітовому режиму.

Усі ці поняття відображені в прийнятій як стандарт діаграмі кольорів (рис. 5 додатку А), у якій насиченість кольору зменшується до центра, а яскравість скрізь однакова.

Величини колірних параметрів R, G і B змінюються в межах від 0 до 255. Так, якщо відобразити на моніторі смужку колірного сигналу R255, G0, B255 (інтенсивність червоного – 255, зеленого – 0 і синього – 255), то на будь-якому добре відкаліброваному моніторі теоретично повинна з'явитися така сама смужка (у даному випадку, пурпурного кольору).

Для вказування кольору в RGB моделі використовується двовимірне подання тривимірного колірного простору у виді селектора кольорів (color picker).

До *переваг* цієї моделі можна віднести:

- її «генетичне» споріднення з апаратурою (сканером і монітором);
- широке колірне охоплення (можливість відображати різноманіття кольорів, близьке до можливостей людського зору);
- можливість реалізації багатьох процедур обробки зображення (фільтрів) у програмах растрової графіки;
- невеликий (у порівнянні з моделлю СМΥК) обсяг, займаний зображенням в оперативній пам'яті комп'ютера і на диску.

До *недоліків* цієї моделі можна віднести:

- корельованість колірних каналів (при збільшенні яскравості одного каналу інші зменшують її);
- можливість помилки подання кольорів на екрані монітора відносно до кольорів, які були одержані у результаті ділення кольорів (переведення в модель СМΥК);

– не всі кольори створені у цьому режимі можуть бути виведені при друкуванні.

5.2.2. Колірна модель CMYK

Наступною колірною моделлю є чотирикомпонентна модель CMYK (Cyan, magenta, yellow, black – блакитний, пурпурний, жовтий, чорний), зображена на рис. 6 додатку А [41]. Вона часто використовується в кольоровому друці. Такі засоби відтворення кольору, як друковані видання і картини засновані на поглинанні одних довжин хвиль і відображенні інших.

Модель CMYK є субтрактивною, тобто чим більше накладаються фарби, тим темнішим стає колір. При повній відсутності фарби (нульові значення складових) утворюється білий колір (білий папір). Змішання рівних значень трьох компонентів дасть відтінок сірого.

Блакитний, пурпурний і жовтий кольори служать доповненням для червоного, синього і зеленого. Чисто блакитна поверхня поглинає все червоне світло, спрямоване на неї. Якщо комбінувати жовту і пурпурну фарби, вони поглинають зелене і синє світло, що приводить до утворення червоного кольору. При комбінуванні блакитної, пурпурної і жовтої фарб поглинається усе світло, що приводить до утворення чорного кольору – принаймні, теоретично.

На практиці, при комбінуванні блакитної, пурпурної і жовтої фарб, на білому аркуші паперу не створюється чистий чорний колір. Тому в друці використовується ще і четвертий барвник – чорний (black), що дає насичений, однорідний чорний колір. Його застосовують для друку тексту й оформлення інших важливих деталей, а також для коректування загального тонального діапазону зображень. Насиченість кольору в моделі CMYK вимірюється у відсотках, так що кожен колір має 100 градацій яскравості.

Між колірною моделлю CMYK і RGB немає взаємно однозначної відповідності. Одному й тому ж значенню в RGB моделі відображається безліч значень системи CMYK.

Перевагами цієї моделі є:

- незалежність каналів (зміна значень у одному каналі не впливає на інші);
- це зручна модель для тріадного друку, оскільки з нею маніпулюють растрові процесори пристроїв виводу інформації.

Недоліками цієї моделі є:

- вузьке колірне охоплення, обумовлене недосконалістю пігментів і відбиваючими властивостями паперу;
- не зовсім точне відображення кольорів CMYK на моніторі;
- багато фільтрів растрових програм у цій моделі не працюють;

– потрібно на 30 % більший обсяг пам'яті порівняно з моделлю RGB.

5.2.3. Колірна модель HSB

HSB – Hue-Saturation-Brightness (відтінок-насиченість-яскравість) – колірна модель, заснована на фізичному сприйнятті колірної інформації людським оком (рис. 7 додатку А). Вказування кольору в цій моделі здійснюється за допомогою трьох каналів [2]. Колірна модель HSB є найбільш простою для розуміння. Крім того, вона однаково застосовується і для адитивних, і для субтрактивних кольорів.

Якщо дві вищеописані моделі (RGB і CMYK) представити у вигляді єдиної моделі, утвориться усічений варіант колірного кола. На колірному колі (рис. 8 додатку А) основні кольори моделей RGB і CMYK знаходяться в такій залежності: кожен колір розташований навпроти кольору який його доповнює (комплементарного); при цьому він знаходиться між кольорами, що його утворили. Щоб підсилити який-небудь колір, потрібно послабити колір, що доповнює його (розташований навпроти нього на колірному колі). Наприклад, щоб змінити загальне колірне рішення у бік блакитних тонів, варто знизити в ньому вміст червоного кольору.

Параметри колірної моделі HSB:

– *Колірний тон* (власне колір). По краю колірного кола розташовуються спектральні кольори, чи колірні тони (Hue). Вони визначаються довжиною світлової хвилі, відбитої від непрозорого об'єкта через прозорий об'єкт. Колірний тон характеризується положенням на колірному колі і визначається величиною кута в діапазоні від 0° до 360° (тон червоного дорівнює 0°, жовтого – 60°, зеленого – 120°, синього – 270°). Ці кольори мають максимальну насиченість і максимальну яскравість.

– *Насиченість* (відсоток додавання до кольору білої фарби) – це параметр кольору, що визначає його чистоту.

Якщо по краю колірного кола розташовуються максимально насичені кольори (100 %), то залишається тільки зменшувати їхню насиченість до мінімуму (0 %).

Зменшення насиченості кольору означає його розмиття. Колір зі зменшенням насиченості освітлюється, стає розмитим. При значенні насиченості 0 % будь-який колір стає білим.

– *Яскравість* (відсоток додавання чорної фарби) – це параметр кольору, що визначає освітленість або затемнення кольору.

Усі кольори розглянутого вище колірного кола мають максимальну яскравість (100 %) і яскравішими вже бути не можуть. Яскравість можна зменшити до мінімуму (0 %). Зменшення яскравості кольору означає його почорніння.

У загальному випадку, будь-який колір утворюється зі спектрального кольору додаванням визначеного відсотка білої і чорної фарб, тобто фактично сірої фарби.

Перевагами цієї моделі є:

1. Задовільно узгоджується зі сприйняттям людини: колірний тон є еквівалентом довжини хвилі світла, насиченість – інтенсивності хвилі, а яскравість – кількості світла.
2. Дана модель є зручною і зрозумілою і має велике колірне охоплення.

Недоліком цієї моделі є необхідність перетворення в модель RGB для відображення на екрані монітора або в модель CMYK для одержання поліграфічного відбитка, а будь-яке перетворення з моделі в модель не відбувається без втрат відтворення кольору.

5.2.4. Колірні моделі HSL, HSV

Моделі HSV, HSL, HSB (рис. 9 додатку А) мають багато спільного. Вони розкладають колір на тон (hue) – переважний основний колір, він змінюється від 0° до 360° [2].

Насиченість (saturation) – чистота кольору, показує у відсотках, наскільки тон (hue) відрізняється від нейтрального сірого. При 0 % насиченості немає, а при 100 % вона максимальна (рис. 10 додатку А).

Компонента яскравості в цих моделях визначається по-різному. У HSV це value/volume, у HSL – lightness, у HSB – brightness.

Розглянемо модель HSL (hue, saturation and lightness – колірний тон, насиченість і освітленість). Компонента яскравості в цій моделі L – lightness, також змінюється від 0 до 100 % (рис. 5.2.).



Рис. 5.2. Зміна яскравості зображенні у моделі HSL

На рис. 5.2 0 % відповідає відсутності світла (чорний колір), а 100 % – повному розмиттю кольору. Модель HSL можна представити в циліндричних координатах. Таким чином, одержуємо еліпсоїд (рис. 11 додатку А).

HSV – Hue, Saturation, Volume (тон, насиченість і яскравість). Зазвичай тривимірний колірний простір HSV подають у вигляді конуса. Початок координат – вершина конуса – чорний колір. Висота, спрямована до основи, – яскравість. Точка перетину висоти з основою –

білий колір. На висоті знаходяться відтінки сірого кольору від чорного (вершина конуса) до білого. На обвідній, що обмежує основу конуса, знаходяться чисті колірні тони: від червоного (0 рад), через зелений ($\frac{2\pi}{3}$ рад), до синього ($\frac{4\pi}{3}$ рад). Радіус конуса – насиченість кольору.

5.2.5. Колірна модель LAB

Перевагою колірної моделі LAB є те, що вона дає доступ як до компонент моделі RGB, так і до кольорової палітри CMYK. Даний режим часто використовують професіонали в області обробки графіки.

Недоліком цієї моделі є досить складне її сприйняття, але якщо її засвоїти, то це дасть *перевагу* при роботі з веб і поліграфією. LAB є компромісом між моделями RGB і CMYK. Наприклад, колірна модель RGB якісно відтворює кольори в діапазоні від синього до зеленого, але гірше від жовтого до помаранчевого відтінків.

Модель LAB використовує три канали, перший відповідає яскравості (Luminosity), два інших – колірні параметри, які позначаються буквами А і В. Канал А містить кольори в діапазоні від темно-зеленого, через сірий, до яскраво-рожевого (рис. 12 додатку А). Канал В містить кольори від світло-блакитного до яскраво-жовтого.

Модель LAB є проміжною стадією при трансформації зображення із RGB в CMYK при використанні пакета Photoshop [52, 53].

5.3. Колірні моделі, що використовуються у форматах компактного подання зображень

5.3.1. Колірна модель YCbCr

Компонента Y представляє яскравість зображення. Компоненти Cb Cg визначають колірність. Значення Cb задає синяву зображення, а значення Cg задає його червоність [27].

На відміну від колірної моделі RGB, де усі компоненти приблизно рівнозначні, колірна модель YCbCr концентрує найбільш важливу інформацію в одній із компонент. Це дозволяє перерозподіляти енергію сигналу-зображення між компонентами, що, в свою чергу, удосконалити методи компактного подання графіки. Більшість енергії сигналу-зображення буде міститися у компоненті Y.

Колірна модель YCbCr схожа на колірні моделі, що використовуються в телевізійних приймачах. Модель забезпечує сумісність кольорових зображень із зображеннями чорно-білих телевізорів. У моделі YCbCr компонента Y власне є напівтоновим представленням кольоро-

вого зображення. Колірна модель YCrCb, прийнята для стандарту компресії зображень JPEG [54, 55].

5.3.2. Колірна модель YUV

У колірній моделі YUV компоненти величини розглядаються як три складові колірного відтінку [51]. Колір задається однією компонентою яскравості Y і двома колірними компонентами U і V. Змінюючи значення компоненти Y, одержують різні відтінки того самого кольору, наприклад, темно-червоного, яскраво-червоного. Нульове значення яскравості, незалежно від значень компонент U і V, буде визначати чорний колір. А для максимального значення складової яскравості одержують білий колір.

Також значення Y може бути використане для перетворення кольорового зображення в зображення з градаціями сірого. Людське око більш чутливе до складової яскравості кольору, ніж до колірної. Отже, за рахунок цього можна удосконалювати компресори графіки, зменшуючи діапазон значень компонент U і V, але зберігаючи всі значення компоненти Y.

Така система часто застосовується в комп'ютерній графіці, наприклад, у форматах JPEG, і в європейському телевізійному стандарті PAL [51].

5.3.3. Модель YIQ

Модель YIQ використовується в телевізійних передавальних системах, що підтримують північноамериканський стандарт NTSC [51]. Кожен колір у ній задається за допомогою устанавлення значень трьох параметрів: Y – інтенсивності (luminance,) і двох колірних компонент I і Q, що дозволяють спільно керувати створенням кольору за допомогою зеленого, синього, жовтого і пурпурного кольорів. Так устанавлення мінімальних значень I і Q (0, 0) приводить до отримання зеленого кольору, а установка їхніх максимальних значень (255; 255) дає пурпурний колір. Кожна з компонентів YIQ моделі може змінюватися в діапазоні від 0 до 255.

У випадку використання монохромного дисплея на екрані буде відображена тільки компонента Y.

Дані колірні моделі забезпечують зменшення смуги пропускання, необхідної для передавання телевізійного сигналу. Зменшення смуги пропускання досягається за рахунок концентрації більшої частини енергії сигналу в компоненті Y, що передається в максимально можливій смузі частот, і обмеженням смуги частот кольорорізнисних I, Q (або U, V, Dr, Db компонент).

5.4. Колірні моделі зображень, що не призводять до втрат інформації

Значення матриць прямого та зворотного перетворення для перерахованих у пункті 5.3 колірних моделей показані в табл. 5.1 [4, 56, 57].

Із аналізу табл. 5.1 слідує, що значення кольорорізницевих компонент у всіх колірних моделях можуть приймати як додатні, так і від'ємні значення (необхідно буде один біт для представлення знака), що викличе збільшення розрядності двійкових слів при описанні компонент. Однак, головний недолік усіх перетворень полягає в тому, що вони нецілочислові. Це викликає похибку при зворотному перетворенні.

Даний суттєвий недолік розглянутих колірних моделей не дозволяє їх застосовувати в графічних архіваторах. Крім того, неможливо використовувати зображення як контейнер у стеганографії, оскільки будь-які втрати інформації тут вже не допустимі. У зв'язку з цим необхідно користуватися методами цілочислового перетворення колірних координат.

Цілочислове перетворення колірної моделі RGB може бути подано наступним чином [58]:

– пряме перетворення

$$Y_z = \left\lfloor \frac{R + 2G + B}{4} \right\rfloor, U_z = R - G, V_z = B - G; \quad (5.1)$$

– зворотне перетворення

$$G = Y_z - \left\lfloor \frac{U_z + V_z}{4} \right\rfloor, R = U_z + G, B = V_z + G, \quad (5.2)$$

де Y_z , U_z , V_z – колірні компоненти цілочислової перетвореної моделі;

– операція знаходження цілої частини числа.

У формулі (5.1) подвійне значення зеленої компоненти зображення обумовлено тим, що зелений колір буде уявлятися найбільш яскравим із трьох, так як люмінесцентна функція ефективності досягає максимуму в зеленій області спектра. Червоний буде уявлятися менш яскравим, а синій буде найбільш темним із трьох. Якщо обчислити яскравість, то зелений коефіцієнт буде найбільшим, червоний буде мати проміжне значення, а синій – найменше із трьох [40, 59].

Для оцінювання впливу зміни колірних моделей на ефективність методів компресії зображень визначалось середнє значення ентропії компонент і пікове співвідношення сигнал/шум у відновлених даних

після перетворення [60, 61]. У цьому дослідженні були задіяні фото-реалістичні зображення з частотою колірного перепаду 0,7–0,999. Для цього було сформовано тестовий пакет із 300 зображень з такими властивостями:

- формат BMP с параметром візуалізації 24 біт/піксель;
- частота кольорового перепаду $C_{пер} > 0,7$.

У пакет увійшли як довільно сформовані зображення, так і фото-реалістичні зображення із тестових пакетів «Waterloo» [62] і «Kodak Images» [63].

Таблиця 5.1

Матриці перетворення колірних компонент

	Матриця прямого перетворення			Матриця зворотного перетворення		
	R	G	B	Y	I	Q
Y	0,299	0,587	0,114	1	0,956	0,621
I	0,596	–0,274	–0,322	1	–0,272	–0,647
Q	0,211	–0,523	0,312	1	–1,106	1,703
	R	G	B	Y	U	V
Y	0,299	0,587	0,114	1	–0,048	1,138
U	–0,147	–0,289	0,437	1	–0,37	–0,579
V	0,615	–0,518	–0,08	1	2,028	0
	R	G	B	Y	Db	Dr
Y	0,299	0,587	0,114	1	0	0,526
Db	1,332	–1,115	–0,217	1	–0,1295	–0,2681
Dr	–0,449	–0,881	1,329	1	0,667	0
	R	G	B	Y	Cb	Cr
Y	0,299	0,587	0,114	1	0	1,402
Cb	–0,1687	–0,3313	0,5	1	–0,34414	–0,71414
Cr	0,5	–0,4187	–0,0813	1	1,722	0

Середня ентропія колірних компонент визначалась для джерела з нерівномірними і взаємозалежними відліками, аналітичний вираз описано у підпункті 2.1.

Значення середньої ентропії показані в табл. 5.2.

Пікове співвідношення сигнал/шум у відновлених зображеннях (PSNR) обчислювалось за формулою (2.8).

Розрахункові значення PSNR для всіх колірних моделей відображені у табл. 5.2.

Результат обчислення ентропії колірних компонент моделей дозволяє зробити висновок про те, що їх значення менше у порівнянні з ентропією компонент моделі RGB. Так, для колірних компонент моделі RGB і компоненти Y просторів YIQ, YUV, YDbDr і YCbCr вона складає 6,5, для двох інших компонент ентропія складає 2,7–5,3 біт/відлік.

Таблиця 5.2

Значення середньої ентропії колірних компонент зображень і пікового співвідношення сигнал/шум у відновлених зображеннях

Колірна модель	Ентропія колірних компонент, біт/відлік	Пікове співвідношення сигнал/шум у відновлених зображеннях, дБ
RGB	6,524/6,32/6,177	—
YIQ	6,419/4,032/2,689	45,75
YCrCb	6,419/3,844/3,728	45,98
YDrDb	6,419/5,174/5,289	46,5
YUV	6,419/3,631/4,063	43,25
YzUzVz	6,37/4,767/4,692	$+\infty$
Y'zU'zV'z	6,349/4,767/4,692	$+\infty$

Подальші дослідження колірних моделей були спрямовані на зменшення значення середньої ентропії яскравісної (Y) компоненти зображень [64]. Для цього було проведено ще одне подвоєння значень зеленої компоненти зображення. При заміні виразів (5.1) і (5.2) на (5.3) і (5.4) ентропія Y компоненти зменшується на 3 % (див. табл. 5.2).

Пряме перетворення у модифікованому вигляді запишеться:

$$Yz' = \left\lfloor \frac{R+2G+B}{6} \right\rfloor, \quad Uz' = Uz = R - G, \quad Vz' = Vz = B - G; \quad (5.3)$$

зворотне перетворення у модифікованому вигляді:

$$G = Yz' - \left\lfloor \frac{Uz' + Vz'}{6} \right\rfloor, \quad R = Uz' + G, \quad B = Vz' + G', \quad (5.4)$$

Після заміни колірної моделі початкове зображення розміром $n \times m$ елементів представляє собою наступну структуру (рис. 5.3):

Рис. 5.3. Структура зображення до і після перетворення колірної моделі

У результаті перетворення колірної моделі RGB у $Yz/Uz/Vz'$ для вказування значень елементів матриць кольорорізнисних компонент Uz' і Vz' необхідно 9 біт. Додатковий біт точності не дозволяє застосувати до них цілочислове декорелююче перетворення. Тому було запропоновано [64] відділити знакову площину матриць Uz' і Vz' з наступним записом бітового потоку в байти, як показано на рис. 5.4.

Дана процедура представлена виразом:

$$V_{BZH} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } Vz'(i) < 0, i=0, \dots, N; \\ 0, & \text{у пр} \\ & \text{отилежному випадку} \end{cases} \quad (5.5.)$$

де V_{BZH} – потік біт знакової площини компоненти Uz' (Vz'), N – кількість елементів матриці Uz' (Vz').

Далі проводиться запис двійкового потоку V_{BZH} в байтовий, що позначається як V_{ZH} . Якщо V_{BZH} буде не кратним 8, то останній байт V_{ZH} $[N/8+1]$ масиву V_{ZH} буде неповним. Тому кодеру потрібно прийняти останні біти

$$V_{ZH} [N/8+1] << 8 - r, \quad (5.6)$$

де r – кількість біт останнього неповного байту, $<<$ – операція зсуву вліво. Відповідно до виразу (5.6) останній байт буде складатися із r старших розрядів і $(8-r)$ нулів.

Діапазон допустимих значень знакового потоку лежить в інтервалі $[0; 255]$. Сформований потік байт $V_{БЗН}$ подається на арифметичний кодер з параметром $Q = 256$ (Q – потужність оброблюваного алфавіту) [65].

Програмна реалізація цілочислового методу перетворення кольірних координат та процедура формування одновимірного блоку знаків кольорорізнисних компонент Uz' і Vz' відображені у додатку Б.

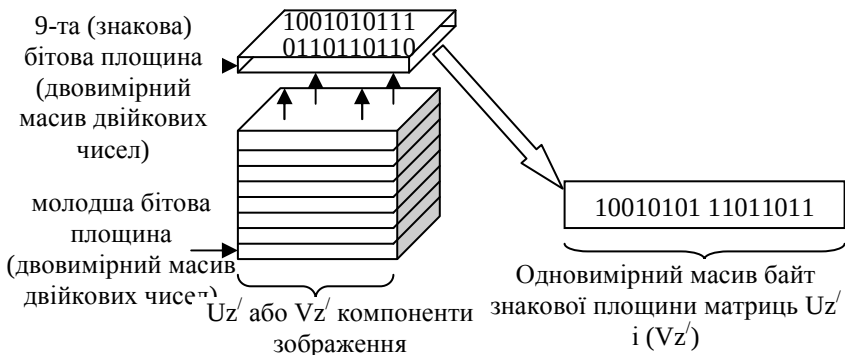


Рис. 5.4. Схема відділення знакової площини в кольорорізнисних компонентах зображення

Модель $YzUzVz$ [58] розроблена для використання в архіваторах графіки (наприклад, у форматі JPEG-2000) замість $YCbCr$. Удосконалена кольорова модель $Y'zU'zV'z$ разом із попередньою є досить грубим наближенням нецілочислової моделі, що недостатньо враховує всі статистичні властивості кольірних компонент для їх подальшого кодування [61, 66]. Постає проблема подальшого вдосконалення даного алгоритму, що і було виконано у [68].

Дана модель, що названа *адаптивною*, базується на знаходженні значень кольірної компоненти, що має найменше значення енергії, і використанні її як основної. Обчислення основної компоненти здійснюється за допомогою порівняння значень енергій, тобто суми квадратів значень кольірної компоненти всіх пікселів зображення. Енергія кожної компоненти конкретного зображення знаходиться за формулою (5.7).

$$E_K = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m K_{i,j}^2, \quad (5.7)$$

де E_K – абсолютна енергія кольірної компоненти;

$K_{i,j}$ – значення пікселя з координатами i, j ;

n – кількість пікселів по горизонталі;

m – кількість пікселів по вертикалі.

Однак для визначення співвідношення енергій кольірних компонент вираз (5.7) можна спростити, відмовившись від знаходження квадрата величини $K_{i,j}$. Тому енергія E_K замінюється сумою значень кольірної компоненти S_K

$$S_K = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m K_{i,j} \quad (5.8)$$

Аналіз зображень при застосуванні такого перетворення показав, що 91,3 % з них мають найменше значення S_K для червоної та синьої компоненти моделі RGB. Це підтверджує попередні висновки про особливості прийняття зеленого кольору системою людського зору.

Дослідження показали, що одна з компонент зображення має значно меншу величину S_K відносно до інших. На основі цього було сформовано припущення, що в більшості випадків значення S_K вказує на найменше значення ентропії компоненти. Знайдений принцип і став основою для створення адаптивної моделі.

Тому замість обчислення компоненти Y за формулами (5.2) або (5.3) було запропоновано присвоїти їй значення компоненти з найменшою сумою S_K . Компоненти Uz і Vz обчислювались аналогічно моделям $YzUzVz$ і $Y'zU'zV'z$.

Загальний вираз для перетворення кольірної моделі RGB в адаптивну має вигляд:

$$Yz = S_K, \quad Uz = R - G, \quad Vz = B - G; \quad (5.9)$$

Оскільки зелена компонента не використовується як основна, то в адаптивній моделі порівнюються лише червона та синя складові. На основі цього формули оберненого перетворення матимуть вигляд:

$$R = S_K, \quad G = S_K - Uz, \quad B = Vz - G \quad (5.10)$$

для зображення з найменшою ентропією червоного кольору;

$$B = S_K, \quad G = S_K - Vz, \quad R = Uz - G \quad R = Uz + G \quad (5.11)$$

для зображення з найменшою ентропією синього кольору.

Оцінювання адаптивної моделі проводилося так само як і всіх попередніх моделей, тобто обчислювалось значення ентропії кольірних компонент за формулою (2.1). Для тестового пакета фотореалістичних зображень з частотою кольірного перепаду 0,7–0,999 вона становить приблизно на 5,8 % менше ніж для моделі $Y'zU'zV'z$.

Переваги та недоліки основних кольірних моделей показані у табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Переваги та недоліки кольірних моделей зображень

№ п/п	Колірні моделі	Переваги	Недоліки	Де використовується
1.	RGB	– її «генетичне» споріднення з апаратурою (сканером і монітором); – широке кольірне охоплення; – можливість реалізації багатьох процедур обробки зображення (фільтрів) у програмах растрової графіки; – невеликий (у порівнянні з моделлю СМУК) обсяг, що займає зображення в оперативній пам'яті комп'ютера і на диску	– корельованість кольірних каналів (при збільшенні яскравості одного каналу інші зменшують її); – можливість помилки подання кольорів на екрані монітора по відношенню до кольорів, які були одержанні у результаті ділення кольорів (переведення в модель СМУК).	у телевізійних передавальних системах, що підтримують північноамериканський стандарт NTSC
2.	YIQ	– забезпечують найменше значення ентропії компонент сигналу і вносять найменші перекручування у мультимедіа; – дозволяють зменшити об'єми цифрового описання зображень	потребують додатковий біт для вказування знака елемента матриці	у телевізійних передавальних системах, що підтримують північноамериканський стандарт NTSC

Продовження таблиці 5.3.

№ п/п	Колірні моделі	Переваги	Недоліки	Де використовується
3.	YUV	дозволяють зменшити об'єми цифрового описання зображень	потребують додатковий біт для вказування знака елементу матриці	у комп'ютерній графіці, наприклад, у форматі JPEG, і в телевізійному стандарті PAL
4.	YCbCr	– забезпечують найменше значення ентропії компонент сигналу і вносять найменші перекручування у зображення; – дозволяють зменшити об'єми цифрового описання зображень	потребують додатковий біт для вказування знака елементу матриці	прийнята для стандарту компресії зображень JPEG
5.	$Y_zV_zV_z, Y'_zU'_zV'_z$	не приводить до втрат інформації	менше, ніж інші моделі, зменшує ентропію	при розробці архіваторів графіки, у стеганографії
6.	Адаптивна	не приводить до втрат інформації	має менше значення ентропії на 5,8 %, ніж модель $Y'_zU'_zV'_z$	при розробці архіваторів графіки, у стеганографії

ВИСНОВКИ

1. На практиці одержали поширення колірні моделі, що забезпечують вирішення наступних задач:

- забезпечення інтуїтивного вибору кольорів комп'ютерними дизайнерами і художниками – колірна модель HSB (hue, saturation, brightness – тон, насиченість, яскравість) і її різновиди HSV, HSL;
- установлення кольорів під час виготовлення друкованої продукції з комп'ютерних оригіналів – колірна модель CMYK.
- стиснення кольорових зображень – колірні моделі YIQ, YUV, YDrDb, YCbCr.

2. При розробці графічних архіваторів та у стеганографії доцільно застосовувати цілочислові способи перетворення колірних просторів, наприклад, користуватися моделями $Y_zV_zV_z$ та $Y'_zU'_zV'_z$.

VI. ДЕКОРЕЛЯЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЗОБРАЖЕННЯ – СУЧАСНІ ПІДХОДИ, ПРИКЛАДИ ТА ПРОГРАМНІ РЕАЛІЗАЦІЇ

6.1. Аналіз основних видів перетворень компонент зображень

6.1.1. Аналіз основних базисних функцій перетворення Фур'є

Математичні перетворення застосовуються до сигналу для того, щоб одержати про нього якусь додаткову інформацію, недоступну в початковому вигляді. Далі сигнал в часовій області називатиметься «початковим», а перетворений сигнал – трансформантою. Серед багатьох відомих перетворень сигналів найпопулярнішим є перетворення Фур'є (ПФ) [68]. Більшість сигналів, що зустрічаються на практиці, представлена у часовій області, тобто сигнал є функцією часу. Таким чином, при відображенні сигналу на графіку однією з координат (незалежної) є вісь часу, а іншою координатою (залежної) – вісь амплітуд. Таким чином ми одержуємо амплітудно-часове представлення сигналу:

$$C(w) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \cdot e^{-i\omega t} dt. \quad (6.1)$$

Класичним методом частотного аналізу сигналів є ПФ, суть якого можна виразити формулою (6.1).

Результат ПФ – амплітудно-частотний спектр, за яким можна визначити присутність деякої частоти в досліджуваному сигналі.

У разі, коли не порушується питання про локалізацію часового положення частот, метод Фур'є дає добрі результати. Але за необхідності визначити часовий інтервал присутності частоти доводиться застосовувати інші методи.

Одним із таких методів є узагальнений метод Фур'є (локальне ПФ). Цей метод складається з наступних етапів:

1. У досліджуваній функції створюється «вікно» – часовий інтервал, для якого функція $f(x) \neq 0$, і $f(x) = 0$ для решти значень.
2. Для цього «вікна» обчислюється ПФ.
3. «Вікно» переміщується, і для нього також обчислюється ПФ.

«Пройшовши» таким «вікном» уздовж всього сигналу, утворюється деяка тривимірна функція, залежна від положення «вікна» і частоти.

Даний підхід дозволяє визначити факт присутності в сигналі будь-якої частоти, та інтервал її присутності. Це значно розширює можливість методу в порівнянні з класичним перетворенням Фур'є, але існують і певні недоліки. Згідно з наслідками принципу невизначеності Гейзенберга в даному випадку не можна стверджувати про факт наявності частоти ω_0 в сигналі у момент часу t_0 – можна лише визначити, що спектр частот (ω_1, ω_2) присутній в інтервалі (t_1, t_2) .

Причому розрізнення за частотою (за часом) залишається постійним незалежно від області частот (часу), в яких здійснюється дослідження. Тому, якщо, наприклад, у сигналі істотна тільки високочастотна складова, то збільшити розрізнення можна тільки змінивши параметри методу. В результаті ПФ сигналу, заданого в часовій області, одержують його спектральне уявлення. Замість значень часу на осі абсцис графіка сигналу будуть тепер відкладені значення частоти, а вісь ординат відображатиме амплітуду тієї чи іншої частоти в сигналі [69].

При обробці сигналу для вирішення поставленого завдання важливим є знаходження такого його уявлення, яке було б в деякому розумінні оптимальним. Бажаним було б таке представлення сигналу, яке б відображало всі його властивості. Отримати таке подання можна шляхом декомпозиції початкового сигналу на елементарні будівельні блоки X_i :

$$X = \sum_i X_i , \quad (6.2)$$

де X_i є простими функціями. Більш того, бажано, щоб ці функції мали деяку фізичну інтерпретацію. Наприклад, у зображенні блоки можуть відповідати текстурі і лініям. Декомпозиція сигналу повинна здійснюватися за допомогою швидкого алгоритму, інакше вона матиме лише теоретичний інтерес. При декомпозиції повинно вирішуватися завдання апроксимації, тобто результат розкладання повинен бути якомога ближче до початкового сигналу при використанні можливо меншого числа блоків.

Концепція аналізу з різним розрізненням, що розглядається далі, дозволяє зробити це таким чином: здійснюється наближення до початкового сигналу, послідовно додаючи деталі до деякої грубої апроксимації.

Один з класичних засобів подібного розкладання сигналу є ПФ як безперервного, так і дискретного часу. Розроблені численні алгоритми швидкого ПФ. Хоча вони різні, в них використовується один і той же математичний апарат [70].

Якщо є одночастотний сигнал, методи, засновані на ПФ, виділятимуть пік на частоті ω . Проте, якщо вже сигнал складається з двох синусоїд на різних часових інтервалах, отримаємо два піки без локалізації в часі. Звідси витікає потреба в частотно-часовому поданні сигналу, яке б забезпечувало локальну інформацію про сигнал як в частотній, так і в часовій області. Очевидно, що потрібні більш локалізовані функції, ніж синусоїди.

Тому вводяться так звані вікна, так що будівельні блоки тепер: $\omega(t) \sin(t)$, де $\omega(t)$ – функція вікна, що забезпечує локалізацію в

часі. Таке перетворення називається віконним перетворенням Фур'є, або Фур'є-перетворенням на короткому інтервалі (STFT).

Будівельні блоки, що утворились, розбивають частотно-часову площину певним чином. При цьому неможливо досягти довільно доброї локалізації і за частотою, і за часом через принцип невизначеності Гейзенберга. Розрізнення за частотою і за часом обмежуються нерівністю: $\Delta t \Delta f \leq \frac{1}{4\pi}$. На рис. 6.1 а представлено розбиття частотно-часового плану при STFT.

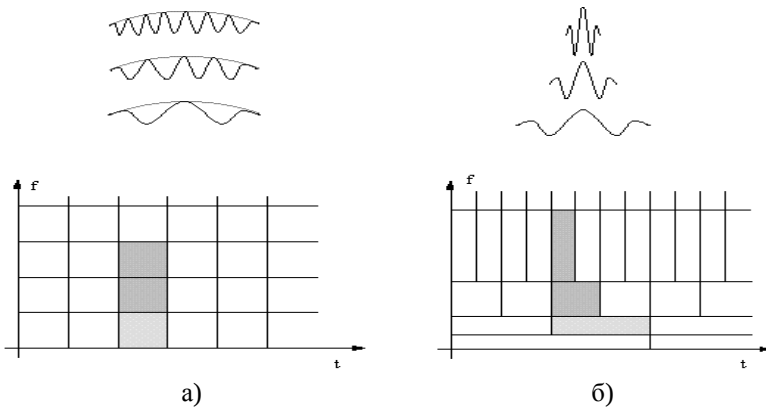


Рис. 6.1. Приклади частотно-часового розбиття сигналів:
а) при STFT; б) при вейвлет-декомпозиції

При даному уявленні виявляються зафіксованими ступінь локалізації за частотою і за часом.

Нехай $L_2(0, 2\pi)$ – простір функцій $f(x)$, визначених при $x \in (0, 2\pi)$ і що квадратично інтегруються таким чином, що

$$\int_0^{2\pi} |f(x)|^2 dx < \infty. \quad (6.3)$$

Це визначення кусково-безперервної функції $f(x)$. Вона може бути періодично розширена і визначена на всій осі $R(-\infty, \infty)$, отже,

$$f(x) = f(x - 2\pi), \text{ для всіх } x \in R. \quad (6.4)$$

Будь-яка $f(x)$ з простору 2π -періодичних функцій L_2 , що квадратично інтегруються $(0, 2\pi)$ може бути представлена у вигляді ряду Фур'є з постійними коефіцієнтами

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jnx} \quad (6.5)$$

де

$$C_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_n e^{jnx} dx. \quad (6.6)$$

Ряд (6.5) рівномірно сходиться до $f(x)$, тобто

$$\lim_{M, N \rightarrow \infty} \int_0^{2\pi} \left| f(x) - \sum_M^N C_n e^{jnx} \right| dx = 0. \quad (6.7)$$

Необхідно відзначити, що

$$W_n(x) = e^{jnx}, n = \dots, -1, 0, 1, \quad (6.8)$$

є ортонормований базис простору $L_2(0, 2\pi)$. Він побудований масштабною зміною єдиної функції $W(x) = e^{jx}$ таким чином, що $W_n(x) = W(nx)$. Це так зване інтегральне розширення.

Таким чином, кожна 2π -періодична функція може бути одержана суперпозицією інтегральних розширень базисної функції $W(x) = e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$, тобто є композицією синусоїдальних хвиль з різними частотами.

Оскільки базис (6.8) ортонормований, для коефіцієнтів ряду Фур'є існує рівність Парсеваля.

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |f(x)|^2 dx = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |C_n|^2. \quad (6.9)$$

Інтегральне ПФ і ряди Фур'є є основою гармонічного аналізу і на практиці, і в теорії. Одержувані в результаті перетворення коефіцієнти Фур'є піддаються досить простій фізичній інтерпретації, причому простота у жодному випадку не поменшує важливості подальших висновків про характер досліджуваного сигналу. У обчислювальному і теоретичному аспектах застосування інтегрального перетворення і рядів Фур'є також дуже наочне, оскільки всі необхідні властивості і формули виписуються за допомогою всього двох функцій $\sin(x)$, $\cos(x)$ (або однієї комплексної синусоїдальної хвилі $\sin(x) + i \cos(x)$) і достатньо легко доводяться [69].

6.1.2. Обґрунтування переваг вейвлет-перетворень при декореляції відліків компонент графічних зображень

Вейвлет-аналіз є особливим типом лінійного перетворення функцій з деякого досить широкого класу. Базис власних функцій, по якому проводиться розкладання, володіє багатьма спеціальними властивостями. Правильне застосування цих властивостей дозволяє досліднику сконцентрувати увагу на тих або інших особливостях аналізованого сигналу, які не можуть бути виявлені за допомогою традиційно вживаних перетворень Фур'є і Лапласа.

Впродовж багатьох десятиліть основним засобом аналізу реальних фізичних процесів, зокрема випадкових, був гармонічний аналіз. Математичною основою гармонічного аналізу є ПФ (ряди Фур'є для кінцевих відрізків часу та інтеграли Фур'є для процесів, не обмежених за часом). Гармонічний Фур'є-аналіз дозволяє наочно виявити швидкі і повільні зміни в досліджуваному процесі і дослідити їх окремо. Усі необхідні властивості і формули виражаються за допомогою однієї базисної функції $e^{i\omega t}$ або двох дійсних функцій $\sin(\omega t)$ і $\cos(\omega t)$. Таким чином, ПФ розкладає довільний процес на елементарні гармонічні коливання з різними частотами. Гармонічні коливання мають щонайширше розповсюдження в природі (коливання маятників, струн та ін.). Тому значення ПФ інтуїтивно зрозуміле незалежно від строгих математичних доказів.

ПФ володіє рядом особливих властивостей, що спрощують його практичне застосування. Воно є ортогональним оператором, тобто оператор зворотного перетворення співпадає з виразом для комплексно зв'язаного оператора. Областю визначення ПФ є простір L_2 функцій, що квадратично-інтегровані. Це вельми широкий клас функцій, і багато реальних фізичних процесів, спостережуваних в природі, можна вважати функціями часу, що належать цьому класу. Власними функціями ПФ є добре вивчені поліноми Ерміта [71]. Розроблені ефективні обчислювальні процедури типу алгоритму швидкого ПФ, що забезпечують знаходження Фур'є-образу функцій з мінімальними втратами. Ці процедури до теперішнього часу включені у всі пакети прикладних програм і реалізовані апаратно в різних процесорах обробки сигналів.

Інші перетворення функцій, зокрема операційне числення, застосовуються, в основному, в теоретичних дослідженнях сигналів. Застосування їх для аналізу реальних процесів обмежене різними обставинами, зокрема необхідністю контурної інтеграції в комплексній площині [72].

Вейвлет-перетворення (ВП) має багато загального з ПФ. У той же час між ними ряд істотних відмінностей. Розгляд властивостей ВП і

ПФ вестимемо паралельно, за необхідності звертаючись до аналогій між ними.

Необхідно нагадати деякі математичні визначення. У просторі функцій однієї змінної, визначених на кінцевому проміжку $(0, 2\pi)$ введемо норму у вигляді скалярного добутку

$$\|f(t)\|^2 = (f(t), f(t)) = \int_0^{2\pi} f^*(t)f(t)dt. \quad (6.10)$$

Функції, для яких такий інтеграл сходиться і має кінцеве значення, належать простору $L_2(0, 2\pi)$. Зокрема, всі кусково-безперервні на проміжку $(0, 2\pi)$ функції належать цьому простору. Будь-яка функція $f(t)$ з цього простору може бути представлена у вигляді ряду Фур'є:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} c_n e^{int}. \quad (6.11)$$

Коефіцієнти c_n у цьому розкладанні виражаються у вигляді інтегралів

$$c_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) e^{-int} dt. \quad (6.12)$$

Ряд Фур'є рівномірно сходиться до $f(t)$ за нормою, визначеною в (6.10):

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left\| f(t) - \sum_{n=-N}^N c_n e^{int} \right\| = 0. \quad (6.13)$$

Відзначимо, що є ортонормованим базисом простору $L_2(0, 2\pi)$, побудованого з єдиної функції $\omega(t) = e^{it}$ $w(t) = \exp(it)$ за допомогою масштабного перетворення незалежної змінної (часу), так що $\omega_n(t) = \omega(nt)$.

Слід нагадати також, що для коефіцієнтів ряду Фур'є справедлива рівність Парсеваля

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |f(t)|^2 dt = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |c_n|^2. \quad (6.14)$$

Аналогічно визначається функціональний простір $L_2(R)$ на всій числовій прямій. До нього належать функції, визначені на всій числовій осі $R(+\infty, -\infty)$ і які володіють кінцевою енергією (нормою).

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt < \infty. \quad (6.15)$$

Проте властивості функцій з просторів $L_2(0, 2\pi)$ і $L_2(R)$ істотно різні. Зокрема, нескінченні синусоїдальні хвилі не належать простору $L_2(R)$ і, отже, сімейство синусоїд не є базисом у цьому просторі. Спроба сконструювати базис простору $L_2(R)$ з функцій, що належать цьому ж простору, привела до створення теорії ВП.

Розглянемо прості евристичні міркування. Функції, що належать простору $L_2(R)$, повинні прямувати до нуля на нескінченності. Чим швидше ці функції прямують до нуля, тим практично зручніше використовувати їх як базис перетворення при аналізі реальних сигналів. Хай $\phi(t)$ – така функція. Назвемо її базисною функцією. Поки вважатимемо, що вона рівна нулю за межами деякого кінцевого інтервалу.

Так само, як у разі простору $L_2(0, 2\pi)$, спробуємо сконструювати базис у просторі $L_2(R)$ на основі функції $\phi(t)$ за допомогою масштабних перетворень незалежної змінної. Хай коефіцієнти перетворення пропорційні ступеням двійки $\phi(t) = \phi(2^j t)$. Для того, щоб перекрити за допомогою фінітних функцій всю числову вісь, влаштуємо систему перенесень (зрушень) уздовж осі. Хай вони для простоти будуть цілочисловими, тобто набудуть вигляду

$$\phi(t) = \phi(2^j t + k). \quad (6.16)$$

За допомогою такої системи функцій можна перекрити всю дійсну вісь. Якщо базисна функція $\phi(t) \in L_2(R)$ має одиничну норму, то і всі функції

$$\phi^{jk}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \phi(2^j t + k). \quad (6.17)$$

будуть нормовані на одиницю, тобто

$$\|\phi^{jk}\| = 1. \quad (6.18)$$

Якщо сімейство функцій $\phi^{jk}(t)$ є ортонормованим базисом простору $L_2(R)$, тобто

$$(\phi^{jk}(t)\phi^{lm}(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi^{jk}(t)\phi^{lm}(t)dt = \delta_{jl}\delta_{km}, \quad (6.19)$$

і кожна функція може бути представлена у вигляді ряду (розкладання за базисом)

$$f(t) = \sum_{j, k=-\infty}^{\infty} c_{jk} \phi^{jk}(t), \quad (6.20)$$

який рівномірно сходиться в $L_2(R)$, тобто

$$\lim \left\| f - \sum_{-M}^M \sum_{-N}^N c_{jk} \phi^{jk} \right\| = 0 \quad (6.21)$$

тоді базисна функція перетворення $\phi(t)$ називається ортогональним вейвлетом. Ортогональність системи функцій $\phi^{jk}(t)$ може бути перевірена безпосередньо. Докази повноти і замкнутості базису для кожної конкретної системи повинні проводитися окремо. Як правило, вони вельми складні і громіздкі. Посилання на них можна знайти в оглядах [9, 10]. Для практичного застосування, проте, досить приблизного дотримання всіх цих властивостей. Як правило, на практиці використовуються саме такі системи функцій. Надалі називатимемо їх вейвлетами. Дослівний переклад цього слова означає «маленька хвиля». Значення такої назви стане зрозумілим далі [9].

Простим прикладом ортогональної системи функцій такого типу є перетворення Хаара. Базисна функція цього перетворення визначається співвідношенням

$$\phi^H = \begin{cases} 1, & 0 < t < 1/2 \\ -1, & 1/2 < t < 1 \\ 0, & t < 0, t > 1 \end{cases} \quad (6.22)$$

Легко перевірити, що дві будь-які функції, одержані за допомогою цього базисного вейвлета шляхом масштабних перетворень і перенесень, мають одиничну норму і ортогональні. Виявляється також, що ця система функцій замкнута і повна в просторі $L_2(R)$, тобто є ба-

зисом. Доказ повноти і замкнутості базису перетворення Хаара можна знайти в книзі [73].

Для функцій, заданих на всій числовій осі, ряд Фур'є замінюється інтегралом Фур'є по безперервному спектру частот. Аналогічно визначимо континуальний базис вейвлетів у просторі $L_2(R)$ на основі системи безперервних перетворень масштабу і перенесень:

$$\phi^{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in R, \quad \phi \in L_2(R). \quad (6.23)$$

При цьому параметри перенесення b і масштабного перетворення a приймають довільні значення з безперервного спектра. Формула інтегрального ВП на його основі записується у вигляді:

$$[W_\phi f](a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \phi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \phi^{*ab}(t) dt \quad (6.24)$$

За допомогою цього співвідношення можна формально виразити коефіцієнти дискретного ВП:

$$c_{jk} = [W_\phi f]\left(\frac{1}{2^j}, \frac{k}{2^j}\right). \quad (6.25)$$

Далі для скорочення запису замість виразу $[W_\phi f]$ використовуватимемо позначення $[W(a, b)]$, $W_\phi f$ або просто. $W[f]$

Розглянемо тепер питання про зворотне перетворення, що дозволяє за відомими коефіцієнтами перетворення відновити початкову функцію з простору $L_2(R)$. У разі Фур'є-перетворення маємо справу з ортонормованою системою базисних функцій, і проблем із зворотним перетворенням Фур'є не виникає. У разі ВП ортонормованість базису й існування зворотного перетворення вимагає окремого доказу.

Зворотне перетворення для безперервного ВП (6.23) записується в тому ж вигляді, що і пряме:

$$f(t) = \frac{1}{C_\phi} \iint W(a, b) \phi_{ab}(t) \frac{dadb}{a^2}. \quad (6.26)$$

Коефіцієнт C_ϕ формули (6.26) є константою нормування, аналогічно коефіцієнту $\sqrt{2\pi}$, що нормалізує ПФ:

$$C_\phi = \int_{-\infty}^{\infty} \left| \hat{\phi}(\omega) \right|^2 \frac{d\omega}{|\omega|^2} < \infty, \quad (6.27)$$

де $\hat{\phi}(\omega)$ означає Фур'є-трансформанту базисної функції ВП.

Умова (6.27) для нормалізуючого коефіцієнта c_{jk} накладає обмеження на клас базисних функцій ВП $\phi(t) \in L_2(R)$. Зокрема, для збіжності інтеграла (6.18) до нуля потрібно принаймні, щоб $\hat{\phi}(0) = 0$, тобто

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) dt = 0. \quad (6.28)$$

Для дискретного ВП існування зворотного перетворення визначається за допомогою нерівності Рісса. Хай ϕ^{jk} – базис ВП, визначений за допомогою формули (6.26). Тоді, якщо існують дві додатні дійсні константи $0 < A \leq B < \infty$, для яких нерівність

$$A \|\{c_{jk}\}\|^2 \leq \left\| \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{jk} \phi_{jk} \right\|^2 \leq B \|\{c_{jk}\}\|^2 \quad (6.29)$$

справедлива для будь-якої обмеженої, підсумовуваної з квадратом послідовності $\{c_{jk}\}$:

$$\|\{c_{jk}\}\|^2 = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_{jk}|^2 < \infty, \quad (6.30)$$

така базисна функція ϕ^{jk} називається R-функцією. Для будь-якої такої функції існує базис $\{\phi_{jk}\}$ – двійник базису $\{\phi^{jk}\}$. Для будь-яких двох елементів цих базисів виконується властивість ортогональності

$$(\phi^{jk}, \phi_{lm}) = \delta_{jl} \delta_{km}. \quad (6.31)$$

На основі цього базису будується формула реконструкції:

$$f(t) = \sum_{j,k=-\infty}^{\infty} (f, \phi_{jk}) \phi^{jk}(t). \quad (6.32)$$

Якщо $\phi^{jk}(t)$ – ортонормований базис і $\phi(t)$ – ортогональний вейвлет, тоді базиси $\{\phi_{jk}\}$ і $\{\phi^{jk}\}$ співпадають, і формула (6.32) є точною формулою зворотного перетворення. Якщо $\phi(t)$ – не ортогональний вейвлет, але є R-функцією, тоді базис-двійник також має базисну

функцію, на основі якої він будується за виразом (6.32). У загальному випадку формула реконструкції (6.32) не є вейвлет-рядом у тому значенні, що базис-двійник не може бути побудований по типу (6.28).

Як засіб аналізу фізичних процесів вейвлет-функції мають ряд привабливих властивостей. ПФ, що є одним з основних засобів такого аналізу, не володіє властивістю локалізації в часі. Дельта-функція Дірака є функціоналом, що ставить у відповідність якоїсь функції її значення в даній точці. Таке перетворення абсолютно локалізоване в часі, але при цьому повністю втрачається інформація про частоту процесу. У цій ситуації стикаються з проявом закону типу квантового співвідношення невизначеності, тобто з неможливістю одночасно визначити миттєву частоту процесу і його значення в даний момент часу. Спроба уточнити один з цих параметрів негайно призводить до погіршення знань про інший параметр. Вейвлет-аналіз по суті є сімейством функцій, що реалізують різні варіанти співвідношення невизначеності і надають досліднику можливість гнучкого вибору між ними. Фур'є-аналіз і його модифікації (дискретне косинусне перетворення та ін.) такими властивостями не володіють.

6.1.3. Двовимірні вейвлети та компресія зображень

Для роботи з графікою необхідно обробляти двовимірні масиви даних. Кратно-масштабний аналіз повинен будуватися в просторі функцій двох змінних. Існує декілька способів узагальнити викладені раніше конструкції на функції декількох змінних (говоритиметься лише про функції двох змінних).

Найпростіший і широко поширений шлях – тензорний добуток одномірних кратно-масштабних функцій. Береться двовимірна скейлінг-функція

$$\Phi(t, s) = \varphi(t)\varphi(s),$$

потім замість одного вейвлета виникає три:

$$\psi_{LH}(t, s) = \varphi(t)\psi(s), \quad \psi_{HL}(t, s) = \psi(t)\varphi(s), \quad \psi_{HH}(t, s) = \psi(t)\psi(s),$$

де L означає низьку частоту, H – високу частоту. Простори V_j породжуються зсувами скейлінг-функції на одному і тому ж масштабі:

$$V_j = \{2^j \Phi(2^j t - k, 2^j s - m)\},$$

простори деталей мають вигляд:

$$W_j^{LH} = \{2^j \psi_{LH}(2^j t - k, 2^j s - m)\}, \quad W_j^{HL} = \{2^j \psi_{HL}(2^j t - k, 2^j s - m)\},$$

$$W_j^{HH} = \{2^j \psi_{HH}(2^j t - k, 2^j s - m)\}.$$

Відповідні проекції знаходяться застосуванням фільтрів (у очевидних позначеннях):

$$x \mapsto \{H_t \otimes H_s(x), H_t \otimes G_s(x), G_t \otimes H_s(x), G_t \otimes G_s(x)\},$$

де x – двовимірний сигнал. Класична схема Малла [74] передбачає рекурсивне застосування тієї ж процедури до низькочастотної складової. На рис. 6.2 показані результати двох етапів цього процесу для фотокартки Інґрід Добеші (Ingrid Daubechies) (що внесла видатний внесок у теорію вейвлет-аналізу [9]).

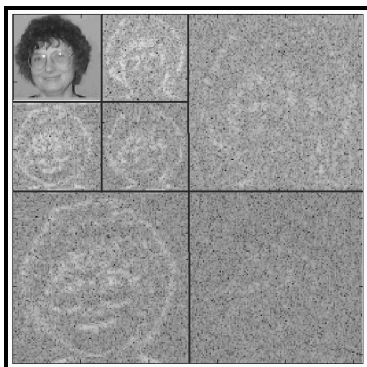


Рис. 6.2. Два рівні двовимірного ВП

Коефіцієнти розташовані за правилом (рис. 6.3):

LL	HL
LH	HH

Рис. 6.3. Двовимірні трансформанти ВП

Наприклад, LH означає, що в цій матриці значень стоїть результат застосування фільтра низьких частот до стовпців, високих частот – до рядків початкової матриці, і проріджування вдвічі по кожному напрямку. На рис. 6.2 яскравішим кольором позначені коефіцієнти більшої амплітуди. Чітко видно, що їх положення вказує на різкі перепади

яскравості. Такі перепади є найбільш інформативними при швидкому перегляді будь-якого зображення. Вейвлет-уявлення дозволяє їх локалізувати шляхом послідовного уточнення, починаючи з крупніших масштабів. Крім того, коефіцієнти проєкції на різні простори деталей відповідають за перепади яскравості різної орієнтації: наприклад, якщо фільтр високих частот застосовувався до рядків, то у відповідному квадранті яскравіше виділені вертикальні перепади. Це добре видно на рис. 6.4.

Найпростіший підхід до стиску зображень за допомогою ВП полягає в наступному:

- Виконати ВП.

- Упорядкувати коефіцієнти.

- Відкинути «хвіст» впорядкованого масиву, енергія якого рівна допустимій (за умовою задачі) величині.

- Запам'ятати збережені коефіцієнти і їх положення в масиві початкових коефіцієнтів.

- При відновленні замінювати відкинуті коефіцієнти нулями.

Ця ідея в тій або іншій формі присутня у всіх методах вейвлетного стиснення. Дану процедуру можна, наприклад, застосовувати роздільно до кожного з квадрантів, отриманих при розкладанні за оптимально вибраними вейвлет-пакетами [75, 76].

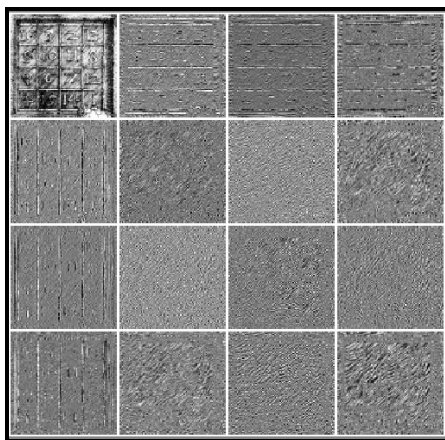


Рис. 6.4. Повне дерево висоти дворівневого розкладання за вейвлет-пакетами

Однак існують і витонченіші методи, де кодування відразу йде на рівні бітів. Один з них є модифікацією методу зануреного нуля-дерева (embedded zero-tree) [12].

Коефіцієнти ВП квантуються і записуються цілими числами.

Будується впорядкована таблиця коефіцієнтів: спочатку йдуть ті, у яких у старшому двійковому розряді 1, потім – ті, у яких в старшому розряді 0, але в наступному – 1, і т.д. У бітовому представленні упорядкування виглядає так:

	s	s	s	s	s	s	s	s	s
	1	1	0	0	0	0	0	0	0
→		1	1	1	1	1	0	0	0
→							1	1	1

Рис. 6.5. Упорядкування вейвлет-коефіцієнтів

У першому рядку стоять знаки коефіцієнтів, у другому – старші біти, і т.д. Ясно, що для відтворення початкового зображення достатньо запам'ятати (передати) лише ті біти, які стоять в клітинках, позначених стрілками, а також довжину стрілок і положення самих коефіцієнтів у початковому двовимірному масиві коефіцієнтів. При передаванні бітів у такому порядку спочатку передається суттєвіша інформація (старші біти найбільших коефіцієнтів), потім менш суттєва, і т.д. Цей процес можна обірвати, дійшовши до тієї частини таблиці, де стоять «маленькі» коефіцієнти.

Проблема в тому, як компактно передати таблицю положень збережених коефіцієнтів. Помітимо, що повністю упорядковувати масив коефіцієнтів (по абсолютній величині) не потрібно, достатньо знайти розбиття на групи, показані в таблиці, тобто на такі групи, що для фіксованого n

$$2^n \leq |c_{ij}| < 2^{n+1}. \quad (6.33)$$

Нехай уся множина коефіцієнтів розбита на деякі підмножини T_m .

Фіксуємо n , і починаємо по черзі переглядати T_m на наявність значущих коефіцієнтів, тобто тих, що задовольняють умову (6.33). Якщо в T_m є значущі коефіцієнти, ця множина розбивається на деякі підмножини, і вони знову перевіряються на значущість і т.д. Добре було б побудувати розбиття так, щоб значущі множини складалися (майже завжди) з єдиного елемента, а незначущі – з багатьох.

Саме тут використовується специфіка вейвлет-аналізу. У розкладаннях такого типу, як на рис. 6.3, масив коефіцієнтів розпадеться на абір піддерев (рис. 6.6):

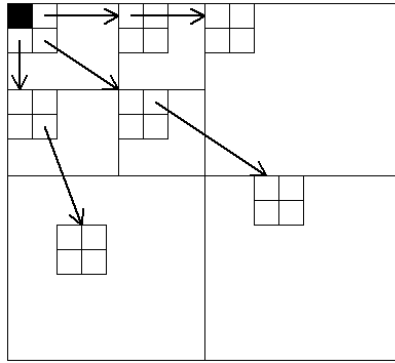


Рис. 6.6. Структура дерев, на які розпадається безліч вейвлет-коефіцієнтів

Верхній лівий квадрант розпадається на четвірки коефіцієнтів. У кожній четвірці три коефіцієнти (окрім зафарбованого чорним) мають «нащадків» – четвірки коефіцієнтів на нижніх рівнях; кожний з коефіцієнтів у цих четвірках має своїх «нащадків» і т.д. Вузлу (i,j) відповідають «нащадки» з координатами $(2i,2j)$, $(2i,2j+1)$, $(2i+1,2j)$, $(2i+1,2j+1)$. Як початкове розбиття береться саме цей набір піддерев. Багато з них дійсно складається лише з неістотних коефіцієнтів, тому що малі значення на верхніх рівнях майже завжди відповідають малим значенням на нижніх рівнях (якщо рухатися за напрямом стрілок на рис. 6.6). Не заглиблюючись у подальші подробиці, відзначимо ще одну особливість цього алгоритму: передається (запам'ятовується) не таблиця положень коефіцієнтів, а й ключові кроки процесу сортування, що значно компактніше (при декодуванні цей процес фактично відтворюється в зворотному порядку). Тому що зазвичай багато піддерев виявляються «нульовими», кроків сортування буде не дуже багато [77].

Розрізняють дискретний і безперервний вейвлет-аналіз, апарат яких можна застосовувати як для безперервних, так і для дискретних сигналів. Сигнал аналізується шляхом розкладання за базисними функціями, одержаними з деякого прототипу шляхом стиснень, розтягувань і зсувів. Функція-прототип називається аналізуючим (материнським) вейвлетом.

Вейвлет-функція повинна відповідати двом умовам:

1. Середнє значення (інтеграл по всій прямій) рівний 0.
2. Функція швидко убуває при $t \rightarrow \infty$.

Зазвичай, функція-вейвлет позначається літерою ψ .

У загальному випадку вейвлет перетворення функції $f(t)$ виглядає так:

$$W(x, s) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} \psi^* \left(\frac{t-x}{s} \right) f(t) dt ,$$

де t – вісь часу, x – момент часу, s – параметр, зворотний частоті, $a(*)$ – означає комплексно зв'язане.

Головним елементом у вейвлет-аналізі є функція-вейвлет. Взагалі вейвлетом є будь-яка функція, що відповідає двом вищезгаданим умовам. Найбільшою популярністю користуються два зображені на рис. 6.6 вейвлети:

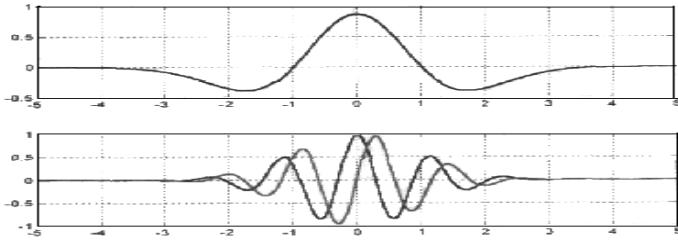


Рис 6.6. Приклади вейвлетів

Зверху зображений вейвлет «сомбреро» (Mexican Hat), названий так завдяки своєму зовнішньому вигляду. На нижній частині рис. 6.6 зображений вейвлет Морле. Графік будь-якого вейвлета виглядає приблизно так, як і вейвлет Морле. Вейвлет Морле – комплекснозначний, на рисунку зображені його дійсна і уявна складові.

Отже, є деяка функція $f(t)$, залежна від часу. Результатом її вейвлет-аналізу буде деяка функція $W(x,s)$, яка залежить вже від двох змінних: від часу і від частоти (обернено пропорційно). Для кожної пари x і s рецепт обчислення ВП наступний:

функція-вейвлет розтягується в s разів по горизонталі і в $1/s$ разів по вертикалі;

– далі він зсувається в точку x . Отриманий вейвлет позначається $\psi(x,s)$;

– проводиться усереднювання в околі точки s за допомогою $\psi(x,s)$.

У результаті можна відобразити частотно-часові характеристики сигналу. По осі абсцис відкладається час, по осі ординат – частота (іноді розмірність осі ординат вибирається так: $\log(1/s)$, де s – частота), а абсолютне значення ВП для конкретної пари x і s визначає колір, яким даний результат буде відображений (чим більшою мірою та або інша частота присутня в сигналі в конкретний момент часу, тим темніше буде відтінок).

Даний рисунок показує результати вейвлет-аналізу для сигналу, що складається з накладених двох синусоїд різної частоти. Частотні ха-

рактики даного сигналу не змінюються в часі (сигнал стаціонарний), що добре видно на верхній частині рис. 6.7.

По рис. 6.8 зручно порівняти результати, які дають ПФ і ВП. Початковий сигнал зображений на рис 6.8 а. Як видно з рис 6.8 в ПФ дає інформацію про той спектр частот, який присутній у сигналі в проміжку часу від 0 до 1 сек, при цьому нам невідомо, коли саме та або інша частота реально присутня в сигналі.

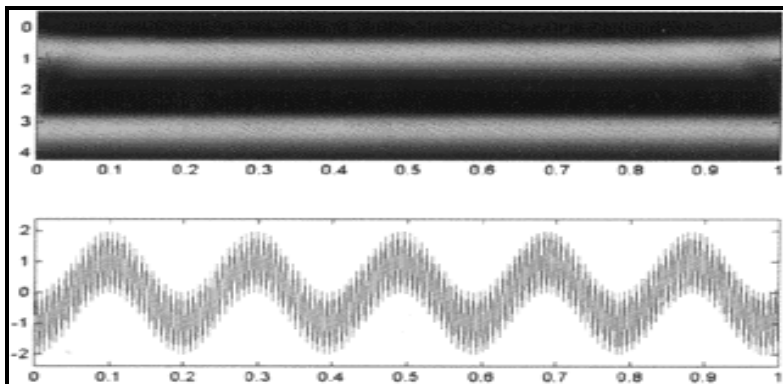


Рис 6.7. Вейвлет перетворення стаціонарного сигналу

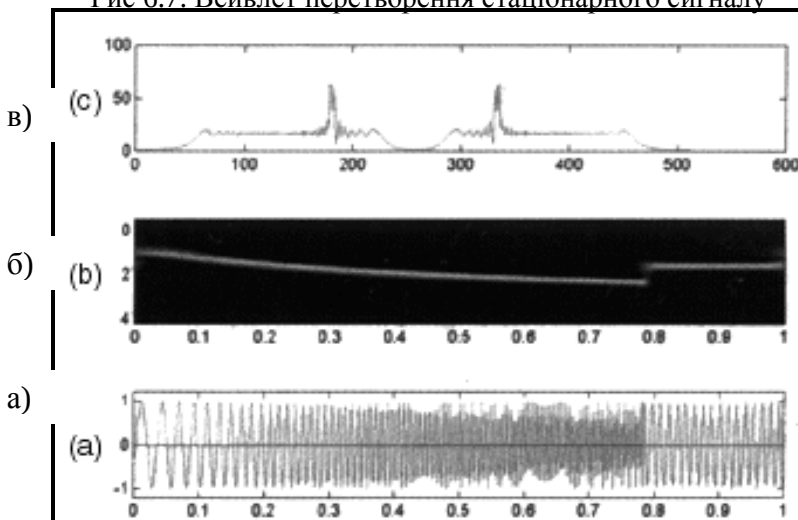


Рис 6.8. Порівняння методів вейвлет- та Фур'є-аналізу сигналу

У той же час ВП (рис. 6.8 б) дає вичерпну картину динаміки зміни частотних характеристик у часі. Все це вказує на те, що ВП істотно більш інформативне, ніж ПФ [12, 25].

6.2. Алгоритми виконання вейвлет-перетворень

6.2.1. Обчислення дискретних вейвлет-перетворень у часовій області

Існує два різні шляхи проведення ВП. Йдеться про розрахунки в часовій і частотній областях. При роботі в часовій області маємо справу з функціями, аргументами яких є часові параметри, а у разі частотної – частотні. У частотній області використовується механізм швидкого ПФ.

Передусім, нам необхідно визначити материнський вейвлет. Припустимо, що обрано деяку функцію, що відповідає необхідним умовам: $\psi_0(\eta)$, де η – безрозмірний період.

Отже, дана часова серія X із значеннями x_n , в моменти часу $n \in [0, N-1]$, де N – кількість вимірів. Кожна величина розділена за часом на постійну величину dt . Отримавши основну формулу для материнського вейвлета, необхідно мати і розміри вейвлета. Для цього будеться так званий «масштабований» вейвлет, який матиме вигляд:

$$\psi\left(\frac{(n' - n)dt}{s}\right) = \left(\frac{dt}{s}\right)^{1/2} \psi_0\left(\frac{(n' - n)dt}{s}\right),$$

де s – параметр, зворотний частоті.

Обчислення ВП є згортою часової серії з функцією-вейвлетом. Основна формула має вигляд:

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \psi^*\left(\frac{(n' - n)dt}{s}\right), \quad (6.34)$$

у даному випадку $(*)$ – означає комплексно зв'язане.

Результатом розрахунку $W_n(s)$ за формулою (6.34) буде комплексне число. Як кінцевий результат береться абсолютне значення одержаного комплексного числа [9].

Загальна блок-схема алгоритму обчислення дискретного ВП (ДВП) у часовій області зображена на рис. 6.9.

6.2.2. Обчислення дискретних вейвлет-перетворень у частотній області

ВП можна провести і в частотній області. Для цього знову, в першу чергу, необхідно визначити материнський вейвлет. Розрахунок за даною схемою відбувається таким чином: ПФ самого вейвлета (у даному випадку розглядатиметься вейвлет Морле) сконцентровано навколо дея-

кої виділеної частоти ω_b . Тому ПФ вейвлета, розтягнутого в s разів, буде сконцентроване навколо частоти ω_b/s (див. рис. 6.10).

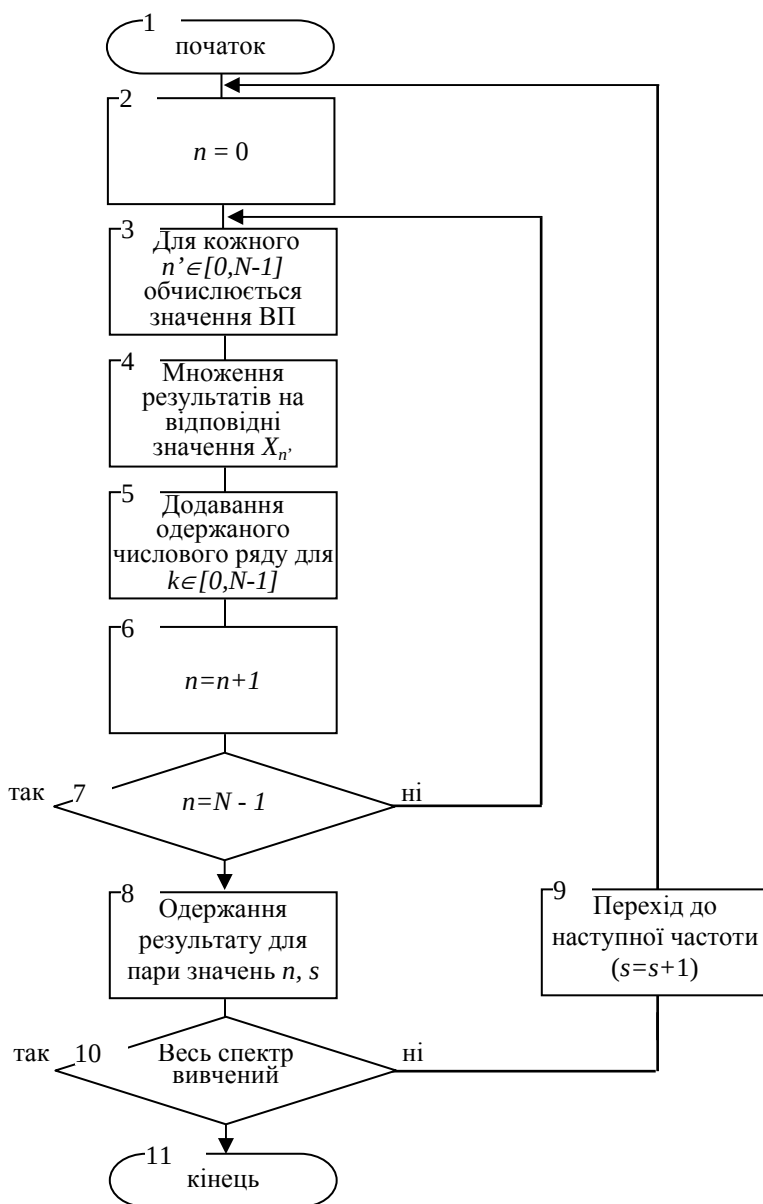


Рис. 6.9. Блок-схема алгоритму виконання ДВП у часовій області

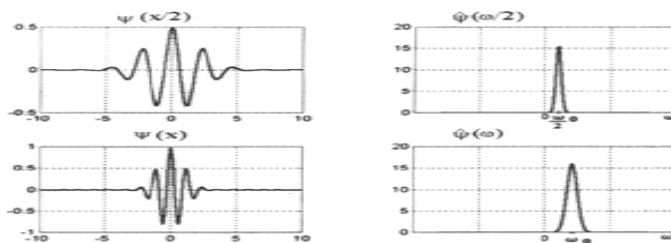


Рис 6.10. ПФ функції вейвлета

Оскільки згортка функцій еквівалентна їх перемножуванню в частотній області, «рядок» $s = \text{const}$ на зображенні ВП показує еволюцію функції, що вивчається, на частотах, близьких ω_0/s . Тобто множення Фур'є-спектра початкової функції на пік у точці ω_0/s в частотній області (тобто на Фур'є-образ розтягнутого вейвлета) вирізає з цієї функції все те, що дає внесок в її спектр на частотах, близьких ω_0/s . У результаті отримується розгортка спектральної компоненти в часі.

Основні формули мають вигляд:

$$W_n(s) = \sum_{k=0}^{N-1} \bar{C}_k \bar{C}^*(s\omega_k) e^{i\omega_k n d t}, \quad (6.36)$$

де (*) – означає комплексно зв'язана величина, а знак (-) – ПФ.

$$\bar{C}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-2\pi i k n / N}, \quad (6.37)$$

$$\bar{C}^*(s\omega_k) = \left(\frac{2\pi s}{dt} \right)^{1/2} \hat{\psi}_0(s\omega_k). \quad (6.38)$$

Для материнського вейвлета підходить будь-яка функція, що відповідає двом вищезгаданим умовам. Для реалізації алгоритму було вирішено скористатися вейвлетом Морле (рис. 6.11). Це було зроблено з трьох причин:

- 1) вейвлет Морле один з найпопулярніших і широко застосовується;
- 2) він володіє значною наочністю;
- 3) він простий в обчислювальному плані, що прискорює роботу алгоритму.



Рис 6.11. Вейвлет Морле

Фактично вейвлет Морле є добутком комплексної синусоїди на гауссіан.

$$\psi(\eta)\pi^{-\frac{1}{4}}e^{-i\omega_0\eta}e^{-\frac{\eta^2}{2}}, \quad (6.39)$$

де ψ є значенням вейвлет-функції з безрозмірним періодом η , а ω_0 – хвильовий параметр (при реалізації $\omega_0 = 6$). Алгоритм показано на рис. 6.12.

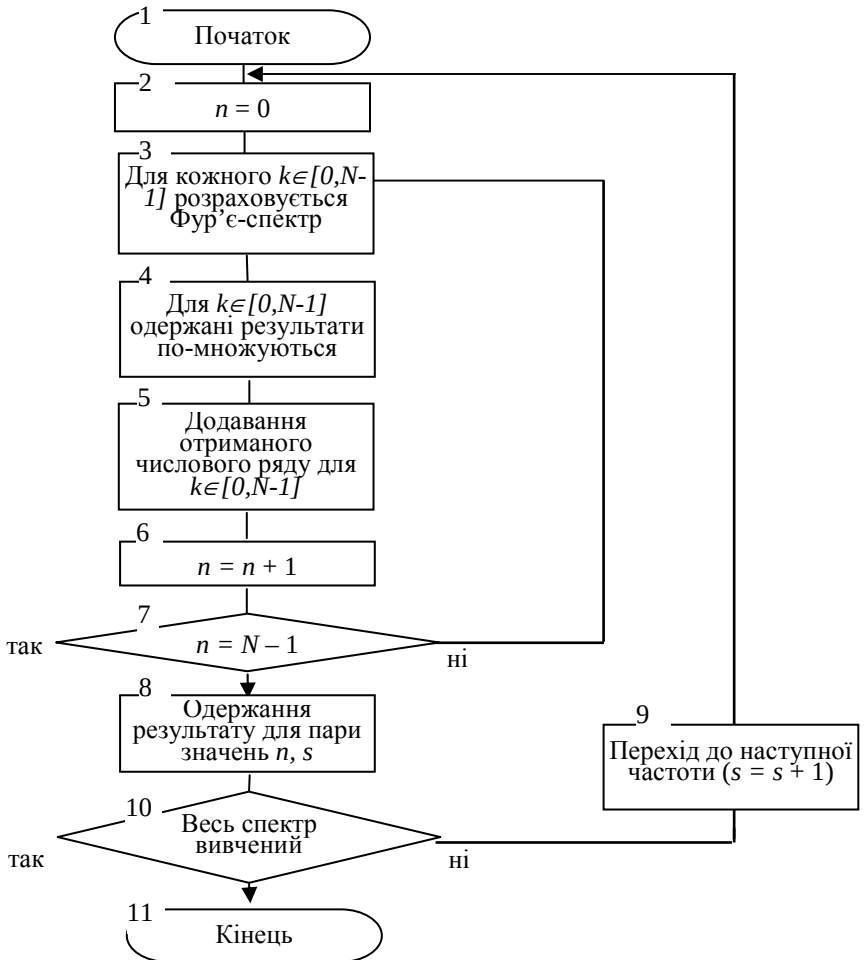


Рис. 6.12. Блок-схема алгоритму виконання ДВП у частотній області

Необхідно також відзначити, що вейвлет Морле є комплекснозначним, тобто має дійсну і уявну частини.

Для збільшення розрізнення вейвлет-фільтрів за частотою використовується простий, красивий і ефективний прийом. Опишемо його для ортогонального випадку. Слід нагадати, що при роботі алгоритму Малла на кожному кроці «відрізається» половина (в разі ідеального фільтра) низькочастотної частини діапазону. Але ж можна застосувати ту ж операцію «розщеплювання» (splitting) до будь-якої з отриманих високочастотних компонент. На рис. 6.13 зліва показана схема алгоритму Малла, справа – інша схема розкладання сигналу, при якій кожен високочастотний діапазон з схеми Малла теж ділиться навпіл.

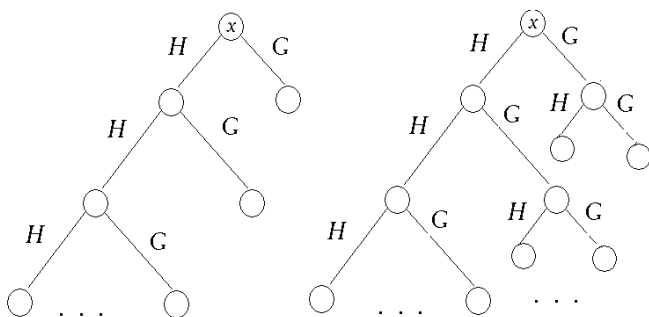


Рис. 6.13. Розкладання за вейвлет-пакетами

Цій схемі можна дати тлумачення на мові вейвлетів. Дерево на рис. 6.13 справа відповідає заміні вейвлета $\psi(t)$ на два нових вейвлета:

$\psi_1(t) = \sum_n h_n \psi(t-n)$ і $\psi_2(t) = \sum_n g_n \psi(t-n)$. Тепер розкладання продовжується з функціями w_j^1 і w_j^2 породженими відповідно

$\left\{ 2^{j/2} \psi_1(2^j t - 2m) \right\}$ і $\left\{ 2^{j/2} \psi_2(2^j t - 2m) \right\}$ базисами. Нові вейвлети теж локалізовані в просторі, але на вдвічі ширшому відрізку, ніж початковий вейвлет, тому що їх локалізація за частотою вдвічі тонша.

Можна намалювати довільне бінарне дерево розкладання, і йому відповідатиме набір підпросторів з базисами, побудованими за аналогічним принципом. Функції, що породжують ці базиси, і називаються вейвлет-пакетами (wavelet-packets).

На практиці (наприклад, при компресії даних) мають справу лише з фільтрами. За рахунок вибору оптимального дерева для даного сигналу або класу сигналів іноді можна суттєво (у декілька разів) підвищити ефективність компресії. Для вибору квазіоптимального дерева розроблено низку методів. Усі вони засновані на введенні деякої

функції («ентропії»), що дозволяє оцінити «інформативність» набору коефіцієнтів. Стратегія така: спочатку будується повне дерево розкладання, потім від верху до низу аналізуються пари вузлів, що мають спільне коріння. Якщо при переході від коріння до вузлів ентропія не зменшується, ця пара замінюється на коріння. Спрощений варіант – підібрати оптимальний рівень, тобто висоту повного дерева, при якій ентропія мінімальна [77].

6.3. Обмеження, що накладаються на базисні функції вейвлет-перетворень

Як було показано вище, ВП володіє кращою частотно-просторовою локалізацією, ніж ПФ.

Тепер спробуємо суворіше сформулювати властивості ВП і обмеження, що накладаються на його базисні функції. Оскільки в даний час повна теорія вейвлетів ще не побудована, розглянемо одне з найпростіших визначень вейвлета, що спирається на вже запроваджені вище поняття.

Будь-яка локалізована R-функція $\phi(t) = L2(R)$ називається R-вейвлетом (або просте вейвлетом), якщо для неї існує функція – двійник $\phi^*(t) = L2(R)$ така, що базиси, побудовані згідно з правилом, є парними взаємними базисами функціонального простору $L2(R)$. Кожен таким чином визначений вейвлет, незалежно від того, чи є він ортогональним чи ні, дозволяє представити будь-яку функцію $f(t)$ з простору $L2(R)$ у вигляді ряду, коефіцієнти якого визначаються інтегральним перетворенням.

Вейвлет-двійник $\phi^*(t)$ – є єдиним, а також є R-вейвлетом. У свою чергу, $\phi(t)$ є двійником для вейвлета $\phi^*(t)$. Якщо $\phi(t)$ – ортогональний R-вейвлет, то $\phi^*(t) \equiv \phi(t)$ і $\{\phi_{jk}^*\} \equiv \{\phi_{jk}\}$ – ортогональний базис.

Для багатьох практичних цілей достатньо, щоб вейвлет $\phi(t)$ володів лише властивістю напівортогональності, тобто $(\phi_{jk}, \phi_{lm}) = 0$ при $j \neq l$.

Усякий R-вейвлет називається неортогональним, якщо він не є напівортогональним вейвлетом. Однак, оскільки він відповідає умові Рісса, він має двійника, який дозволяє побудувати формулу зворотного перетворення.

Більшість обмежень, що накладаються на вейвлет, пов'язана з необхідністю мати зворотне перетворення. Розглянемо основні з цих обмежень.

1. Локалізація. ВП використовує базисну функцію, локалізовану в просторі часу і частот. Функції, що не прямують до нуля за межами деякого обмеженого околу, не можуть бути вейвлетами.

Обмеженість

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\phi(t)|^2 dt < \infty.$$

Практична оцінка обмеженості і локалізації може бути записана у вигляді нерівностей:

$$|\phi(t)| < \frac{\text{const}}{(1+|t|^n)} \text{ і } |\hat{\phi}(\omega)| < \frac{\text{const}}{(1+|\omega-\omega_0|^n)}.$$

Число n повинно бути якомога більшим, ω_0 – домінантна частота вейвлета.

2. Нульове середнє. Як бачимо з формули (6.18), для обмеженості константи нормування зворотного ВП повинно відповідати умові рівності що нульовий момент (середній за часом) дорівнює нулю.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) dt = 0.$$

Часто для практичних прикладів виявляється необхідним, щоб нулю були рівні не тільки нульові, але і перші m моментів вейвлета:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) t^m dt = 0.$$

Такий вейвлет називається вейвлетом порядку m . Вейвлети високого порядку, ті, що володіють великою кількістю нульових моментів, дозволяють позбутися впливу регулярних (поліноміальних) складових досліджуваного процесу і зосередити увагу на аналізі дрібномасштабних флуктуацій і особливостей високого порядку.

3. Автомодельність базису. Самосхожість базису ВП є його характерною ознакою. Дійсно, всі функції даного сімейства ϕ_{ab} мають однакову кількість нулів, оскільки отримані з базисного вейвлета за допомогою системи перетворень схожості. Це полегшує застосування ВП для аналізу фрактальних сигналів.

6.4. Аналітичні вирази прямих та зворотних вейвлет-перетворень

У даному пункті будуть розглянуті методи отримання вейвлет-коефіцієнтів зображення. Ці методи можуть бути застосовані для стиснення зображень як без втрат, так і з втратами інформації, у методах стеганографії, що базуються на вбудовуванні біт в область перетворення.

Розглянемо спочатку цілочислові ВП. В основі даних методів лежить деяка модифікація ВП, що дозволяє проводити всі підрахунки в цілочисловому вигляді. Одержане перетворення не є вейвлет-перетворенням, але володіє всіма його властивостями. Теоретично при ВП втрати інформації не відбувається. Однак при реалізації виникають неминучі помилки під час округлення вейвлет-коефіцієнтів. У той же час, у деяких програмах обробки зображень повна зворотність перетворення є важливою. Цілочислове ВП дозволяє досягти повного контролю над точністю підрахунків. Тому воно отримало назву оберненого ВП. Крім того, цілочисельність підрахунків прискорює виконання алгоритмів на комп'ютерах.

Для простоти всі викладення проводяться для одного рівня розкладання і для одновимірного сигналу парної довжини. Нехай $\{c_n^0\}_{n=0}^{N-1}$ – початковий сигнал, де верхній індекс показує рівень розкладання (0), нижній – конкретну точку сигналу, а $\{c_n^1\}_{n=0}^{N/2-1}$ і $\{d_n^1\}_{n=0}^{N/2-1}$ складові його розкладання на першому рівні (низькочастотна і високочастотна частки, відповідно).

Цілочислове вейвлет-перетворення Хаара (Haar 2/2). Це перетворення, що використовує наступні фільтри декомпозиції [73]:

$$h_0=h_1=g_0=-g_1=1/2.$$

Підрахунки ведуться таким чином:

$$\begin{cases} d_k^1 = c_{2k}^0 - c_{2k+1}^0, & k = 0, \dots, N_1 - 1, \\ c_k^1 = \left\lfloor \frac{d_k^1}{2} \right\rfloor + c_{2k+1}^0, & k = 0, \dots, N_1 - 2, \end{cases} \quad (6.40)$$

$$c_{N_1-1}^1 = \left\lfloor \frac{d_{N_1-1}^1}{2} \right\rfloor + c_{N-1}^0. \quad (6.41)$$

У виразах (6.40), (6.41) позначення $\left\lfloor \right\rfloor$ означає операцію округлення. Таким чином, всі елементи $\{c_n^1\}_{n=0}^{N/2-1}$ і $\{d_n^1\}_{n=0}^{N/2-1}$ будуть

цілими числами. З (6.40) і (6.41) легко одержати алгоритм реконструкції:

$$c_{2k+1}^0 = c_k^1 - \left[\frac{d_k^1}{2} \right], \quad k = 0, \dots, N_1 - 1,$$

$$c_{2k}^0 = d_k^1 + c_{2k+1}^0, \quad k = 0, \dots, N_1 - 1 \quad c_{2k}^0 = d_k^1 + c_{2k+1}^0,$$

Цілочислове ВП (TS 2/6). Дане перетворення еквівалентне застосуванню наступних фільтрів аналізу [12]:

$$h_n = \{0, 0, 1/2, 1/2, 0, 0\}, \quad g_n = \{-1/16, -1/16, 1/2, -1/2, 1/16, 1/16\}.$$

Декомпозиція виконується аналогічно перетворенню Хаара з додаванням ще одного кроку. Спочатку проводяться розрахунки за формулами (6.40), (6.41). Замість d_k^1 у даних виразах тепер використовується позначення $d_k^{1,0}$. Потім проводиться зміна високочастотних коефіцієнтів за формулами:

$$\begin{cases} d_0^1 = \left[\frac{c_0^1 - c_1^1}{4} \right] - d_0^{1,0}, \\ d_k^1 = \left[\frac{c_{k-1}^1 - c_{k+1}^1}{4} \right] - d_k^{1,0}, \\ d_{N_1-1}^1 = \left[\frac{c_{N_1-2}^1 - c_{N_1-1}^1}{4} \right] - d_{N_1-1}^{1,0} \end{cases}, \quad k = 1, \dots, N_1-2$$

Алгоритм реконструкції аналогічний алгоритму декомпозиції. Реконструкція виконується у зворотному порядку:

$$\begin{cases} d_0^{1,0} = \left[\frac{c_0^1 - c_1^1}{4} \right] - d_0^1, \\ d_k^{1,0} = \left[\frac{c_{k-1}^1 - c_{k+1}^1}{4} \right] - d_k^1, \\ d_{N_1-1}^{1,0} = \left[\frac{c_{N_1-2}^1 - c_{N_1-1}^1}{4} \right] - d_{N_1-1}^1 \end{cases}, \quad k = 1, \dots, N_1-2$$

і, далі, за формулами (6.40), (6.41) із заміною в них d_k^1 на $d_k^{1,0}$.

Цілочислове ВП (S 1/3). Це нелінійне перетворення є різновидом перетворення, що використовує біртогональну пару фільтрів [12]:

$$h_n = \{1, 0, 0\}, g_n = \{1/4, -1/2, 1/4\}.$$

Підрахунки починаються з вейвлета Лейзі. Перетворення Лейзі полягає в простому розбитті вхідного сигналу на парну і непарну частки за формулами:

$$c_k^1 = c_{2k}^0, \quad k = 0, \dots, N_1 - 1,$$

$$d_k^1 = c_{2k+1}^0, \quad k = 0, \dots, N_1 - 1.$$

На наступному етапі виконується зміна високочастотних коефіцієнтів:

$$d_k^1 = \left[\frac{c_k^1 + c_{2k+1}^1}{2} \right] - d_k^{1,0}, \quad k = 0, \dots, N_1 - 2,$$

$$d_{N_1-1}^1 = c_{N_1-1}^1 - d_{N_1-1}^{1,0}.$$

Реконструкція виконується так:

$$c_{2k}^0 = c_k^1, \quad k = 0, \dots, N_1 - 1,$$

$$\begin{cases} c_{2k+1}^0 = \left[\frac{c_{2k}^0 + c_{2k+2}^0}{2} \right] - d_k^1, & k = 0, \dots, N_1 - 2, \\ c_{N_1-1}^0 = c_{N_1-1}^1 - d_{N_1-1}^1. \end{cases}$$

Таким чином, розглянуто деякі аналітичні вирази одержання цілочислових вейвлет-коефіцієнтів. Дана область дослідження є перспективною і привертає увагу багатьох дослідників.

Розглянемо інший метод ВП. Він заснований на так званому S+P перетворенні, запропонованому А. Саїдом і В. Перельманом [77]. Конструювання біртогональних вейвлетів за допомогою ліфтингової схеми може розглядатися як окремий випадок методу корекції.

S+P перетворення аналогічно використанню наступних фільтрів аналізу:

$$h_n = \{0, 0, 0.5, 0.5, 0, 0\},$$

$$g_n = \{-0.0625, -0.0625, 0.46875, -0.53125, 0.21875, -0.03125\}.$$

При цьому фільтри синтезу не мають компактної області визначення. Проте S+P перетворення може бути виконане таким чином:

1. Виконаємо декомпозицію за формулами (6.40), (6.41). При цьому замість d_k^1 в даних формулах тепер використовуємо $d_k^{1,0}$.

2. Крок корекції:

$$\begin{cases} d_0^1 = d_0^{1,0} - \left[\frac{c_0^1 - c_1^1}{4} \right], \\ d_k^1 = d_k^{1,0} - \left[\frac{2c_{k-1}^1 + c_k^1 - 3c_{k+1}^1 - 2d_{k+1}^{1,0}}{8} \right], \\ d_{N_I-1}^1 = d_{N_I-1}^{1,0} - \left[\frac{c_{N_I-2}^1 + c_{N_I-1}^1}{4} \right]. \end{cases} \quad k = 1, \dots, N_I-2$$

Реконструкція виконується таким чином:

$$\begin{cases} d_{N_I-1}^{1,0} = d_{N_I-1}^{10} - \left[\frac{c_{N_I-2}^1 - c_{N_I-1}^1}{4} \right], \\ d_k^{1,0} = d_k^1 + \left[\frac{2c_{k-1}^1 + c_k^1 - 3c_{k+1}^1 - 2d_{k+1}^{1,0}}{8} \right], \\ d_0^{1,0} = d_0^1 + \left[\frac{c_0^1 - c_1^1}{4} \right]. \end{cases} \quad k = 1, \dots, N_I-2$$

Нецілочислове ВП Коена-Добеші-Фово (CDF 9/7). Це симетричне ВП з використанням біртогональних 9/7 фільтрів [78]:

$$\begin{aligned} h_0 &= \{0.03783, 0.02385, 0.1106, 0.3774, 0.8527\}, \\ h_1 &= \{0.06454, 0.04069, 0.4181, 0.7885\}, \\ g_0 &= \{0.788486, 0.040689, 0.023849, 0.377403\}, \\ g_1 &= \{0.418092, 0.064539, 0.037829, 0.110624, 0.852699\}. \end{aligned}$$

Декомпозиція сигналу виконується за формулами:

$$c_k^1 = k_0^l c_k^0 + \sum_{i=1}^4 k_i^l (c_{k+i}^0 + c_{k-i}^0), \quad k = 0, \dots, N-1,$$

$$d_k^1 = k_0^h c_k^0 + \sum_{i=1}^3 k_i^h (c_{k+i}^0 + c_{k-i}^0), \quad k = 0, \dots, N-1.$$

де $k_{l,i}$ – i -й коефіцієнт НЧ фільтра реконструкції;
 $k_{h,i}$ – i -й коефіцієнт ВЧ фільтра реконструкції.

Реконструкція виконується таким чином:

$$\begin{aligned} c_k^0 &= k_0^l c_k^1 - k_1^l (c_{k+1}^1 + c_{k-1}^1) - k_0^h (d_{k+1}^1 + d_{k-2}^1) + k_1^h (d_k^1 + d_{k-1}^1), \quad k=0, \dots, N_1-1, \\ c_{k+1}^0 &= k_2^l (c_{k+1}^1 + c_k^1) - k_3^l (c_{k+2}^1 + c_{k-1}^1) - k_2^h (d_{k+2}^1 + d_{k-2}^1) + k_3^h (d_{k+1}^1 + d_{k-1}^1) - k_4^h d_k^1, \\ k &= 0, \dots, N_1-1, \end{aligned}$$

де $k_{l,i}$ – i -й коефіцієнт НЧ фільтра декомпозиції;
 $k_{h,i}$ – i -й коефіцієнт ВЧ фільтра декомпозиції.

Отже, на сьогоднішній день існує дуже велика кількість алгоритмів виконання вейвлет-перетворень як цілочислових (без втрат), так і нецілочислових (з втратами інформації). У пунктах 6.1–6.3 були викладені основні положення вейвлет-аналізу, а також розглянуті обмеження, що накладаються на базисні функції вейвлет-перетворень. Усі ці алгоритми дозволяють досягнути значних ступенів стиснення, особливо нецілочислові, але вони не дозволяють одержувачу мультимедійної інформації переглянути зменшену копію зображення без передавання ВЧ коефіцієнтів, тому що коефіцієнти ВП є дійсними числами і це вносить спотворення. Що стосується використання вейвлетів у стеганографії, то частіше використовуються цілочислові перетворення, особливо для розробки робастних стеганоалгоритмів.

6.5. Оцінювання властивостей базисних функцій вейвлет-перетворень

Для практичного дослідження деяких із описаних базисних функцій ВП було розроблено програмний продукт «Wavelet Maker», що дозволяє без застосування будь-яких додаткових засобів реалізувати наступні функції:

1. Багаторівневе ВП зображень.
2. Обчислення значень статистичних характеристик початкових зображень.
3. Обчислення значень характеристик відповідності відновленого зображення початковому з метою оцінювання спотворень, що вносяться ВП.

6.5.1. Аналіз статистичних характеристик зображення при застосуванні до нього вейвлет-перетворень

У якості основних статистичних характеристик початкового зображення використовуються:

- ентропія пікселів початкового зображення;
- кількість нульових елементів у початковому зображенні (у процентах);
- теоретичний мінімальний ступінь стиснення зображення, що складається із взаємонезалежних елементів.

Обчислення числових значень вказаних характеристик дозволяє в подальшому об'єктивно оцінити ефективність алгоритму ВП шляхом порівняння статистичних властивостей зображення до і після перетворення.

Обчислення ентропії колірних компонент початкового зображення виконується за кілька етапів, основними з яких є:

- звертання до кожного пікселя початкового зображення і представлення його значення (24 біти) у вигляді значень колірних компонент (8-бітних червоної, зеленої і синьої);
- запис отриманих числових значень колірних складових у масиви, окремо для кожної складової;
- аналіз матриць колірних компонент і обчислення імовірності появи кожного з 256 можливих значень в аналізованому зображенні;
- обчислення ентропії для кожної колірної складової за формулою (2.1);
- усереднення значень ентропії кожної колірної компоненти, а потім і по всьому зображенні, з метою розрахунку середньої ентропії всього початкового зображення.

Ентропія $H(S)$ виступає кількісною мірою різноманіття значень колірної компоненти і є її основною характеристикою. Чим більший алфавіт вхідних даних, тим більше значення ентропії і тим складніше це зображення піддається компресії.

Обчислення кількості нульових елементів у зображенні здійснюється за формулою:

$$K_{zero} = \sum_{i=1}^3 \frac{N_i}{h \times w} \times 100\%, \quad (6.42)$$

де N_i – кількість нульових елементів у i -й матриці колірної складової;

h – розмірність матриці колірної складової по вертикалі;

w – розмірність матриці колірної складової по горизонталі.

Обчислення даної характеристики дозволяє визначити кількість пікселів, що дорівнюють нулю у початковому та перетвореному зображеннях. Чим більша кількість нулів у інформаційному блоці, тим легше його стиснути. Тобто чим більшу кількість нульових елементів буде утворено за допомогою певного базису ВП, тим краще воно декорелює зображення.

Обчислення значення мінімального теоретичного ступеня стиснення декорельованого зображення здійснюється за формулою (2.3). Це дозволяє знайти не тільки мінімальний ступінь компресії конкретного зображення, а й знову ж таки оцінити можливості вейвлет-базису.

6.5.2. Аналіз характеристик відповідності відновленого зображення початковому

У результаті застосування до початкового зображення алгоритму стиснення з втратами після виконання послідовності операцій стиснення-розпакування утворюється зображення, що не цілком збігається з оригіналом [1]. Цю невідповідність прийнято називати шумом. У якості основних статистичних характеристик відповідності відновленого зображення початковому, обчислюється:

- пікове співвідношення сигнал/шум у відновленому зображенні;
- середньоквадратичне відхилення значень початкового і відновленого зображень.

Аналіз значень цих характеристик дозволяє оцінити ефективність застосування до початкового зображення алгоритмів ВП з метою вибору оптимального за критерієм відповідності відновленого зображення початковому.

Обчислення значень перерахованих вище характеристик також відбувається в кілька етапів. Загальними для обчислення значень основних характеристик відповідності відновленого зображення вихідному є наступні етапи:

- звертання до кожного пікселя початкового і відновленого після стиснення зображень і маніпулювання зі значеннями колірних компонент (як у попередньому пункті);
- запис масивів значень колірних складових для початкового і відновленого зображення після стиснення з втратами.

Після цього здійснюється порівняння значень, записаних у матриці початкового і відновленого зображень, для кожної колірної складової. Метою порівняльного аналізу є виявлення перекручувань, внесених у зображення в результаті застосування до нього перетворення, що вносить втрати. На основі результатів порівняння обчислюються наступні характеристики:

- пікове співвідношення сигнал/шум у відновленому зображенні за формулою (2.6);

– середньоквадратичне відхилення значень початкового і відновленого зображень за формулою (2.5).

Аналіз значень цих характеристик дозволяє оцінити ефективність застосування до визначеного класу зображень вейвлет-перетворень з метою вибору оптимального за критерієм відповідності відновленого зображення початковому.

У результаті застосування до зображення вейвлет-перетворень найбільш важлива інформація концентрується в одній із компонент, тобто відбувається перерозподіл енергії [12].

6.6. Реалізація програмного пакета дослідження статистичних характеристик зображень

Програма «Wavelet Maker» призначена для обчислення статистичних характеристик початкових зображень, здійснення багаторівневих ВП та оцінювання ефективності їх базисних функцій. У програмі реалізовані як цілочислові алгоритми ВП, при яких відновлене зображення біт у біт відповідає початковому, так й не цілочислові, при яких відновлене зображення не повністю відповідає початковому, але спотворення є незначними та візуально малопомітними. Відображення початкових та відновлених зображень у окремих вікнах надає можливість користувачу поєднувати візуальне порівняння зображень з порівнянням їх основних статистичних характеристик. Головне вікно програми має вигляд, показаний на рис. 6.14.

У верхній частині головного вікна знаходиться смуга головного меню. Під смугою головного меню розміщені панелі керування «Целочисленное ВП»¹ («Нецелочисленное ВП») і «Уровней декомпозиции», а також кнопка «Пуск». Під ними розміщено п'ять іменованих інформаційних панелей: «Энтропия исходного изображения»; «Минимальная степень сжатия»; «Кол-во нулевых моментов»; «Среднеквадратическое отклонение»; «Пиковое соотношение сигнал/шум».

При натисканні кнопки «Пуск» відбувається пряме та зворотне ВП обраного зображення, обчислення та відображення описаних характеристик зображення.

Відображення числових значень цих характеристик відбувається у відповідних іменованих інформаційних панелях.

Відновлене зображення та матриця значень результатів ВП відображаються у окремих вікнах, що надає користувачу змогу візуально порівнювати початкове та відновлене після застосування до нього алгоритму стиснення зображення, як показано на рис. 6.15.

¹ Тут і далі назви елементів керування подаються російською мовою відповідно до позначень на панелі

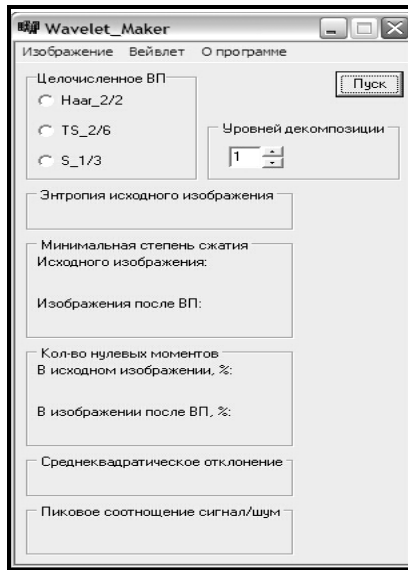


Рис. 6.14. Видяг головного вікна програми «Wavelet Maker»

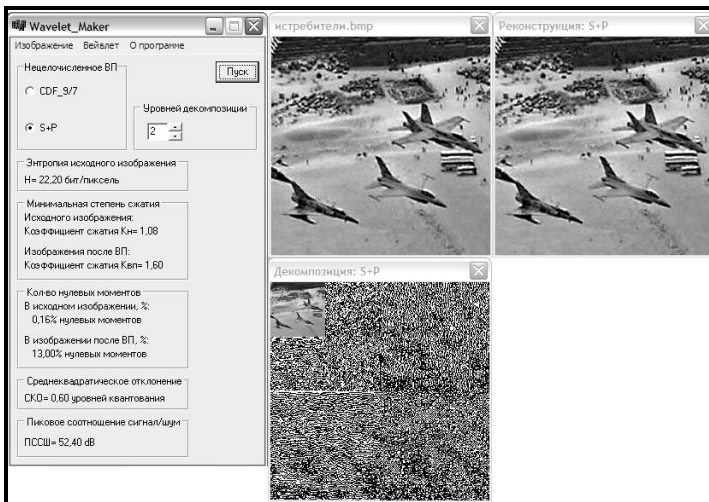


Рис. 6.15. Видяг вікон відновленого зображення та матриць ВП

ВИСНОВКИ

1. Для більш глибокої декореляції елементів зображення сучасні компресори графіки передбачають етап перетворення початкових даних. Це дозволяє суттєвіше підвищити ступінь стиснення зображень.

2. Для стеганографії ефект від процедури декореляції пікселів зображення полягає у подальшій незалежній обробці кожного окремого елемента масиву. Це дозволить синтезувати стеганоалгоритми з різною робастністю.

3. Передумовою до удосконалення методів цифрової обробки зображень за вказаними напрямками є детальне вивчення властивостей базисів розкладання елементів зображення.

4. У розділі проаналізовано ряд цілочислових та нецілочислових вейвлет-перетворень. Для досягнення найбільших ступенів компресії зображень доцільно застосовувати базиси Коена-Добеші-Фово, з точки зору найменшої складності відшукування вейвлет-коефіцієнтів – вибір буде за базисом Хаара.

5. Представлено програмну реалізацію для дослідження статистичних характеристик початкового та перетвореного зображень.

VII. ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ТЕОРІЇ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ

7.1. Приклад створення інформаційної технології компресії зображень без втрат якості

Після розгляду початкових етапів створення архіватора зображень, до яких відноситься перетворення колірної моделі та вейвлет-перетворення, опишемо додаткові процедури зменшення об'єму початкового файлу та власне процес стиснення – безнадлишкове кодування.

7.1.1. Особливості ітераційного виконання вейвлет-розкладання зображень

Виконання ітераційного розкладання зображення викликано необхідністю підвищення ступеня стиснення зображення [21]. Кількість рівнів розкладання зображення може бути обчислена як теоретично, так і визначена практично. Після першого рівня декомпозиції зображення за допомогою вейвлет-перетворення, початкове зображення буде розділено на високочастотні HH_1 , LH_1 , HL_1 і низькочастотну LL_1 складові (рис. 7.1), де нижній індекс означає рівень розкладання. Об'єм початкового зображення $V_{Поч}^1$ у цьому випадку рівний

$$V_{ИСХ}^1 = \sum_{k=1}^3 \left(V_{LL} + \sum_{i=1}^3 V_{H_i} \right),$$

де V_{LL} – об'єм низькочастотної області;

k – кількість колірних компонент зображення;

i – кількість високочастотних матриць ВП.

Об'єм області, що не стискається рівний об'єму низькочастотної складової

$$V_{LL} = \frac{1}{4} V_{Поч}^1.$$

Підвищення ступеня стиснення може бути досягнуто шляхом подальшого розкладання перетворених даних.

Частіше всього в літературі [79–81] для розкладання зображень застосовується пірамідальна схема (рис. 7.1), яка має наступні переваги:

1. Невелика обчислювальна складність у порівнянні, наприклад, з шаховою (застосування технології вейвлет-пакетів) [75, 76].

2. Можливість ефективного застосування до зображень будь-якого класу та ін.

На другому рівні декомпозиції об'єм початкового зображення складе:

$$V_{поч}^2 = \sum_{k=1}^3 \sum_{n=1}^2 \left(V_{LL_n} + \sum_{i=1}^3 V_{H_{i,n}} \right),$$

де n – кількість ітерацій ВП.

Низькочастотна область, що не стискається LL_3

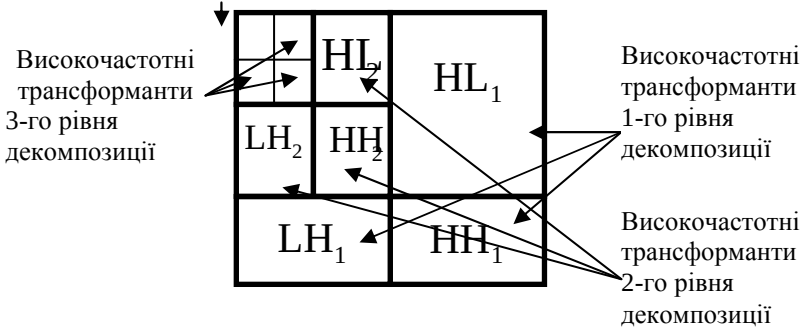


Рис. 7.1. Трирівневе пірамідальне розкладання зображення

Об'єм даних, що не стискаються:

$$V_{LL_2} = \frac{1}{4} V_{поч}^1 \times \frac{1}{4} V_{поч}^2 = \frac{1}{16} V_{поч}.$$

При j -рівнях розкладення об'єм $V_{поч}^j$ рівний:

$$V_{исх}^j = \sum_{k=1}^3 \sum_{n=1}^j \left(V_{L_n} + \sum_{i=1}^3 V_{H_{i,n}} \right).$$

Об'єм даних, що не стискаються, рівний:

$$V_{LL_n} = 2^{-2n} V_{поч}. \quad (7.1)$$

Вже на третьому рівні декомпозиції об'єм низькочастотної області складе 1/64 від початкового (<2 %), а на четвертому – 1/256 (<1 %), тому подальше розкладання низькочастотної трансформанти недоцільне. Більше того, в компресорах, критичних до швидкості ПД, достатньо обмежитися трьома рівнями декомпозиції.

Результати теоретичних розрахунків кількості рівнів розкладання зображення були підтверджені експериментально. Експеримент проводився на тому ж тестовому пакеті, що описаний вище. Результати досліджень наведені на рис. 7.2 і рис. 7.3.

Аналіз часових діаграм на рис. 7.2 і рис. 7.3 показує, що при дворівневому розкладанні зображення за допомогою розглянутих ВП ступінь стиснення зростає на 8–02 %, а при трирівневому – на 2–5 %.

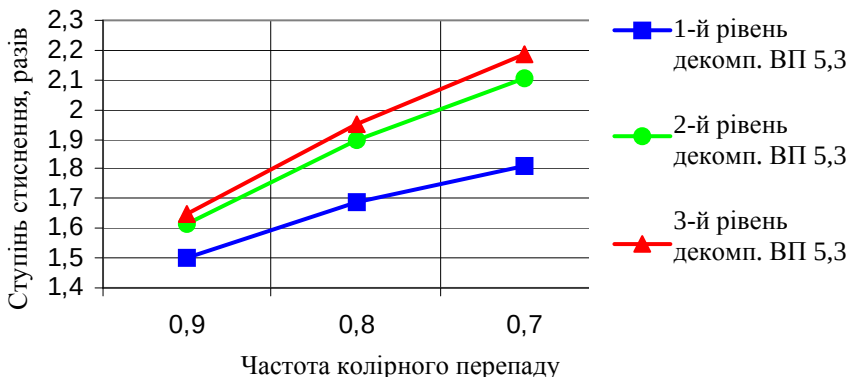


Рис. 7.2. Залежність ступеня стиснення зображень у колірній моделі RGB з різною частотою кольорового перепаду від кількості рівнів декомпозиції при використанні ВП 2,2

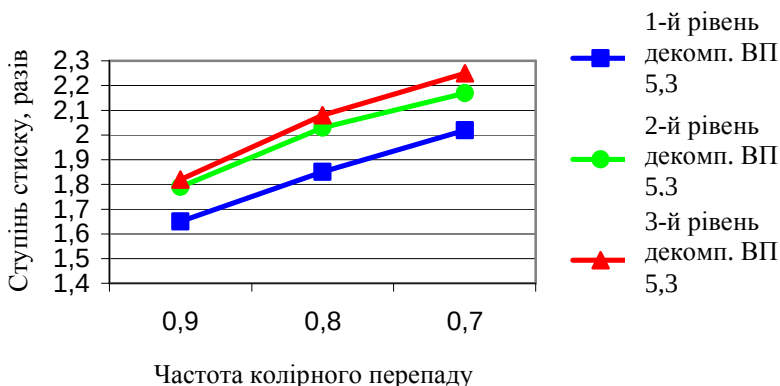
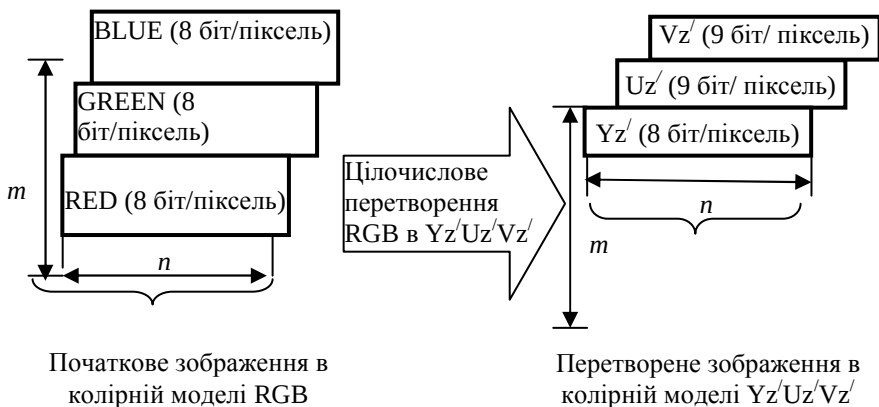


Рис. 7.3. Залежність ступеня стиснення зображень у колірній моделі RGB з різною частотою кольорового перепаду від кількості рівнів декомпозиції при використанні ВП 5,3



7.1.2. Розкладання високочастотних трансформант вейвлет-перетворення на блоки старших та молодших бітових площин

Для створення ефективного методу компресії зображень на основі ВП необхідне знання статистичних властивостей ВЧ трансформант HH_i , LH_i , HL_i даного перетворення (див. рис. 7.1).

Відобразимо високочастотні трансформанти ВП у вигляді куба з восьми двовимірних бітових площин (БП), де верхня площина міститиме знаки коефіцієнтів ВП (рис. 7.4). Кількість БП визначається розрядністю вейвлет-коефіцієнтів. У загальному випадку, значення НЧ послідовності знаходиться в діапазоні $0 \leq LL_i \leq 255$, а ВЧ – у діапазоні $[-128 \leq HH_i = LH_i = HL_i \leq 127]$, внаслідок чого для вказування від'ємних ВЧ вейвлет-коефіцієнтів буде потрібний додатковий біт для запису знака. Проте в машинному поданні від'ємні числа відображаються в додатковому коді, наприклад:

$$[-1]_{10} = [11111111]_{\text{дод. код}},$$

$$[-128]_{10} = [10000000]_{\text{дод. код}}.$$

Тому для кодування коефіцієнтів ВП необхідно стільки ж біт, скільки й для відліків початкового зображення в колірній моделі RGB, при цьому знак коефіцієнта характеризує старший біт байта.

Дослідженню піддавалися всі 7 інформаційних площин зображень [82] з тестового пакета з 300 фотореалістичних зображень. Під дослідженням статистичних властивостей зображень розуміють обчислення частоти нульових елементів у кожній інформаційній площині.

У [60, 61] подано кількість нульових елементів, що містяться в кожній бітовій площині. Аналіз 5–7 площин показав, що кожна з них містить більше 90 % нулів (рис. 13 додатку А).

Різні статистичні властивості БП вейвлет-коефіцієнтів викликають необхідність використання різних методів для їх стиснення [66, 83]. Розділимо всі бітові площини на старші і молодші (рис. 7.4 б) з метою застосування до них різних методів безнадлишкового кодування. Для обґрунтування розбиття 8-бітової трансформанти на трирозрядний блок старших БП V_{ct} і чотирирозрядний блок молодших БП V_{ml} був проведений наступний експеримент:

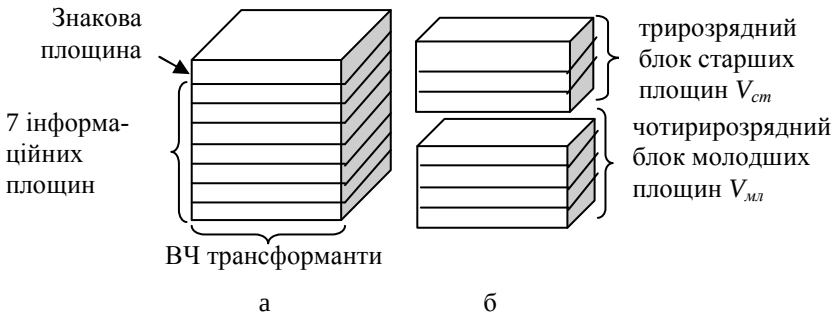


Рис. 7.4. Схема групування трансформант ВП:

- а) представлення початкових високочастотних трансформант ВП;
 б) розділення високочастотних трансформант ВП на старші і молодші бітові площини

1. Розбиття 8-ми бітової трансформанти на блоки різної розрядності:

- V_{ml} – трирозрядний, V_{ct} – чотирирозрядний;
- V_{ml} – чотирирозрядний, V_{ct} – трирозрядний;
- V_{ml} – дворозрядний, V_{ct} – п'ятирозрядний;
- V_{ml} – п'ятирозрядний, V_{ct} – дворозрядний.

2. Кодування V_{ml} арифметичним методом, V_{ct} – методом довжин серій.

3. Визначення ступеня стиснення зображень для всіх чотирьох випадків.

Результати обчислення значень ступенів стиснення тестового пакета зображень представлені в табл. 7.1.

Максимальний ступінь стиснення зображень при розбитті трансформанти як показано на рис. 7.4 б пояснюється тим, що:

1. Основна енергія зображення зосереджена в молодших площинах.
2. Арифметичний кодер ефективно кодує дані цілими байтами (цілі байти можуть бути сформовані тільки з напівбайтів чотирирозрядних змінних).

3. Кодер довжин серій ефективний тільки для сильнокорельованих даних (з низькою частотою колірною перепадом), якими є старші БП. Розділення масивів ВЧ трансформант ВП на молодші і старші площини здійснюється таким чином:

$$V_{ct} = V_i \gg 4, \quad (7.2)$$

$$V_{ml} = V_i \oplus 0 \times 0F, \quad (7.3)$$

де $\oplus$ – операція логічного додавання на число $0 \times 0F$ (15 в десятковій системі числення).

Таблиця 7.1

Значення ступенів стиснення зображень при кодуванні блоків різної розрядності (колірна модель Yz/Uz/Vz і ВП 5,3)

Розрядність блоків трансформант, біт		Середній ступінь стиснення, разів
V_{ml}	V_{ct}	
3	4	2,22
4	3	2,35
2	5	2,11
5	2	2,27

Молодші розряди V_{ml} формуються шляхом зсуву вправо на чотири біти восьмирозрядної $i - i'$ трансформанти поточного рівня розкладання, а старші V_{ct} розряди – логічним додаванням трансформанти ВП V_i на число 15 ($0 \times 0F$ в шістнадцятковій системі зчислення).

Приклад.

Нехай є послідовність коефіцієнтів трансформанти V_i , записана в десятковому вигляді:

$$[V_i]_{10} = \{-6, 7, 21, -9, 3, 1, 1, 0, 4, -3, \dots\}.$$

Тоді у двійковому машинному (додатковому) коді одержимо:

$$[V_i]_2 = \left\{ 11111010, 00000111, 00010101, 11110111, 00000011, \right. \\ \left. 00000001, 00000001, 00000000, 00000100, 11111101, \dots \right\}.$$

Особливістю даного представлення ВЧ трансформант ВП є те, що від'ємні коефіцієнти відображаються в додатковому коді, а додатні в прямому. Тоді однакові за абсолютним значенням коефіцієнти матимуть абсолютно різний двійковий код, наприклад:

$$[-1]_{10} = [1111111]_2,$$

$$[1]_{10} = [00000001]_2.$$

Для зменшення відмінності в представленні від'ємних і додатних значень вейвлет-коефіцієнтів необхідно додатковий код від'ємних коефіцієнтів перетворити в прямий за допомогою вирівнювання:

$$V_i = \begin{cases} -129 - V_i, & \text{при } V_i < 0 \\ V_i & \text{у протилежному випадку} \end{cases} \quad (7.4)$$

Тоді

$$[-1]_{10} = [10000000]_2,$$

$$[-128]_{10} = [11111111]_2.$$

При вирівнюванні (7.4) відбувається не тільки перетворення додаткового коду від'ємних коефіцієнтів, але й зменшення величини їх модуля на одиницю, що позитивно впливає на результуючий ступінь стиснення.

Повертаючись до прикладу, послідовність $[V_i]_2$ після вирівнювання матиме такий вигляд:

$$[V_i]_2 = \left\{ 10000101, 00000111, 00010101, 10001000, 00000011, \right. \\ \left. 00000001, 00000001, 00000000, 00000100, 10000010, \dots \right\}.$$

Процедури вирівнювання ВЧ трансформант ВП і розбиття на напівбайти виконуються відразу ж після прямого ВП і наведені у додатку В.

Старша (восьма) БП містить знаки вейвлет-коефіцієнтів, позначимо знакову площину через $V_{3H_{BK}}$. Одновимірний масив знаків вейвлет-коефіцієнтів формується аналогічно масиву V_{3H} . Діапазон допустимих значень знакового масиву також лежить в інтервалі $[0; 255]$, який доцільно обробляти арифметичним кодером для великих алфавітів.

Для аналізу статистичних властивостей 3-х старших інформаційних площин було проведено підрахунок значущих (ненульових) елементів, що містяться в даному трирозрядному блоці. Ненульовими будуть елементи, які містять хоча б одну одиницю в одній із старших площин (рис. 7.5).

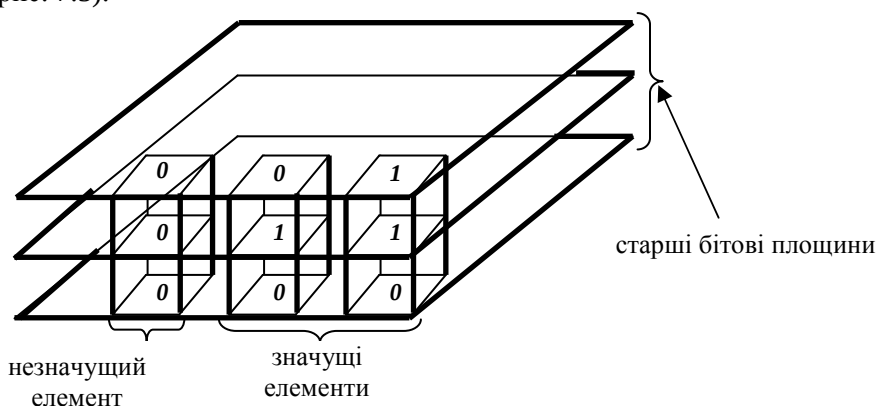


Рис. 7.5. Елементи трирозрядних старших інформаційних БП високочастотних вейвлет-коефіцієнтів

Для розглянутого прикладу значення блоку V_{cm} для послідовності $[V_i]_{10}$ у десятковому представленні рівні:

$$[V_i]_{10} = \{0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}.$$

Процентне співвідношення кількості ненульових елементів до їх загальної кількості в блоці для кожної колірної компоненти зображень з різною насиченістю, подаються у табл. 7.2.

Аналогічне статистичне дослідження було проведено і з молодшими БП різної розрядності. Результати експерименту також поміщені в табл. 7.2.

Результат додавання загальної кількості значущих елементів при розбитті ВЧ трансформант на три- чотири- та дво- п'ятирозрядні блоки наведений у табл. 7.3.

Таблиця 7.2

Процентне співвідношення кількості ненульових елементів до загальної кількості елементів у старших і молодших БП для зображень різної насиченості

Частота колірного перепаду	Колірні компоненти зображення											
	Yz'				Uz'				Vz'			
Розрядність БП, біт	Блоки старших і молодших БП різної розрядності, біт											
	V _{ст}		V _{ст}		V _{ст}		V _{ст}		V _{ст}		V _{ст}	
	3	2	4	5	3	2	4	5	3	2	4	5
0,9–0,99	15,3	77,7	87,8	36,4	14,6	75,1	85,4	35,9	14,6	76,2	86,3	36,1
0,8–0,89	11,6	72,3	86,5	35,6	11,2	70,4	83,6	34,2	11,1	70	83,8	34,7
0,7–0,79	10	68,9	83,9	30,2	9,7	65,5	81,7	30	9,7	66,1	82,4	31,2

Аналіз табл. 7.3 дозволяє зробити висновок про те, що при три-чотирирозрядному розбитті ВЧ трансформант, кількість значущих елементів менше на 8,2 %, ніж при дво-п'ятирозрядному, що підтверджує правильність вибору першого способу формування блоків старших і молодших БП. Велика кількість нульових кодових комбінацій у трихрозрядних старших БП (більше 85 %) дозволяє застосовувати для їх стиснення простий і ефективний метод довжин серій (RLE) [66, 84, 85]. Блок $V_{мл}$ доцільно обробляти арифметичним кодером для малих алфавітів ($Q = 16$) [86].

Таблиця 7.3

Процентне співвідношення суми ненульових елементів до загальної кількості елементів у старших і молодших БП при різному розбитті ВЧ трансформант зображень

Частота колірнього перепаду	Колірні компоненти зображень					
	Yz'		Uz'		Vz'	
Розрядність БП, біт	Спосіб розбиття ВЧ трансформант зображення, біт					
	3–4	2–5	3–4	2–5	3–4	2–5
0,9–0,99	103,1	114,1	100	111	100,9	112,3
0,8–0,89	98,1	107,9	94,8	104,6	94,9	104,7
0,7–0,79	93,9	99,1	91,4	95,5	92,1	97,3
Усього в середньому	98,4	107	95,4	103,7	96	104,8

7.1.3. Розробка процедури компресії зображень

Розроблений метод компресії зображень без втрат містить наступні етапи:

1. Читання початкових компонент зображення.
2. Зміна колірної моделі зображення.
3. Відділення знакової площини кольорорізнисних компонент зображення.
4. Цілочислове вейвлет-перетворення компонент зображення.
5. Розділення високочастотних трансформант вейвлет-перетворення на старші і молодші бітові площини.
6. Виділення знакових площин вейвлет-коефіцієнтів.
7. Безнадлишкове кодування знакових площин кольорорізнисних компонент зображення і вейвлет-коефіцієнтів арифметичним кодером для великих алфавітів.
8. Безнадлишкове кодування молодших бітових площин $V_{мл}$ арифметичним кодером для малих алфавітів.
9. Безнадлишкове кодування старших бітових площин $V_{ст}$ методом довжин серій.
10. Формування стиснутого файлу.

Схема методу компресії зображень показана на рис. 7.6. Службові дані складаються з наступних полів:

- ширина і висота зображення;
- тип вейвлет-перетворення;
- завдання режиму роботи методу;
- службові дані арифметичних кодерів.

Структура інформаційного поля стиснутого файлу складається з послідовності таких масивів:

- низькочастотна послідовність зображення останнього рівня розкладання;
- закодований масив 4-х молодших бітових площин;
- закодований масив 3-х старших бітових площин;
- закодований масив знаків вейвлет-коефіцієнтів;
- закодований масив знаків кольорорізнисних компонент зображення.

При апаратній реалізації методу компресії зображень можлива паралельна обробка даних, що суттєво зменшує час обробки зображення. Наприклад, можливо одночасне і незалежне кодування молодших і старших БП, незалежна і паралельна обробка знаків кольорорізнисних компонент і їх модулів (рис. 7.6).

Ширина і висота зображ.	Тип вейвлет-перетв.	Режим роботи методу стиснення	Службові дані арифметичних кодерів	Інформаційні дані
Службові дані				

Структура файлу стиснутого зображення представлена на рис.7.7.

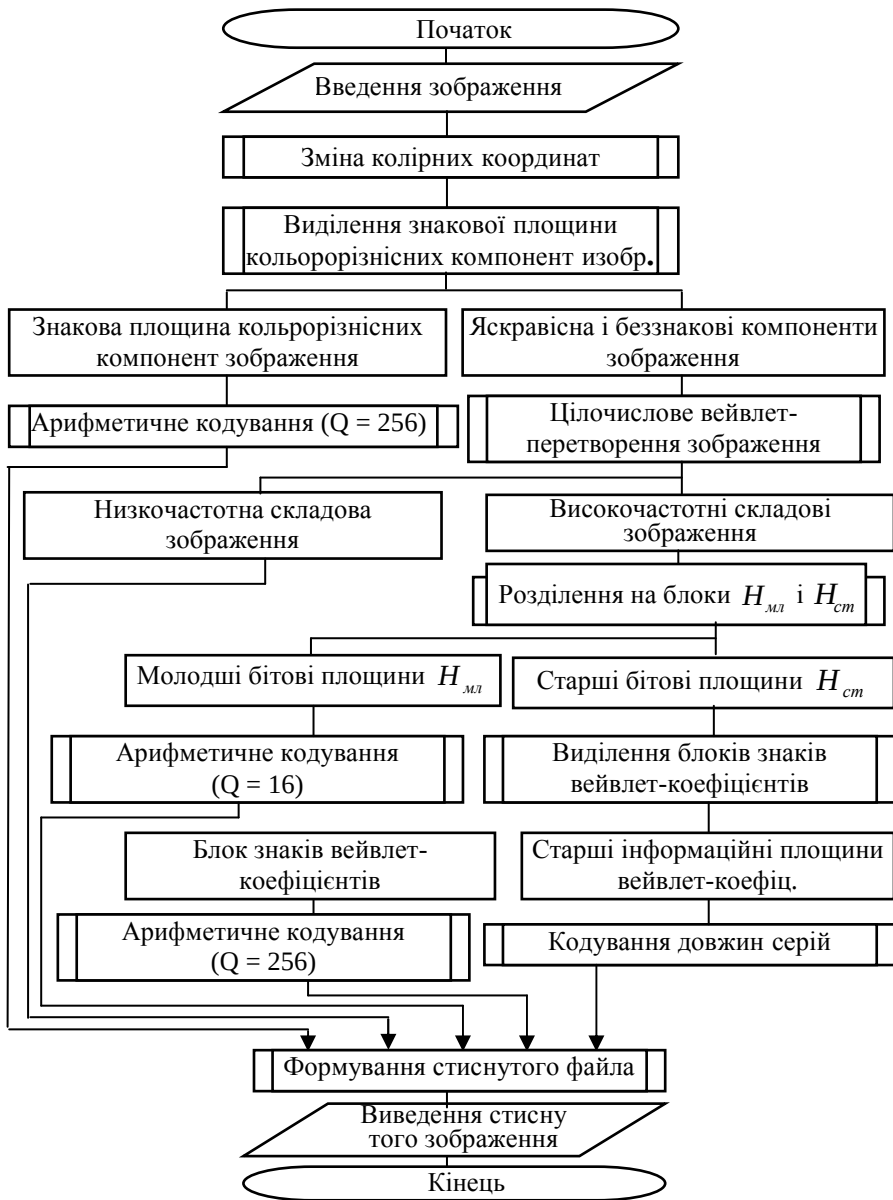


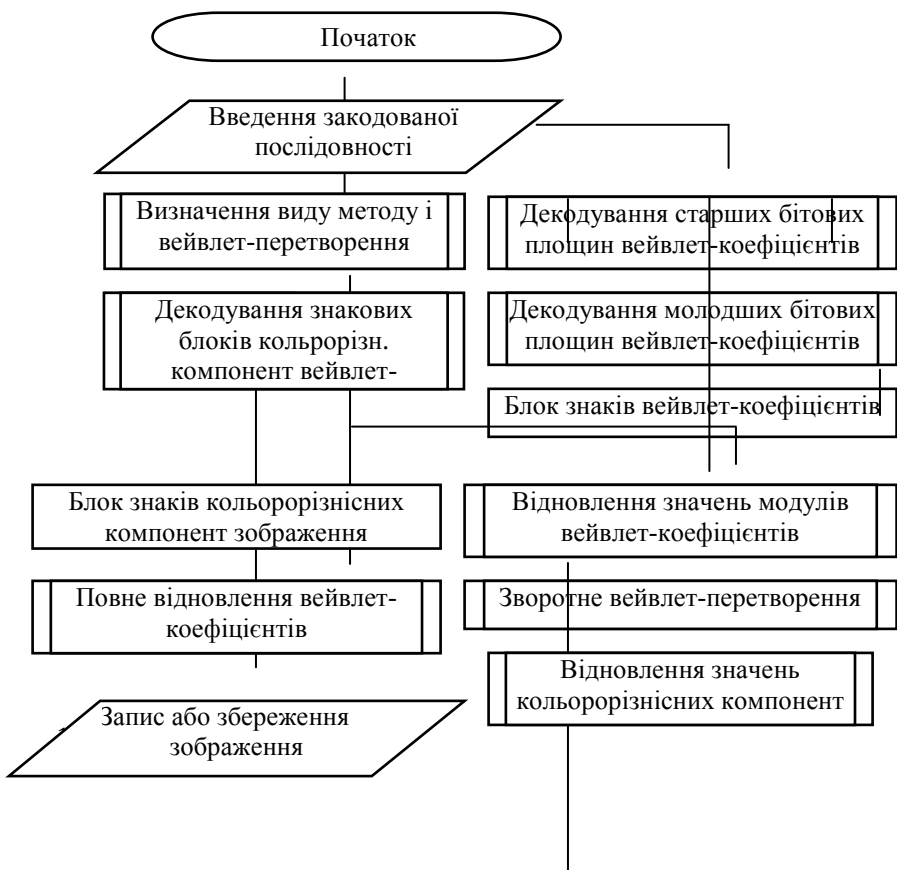
Рис. 7.7. Структура стиснутого файлу

7.1.4. Розробка процедури відновлення зображень

Будь-який метод стиснення зображень, що розробляється, не має практичної значущості без методу відновлення початкових даних.

Запропонований метод відновлення зображень складається з послідовності таких операцій:

1. Читання полів стиснутого файлу.
 2. Визначення ширини і висоти зображення, типу вейвлет-перетворення, режиму методу стиснення.
 3. Читання низькочастотної області останнього рівня вейвлет-розкладання зображення.
 4. Декодування 4-х молодших бітових площин вейвлет-коефіцієнтів.
 5. Декодування 3-х старших бітових площин вейвлет-коефіцієнтів.
 6. Декодування знаків вейвлет-коефіцієнтів.
 7. Відновлення вейвлет-коефіцієнтів.
 8. Зворотне вейвлет-перетворення.
 9. Декодування знаків кольорорізнисних компонент зображення.
 10. Відновлення початкової колірної моделі зображення.
- Схема методу відновлення зображень показана на рис. 7.8.



Висновки:

1. Аналіз існуючих колірних просторів зображень показав, що при розробці методу стиснення без втрат доцільно використовувати цілочисловий метод перетворення колірного простору, наприклад, модель $YzUzVz$ або адаптивну.

2. Використовування колірного простору $Yz/Uz/Vz/$ дозволяє підвищити ступінь стиснення в порівнянні із зображеннями, представленими в колірній моделі RGB на 15–20 %.

3. Відділення і незалежне кодування знакових площин кольорорізнісних компонент ($Uz/$ і $Vz/$) розробленої моделі дозволяє обробляти їх так само, як і складову яскравості.

4. При розкладанні зображень достатньо обмежитися трьома рівнями вейвлет-перетворення, оскільки всі подальші ітерації перетворення мало впливають на ступінь стиснення (приріст ступеня стиснення складе не більше 1 %).

5. Зміна статистичних властивостей зображення після вейвлет-перетворення викликає необхідність групування високочастотних трансформант з метою більш ефективного кодування. Отриманий метод групування трансформант вейвлет-перетворення, що базується на незалежній обробці знакових блоків вейвлет-коефіцієнтів і колірних компонент зображення, а також блоків старших і молодших бітових площин вейвлет-коефіцієнтів дозволяє більш ефективно враховувати статистичні властивості різних масивів зображення при їх кодуванні.

6. Розроблені методи перетворення колірної моделі і групування високочастотних трансформант зображення дозволили побудувати схеми стиснення (відновлення) досліджуваних даних.

7.1.5. Розробка методу арифметичного кодування джерел з великим і малим алфавітом

Відповідно до виразів (5.5) і (5.6) і схеми на рис. 5.4 байтовий потік Buf знаків кольорорізнісних компонент зображення ($Uz/$ і $Vz/$) складається із значень у діапазоні $[0; 255]$. Значення потоку знаків високочастотних вейвлет-коефіцієнтів мають такий же діапазон, як і знаки компонент $Uz/$ і $Vz/$. При виборі методу кодування були проаналізовані існуючі алгоритми упаковки перетворених відліків зображення. Для цієї мети використовують коди Хаффмана, Шеннона-Фано, Голомба, Ріда-Соломона, арифметичне кодування, кодування серій та ін. [11, 40]. Найоптимальнішим є арифметичне кодування (АК) [87, 88]. Класичний алгоритм АК, запропонований у 1976 році Й. Ріссеном [89, 90], має наступні недоліки:

- необхідність використання арифметичних операцій з плаваючою крапкою, теоретично, необмеженої точності;
- результат кодування стає відомий лише по закінченні обробки вхідного потоку;
- необхідність передавання таблиці накопичених частот вхідних символів;
- невисока швидкодія унаслідок наявності операцій множення і ділення.

Тому за основу алгоритму АК, що розробляється, для великих алфавітів був узятий прототип QM-кодера [91], частково вільний від вищезгаданих недоліків, узагальнена схема алгоритму якого наведена на рис. 7.9.

Скорочення, що використовуються в блок-схемі, означають:

$N_{i,j}$ – знаки з потоку Buf (або знаки вейвлет-коефіцієнтів) зображення;

$N_{k,l}$ – останній байт знакового потоку;

EOB (end-of-block) – символ кінця блоку.

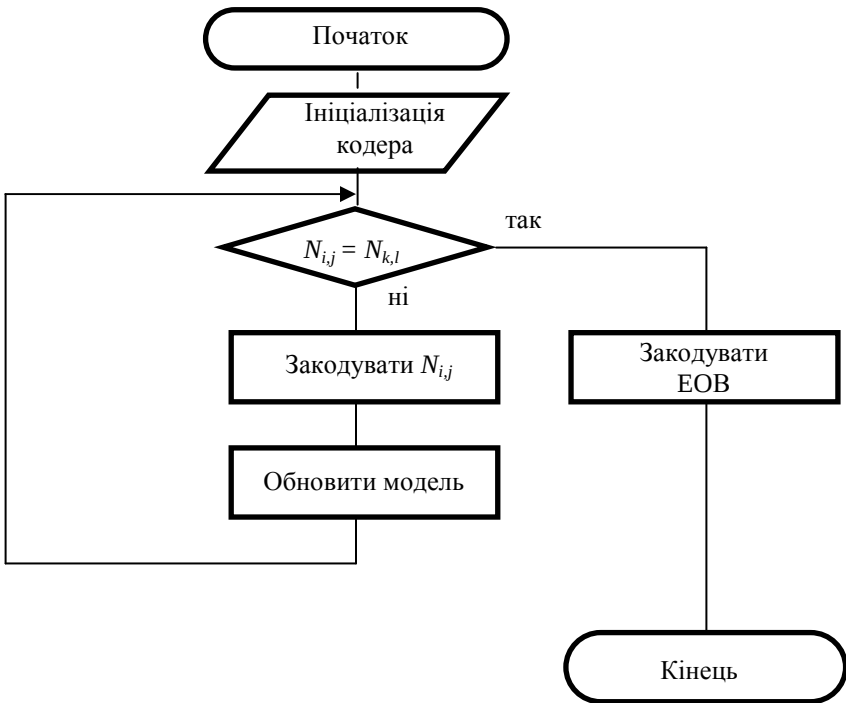


Рис. 7.9. Узагальнена блок-схема арифметичного кодування

У процесі роботи QM-кодера початковий інтервал дорівнює $F_{поч} = [0; 2^{16}-1]$, межі якого – цілі числа. У міру кодування блоку даних відповідний йому інтервал зменшується, а кількість біт для його представлення збільшується. Чергові відліки блоку скорочують величину інтервалу виходячи із значень їх частот (блок «Закодувати $N_{i,j}$ » на рис. 7.9). При завершенні кодування поточного відліку $N_{i,j}$ здійснюється оновлення моделі (блок «Обновити модель» на рис. 7.9) – збільшення на одиницю частоти даного відліку. Поновлення моделі необхідно для збереження інформації про попередні відліки. Таким чином, даний алгоритм кодування дозволяє нічого не передавати до повного завершення кодування всього блоку, декодер також не починає процес, поки не отримає стиснутий блок повністю. У випадку знаходження кодером останнього символу блоку $N_{k,l}$ обробка блоку завершується формуванням унікального символу кінця блоку (EOB).

Під час збирання статистики символів, імовірність появи того або іншого з них – дійсне число, що не дозволить точно відновити початкові дані. Тому ймовірність появи символу замінюється на частоту. Крім того, в алгоритмі використовуються цілочислові (з відкиданням дробової частини) операції множення і ділення.

Спрощена блок-схема процесу кодування одного відліку зображена на рис. 7.10 (блок «Закодувати $N_{i,j}$ » рис. 7.9)». Тут l, h відповідно нижня і верхня межі інтервалу. За величиною початковий інтервал рівний двом байтам і визначається наступним виразом:

$$F_{уч} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4, \quad (7.5)$$

де $F_1 = F_2 = F_3 = F_4$ – підінтервали, що відображають частоту виникнення того чи іншого відліку.

Початковий інтервал розбивається на чотири підінтервали (вираз (7.5)), як показано на рис. 7.10.

Умови виходу із циклу кодування:

1. За умови $l \geq F_1$ і $h < F_3$ (поточний робочий інтервал $[l; h]$ повністю міститься в середині початкового інтервалу) необхідно зменшити межі інтервалу на величину відповідних підінтервалів.

2. У протилежному випадку, небезпеки наближення l до h не виникне, тому розширюємо поточний робочий інтервал удвічі і виводимо біти кодованого потоку в буфер. Потрібно зазначити, що буфер буде заповнюватися різними бітами, в залежності від попадання поточного робочого інтервалу у відповідний підінтервал (рис. 7.11).

Використання в кодері частоти появи відліків замість імовірності і цілочислових операцій множення (ділення) при обчисленні l, h дозволяє забезпечити потрібну точність розрахунків.

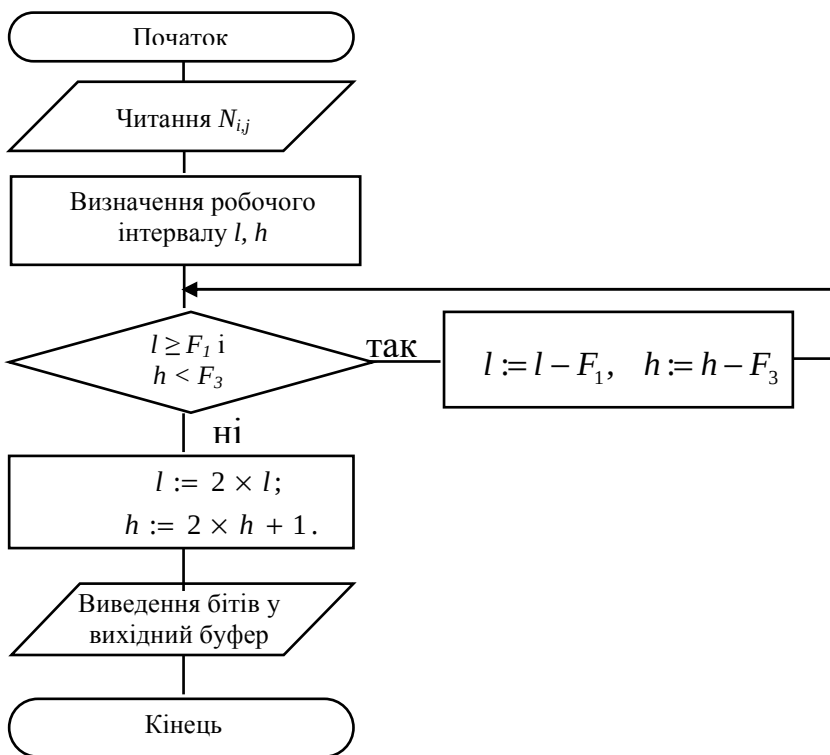


Рис. 7.10. Узагальнена блок-схема процесу кодування одного відліку

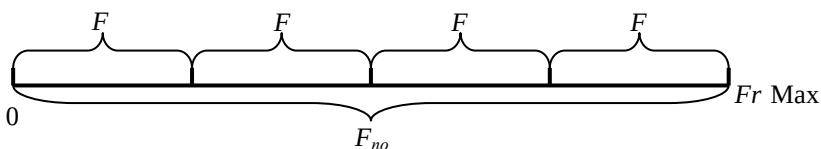


Рис. 7.11. Розбиття початкового інтервалу на підінтервали

Повний алгоритм АК знакових потоків кольорізнисних компонент і вейвлет-коефіцієнтів зображення представлено на рис. 7.12.

Для здійснення арифметичного декодування необхідна наявність статистики вхідних символів, що потребує додаткового проходження для її збору.

Статичні моделі (в яких розподіл приймається незмінним) у більшості випадків не дають максимальної якості стиснення.

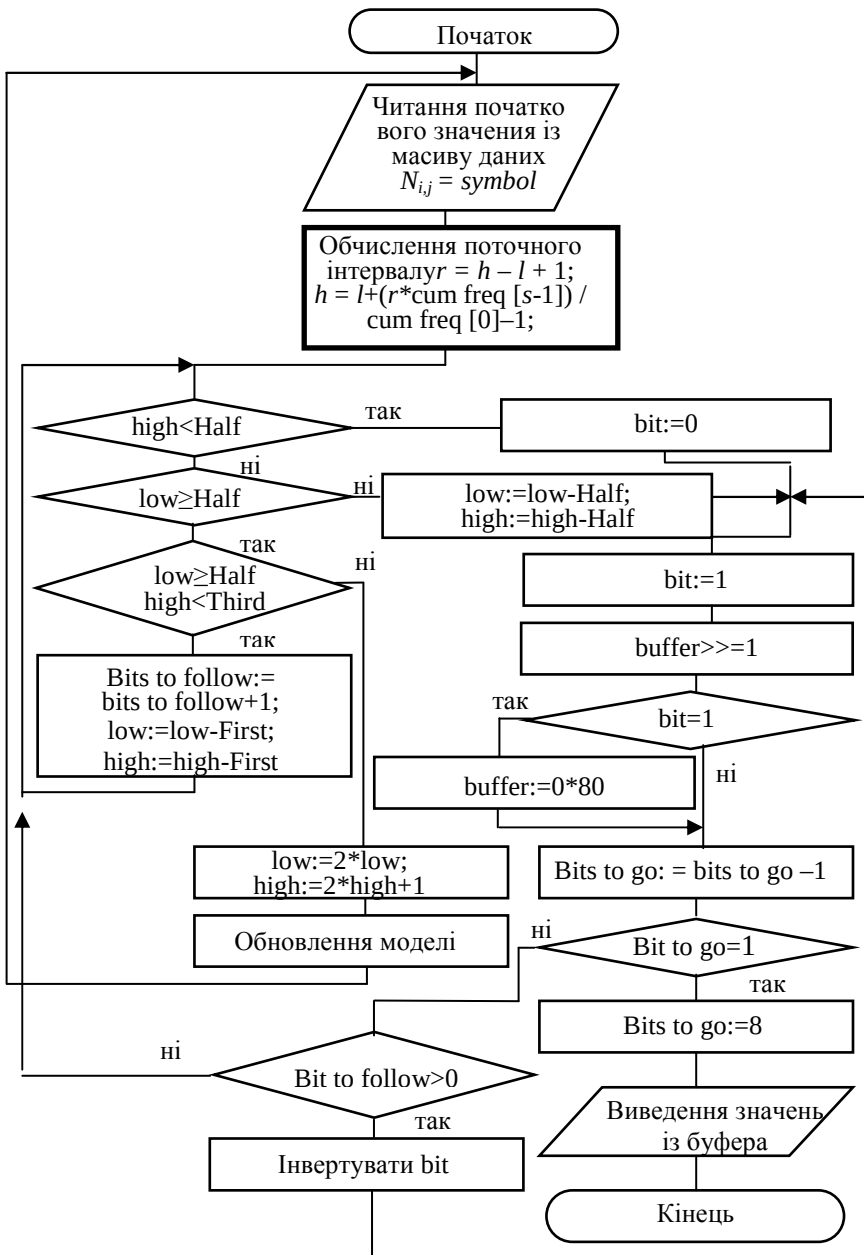


Рис. 7.12. Блок-схема арифметичного кодування

Доцільно використовувати адаптивну модель, що враховує поточний контекст потоку. Такі моделі дозволяють будувати швидкі однопрохідні алгоритми компресії, що не потребують апріорних знань про вхідний потік даних, вони будують розподіл «на льоту». Блок-схема адаптивного алгоритму оновлення згідно з новим символом наведена на рис. 7.13. Ймовірності появи відліків відтворюються в моделі як цілочислові значення лічильників частот, а частоти, які накопичуються, зберігаються в масиві f_s . Цей масив зворотний, і лічильник загальної частоти, що застосовується для нормалізації усіх частот, розміщується в $f_s(0)$. Частоти, які накопичуються, не повинні перевищувати встановленої величини, а реалізація моделі повинна попереджувати переповнення відповідним масштабуванням.

Необхідно також хоча б на одиницю забезпечити відмінність між двома сусідніми значеннями $f_s(i)$, інакше поточний відлік не може бути переданим. Дана модель змінює частоти вже знайдених у блоці відліків. На початку всі n (у даному випадку $n = 256$) лічильників, крім першого, рівні одиниці, що відображає відсутність початкових даних, але в процесі перегляду кожного вхідного символу вони змінюються, наближуючись до потрібних частот. При досягненні лічильником $f_s(0)$ значення $F_{\text{исх}}/4$ здійснюється його обнулення, а всі інші значення лічильників зменшуються вдвічі. Далі відповідний лічильник збільшується на одиницю, виконуючи оновлення моделі. На останньому етапі здійснюється упорядкування значень лічильників у порядку зменшення для прискорення процесу декодування.



Рис. 7.13. Блок-схема адаптивного алгоритму оновлення відліків

І кодер, і декодер використовують однакові початкові значення (рівні лічильники) і однакові алгоритми оновлення, що дозволить їх моделям завжди залишатися на одному рівні. Кодер одержує черговий символ, кодує його і змінює модель. Декодер визначає черговий символ на основі своєї поточної моделі, а потім поновлює її. Повна блок-схема адаптивної моделі поновлення відліків подана на рис. 7.14.

Введення початкових даних здійснюється за допомогою двобайтового буфера v . Вибір величини буфера пов'язаний з оптимальною швидкістю роботи кодера (декодера). При кодуванні оброблені біти переміщуються у верхню частину буфера. Спочатку кодер заповнює v одержаними бітами.

Після визначення наступного вхідного символу декодером здійснюється виведення непотрібних, однакових в l і h старших біт зсувом v на цю кількість разрядів.

Варіант арифметичного кодера на рис. 7.10 призначений для обробки даних одним блоком (наприклад, текстовий файл). У нашому випадку один блок ($K=1$) може складатися із ВЧ трансформант колірних компонент зображення всіх рівнів вейвлет-розкладення.

Висновки:

1. Аналіз існуючих методів безнадлишкового кодування показав, що найкращим для компресії потоку знаків кольорорізницевих компонент і вейвлет-коефіцієнтів зображення є арифметичне кодування.

2. На основі QM-кодера розроблено метод арифметичного кодування, що відрізняється від існуючих можливістю обробки даних з різною потужністю алфавіту.

3. Розроблено алгоритм завершення арифметичного кодування для застосування його в методі обробки трансформант зображення, поданих незалежними блоками.

7.1.6. Реалізація інтерфейсу інформаційної технології підтримки процесів компресії і відновлення зображень у телекомунікаційних мережах

Програмна реалізація методу компресії зображень складається із наступних підпрограм (додатки Б і В):

- підпрограми зміни колірних компонент;
- процедури формування знакового потоку кольорорізницевих компонент U_z , V_z і вейвлет-коефіцієнтів;
- підпрограми виконання прямого цілочислового вейвлет-перетворення ВП 2,2 і ВП 5,3;
- процедури вирівнювання і розбиття ВЧ трансформант ВП на старші і молодші БП;

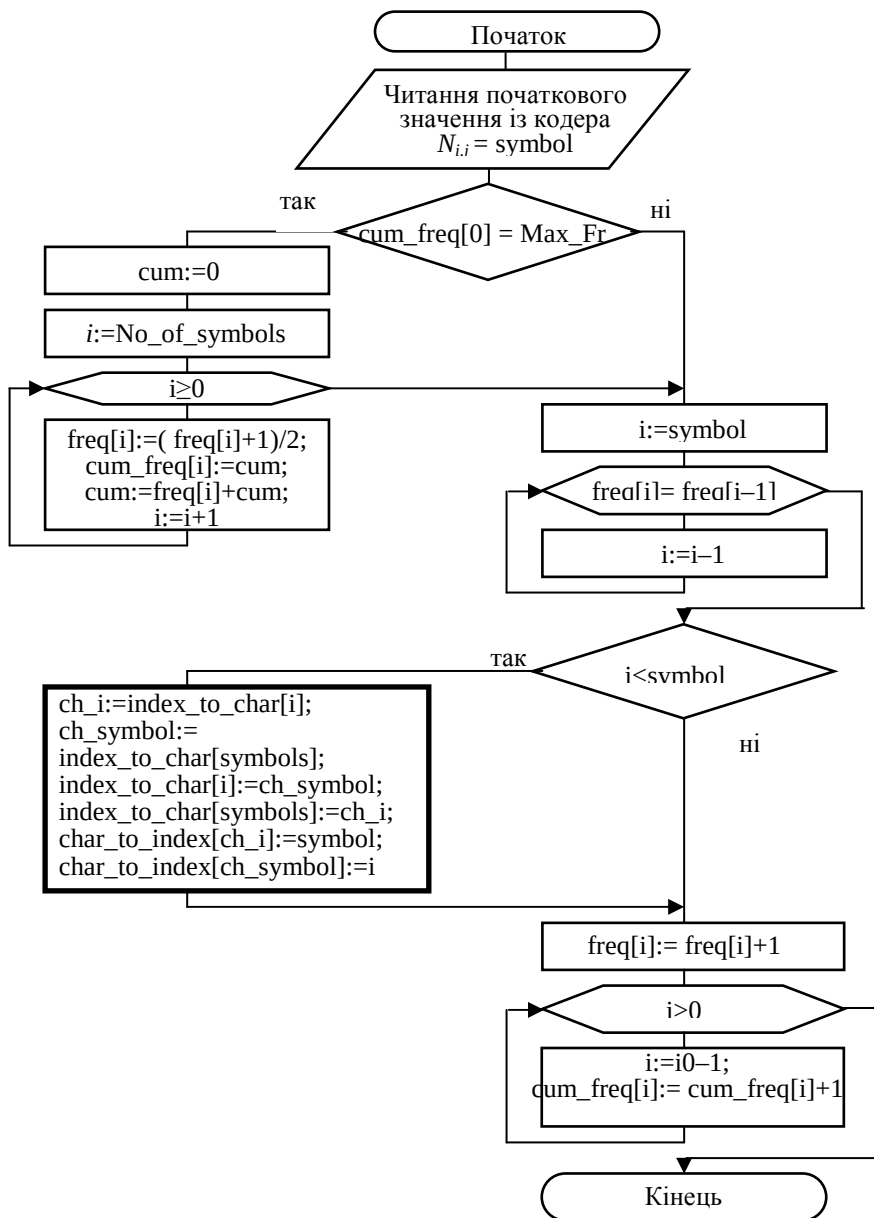


Рис. 7.14. Повна блок-схема адаптивної моделі поновлення відліків

- підпрограми арифметичного кодування знакових потоків кольорорізнцевих компонент U_z , V_z і вейвлет-коефіцієнтів, а також молодших БП модулів вейвлет-коефіцієнтів;

- підпрограма кодування старших БП модулів вейвлет-коефіцієнтів зображення.

Програмна реалізація арифметичного кодування для АК з нерозділеними БП ($Q = 256$) і АК з розділеними БП ($Q = 16$) представлена чотирма підпрограмами (додаток Г):

1. Підпрограма визначення параметрів АК з розділеними і нерозділеними БП.

2. Підпрограма реалізації алгоритму арифметичного кодування.

3. Підпрограма алгоритму адаптивної моделі арифметичного кодування.

4. Процедури введення/виведення бітів після арифметичного кодування.

Програмна реалізація інформаційної технології підтримки відновлення зображень. Програмна реалізація методу відновлення зображень складається із таких підпрограм (додаток Д):

- підпрограма арифметичного декодування знакових потоків і молодших БП вейвлет-коефіцієнтів;

- підпрограма декодування старших БП вейвлет-коефіцієнтів;

- підпрограми виконання зворотного ВП 2,2 і ВП 5,3 з процедурами відновлення 8-розрядних і перетворення від'ємних значень вейвлет-коефіцієнтів в прямий код;

- підпрограми декодування знакових блоків з відновленням знаків кольорорізнцевих компонент і вейвлет-коефіцієнтів зображення, а також відновлення компонент колірної моделі RGB.

Інтерфейс інформаційної технології підтримки процесів стиснення і відновлення зображень зображений на рис. 14 додатку А.

Введення початкового зображення здійснюється двома способами: за допомогою командного рядка і відповідної кнопки головного вікна програми. Операції стиснення, відновлення та зберігання зображення також виконуються натисканням кнопок 2, 3 і 4 відповідно. У лівій частині головного вікна розташоване поле для вибору виду ВП (або ВП Хаара, або ВП Коена-Добеші-Фово). Подання початкового і відновленого зображення показано в нижній частині рис. 14 додатку А.

Для оцінювання відповідності початкового зображення відновленому була розроблена програма, що дозволяє розраховувати значення співвідношення сигнал/шум, пікове співвідношення сигнал/шум у відновленому зображенні, а також величину середньоквадратичного відхилення і дисперсії. Головне вікно цієї програми показано на рис. 15.

Розроблений програмний продукт є функціонально завершеним та дозволяє здійснювати повноцінну компресію кольорових фотореаліс-

тичних зображень формату BMP. Після процедури компресії формується архів із розширенням *.rks, який після завантаження його у відповідну форму програми буде відновлено до початкового (нестиснутого) без втрат якості.

Розроблений метод компресії зображень без втрат інформації за ступенем стиснення перевершує формат PNG на 15–20 %, формат JPEG-LS – на 3–5 %, при цьому час стиснення (відновлення) даних приблизно однаковий.

7.2. Приклад реалізації стеганографічного алгоритму при використанні зображення-контейнера

7.2.1. Розробка методу приховування даних при дії активного противника

Як було зазначено раніше, при приховуванні даних від порушника, який застосовує активні атаки, метод прямої заміни біт інформації не відповідає умовам відновлюваності інформації. Труднощі полягають у тому, що невеликі зміни значень колірних компонент зображення призводять до непередбачених змін вбудованого повідомлення.

Розглянемо метод вбудовування інформації в бітові площини [92]. Вбудовування відбувається в найменш значущі області зображення, в даному випадку в молодшу БП, яка майже не несе в собі інформації і являє собою шум. У методах компресії з втратами інформації перетворенню підлягають ті ж самі області зображення, що використовуються в методах приховування. Тобто при застосуванні будь-якого методу стиснення з втратами (JPEG, GIF) молодша БП буде повністю модифікована.

Під час дослідження методу прямої заміни біт у БП було виявлено, що можливе вбудовування в старші БП до 3–4-ї площини, які вже в більшості випадків не є шумом і являють собою приблизну копію зображення [93]. Таким чином, здавалося б можливим вбудовування повідомлень у ці БП. З метою аналізу можливості розробки такого методу було проведено аналіз зміни БП в результаті застосування процедури компресії зображення форматом JPEG-2000. Суть аналізу полягає в порівнянні відповідних біт площини до, та після перетворення, а також обчисленні коефіцієнта спотворень за формулою:

$$K_{ном} = \frac{\sum_{i=1}^N |(I_i \oplus \tilde{I}_i)|}{N}, \quad (7.6)$$

де $I_i, \tilde{I}_i$ – інформаційні біти вбудованого та отриманого повідомлення відповідно;

N – кількість впроваджених біт повідомлення;

$\oplus$ – сума за модулем 2.

Результати аналізу тестового пакета Kodak Image з 24 зображень наведені у табл. 7.4.

Таблиця 7.4

Коефіцієнт спотворення бітових площин при стисненні форматом JPEG-2000 (у відсотках)

Коефіцієнт компресії	K = 10				K = 5			
Компонента	Червона	Зелена	Синя	Середнє значення	Червона	Зелена	Синя	Середнє значення
1-ша площ.	49,48	48,97	49,79	49,41	49,36	48,41	49,75	49,17
2-га площ.	46,71	44,22	47,93	46,29	41,93	36,25	44,88	41,02
3-тя площ.	34,71	31,20	36,65	34,18	23,68	19,20	26,99	23,29
4-та площ.	20,33	17,62	21,91	19,95	11,78	9,39	13,55	11,57
5-та площ.	10,44	8,92	11,42	10,26	5,96	4,67	6,85	5,83
6-та площ.	5,29	4,51	5,55	5,12	3,02	2,38	3,30	2,90
7-ма площ.	2,50	2,05	2,49	2,35	1,43	1,09	1,51	1,34
8-ма площ.	1,17	0,98	1,09	1,08	0,71	0,55	0,76	0,68

Результати дослідження показують, що перша і друга площина взагалі не можуть застосовуватися для приховування даних, тому що коефіцієнт спотворення близький до 50 %. Крім того, необхідно звернути увагу на те, що навіть старша БП буде спотворена.

Проблема спотворення старшої БП пояснюється на такому прикладі: нехай значення колірної компоненти було 127, або у двійковому вигляді $(01111111)_2$. При зворотному перетворенні з втратами значення може змінитися на 128, що у двійковому вигляді представляється як $(10000000)_2$. Як бачимо, змінилося значення в усіх бітових площинах (практично відбулася інверсія байта).

Коефіцієнти спотворення чотирьох старших БП задовольнили б вимоги, але приховування даних у такі площини не є можливим через значні візуальні спотворення, які при цьому відбуваються.

Отже, застосування методу приховування в БП шляхом прямої заміни не є перспективним на сьогоднішній день, тому що інформацію про зображення несуть не площини, а числові значення колірних компонент. Таким чином, необхідно розробляти метод, який спирається на маніпулювання саме зі значеннями колірних компонент зображення.

Проаналізуємо характер зміни значень колірних компонент у результаті компресії форматом JPEG-2000. З метою оцінювання впливу формату JPEG-2000 на зображення пропонується застосувати два показники. Перший показник буде характеризувати максимальне відхилення значень колірних компонент між початковим та стиснутим зображенням M :

$$M = \max \left(\left| I_{i,j} - \tilde{I}_{i,j} \right| \right) \text{ при } i \in N, j \in K, \quad (7.7)$$

де $I_{i,j}$ та $\tilde{I}_{i,j}$ – значення колірної компоненти зображення;

N та K – відповідно висота та ширина зображення.

За допомогою цього показника можна оцінити, наскільки сильно агент стиснення може змінити зображення.

Для деяких зображень з тестового пакета в табл. 7.5 наведені значення показника M при різних коефіцієнтах компресії форматом JPEG-2000.

Таблиця 7.5

Значення максимального відхилення колірних компонент M у початковому та стиснутому зображеннях (у рівнях градації яскравості)

Зображення	JPEG2000 (K = 5)				JPEG2000 (K = 10)			
	Червона	Зелена	Синя	Середнє значення	Червона	Зелена	Синя	Середнє значення
Land_ahoy	5	5	8	6	8	6	12	8,7
Boat_Zentime	6	4	8	6	15	11	23	16,3
Hats	7	4	7	6	7	5	7	6,3
Mountain_stream	13	9	19	13,7	27	25	45	32,3
Collor_girl	51	49	49	49,7	51	49	49	49,7
Середнє значення (за пакет)	10,93	9,14	11,86	10,64	16,71	14,79	21,50	17,67

Як видно з табл. 7.5, у цілому значення M не перевищує 6 рівнів квантування (64 за амплітудою). У середньому ж значення відхилення складає менше 4-х рівнів квантування (16 за амплітудою), що відповідає четвертій площині. Але статистичні дані табл. 7.5 свідчать про те, що значення M залежить від конкретного зображення і може лежати в межах від 6 до 60. Однак кількість значних відхилень ($M > 6$),

як наприклад, у зображенні «Color_girl» у цілому для будь-якого зображення не перевищує 5 %. Тому такий параметр не надає об'єктивної характеристики методу стиснення і виникає необхідність застосування іншого.

Спочатку проаналізуємо відносну кількість пікселів, які змінили своє значення на 0, 1, 2, 3 і т.д. до 255 рівнів градації яскравості. Для прикладу візьмемо зображення з найгіршим показником M «Color_girl»:

Таблиця 7.6

Відносна кількість відхилень між початковим та стисненим зображенням «Color_girl» (у відсотках)

Значення відхилення	JPEG2000 (K = 5)			JPEG2000 (K = 10)		
	Червона	Зелена	Синя	Червона	Зелена	Синя
[0]	26,481	37,05	24,861	31,94962	43,96820	29,45709
[1]	40,65069	39,48313	39,11362	44,71283	41,87927	42,79200
[2]	21,06222	16,54663	22,05353	16,89479	10,67988	19,26346
[3]	7,73900	4,63308	9,10746	4,26432	1,93481	5,81309
[4]	2,40606	1,21002	3,03116	1,09762	0,61671	1,52486
[5]	0,77184	0,43767	0,95596	0,42165	0,34154	0,49515
[49]	0	0,00025	0,00025	0	0,00025	0,00025
[51]	0,00025	0	0	0,00025	0	0
[56]–[255]	0	0	0	0	0	0

Як видно з табл. 7.6, відносна кількість пікселів, які змінили своє значення на величину $[x]$, тим менша, чим більше значення $[x]$. Такий аналіз більш точно характеризує спотворення, які вносяться при компресії зображення, ніж показник M (вираз 7.7). Проте при аналізі статистичних характеристик значної кількості зображень незручно користуватися табл. 7.6 для кожного файлу окремо, тому пропонується ввести новий показник μ – «коефіцієнт 95 %».

Показник μ буде відображати ту кількість рівнів градації, на яку змінилися пікселі зображення, причому таких змін не менше 95 %. Пояснимо детальніше. Для файлу «Color_girl», стиснутим з коефіцієнтом стиснення 5, μ дорівнює 4, тобто 95 % пікселів зображення у кожній компоненті змінили своє значення не більше, ніж на 4 рівні яскравості (наприклад, для червоної компоненти $[0] + [1] + [2] + [4] = 26,48 + 40,65 + 21,06 + 7,74 = 95,84$ %).

Така характеристика більш точно відображає характер зміни зображення в результаті стиснення.

У результаті аналізу пакета Kodak Image за коефіцієнтом μ були отримані наступні дані (табл. 7.7).

Таблиця 7.7

Значення μ між початковими та стиснутими зображеннями (у рівнях градації яскравості)

Зображення	JPEG2000 (K = 5)				JPEG2000 (K = 10)			
	Червона	Зелена	Синя	Середнє значення	Червона	Зелена	Синя	Середнє значення
Land_ahoy	2	2	3	2,33	3	2	3	2,67
Boat_Zentime	2	2	3	2,33	4	4	5	4,33
Hats	2	2	3	2,33	2	2	3	2,33
Mountain_stream	2	2	3	2,33	9	9	11	9,67
Collor_girl	3	3	4	3,33	3	3	3	3,00
Середнє значення (за пакет)	2,21	2,07	3,07	2,45	4,36	3,86	4,71	4,31

З табл. 7.7 можна зробити висновок, що для чотирьох зображень з п'яти значення μ не перевищує 3 та 5 рівнів градації яскравості (при компресії з коефіцієнтом стиснення 5 та 10 відповідно).

Таким чином, є можливість розробити метод вбудовування даних у зображення, який би дозволив спотворювати контейнер не більше ніж на 3 та 5 рівнів яскравості у 95 % пікселів зображення.

На основі цих досліджень було запропоновано новий метод стега-нографічного приховування повідомлень у зображеннях, що носить назву «метод центрування значень колірних компонент зображення». Сутність методу полягає в наступному [94, 95].

Діапазон значення колірної компоненти лежить в межах $[0; 255]$. Необхідно його розділити на N піддіапазонів. Кількість N залежить від робастності, яку необхідно надати методу. Кожен з піддіапазонів матиме рівні верхню та нижню частину. Назвемо їх «частина одиниці» ($\mathcal{C}_1$) та «частина нуля» ($\mathcal{C}_0$) відповідно (рис. 7.15).

Декодування буде відбуватися наступним чином: якщо значення компоненти лежить у межах $\mathcal{C}_0$ будь-якого піддіапазону, то декодується 0, якщо у $\mathcal{C}_1$ – 1. Таким чином, необхідно розробити метод вбу-

довування, який би перерозподіляв значення колірних компонент відповідно до секретного повідомлення, що вбудовується. Причому бажано, щоб після компресії ці значення не перевищили меж $\mathcal{C}_0$ та $\mathcal{C}_1$. Тобто при вбудовуванні біта «1» значення пікселя необхідно «розмістити» у центрі $\mathcal{C}_1$, а при вбудовуванні «0» – у центрі $\mathcal{C}_0$ відповідного піддіапазону.

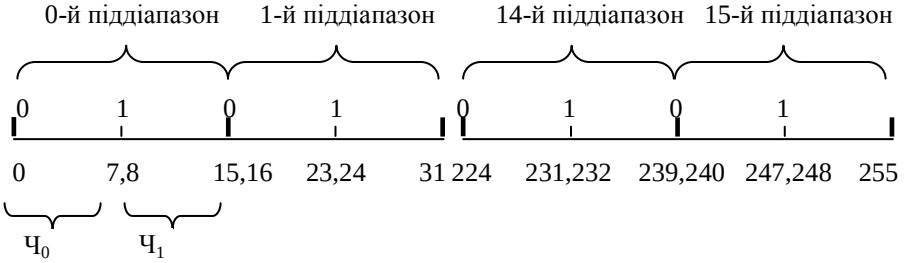


Рис. 7.15. Схема розподілу діапазону значень колірної компоненти на 16 піддіапазонів

Кількість $N = 16$ було обрано експериментальним шляхом як таке, що дозволяє розподілити діапазон значень колірної компоненти на рівні частини і забезпечує достатню робастність та прихованість.

Отже, вбудовування інформації відбувається за таким правилом:

$$x_{i,j} = \begin{cases} w \cdot \left(\frac{4 \cdot n + 1}{4} \right), & \text{якщо } b_k = 0, \\ w \cdot \left(\frac{4 \cdot n + 3}{4} \right), & \text{якщо } b_k = 1; \end{cases} \quad (7.8)$$

де $x_{i,j}$ – значення колірної компоненти;

$w = 256/N$ – інтервал робастності (інтервал приховування);

n – номер піддіапазону, якому належить $x_{i,j}$;

b_k – біт, що вбудовується.

Декодування відбувається так:

$$b_k = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \left\{ \frac{\tilde{x}_{i,j}}{w} \right\} \geq \frac{w}{2}, \\ 0, & \text{якщо } \left\{ \frac{\tilde{x}_{i,j}}{w} \right\} < \frac{w}{2}; \end{cases} \quad (7.9)$$

де $\tilde{X}_{i,j}$ – значення колірної компоненти після стиснення;

$\left\{ \frac{a}{b} \right\}$ – залишок від ділення.

Розглянемо приклад.

Нехай необхідно приховати 1 байт повідомлення, наприклад, $(10011101)_2$, а колірна компонента складається зі значень 7, 4, 5, 9, 14, 18, 22, 26. Довжина інтервалу приховування дорівнює 16. Першим необхідно приховати біт «1» в елемент колірної компоненти зі значенням 7. З рис. 7.15 видно, що значення 7 належить першому піддіапазону. Враховуючи те, що приховується біт «1», то відповідно до формули (7.8) значення 7 необхідно «центрувати» у верхній частині $\mathcal{C}_0$ нульового піддіапазону. Запишемо цю операцію наступним чином: $7(1) = 16 \cdot 3/4 = 12$. Аналогічно для наступного біта «0»: $4(0) = 4$. Далі маємо:

$5(0) = 4;$
 $9(1) = 12;$
 $13(1) = 12;$
 $18(1) = 28;$
 $22(0) = 20;$
 $26(1) = 28.$

Після стиснення зображення значення пікселів можуть бути наступними: 10, 6, 6, 11, 13, 25, 22, 23. При декодуванні згідно з виразом (7.9) отримаємо (10011100) . При цьому відбулося спотворення останнього біта, тому що елемент зі значенням 28 зменшився на 5, а число 23 вже належить інтервалу $\mathcal{C}_1$. Це і є ті випадки, коли з'являються спотворення у декодованому повідомленні.

Суттєвою перевагою цього методу є відносно великий об'єм даних, які приховуються. Він складає $1/8$ від об'єму зображення, як і для методу заміни молодших біт елементів колірних компонент зображення. Проте збільшення робастності, як буде показано далі, було досягнуто за рахунок зменшення прихованості.

Таким чином, вбудовування даних у зображення, які стискаються методами з втратами, доволі складне завдання і вимагає детального аналізу формату компресії графічних файлів. Спотворення, які вносяться форматом JPEG-2000, у загальному випадку не перевищують 3–5 рівнів яскравості колірних компонент. На основі цих даних було розроблено метод вбудовування, який зберігає повідомлення при стисненні [94, 95].

7.2.2. Аналіз стеганографічного методу центрування значень колірних компонент зображення

Оцінювання розробленого методу проводилася на вищезазначеному пакеті тестових зображень Kodak Image [63] з 24-х зображень. Компресія здійснювалась методом JPEG-2000 з коефіцієнтами стиснення 5 та 10. Вбудовування відбувалося з шириною інтервалу робастності $w = 16$ та $w = 32$.

Перш за все було проведено суб'єктивне (візуальне) оцінювання методу у відповідності до табл. 3.2. При вбудовуванні з шириною інтервалу робастності $w = 16$ у синю та червону компоненти спотворень зображення помітно не було (суб'єктивно оцінені на «5»). При вбудовуванні в зелену компоненту для 70 % зображень спотворення досить помітні («3» бали), а для 20 % – помітні при наявності початкового зображення («4» бали).

При використанні інтервалу робастності $w = 32$ для 100 % зображень вбудовування в зелену компоненту стає неможливим через спотворення, які заважають сприймати зображення («2» бали). Для синьої та червоної компонент – у середньому оцінка 4,21 та 3,43 бали відповідно.

Більш детальний аналіз показав, що спотворення більш помітні у зображеннях з меншою ймовірністю колірного перепаду. Цей факт пояснюється тим, що при збільшенні частоти колірного перепаду зменшується кількість монотонних областей. У третьому розділі було сказано, що чутливість людського ока до високонасичених областей менша, ніж до низьконасичених (ефект маскування). Тому наявність спотворення початкового сигналу менш помітна в зображеннях з великою частотою колірного перепаду (0,8 і більше).

Таким чином, можна зробити висновок, що збільшення насиченості зображення приводить до збільшення прихованості методу від візуальної атаки.

Необхідно звернути увагу на те, що приховування в зелену компоненту розробленим методом ускладнене. Причина особливої помітності спотворень зеленої компоненти наступна. Як зазначалося вище, людське око має особливу чутливість у діапазоні хвиль 510–530 нм, що відповідає зеленому кольору. Отже, невеликі зміни зеленого кольору (1–3 рівні градації яскравості) людиною сприймаються значно чутливіше, ніж аналогічні зміни в синій або червоній компоненті. Колірна модель RGB не враховує такого факту, оскільки для представлення всіх кольорів відводиться 8 рівнів квантування. Тому і стають помітними ці спотворення зеленої компоненти. Виходом з такої ситуації може стати застосування інших колірних моделей (наприклад, YUV, YIQ та ін.), які враховують особливості людського сприйняття кольорів.

Іншими показниками оцінювання методу (об'єктивний аналіз спотворень) – середні значення середньоквадратичного відхилення σ (вираз 2.5) та пікового співвідношення сигнал/шум $P_{s/n}^{\max}$ (вираз 2.6), які наведені в табл. 7.8 та табл. 7.9.

Як видно з табл. 7.8 та табл. 7.9, без вбудовування повідомлення ($w = 0$) значення σ невеликі (1,3 та 2,2 рівня квантування при компресії з коефіцієнтом $k = 5$ та $k = 10$ відповідно). Вбудовування повідомлення призводить до збільшення σ до 6,2 та 12,4 рівня квантування. При цьому необхідно звернути увагу, що стиснення причиняє незначне зменшення значення σ (на 0,8 % та 5,6 % для $k = 5$ та $k = 10$ відповідно при вбудовуванні з інтервалом робастності $w = 16$, а також на 0,5 % та 5,21 % при вбудовуванні з інтервалом робастності $w = 32$).

Таблиця 7.8

Середні значення середньоквадратичного відхилення σ при різних інтервалах вбудовування w та коефіцієнтах стиснення k

	Інтервал робастності	Коефіцієнт стиснення	σ , рівнів квантування			
			червона	зелена	синя	середнє значення
Без вбудовування	$w = 0$	$k = 5$	0,373	0,111	0,543	0,353
		$k = 10$	1,144	0,954	1,260	1,125
З вбудовуванням	$w = 16$	$k = 1$	2,628	2,632	2,631	2,633
		$k = 5$	2,577	2,676	2,622	2,612
		$k = 10$	2,448	2,568	2,504	2,493
	$w = 32$	$k = 1$	3,638	3,624	3,632	3,633
		$k = 5$	3,596	3,663	3,625	3,614
		$k = 10$	3,449	3,529	3,477	3,453

Для пікового співвідношення сигнал/шум спостерігається збільшення значення σ на 0,2 % та 2,4 % для $k = 5$ та $k = 10$ відповідно при вбудовуванні з інтервалом робастності $w = 16$, а також на 0,15 % та 3,42 % при вбудовуванні з інтервалом робастності $w = 32$). Зменшення спотворень стего, що підлягає компресії, пояснюється усередненням значень трансформант після стиснення (зменшення збитковості). При цьому значення колірних компонент також усереднюються, тобто ентропія зображення в цілому зменшується.

Необхідно також звернути увагу, що збільшення інтервалу робастності вдвічі призводить до збільшення σ приблизно на 1 рів. кв.

Таблиця 7.9

Середні значення пікового співвідношення сигнал/шум при різних інтервалах вбудовування w та коефіцієнтах стиснення k

	Інтервал робастності	Коефіцієнт стиснення	PSNR, дБ			
			червона	зелена	синя	середнє значення
Без вбудовування	$w = 0$	$k = 5$	45,96	47,53	44,93	46,14
		$k = 10$	42,00	43,25	41,34	42,20
З вбудовуванням даних	$w = 16$	$k = 1$	32,28	32,31	32,29	32,29
		$k = 5$	32,41	32,62	32,02	32,35
		$k = 10$	33,13	33,40	32,69	33,08
	$w = 32$	$k = 1$	26,26	26,23	26,31	26,27
		$k = 5$	26,38	26,48	26,08	26,31
		$k = 10$	27,34	27,37	26,89	27,20

Цей факт стає зрозумілим, якщо врахувати, що квантування ведеться за степенями двійки, а $w = 16$ удвічі менше за $w = 32$, тобто рівно на один рівень квантування.

Третій показник – коефіцієнт спотворень або помилок $K_{\text{ном}}$ (вираз 7.11) буде оцінювати спотворення повідомлення, які вносить агент стиснення. Під час аналізу було виявлено, що кількість помилок, внесених при компресії, залежить від частоти кольорового перепаду зображення, як і у випадку візуального оцінювання (табл. 7.10 та табл. 7.11).

Таблиця 7.10

Суб'єктивна оцінка та залежність коефіцієнта помилок $K_{\text{ном}}$ від частоти кольорового перепаду зображення при різних коефіцієнтах стиснення k ($w = 16$)

Зображення	Частота перепаду	Суб'єктивна оцінка	Коефіцієнт помилок $K_{\text{ном}}$, %	
			JPEG2000 ($k = 5$)	JPEG2000 ($k = 10$)
Hats	0,831	3	3,38	23,65
Collor_girl	0,855	3	5,64	29,32
Zentime at the peer	0,897	3	9,29	35,69
Boat_Zentime	0,931	4	10,17	37,03
Mountain_stream	0,973	5	25,38	47,32

Як видно з табл. 7.10 та табл. 7.11, значення коефіцієнта помилок $K_{\text{пом}}$ тим менше, чим менша частота колірного перепаду. Враховуючи те, що зменшення частоти колірного перепаду веде до зменшення прихованості, можна зробити висновок про підтвердження залежності робастності від прихованості, про яку було описано в розділі 2.

Таблиця 7.11

Суб'єктивна оцінка та залежність коефіцієнта помилок $K_{\text{пом}}$ від частоти колірного перепаду зображення при різних коефіцієнтах стиснення k ($w = 32$)

Зображення	Частота перепаду	Суб'єктивна оцінка	Коефіцієнт помилок $K_{\text{пом}}$ %	
			JPEG2000 ($k = 5$)	JPEG2000 ($k = 10$)
Hats	0,831	3	0,465	13,464
Collor_girl	0,855	3	1,217	19,402
Zentime at the peer	0,897	3	1,867	25,956
Boat_Zentime	0,931	4	2,222	27,865
Mountain_stream	0,973	4	16,685	43,689

На рис. 7.16 наведена залежність робастності ($K_{\text{роб}} = 100 - K_{\text{пом}}$) від частоти колірного перепаду:

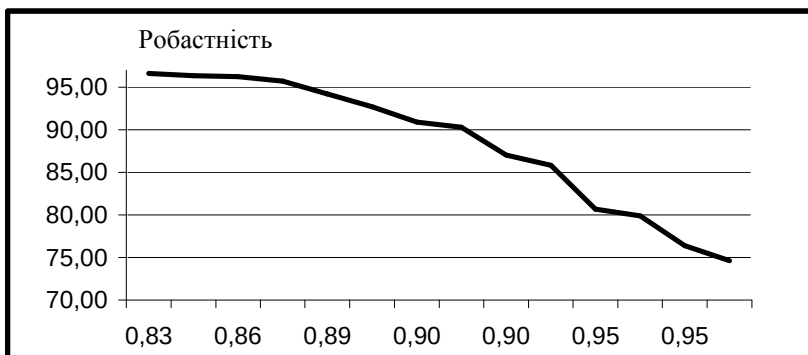


Рис. 7.16. Залежність робастності методу від частоти колірного перепаду зображення

Таким чином, для даного методу збільшення частоти колірного перепаду призводить до зменшення робастності. Це пов'язано з особливостями роботи формату компресії: для сильнонасичених областей зображення агент стиснення намагається усереднити значення трансформант перетворення, що, у свою чергу, призводить до зміни значень

колірних компонент. Чим більш насичена область вбудовування, тим сильніше модифікуються колірні компоненти, що, в свою чергу, призводить до втрати вбудованого повідомлення.

Середні значення коефіцієнта спотворення в залежності від інтервалу вбудовування, коефіцієнта стиснення та частоти колірного перепаду наведені в табл. 7.12.

Отже, коефіцієнт помилок збільшується зі збільшенням коефіцієнта компресії формату, частоти колірного перепаду та зменшенням інтервалу вбудовування. Розроблений метод дозволяє приховувати дані з коефіцієнтом помилок від 1 % до 30 % в залежності від вищеназваних факторів. Він дозволяє приховувати відносно великий об'єм інформації із застосуванням завадостійких методів кодування (наприклад, БЧХ, Ріда-Соломона).

Таблиця 7.12

Залежність значень коефіцієнта спотворень $K_{ном}$ від інтервалу вбудовування, частоти колірного перепаду та коефіцієнта компресії

Частота колірного перепаду	Інтервал вбудовування	Коефіцієнт спотворення $K_{ном}$ %	
		$k = 5$	$k = 10$
0,8	$w = 16$	5,36	28,83
	$w = 32$	1,022	19,044
0,9	$w = 16$	13,16	37,24
	$w = 32$	4,98	28,54

Саме використання завадостійкого кодування покликане на подальше удосконалення розробленого методу, адже ймовірність спотворення до 30 % прихованого повідомлення значним чином зужує його практичне застосування. Вважаючи, що цифрові мітки зазвичай невеликі (десятки – сотні байт), розроблений метод може мати застосування в галузі захисту цифрової мультимедійної інформації.

Таким чином, у результаті аналізу було встановлено, що якість утвореного стего (прихованість методу) та коефіцієнт помилок (робастність) залежать від одних і тих же параметрів, але при цьому збільшення прихованості призводить до зменшення робастності. Тобто, при вбудовуванні даних у зображення необхідно знаходити «золоту середину» між необхідною стійкістю та задовільною якістю.

7.2.3. Аналіз можливості виправлення помилок та вибір завадостійкого коду

Для визначення можливості виправлення помилок, утворених в результаті стиснення з втратами, необхідно спочатку виявити характер спотворень у відтвореному повідомленні.

Спочатку було проаналізовано просторову локалізацію помилок у самому зображенні, тобто виявлено, в яких пікселях зображення виникло спотворення інформаційного біта. Сутність аналізу полягає у наступному: початкове і декодоване повідомлення побітно додаються за модулем 2 (елемент нерівнозначності, XOR). У сумі одиницями будуть позначені ті біти, в яких виникла помилка після стиснення з втратами. Потім отриману суму впроваджуємо у повністю біле зображення з розмірами, що дорівнюють розмірам контейнера. При цьому використовуємо метод впровадження, аналогічний до методу центрування, але тепер ті пікселі, в які впроваджується одиниця, перетворюємо на чорні. Таким чином буде отримано зображення, що відображає чорними крапками місця локалізації помилок (рис. 16 додатку А) [96].

У результаті аналізу просторової локалізації помилок було виявлено, що різні області зображення містять різну кількість помилок. Як видно з прикладу (рис. 16 додатку А), у більш монотонних областях зображення з'являється менша кількість помилок. Така закономірність спотворень, що вносяться під час стиснення, пояснюється особливістю формату JPEG-2000: під час компресії відбувається розбиття зображення на квадратні блоки 16x16, 32x32, 64x64 або 128x128 пікселів (у даному випадку на блоки 128x128 пікселів) та їх окрема обробка. Якщо частота колірною перепадку блока відносно велика (0,95–0,99), то вноситься більше помилок у приховане повідомлення, якщо менша (0,9 і менше) – то коефіцієнт спотворення буде меншим.

Така закономірність характерна лише для зображень, у яких частота колірною перепадку в різних областях різна (сильнонасичені зображення, у яких присутні монотонні області).

Для цілком монотонних зображень із відносно невеликою частотою колірною перепадку (0,7–0,8), а також для сильнонасичених зображень (0,95–0,99), у яких відсутні монотонні області, помилки розташовуються приблизно рівномірно, але з різними коефіцієнтами помилок (рис. 17 та рис. 18 додатку А).

Треба також зауважити, що просторова локалізація помилок залежить від колірної компоненти, в яку вбудовано повідомлення. На рис. 19 додатку А зображено рівномірну просторову локалізацію помилок у червоній колірній компоненті для того ж самого зображення, що і на рис. 16 додатку А.

Проаналізувавши ці факти, можна зробити висновок, що при приховуванні даних у зображення необхідно враховувати насиченість блоків, з якими працює агент стиснення зображення (у даному випад-

ку JPEG-2000), та приховувати дані у кожен блок окремо. Якщо величина блока заздалегідь невідома, то необхідно обирати розмір 16x16 як найменший, що застосовуються форматом.

На наступному етапі аналізу статистичних характеристик стего досліджувалася максимальна довжина серій пакетних (безперервних) помилок (табл. 7.13). Ця величина показує, який відносний відсоток помилок приходить на одиничні, об'єднані у подвійні, потрійні і т.д. Таким чином, сума значень відносної кількості пакетних помилок усіх довжин буде дорівнювати коефіцієнту помилки зображення.

Як і у випадку з коефіцієнтом помилок, відносна кількість спотворень, що припадає на довші пакети, зростає зі збільшенням коефіцієнта компресії та зменшенням ширини інтервалу вбудовування. Тобто, чим більше компресія і менше інтервал, тим більше помилок буде у подвійних, потрійних серіях і т.д.

Таблиця 7.13

Залежність кількості помилок у пакеті від інтервалу вбудовування та коефіцієнта компресії, %

Довжина пакета	$k = 5$		$k = 10$	
	$w = 32$	$w = 16$	$w = 32$	$w = 16$
1	2,400	7,922	13,796	14,039
2	0,498	2,834	8,055	10,749
3	0,209	1,067	4,005	6,547
4	0,065	0,373	1,814	3,653
5	0,038	0,187	0,859	1,973
6	0,017	0,079	0,394	1,052
7	0,008	0,030	0,182	0,556
8	0,003	0,012	0,077	0,288
9	0,001	0,007	0,034	0,156
10		0,005	0,016	0,086
11		0,002	0,015	0,045
12		0,004	0,006	0,031
13		0,005	0,005	0,016
14		0,001	0,003	0,011
15			0,004	0,005
16				0,002
17				0,001

Крім того, необхідно звернути увагу на те, що при відносно невеликій компресії (з $K_{cm} = 5$) довжини серій у більшій мірі залежать від ширини інтервалу вбудовування (9–10 біт підряд для $w = 32$, та 13–14 для $w = 16$), ніж при більших коефіцієнтах компресії ($K_{cm} = 10$ і більше). Тому з ростом коефіцієнта компресії відповідає необхідність збільшувати інтервал вбудовування.

На основі даних з табл. 7.13 було побудовано графік, зображений на рис. 7.17. Виходячи з графіка, можна зробити висновок, що розподіл помилок за пакетами, в залежності від його довжини, зменшується експоненціально, тобто аналогічно до експоненціального закону розподілу. Таким чином, характер появи помилок у декодованому повідомленні не носить пакетного характеру і тому при виправленні не потребує застосування кодів, що виправляють серії помилок.

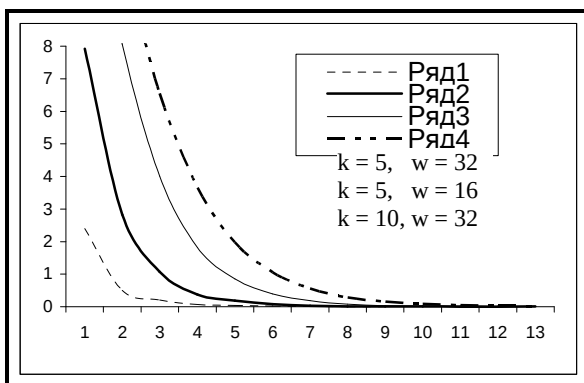


Рис. 7.17. Графік залежності відносної кількості помилок від довжини пакета для різних коефіцієнтів компресії та ширин інтервалу вбудовування

Отже, виходячи з результатів аналізу просторової локалізації помилок та розподілу пакетних помилок, можна зробити висновок, що з метою виправлення спотворень, які виникли в результаті стиснення зображення, доцільно застосовувати різновид циклічних виправляючих кодів – код Боуза–Чоудхурі–Хоквінгема (код БЧХ), як такий, що дозволяє виправляти помилки будь-якої кратності при відносно простій програмній реалізації [97].

При виборі різновиду коду БЧХ необхідно дотримуватися наступних вимог [98]:

- 1) довжина кодового слова: $n = 2^h - 1$, де h – ціле число;
- 2) кількість перевірочних біт: $r = n - k \leq ht$, де t – кратність помилок;

3) мінімальна кодова відстань: $d_{\min} \geq 2t + 1$.

Виходячи з цих даних, було побудовано табл. 7.14, у якій відображаються залежності між виправляючою здатністю та кількістю перевірючих біт для кодів БЧХ з довжинами кодової послідовності 7, 15, 31 та 63 біт. У правій частині таблиці наведені значення середньої кількості помилок, які можуть виникнути в кодовому слові заданої величини при стисненні з коефіцієнтами 5 та 10 відповідно.

Таблиця 7.14

Залежність надлишковості кодів БЧХ від довжини кодового слова та виправляючої можливості

Довжина кодового слова	Кількість інформаційних біт	Кількість перевірючих біт	Мінімальна кодова відстань	Виправляюча здатність	Надлишковість коду, %	Кількість помилок у блоці	
						$K_{ном} = 15\%$ ($K_{ст} = 5$)	$K_{ном} = 30\%$ ($K_{ст} = 10$)
7	4	3	3	1	75,00%	1	2
15	7	8	5	2	53,33%	3	5
15	3	12	7	3	80,00%	3	5
31	11	20	9	4	64,52%	5	10
31	6	25	11	5	80,65%	5	10
31	1	30	13	6	96,77%	5	10
63	9	54	19	9	85,71%	10	19
63	3	60	21	10	95,24%	10	19
127	1	126	37	18	99,21%	19	38,1

З табл. 7.14 видно, що для виправлення помилок, які виникають при компресії контейнера з коефіцієнтом стиснення не більше 5, найбільш доцільним є використання кодів БЧХ(7,4), БЧХ(31,6) та БЧХ (63,3) як таких, що дозволяють виправити помилки, і при цьому вносять найменшу надлишковість. Застосовувати коди з більшою довжиною кодового слова не доцільно через їхню нездатність виправити помилки, які виникають у кодовому слові такої довжини (наприклад, код БЧХ (127,1) здатен виправити помилку кратністю 18, але при $K_{ном} = 15\%$ у такому кодовому слові виникає приблизно 19 помилок).

У результаті проведеної роботи було досліджено характер просторового розташування помилок у стего. Виявлено, що для зображень з відносно високою частотою колірного перепаду (0,9-0,99) помилки локалізуються по блоках, на які розбивається зображення під час компресії форматом JPEG-2000. Тому на етапі кодування необхідно проводити додатковий аналіз областей, в які вбудовується повідомле-

ння. Потрібно вбудовувати повідомлення у квадратні блоки з такими розмірами, з якими працює агент стиснення.

Подальші дослідження слід направити на практичне застосування кодів, що виправляють помилки та підбору коду, який дає можливість виправити помилки, які виникають після стиснення з коефіцієнтами, більшими за 5.

7.2.4. Програмна реалізація розробленого методу

Оцінювання розробленого методу проводилося на програмній моделі, виконаній у інтегрованому середовищі розробки Borland C++ Builder 6. Програма розроблена для операційних систем сімейства Windows NT і розрахована на простого користувача. Реалізація включає методи приховування даних в області перетворення (із застосуванням ВП Коена-Добеші-Фово), а також у просторовій області крихким методом (метод молодших БП) або робастним (метод центрування).

Інтерфейс програми – простий віконний (рис. 20 додатку А).

Для приховування даних необхідно обрати пункт *«Файл – Приховати»* головного меню вікна. Контейнер обирається у вигляді файлу формату BMP за допомогою діалогового вікна, яке розкривається при натисканні на кнопку *«Обрати зображення»*, або введенням шляху до файлу у вікно редагування над кнопкою вибору контейнера. Після вибору контейнер відображається у додатковому вікні зі шляхом до файлу в заголовку.

Аналогічно обирається повідомлення для приховування. Повідомлення може обиратися у вигляді будь-якого файлу даних операційної системи. Після вибору файлу користувачеві виводиться його об'єм.

Вибір місця вбудовування даних проводиться перемикачем *«Область впровадження»*. Для приховування даних методом центрування необхідно поставити прапорець *«Робастно»*, обрати інтервал вбудовування (8, 16 32 або 64) та колірні компоненти зображення. При цьому відразу аналізується максимально можливий об'єм даних, що може бути прихований в обрані компоненти для даного зображення. Якщо об'єм файлу, що вбудовується, не більший максимально допустимого, то кнопка приховування *«Приховати дані»* стає доступною. В іншому випадку приховування даних неможливе (програма не передбачає можливості приховувати файли частинами).

Після приховування користувачеві надається можливість оцінити якість утвореного стего візуально. Стего відображається поряд з початковим контейнером у додатковому вікні з надписом *«Стего»* в заголовку.

Якщо користувач задоволений якістю утвореного зображення, то він має можливість зберегти його у вигляді файлу BMP. Для цього

необхідно кнопкою «Зберегти» (яка стає доступною тільки після утворення стего) відкрити стандартне діалогове вікно «Сохранить как» і зберегти в тому місці і з тим ім'ям, які обере користувач.

Декодування здійснюється цією ж програмою після обиравання пункту «Файл – Витягнути» головного меню (рис. 7.18). Стего обирається аналогічно до вибору контейнера. При витягуванні даних користувач повинен знати метод вбудовування, колірні компоненти, робастність методу, а також об'єм файлу, який було вбудовано. При цьому аналізується, чи міг бути вбудованим в обране зображення файл такого розміру.

Якщо введений розмір не перевищує максимально допустимого, можна здійснити декодування кнопкою «Витягнути». При цьому пропонується зберегти декодований файл у обраному місці із заданим ім'ям.

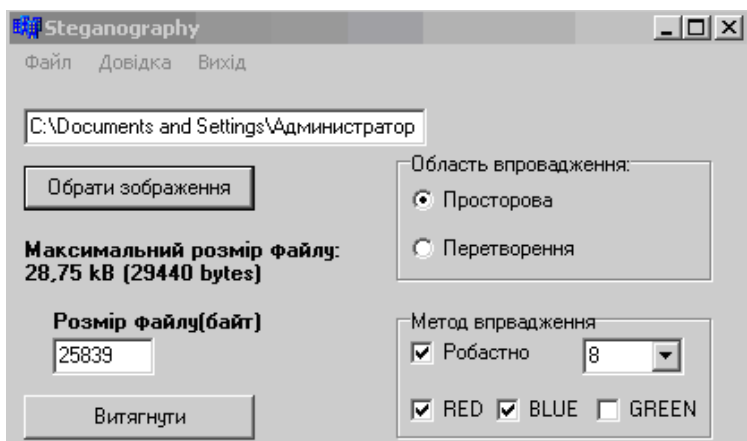


Рис. 7.18. Вигляд головного вікна програми при витягуванні даних

Для аналізу коефіцієнта помилок необхідно обрати пункт головного меню «Файл – Порівняти», обрати два файли даних та натиснути кнопку «Порівняти». Результат буде виведений на форму у вигляді коефіцієнта помилок.

Таким чином, розроблена програма має демонстративний характер і може стати основою для побудови стеганосистеми. Поряд з тим, вона дозволяє зробити аналіз розроблених методів, а крім того, при необхідності, приховувати файли невеликого об'єму в файлах формату BMP крихким та робастним методом.

ВИСНОВКИ

1. У розділі розглянуто практичні питання удосконалення існуючих та розробки нових процедур, що входять до інформаційної технології стиснення зображень та технології стеганографічного приховування повідомлень.

2. Проведено розрахунок кількості рівнів вейвлет-декомпозиції зображень і визначено, що доцільно здійснити три рівні розкладання, оскільки подальші ітерації перетворення суттєво не збільшать ступеня стиснення.

3. На основі статистичного аналізу вейвлет-коефіцієнтів розроблено процедуру їх розділення на блоки старших та молодших бітових площин. Зовсім різні статистичні характеристики цих блоків дозволили застосувати до них різні безнадлишкові коди: до старших бітових площин – кодер довжин серій, до молодших – арифметичне кодування.

4. Розроблено дві реалізації арифметичного кодеру: для нерозділених масивів вейвлет-коефіцієнтів (кодування восьмирозрядних елементів) та для розділених (кодування чотирирозрядних елементів).

5. Реалізовано та описано інформаційну технологію компресії та відновлення зображень без втрат якості.

6. Проаналізовано вплив формату JPEG-2000 на зображення. На основі отриманих даних було розроблено метод приховування інформації, стійкий до компресії з втратами. У залежності від коефіцієнта стиснення та інтервалу робастності коефіцієнт помилок складає від 1 % до 30 %.

7. Досліджено розроблений стеганографічний метод з метою виявлення кількості та виду пакетних помилок, що вносяться форматом JPEG-2000. Висунуто пропозиції щодо усунення групових помилок та подальшого удосконалення методу.

ЗАКЛЮЧЕННЯ

У монографії розглянуто такі науково-практичні завдання цифрової обробки зображень, як компресія зображень без втрат якості відновлених даних та стеганографічне приховування повідомлень у цифрових зображеннях.

Часткові завдання, які були при цьому вирішені, охоплюють такі питання:

- роль та місце компресорів і стеганографічних методів при передаванні інформації в телекомунікаційних системах та мережах;
- аналіз сучасних методів стеганографічного приховування інформації у нерухомих зображеннях;
- особливості фізіологічного та психовізуального сприйняття кольорів людиною;
- методи об'єктивного та суб'єктивного оцінювання сприйняття кольорових зображень;
- методи та моделі подання кольорових зображень;
- декореляція елементів кольірних компонент зображення за допомогою вейвлет-перетворення;
- способи арифметичного кодування джерел з різною потужністю алфавіту;
- метод центрування значень кольірних компонент для приховування інформаційних повідомлень у зображеннях;
- перспективи розвитку архіваторів графіки та стеганографічних методів приховування даних у зображеннях.

Актуальність питань розробки нових методів обробки графічної інформації привертає увагу все більшої кількості спеціалістів. Тому на погляд автора розкриті у праці питання будуть корисними та допоможуть під час розробки сучасних архіваторів зображень та стеганографічних методів.

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АК – арифметичне кодування;
БП – бітова площина;
ВП – вейвлет-перетворення;
ВЧ – високочастотний;
ДВП – дискретне вейвлет-перетворення;
МСЕ – Міжнародний Союз Електрозв'язку;
НЧ – низькочастотний;
ПД – передавання даних;
ПЗ – програмне забезпечення;
ПФ – перетворення Фур'є;
СЛЗ – система людського зору;
ЦВЗ – цифрові водяні знаки

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, Кн. 2., 1982. – 480 с.
2. Зубарев Ю.В., Дворкович В.П. Цифровая обработка телевизионных и компьютерных изображений. – М.: МЦНТИ, 1997. – 212 с.
3. Нетравали А.Н., Лимб Д.О. Кодирование изображений: Обзор. – ТИИЭР. – 1980. – Т. 68, № 3. – С. 76–117.
4. Бондарев В.Н., Трестер Г., Чернега В.С. Цифровая обработка сигналов: методы и средства. – Севастополь: Изд. СевГТУ, 1999. – 398 с.
5. Грибунин В. Г., Оков И.Н., Туринцев И.В. Цифровая стеганография. – М.: Солон-Пресс, 2002. – 272 с.
6. Володин С.В., Макаров А.Н., Умрихин Ю.Д., Фараджев В.А. Общесистемное проектирование АСУ реального времени. – М.: Радио и связь, 1984. – 232 с.
7. Haar A. Zur theorie der orthogonalen funktionen-systeme // Math. Annal., 69: 331–371. – 1910.
8. Зив Дж. Неравенства и алгоритмы универсального сжатия данных // Проблемы передачи информации. – 1996. – Том 32. – Вып. 1. – С. 35–40.
9. Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets // Philadelphia: SIAM. – 1991.
10. Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 11(7): 674–693. – 1989.
11. Ватолин Д.С. Алгоритмы сжатия изображений. Методическое пособие. – М.: Изд. МГУ, 1999. – 9 с.
12. Воробьев В. И., Грибунин В. Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. – СПб.: ВУС, 1999. – 204 с.
13. Мاستрюков Д. Алгоритмы сжатия информации. Часть 2. Арифметическое кодирование // Монитор. – 1994. – №1. – С. 20–26.
14. Cohen A., Daubechies A., Feauveau J.-C. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets // Communications on Pure and Applied Mathematics, 45:485–560. – 1992.
15. Sweldens W. The lifting scheme: A custom-design construction of biorthogonal wavelets // Applied and Computational Harmonic Analysis, 3(2):186–200. – 1996.
16. Shapiro J. M. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients // IEEE Transactions on Signal Processing, 41(12):3445–3462. – 1993.
17. Королев А.В. Теоретические основы компактного представления изображений на основе устранения версификационной избыточ-

ности: // Дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук: 05.12.06. – Харьков, ХВУ, 2003. – 329 с.

18. Бараннік В.В. Метод быстрой биномиально-полиадической нумерации // Радіоелектронні і комп'ютерні системи, Харків: ХАІ. – 2004. – №1(5). – С. 84–89.

19. Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю. Компьютерная стеганография. Теория и практика. – К.: МК-Пресс, 2006. – 288 с.

20. Рубан И.В. Исследование компрессионных возможностей ортогональных преобразований // 36. науч. пр. – К: ИПМЕ, НАНУ. – 2003. – Вип. 22. – С. 198–201.

21. Королёва Н.А., Стрюк А. Ю. Способ сжатия видеоданных, основанный на дискретном волновом преобразовании // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2000. – № 6. – С. 67–70.

22. Ахмед Н., Рао К. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов: Пер. с англ. – М.: Связь, 1980. – 248 с.

23. Van den Braden Lambrecht C.J. and Farrell J.E. Perceptual Quality Metric for Digitally Coded Color Images. In: Proceeding of EUSIPCO, pp. 1175–1178, Trieste, Italy, September 1996.

24. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных / Под. ред. Д. Ватолина. – М.: Диалог-Мифи, 2002. – 384 с.

25. Чуи К. Введение в вейвлеты. – М.: Мир, 2001. – 390 с.

26. Барсуков В.С., Романцов А.П. Компьютерная стеганография: вчера, сегодня, завтра. Технологии информационной безопасности XXI века. – мат. Internet-ресурса «Специальная техника» (<http://st.ess.ru>).

27. Deepa Kundur. Multiresolution Digital Watermarking: Algorithms and Implications for Multimedia. 1999.

28. Kutter M., Voloshynovskiy S., Herrigel A. The Watermark Copy Attack // Proceedings of SPIE: Security and Watermarking of Multimedia Content II. 2000. Vol. 3971.

29. Хорошко В.О., Азаров О.Д., Шелест М.Є., Яремчук Ю.Є. Основи комп'ютерної стеганографії: Навчальний посібник для студентів і аспірантів. – Вінниця: ВДТУ, 2003. – 143 с.

30. Basar T., and Olsder G.J. Dynamic Noncooperative Game Theory // SIAM Classics in Applied Mathematics. Philadelphia, PA: SIAM, 1999.

31. Hastur H. MandelSteg, <ftp://idea.sec.dsi.unimi.it/pub/security/crypt/code/>.

32. Christian Cachin. An Information-Theoretic Model for Steganography // Proceedings of 2nd Workshop on Information Hiding (D. Aucsmith, ed.), Lecture Notes in Computer Science, Springer, 1998.

33. Simmons G. The prisoner's problem and the subliminal channel // Proc. Workshop on Communications Security (Crypto'83), 1984. – P. 51–67.
34. Шлихт Г.Ю. Цифровая обработка цветных изображений. – М.: ЭКОМ, 1997. – 336 с.
35. Рухлова С.А. Основы офтальмологии. – М.: Медицинская книга, Н. Новгород: Изд-во НГМА, 2001. – 252 с.
36. Грибунин В. Объективные метрики для оценки качества видеокодеков // Технологии защиты – 2008. – №2. – С. 56–61.
37. Буш Д. Цифровая фотография и работа с изображением. – М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2004. – 290 с.
38. Girod B. The information theoretical significance of spatial and temporal masking in video signals // Proc. of the SPIE Symposium on Electronic Imaging, 1989. – Vol. 1077. – P. 178–187.
39. Watson A. The cortex transform: rapid computation of simulated neural images // Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1987. Vol. 39, № 3. – P. 311–327.
40. Миано Д. Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии. – М.: Триумф, 2003. – 336 с.
41. Сойфер В.А. Компьютерная обработка изображений. Часть 2. Методы и алгоритмы // Соросовский образовательный журнал – 1996. – № 3, – С. 123–142.
42. Миронов Д.Ф. Corel Draw X3. Учебный курс. – СПб.: Питер, 2006. – 397 с.
43. Пономаренко С.И. Adobe Illustrator CS. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 768 с.
44. Роуз К. Освой самостоятельно Adobe Photoshop CS за 24 часа.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 512 с.
45. Пономаренко С. Пиксел и вектор. Принципы цифровой графики. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 496 с.
46. Пономаренко С.И. Macromedia FreeHand 9 в подлиннике. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 432 с.
47. Тайц А.М. CoreLXARA 2.0: графика для Internet, офиса и полиграфии. – СПб.: БХВ-Петербург, 2000. – 336 с.
48. Лукин А. Введение в цифровую обработку сигналов (Математические основы). – М.: МГУ, Лаборатория компьютерной графики и мультимедиа, 2002. – <http://pv.bstu.ru/dsp/dspcourse.pdf>.
49. Иванов Д.В. и др. Алгоритмические основы растровой графики. – Интернет университет информационных технологий. – <http://www.intuit.ru/goto/course/rastrgraph>.
50. Кривошеев М.И. Основы телевизионных измерений. – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Радио и связь, 1989. – 608 с.

51. Телевидение: Учебник для вузов / В.Е. Джакония, А.А. Гоголь, Я.В. Друзин и др. Под ред. В.Е. Джаконии. 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 2004. – 616 с.

52. Келби С., Нельсон Ф. Photoshop CS. Советы знатоков.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 256 с.

53. Волкова Е.В. Photoshop CS2. Художественные приемы и профессиональные хитрости. – СПб.: Питер, 2006. – 252 с.

54. Wallace G.K. The JPEG algorithm for image compression standard // Communications of the ACM. – 1991. – Vol. 34, №4. – P. 30–44.

55. Wallace G.K. Overview of the JPEG (ISO/CCITT) still image compression: image processing algorithms and techniques // Proceedings of the SPIE. – 1990. – Vol. 1244. – P. 220–233.

56. Резуненко А.А., Стрюк А.Ю. Методы целочисленного преобразования цветовых координат видеоданных // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – Харків: ХАІ, 2004. – № 1(5). – С. 17–20.

57. Резуненко А.А., Дядык Д.Ф. Оценка влияния смены цветовых моделей на эффективность методов сжатия видеоданных // Мат. 8-го Междунар. молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харьков: ХНУРЕ, 2004. – С. 77.

58. Majid Rabbani, Rajan Joshi. An overview of the JPEG2000 still image compression standard // Eastman Kodak Company, Rochester, NY 14650, USA, Signal Processing: Image Communication. – 2002. – Vol. 17. – P. 3–48.

59. ITU-R Recommendation BT.709, Basic Parameter Values for the HDTV Standard for the Studio and for International Programme Exchange (1990), formerly CCIR Rec. 709, (Geneva: ITU, 1990).

60. Стрюк А.Ю., Клименко К.С., Резуненко А.А. Статистические свойства видеоданных, подвергнутых дискретному вейвлет-преобразованию // Зб. наук. пр. – К.: ИПМЕ, НАНУ. – 2003. – Вип. 22. – С. 198–201.

61. Стрюк А.Ю., Резуненко А.А. Метод сжатия видеоданных с использованием вейвлет-преобразования // Мат. 3-й Междунар. научно-техн. конф. «Проблемы информатики и моделирования». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – С. 24.

62. «Waterloo» test images: <http://links.uwaterloo.ca/calgary.corpus.html>.

63. «Kodak images» test images: <http://artst.narod.ru>.

64. Різуненко А.О. Методи та інформаційна технологія стиску зображень в автоматизованих системах на основі вейвлет-перетворень: // Дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: 05.13.06. – Харків, НАКУ ХАІ, 2005. – 190 с.

65. Резуненко А.А., Клименко К.С. Метод целочисленного арифметического кодирования видеоданных // Інформаційно-керуючі

системи на залізничному транспорті, Харків, УДАЗТ. – 2004. – № 2 (46). – С. 13–16.

66. Резуненко А.А., Стрюк А.Ю. Метод комбинированного кодирования высокочастотных трансформант вейвлет-преобразования // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті, Харків, УДАЗТ, 2004. – № 3 (47). – С. 34–40.

67. Дядик Д.Ф., Гаркуша С.В., Стрюк О.Ю. Адаптивний метод перетворення кольорових координат відеоданих // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 6(18). – С. 177–181.

68. Залмазон Л.А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. – М.: Наука, 1989. – 496 с.

69. R.N. Bracewell. The Fourier Transform and its Applications. McGRAW-HILL, International Editions (2000).

70. Штарк Г. Применение вейвлетов для ЦОС. – М.: Техносфера, 2007. – 192 с.

71. Кузнецов А.В. Методы математической физики: Учебное пособие – Ярославль: Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, 2003. – 91 с.

72. Бильчук В.М., Петров В.А. Прикладная математика. Учебное пособие – Харьков: ХВВКИУРВ, 1986. – 336 с.

73. Grochenig K., Madych W.R. Multiresolution Analysis, Haar Bases, and Self-Similar Tilings of R^n // IEEE Trans. Inform. Theory, 1992. 38. P. 556–568.

74. Mallat, S. A Wavelet Tour of Signal Processing. 2nd ed., Academic Press, San Diego, Calif. 1999.

75. Ramchandran K., Vetterli M. Best wavelet packet bases in a rate-distortion sense // IEEE Transactions on Image Processing. – 1992, №2. – P. 160–175.

76. Wickerhauser M. Acoustic signal compression with wavelet packets // In Chui C. ed. Wavelets :A Tutorial in Theory and Applications, Academic Press, Boston. . – 1992. – P. 679–700.

77. Said A., Pearlman W. A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 6(3):243–250. – 1996.

78. A. Cohen, I. Daubechies, J.C. Feauveau, «Biorthogonal Bases of Compactly Support Wavelets,» Communications on Pure and Applied Mathematics, V45 N5:485–560, June 1992.

79. Adelson E., Simoncelli E. Orthogonal pyramid transforms for image coding // In Proceedings of SPIE Visual Communications and Image Processing II. – 1987. – Vol. 845. – P. 50–58.

80. Burt P.J., Adelson E.H. The laplacian pyramid as a compact image code // IEEE Transactions on Communications, COM–31(4): 532–540. –

1983.

81. Beng S. On the applicability of wavelet transforms to image and video compression // Department of computer science university of Strathclyd. – 1999. – 149 p.

82. Резуненко А.А. Метод сжатия графических изображений на основе рекурсивного описания блочных полей // Мат. 7-го Междунар. молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харьков: ХНУРЭ, 2003. – С. 145.

83. Резуненко А.А. Способы кодирования изображений независимыми блоками // 36. мат. міжвузівс. науково-техн. конф. «Факультету «Телекомунікації» 5 років!». – Полтава: ПВІЗ, 2004. – С. 58.

84. Королев А.В., Рубан И.В. Метод межкадрового кодирования цифровых цветных изображений // Обработка информации. – Харьков: НАНУ, ПАНИ, ХВУ. – 1995. – С. 30–36.

85. Королев А.В., Рубан И.В. О возможности межкадрового кодирования цифровых цветных изображений методом длин серий // Тр. Междунар. конф. «Представление обработка и передача информации», Сочи-Харьков: НАНУ, ПАНИ, 1993. – С. 15.

86. Calderbank A. R., Daubechies A. R., Sweldens A. R., Yeo B.-L. Wavelet transforms that map integers to integers // Technical report, Department of Mathematics, Princeton University. – 1996.

87. Witten I.H., Neal R.M., Cleary J.G. Arithmetic coding for data compression // Commun. ACM. – 1987. – Vol. 30, № 6. – P. 520–540.

88. Nelson M. Arithmetic Coding // Dr. Dobbs's Journal. – 1991. – P. 1.

89. Rissanen J. Generalized Kraft inequality and arithmetic coding // IBM J. Res. Develop. – 1976. – Vol. 20, № 3. – P. 198–203.

90. Rissanen J., Langdon G. Universal modelling and coding // IEEE Trans. Inform. Theory. – 1981. Vol. IT.-27, № 1. – P. 12–23.

91. Slattery M. J., Mitchell J. L. The Qx-coder // IBM Journal of Research and Development. – 1998. – Vol.42, № 6. – P. 123–130.

92. Коваленко А.А., Резуненко А.А. Метод скрытия информационных сообщений в области преобразования статических фотореалистичных изображений // Радіоелектронні і комп'ютерні системи, Харків: НАКУ «ХАІ». – 2006. – Вип. 6 (18). – С. 45–49.

93. Коваленко А.О., Різуненко А.О. Квазістійкий метод приховування даних у зображення // Міжнародна НТК «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні» ІКТМ. – Харків: НАКУ «ХАІ», 2006. – С. 238.

94. Коваленко А.О., Різуненко А.О. Метод приховування даних у зображення шляхом центрування значень колірних компонент // Збірник наукових праць «Системи обробки інформації». – Вип. 7. – Харків, ХУПС 2006. – С. 12–16.

95. Коваленко А.О., Різуненко А.О. Впровадження повідомлень у

кольорові зображення методом центрування значень колірних компонент // Проблеми інформатики і моделювання. Матеріали шостої Міжнародної НТК – Х.: НТУ «ХПІ», 2006. – С. 58.

96. Коваленко А.О., Різуненко А.О. Дослідження кількості та серій помилок у декодованому повідомленні для стегоалгоритму з центруванням значень колірних компонент зображення // Збірник наукових праць «Системи обробки інформації». – Вип. 2 (17). – Харків, ХУПС 2008. – С. 92–95.

97. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 187–238 с.

98. Жураковський Ю.П., Полторак В.П. Теорія інформації та кодування: підручник. – К.: Вища шк., 2001. – С. 134–157.