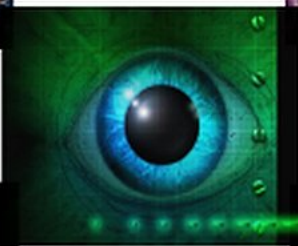


ПРИНЦИПИ УЩІЛЬНЕННЯ ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ



Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

ПРИНЦИПИ УЩІЛЬНЕННЯ ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Монографія

За загальною редакцією В. П. Кожем'яко

Вінниця
ВНТУ
2011

УДК 004.932

ББК 32.811

П76

Автори:

**В. П. Кожем'яко, А. С. Васюра, Н. В. Сачанюк-Кавецька,
О. В. Кириченко**

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 2 від 23.09.2010 р.)

Рецензенти:

Л. І. Тимченко, доктор технічних наук, професор

В. А. Лужецький, доктор технічних наук, професор

Я. В. Ніколайчук, доктор технічних наук, професор

Принципи ущільнення та перетворення зображення : монографія / за заг. ред. В. П. Кожем'яко. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 242 с.

ISBN 978-966-641-404-8

В монографії показані шляхи розвитку існуючих методів ущільнення та перетворення зображень з метою підвищення їх швидкодії для розширення оперативних багатфункціональних, орієнтованих на нановолоконні – оптичні логіко-часові технології, доведено теорему граничного ущільнення часової інформації з використанням математичного апарату логіко-часового середовища. Розглянуто методологію розробки елементів і блоків для нейроквантронних систем ущільнення зображень.

Монографія розрахована на наукових та інженерно-технічних працівників у галузі оптичних інформаційних систем, око-процесорних систем, систем паралельної обробки інформації, а також на студентів і аспірантів відповідних спеціальностей.

УДК 004.932

ББК 32.811

ISBN 978-966-641-404-8

© В. Кожем'яко, А. Васюра, Н. Сачанюк-Кавецька, О. Кириченко, 2011

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ПЕРЕДМОВА.....	7
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ЦИФРОВЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТА ПОПЕРЕДНЯ ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ.....	10
1.1. Типи зображень.....	10
1.2. Дискретизація безперервних зображень.....	12
1.3. Квантування зображень.....	21
1.4. Препарування зображення.....	28
1.5. Фільтрація зображень.....	31
1.6. Двовимірне дискретне перетворення Фур'є.....	47
1.7. Розв'язання рівняння Вінера-Хопфа в циклічному наближенні.....	55
1.8. Медіанна фільтрація.....	59
1.9. Згладжування кольорових зображень.....	64
1.10. Особливості зору людини.....	68
РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СПОСОБІВ І ЗАСОБІВ УЩІЛЬНЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ.....	72
2.1. Класифікаційний аналіз проблемно-орієнтованих методів представлення, перетворення і ущільнення інформації.....	72
2.2. Методи ущільнення із втратою інформації	79
2.3. Методи ущільнення без втрат інформації.....	108
2.4. Основні поняття і визначення мережевого паралельно-ієрархічного перетворення інформації (ППІ).....	124
2.5. Методи і засоби паралельно-ієрархічного перетворення для високопродуктивного оброблення зображень.....	126
ВИСНОВКИ.....	136
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ І ЗАСОБИ ОБРОБКИ ТА УЩІЛЬНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ	137
3.1. Квантування, кодування і ущільнення на основі нормально розподілених величин в логіко-часових кодах і функціях Уолша.....	137

3.2. Моделі ущільнення дискретного зображення в логіко-часових перетвореннях (ЛЧФ).....	143
3.2.1. Характеристика квантрона.....	146
3.2.2. Квантрони, як елементарні операційні автомати із внутрішньою пам'яттю	151
3.2.3. Модель абстрактного КВ-автомата в логіко-часовому середовищі	155
3.2.4. Математичне обґрунтування граничного ущільнення інформації в квантронних структурах некогерентних процесорів.....	159
3.3. Оцінка обчислювальної складності при обґрунтуванні вибору методу ущільнення зображень.....	164
3.4. Розробка двовимірних карт Кохонена покомпонентним кодуванням на основі ЛЧФ і ЛЧК.....	165
3.5. Розробка алгоритму роботи модуля векторного квантування на основі SOFM і ЛЧФ.....	168
ВИСНОВКИ.....	170
РОЗДІЛ 4. АРХІТЕКТУРНА І СХЕМОТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ЛОГІКОЧАСОВИХ СИСТЕМ УЩІЛЬНЕННЯ ЗОБРАЖЕННЯ	
4.1. Аналіз функціональних властивостей квантрона.....	171
4.2. Класифікація фізичних моделей нейрона.....	174
4.3. Способи реалізації нейронних мереж для ущільнення зображень.....	175
4.4. Розробка узагальненої схеми цифрового кодування зображень.....	188
4.5. Оптикоелектронний векторний квантувач на основі Карті Кохонена.....	191
4.6. Цифровий вимірювач одиничних часових інтервалів.....	193
4.7. Спосіб паралельного формування ущільненої суми часоімпульсних сигналів.....	197
ВИСНОВКИ.....	202
РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ УЩІЛЬНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ.....	
5.1. Критерії оцінки якості відновленого зображення.....	203

5.2. Вибір програмних засобів для реалізації алгоритму кодування.....	205
5.3. Розробка програмного забезпечення для ущільнення даних на основі перетворення BWT.....	207
5.4. Тестування програми.....	208
5.5. Виділення дефектів структури зображень багатшарових фотографічних матеріалів.....	210
5.6. Відновлення структури зображень багатшарових фотографічних матеріалів	218
ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	229
ЛІТЕРАТУРА.....	230

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВОЛ	волоконно-оптична лінія
ВОЛЗ	волоконно-оптична лінія зв'язку
ВОС	волоконно-оптична структура
ГІС	геоінформаційна система
ДЗП	динамічний запам'ятовуючий пристрій
ДПКЛ	перетворення Крестенсона-Леві
ДФ	диференціальний фотодіод
ЕП	елемент пам'яті
ЗП	запам'ятовуючий пристрій
КВ	квантронний автомат
ЛЧК	логіко-часовий код
ЛЧС	логіко-часове середовище
ЛЧФ	логіко-часова функція
НЕ	нейронний елемент
ОМ	обчислювальна машина
ООЗП	оптичний оперативний запам'ятовуючий пристрій
ООМ	оптоелектронна обчислювальна машина
ПУА	перетворення Уолша-Адамара
ПІ	перетворювач інтенсивності
СЦП	системи цифрового перетворення інформації
СІД	світловипромінюючий діод
ЦАП	цифро-аналоговий перетворювач

ПЕРЕДМОВА

Вищого свого розвитку експертні системи й комп'ютери 5-го і 6-го поколінь досягли, вирішуючи проблеми комутаційної гнучкості й ущільнення нейроподібними методами й засобами обробки та передачі інформації, особливо вражаючі результати отримані при реалізації волоконно-оптичних око-процесорних комп'ютерних мереж [1], у тому числі з логіко-часовим кодуванням [2]. Передача зображень по комп'ютерних мережах неможлива без попереднього ущільнення. Розроблено ряд стандартів і форматів файлів, які забезпечують передачу зображень у стислому вигляді по мережах [3–5]. Однак, досягнуті коефіцієнти ущільнення зображень у порівнянні з необхідними обсягами передачі даних й пропускною здатністю каналів недостатні. В новітніх синіх лазерних FM- дисках пам'яті досягнуті щільності запису до десятка Тбайт [6]. FM-диск складається з декількох пластикових шарів, сполучених між собою. Шар містить поверхневі структури, які заповнюються флуоресцентним матеріалом. При зчитуванні лазер фокусується на певному шарі і погіршує його флуоресцентні елементи, після чого це світіння уловлюється фотодетектором. Інша цікава особливість цієї технології полягає в можливості паралельного зчитування. Якщо записувати послідовність біт не уздовж доріжки, а вглиб по шарах, то можна значно підвищити швидкість вибірки даних. Таким чином, з'являються три способи зчитування даних: послідовний, послідовно-паралельний і паралельний. Процес читання відбувається за допомогою фоточутливого елемента, який представляє масив CCD-камер. При цьому швидкість зчитування досягає 1 Гбіт/с.

Подібна перезаписуюча пам'ять гігантської ємності з об'ємною щільністю запису 37 Тбайт/см³ розроблена в Кіотському університеті. Інформація записується у масі спеціального запам'ятовуючого скла з присадкою земельного елемента самарія.

Техніка багат шарового оптичного запису, при якому щільність запису в порівнянні з DVD у 10 разів більша, запропонована винахідниками з університету Сидзуока [6]. В якості носія запису використовується полімерний матеріал на основі уретана. На скляній підложці сформовано 10 шарів з цього матеріалу. Запис виконується опроміненням фемтосекундним лазером. Інформація записується на одному з десяти шарів за рахунок регулювання фокусу лазерного променя.

Щоб максимально використати такі можливості необхідне збільшення коефіцієнта ущільнення зображень при збереженні високої якості, що є пріоритетним напрямком досліджень, які виконуються в області кодування зображень. Аналіз традиційних підходів до ущільнення зображень показав, що вони вичерпали свої можливості в цьому напрямку, тому потрібні нові підходи до вирішення завдань ущільнення при передачі й обробці зображень [7].

Сьогодні синтез і аналіз зображень в основному реалізується за допомогою алгоритмічної обробки на ПК. У зв'язку з тим, що зображення стають масовою продукцією в промисловості і науці, а їх обробка, розпізнавання й аналіз – масовим потоковим виробництвом, – цифрова обробка зображень стає економічно вигідною і необхідною скрізь, де вона технічно можлива [8–12].

Вирішення проблем обробки і перетворення великих масивів інформації шляхом застосування класичних прийомів програмного керування виявляється важким, особливо при введенні і виведенні зображень у нестабільних ситуаціях.

Метою нашої роботи є підвищення оперативності обробки та розпізнавання і збільшення ефективності коефіцієнта ущільнення зображень, використовуючи спектральні методи дискретних унітарних перетворень і оптимізації коефіцієнтів перетворення (елементів дискретного перетворення).

Необхідність створення і удосконалення нових методів обробки зображень зумовлена також дослідженнями Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України за держбюджетною темою 57 – Д281 – «Оптико-електронний квантово-розмірний образний комп'ютер око-процесорного типу: концепції, методологія, база знань» (№ держреєстрації: 0105U002434).

Монографія розрахована на наукових та інженерно-технічних працівників у галузі оптичних інформаційних систем, око-процесорних систем, систем паралельної обробки інформації, а також на студентів і аспірантів відповідних спеціальностей.

Вступ, висновки, а також підрозділи 1.3, 2.3, 2.4., 3.1, 4.2, 4.3 підготував В. П. Кожем'яко разом з О. В. Кириченко; підрозділи 2.5, 2.1, 2.2, – А. С. Васюра разом з О. В. Кириченко; підрозділи, 3.2, 4.1, 4.4 – О. В. Кириченко; підрозділи 1.1, 1.2, 1.4, 3.3, 3.4 – Н. В. Сачанюк-Кавецька разом з О. В. Кириченко.

ВСТУП

Одним з підходів, що забезпечує вирішення завдань збільшення коефіцієнта ущільнення зображень, при збереженні високої якості, є застосування штучних нейронних мереж.

У науковій літературі розглядаються різні підходи до застосування нейронних мереж при ущільненні зображень [13], однак особливої уваги заслуговують підходи, які спираються на принципи векторного квантування зображень, оскільки це забезпечує високу швидкодію ущільнення при збереженні високої якості відновленого зображення. Ідея векторного квантування дуже проста. Зображення розбивається на квадратні блоки, наприклад 2×2 , 4×4 або 8×8 . Кожний блок розглядається як вектор в 4-вимірному, 16-вимірному, або 64-вимірному просторі. Із цього простору обирається обмежена кількість векторів, які утворюють кодову книгу, але так, щоб з найбільшою точністю апроксимувати вектори, що вилучаються із вхідного зображення. У канал зв'язку або файл записуються номери векторів з кодової книги, які мають найменшу відстань від векторів, які вилучаються з вихідного зображення, і сама кодова книга. Оскільки векторів у кодовій книзі значно менше загальної кількості векторів у вихідному зображенні, то для подання номера вектора витрачається менше біт, ніж для початкового вектора. За рахунок цього й досягається ущільнення.

Ідеальними для розв'язання цих завдань є нейронні мережі, що самоорганізуються, запропоновані фінським ученим Т. Кохоненом, а саме: мережа, у вигляді двовимірної карти Кохонена, що самоорганізується [14]. Карта Кохонена має дві важливі властивості, які використовуються при ущільненні зображень методами векторного квантування. По-перше, вона дуже схожа на інші методи векторного квантування, які застосовують при ущільненні зображень із втратами, а по-друге, близьким кластерам вхідних векторів відповідають близько розташовані нейрони, що збільшує ефективність ущільнення без втрат та застосовується на наступному етапі кодування.

Саме ці питання і є пріоритетними у монографії. Робота направлена на удосконалення існуючих методів ущільнення зображень: підвищення їх швидкодії за рахунок використання нових тенденцій у розвитку волоконно-оптичних технологій.

РОЗДІЛ 1. ЦИФРОВЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТА ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ

Багато галузей техніки, що мають відношення до одержання, обробки, зберігання й передачі інформації, у значній мірі орієнтуються в цей час на розвиток систем, у яких інформація має характер зображень. Зображення, яке можна розглядати як двовимірний сигнал, є значно ємнішим носієм інформації, ніж звичайний одновимірний (тимчасовий) сигнал. Разом з тим, вирішення наукових і інженерних завдань при роботі з візуальними даними вимагає особливих зусиль, що спираються на знання специфічних методів, оскільки традиційна ідеологія одновимірних сигналів і систем мало придатна в цих випадках. В особливій мірі це проявляється при створенні нових типів інформаційних систем, що вирішують такі проблеми, які дотепер у науці й техніці не вирішувалися, і які вирішуються зараз завдяки використанню інформації візуального характеру.

1.1. Типи зображень

Цифрове зображення являє собою прямокутну таблицю точок, або елементів зображення, розташованих у m рядках і n стовпцях. Вираз $m \times n$ називається *дозволом* зображення (хоча іноді цей термін використовується для позначення числа пікселів, що розміщені на одиницю довжини зображення). Точки зображення називаються *пікселями* (за винятком випадків, коли зображення передається факсом або відео; у цих випадках точка називається *пелом*). З метою ущільнення графічних образів зручно виділити такі типи зображень [15, 16]:

1. *Дворівневе* (або монохроматичне) зображення. У цьому випадку всі пікселі можуть мати тільки два значення, які звичайно називають чорним (двійкова одиниця, або основний колір) і білим (двійковий нуль або кольори тла). Кожний піксель такого зображення представлений одним бітом, тому це найпростіший тип зображення.

2. *Напівтонове* зображення. Кожен піксель такого зображення може мати значення від 0 до $2^n - 1$, що позначають одну з 2^n градацій сірого (або іншого) кольору. Число n звичайно порівнянне з розміром байта, тобто, воно дорівнює 4, 8, 12, 16, 24 або інше кратне 4 або 8.

Множини найзначиміших бітів всіх пікселів утворюють найзначішу бітову площину або шар зображення. Отже, напівтонове зображення складено з n бітових шарів.

3. *Кольорове зображення.* Існує кілька методів задання кольору, але в кожному з них беруть участь три параметри. Отже, кольоровий піксель складається із трьох частин. Типовими колірними моделями є RGB, HLS і CMYK.

4. *Зображення з неперервним тоном.* Цей тип зображень може мати багато схожих кольорів (або півтонів). Коли сусідні пікселі відрізняються всього на одиницю, окові практично неможливо розрізнити їх кольори. У результаті такі зображення можуть містити області, у яких кольори здаються безупинно мінливими. У цьому випадку піксель представляється або більшим числом (у напівтоновому випадку) або трьома компонентами (у випадку кольорового образу). Зображення з неперервним тоном є природними (на відміну від рукотворних, штучних); звичайно вони виходять при зйомці на цифрову фотокамеру або при скануванні фотографій або рисунків.

5. *Дискретно-тонове зображення* (воно ще називається синтетичним). Звичайно, це зображення штучного походження. У ньому може бути всього кілька кольорів або багато кольорів, але в ньому немає шумів і плям природного зображення. Прикладами таких зображень можуть служити фотографії штучних об'єктів, машин або механізмів, сторінки тексту, карти, рисунки або зображення на дисплеї комп'ютера. (Не кожне штучне зображення буде обов'язково дискретно-тоновим. Генероване комп'ютером зображення, що повинне виглядати натуральним, може мати неперервні тони, незважаючи на своє штучне походження.) Штучні об'єкти, тексти, нарисовані лінії мають форму, добре обумовлені контури. Вони сильно контрастують на фоні іншої частини зображення (фону). Прилеглі пікселі дискретно-тонового образу часто бувають одиночними або дуже сильно змінюють свої значення. Такі зображення погано ущільнюються методами із втратою даних, оскільки перекручування всього декількох пікселів букви робить її нерозбірливою, перетворює звичне креслення в зовсім нерозбірливе. Методи ущільнення зображень із неперервними тонами погано ущільнюються із чіткими краями дискретно-тонових образів, для яких варто розробляти особливі методи компресії. Відзначимо, що дискре-

тно-тонові зображення, звичайно, несуть у собі більшу надмірність (фрагменти повторюються багато разів у різних місцях зображення).

б. Зображення, *подібні до мультфільмів*. Це кольорові зображення, у яких присутні більші області одного кольору. При цьому ці області можуть досить сильно розрізнятися за своїми кольорами. Цю властивість можна використати для досягнення кращої компресії.

Інтуїтивно стає зрозуміло, що кожному типу зображень властива певна надмірність, але всі вони надлишкові по-різному. Тому важко створити один метод, що однаково добре ущільнює будь-які типи зображень. Існують окремі методи для ущільнення дворівневих образів, безперервно-тонових і дискретно-тонових зображень. Існують також методи, які намагаються розділити зображення на безперервно-тонову й дискретно-тонову частини й ущільнювати їх окремо.

1.2. Дискретизація неперервних зображень

Дуже рідко зображення, одержувані в інформаційних системах, мають цифрову форму. Тому їх перетворення до цього виду є обов'язковою операцією, якщо передбачається використати цифрову обробку, передачу, зберігання [17]. Як і при одновимірних сигналах, це перетворення містить у собі дві процедури. Перша складається в заміні безперервного кадру дискретним і звичайно називається *дискретизацією*, а друга виконує заміну безперервної множини значень яскравості множиною квантованих значень і зветься *квантування*. При цифровому поданні кожному із квантованих значень яскравості ставиться у відповідність двійкове число, чим і досягається можливість введення зображення в ЕОМ.

Двовимірний характер зображення в порівнянні із звичайними сигналами містить додаткові можливості оптимізації цифрового представлення з метою скорочення обсягу одержуваних цифрових даних. У зв'язку із цим вивчалася питання про найкраще розміщення рівнів квантування, а також про використання різних растрів, інші аспекти цього завдання. Треба, однак, сказати, що в переважній більшості випадків на практиці застосовують дискретизацію, засновану на використанні прямокутного растра, і рівномірного квантування яскравості. Це пов'язане із простотою виконання відповідних операцій і відносно невеликими перевагами від використання оптимальних перетворень.

При використанні прямокутного растра в остаточному вигляді цифрове зображення звичайно являє собою матрицю, рядки й стовпці якої відповідають рядкам і стовпцям зображення.

Заміну неперервного зображення дискретним можна виконати різними способами. Можна, наприклад, вибрати будь-яку систему ортогональних функцій і, обчисливши коефіцієнти представлення зображення за цією системою (за цим базисом), замінити ними зображення. Різноманіття базисів дає можливість утворення різних дискретних представлень неперервного зображення. Однак найбільш розповсюдженою є періодична дискретизація, зокрема, як згадувалося вище, дискретизація із прямокутним растром. Такий спосіб дискретизації може розглядатися як один з варіантів застосування ортогонального базису, що використовує як свої елементи зрушені δ -функції. Далі докладно розглянемо основні особливості прямокутної дискретизації [17].

Нехай $x(t_1, t_2)$ – безперервне зображення, а $x(i_1, i_2)$ – відповідне йому дискретне, отримане з неперервного шляхом прямокутної дискретизації. Це означає, що зв'язок між ними визначається з виразу:

$$x(i_1, i_2) = x(i_1 \Delta t_1, i_2 \Delta t_2), \quad (1.1)$$

де Δt_1 , Δt_2 – відповідно вертикальний і горизонтальний кроки або інтервали дискретизації. Рис. 1.1 ілюструє розташування відліків на площині (t_1, t_2) при прямокутній дискретизації.

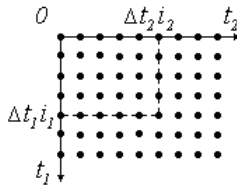


Рис. 1.1. Розташування відліків при прямокутній дискретизації

Основне питання, що виникає при заміні неперервного зображення дискретним, складається у визначенні умов, при яких така заміна є повноцінною, тобто не супроводжується втратою інформації, що

втримується в неперервному сигналі. Втрати відсутні, якщо, маючи у своєму розпорядженні дискретний сигнал, можна відновити неперервний. З математичної точки зору питання, полягає у відновленні неперервного сигналу у двовимірних проміжках між вузлами, в яких його значення відомі або, іншими словами, у здійсненні двовимірної інтерполяції. Відповіді на це питання можна, аналізуючи спектральні властивості неперервного й дискретного зображень.

Двовимірний неперервний частотний спектр $X(\Omega_1, \Omega_2)$ неперервного сигналу $x_H(t_1, t_2)$ визначається двовимірним прямим перетворенням Фур'є:

$$X(\Omega_1, \Omega_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x(t_1, t_2) \exp(-j\Omega_1 t_1 - j\Omega_2 t_2) dt_1 dt_2, \quad (1.2)$$

якому відповідає двовимірне зворотне безперервне перетворення Фур'є:

$$x(t_1, t_2) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} X(\Omega_1, \Omega_2) \exp(j\Omega_1 t_1 + j\Omega_2 t_2) d\Omega_1 d\Omega_2. \quad (1.3)$$

Останнє співвідношення правильне для будь-яких значеннях t_1, t_2 , у тому числі й у вузлах прямокутних ґрат $t_1 = i_1 \Delta t_1$; $t_2 = i_2 \Delta t_2$. Тому для значень сигналу у вузлах, з огляду на (1.1), співвідношення (1.3) можна записати у вигляді

$$x(i_1, i_2) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} X(\Omega_1, \Omega_2) \exp(j\Omega_1 i_1 \Delta t_1 + j\Omega_2 i_2 \Delta t_2) d\Omega_1 d\Omega_2. \quad (1.4)$$

Позначимо для ущільнення через $S(k_1, k_2)$ прямокутну ділянку у двовимірній частотній області

$$\frac{-\pi + 2\pi k_1}{\Delta t_1} \leq \Omega_1 \leq \frac{\pi + 2\pi k_1}{\Delta t_1}; \quad \frac{-\pi + 2\pi k_2}{\Delta t_2} \leq \Omega_2 \leq \frac{\pi + 2\pi k_2}{\Delta t_2}.$$

Обчислення інтеграла в (1.4) по всій частотній області можна замінити інтегруванням по окремих ділянках $S(k_1, k_2)$ і підсумовуванням результатів:

$$x(i_1, i_2) = \frac{1}{4\pi^2} \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{\infty} \iint_{S(k_1, k_2)} X(\Omega_1, \Omega_2) \times \\ \times \exp(j\Omega_1 \Delta t_1 i_1 + j\Omega_2 \Delta t_2 i_2) d\Omega_1 d\Omega_2.$$

Виконуючи заміну змінних за правилом $\Omega_2 \rightarrow \Omega_2 - 2\pi k_2 / \Delta t_2$, домагаємося незалежності області інтегрування від номерів k_1 і k_2 :

$$x(i_1, i_2) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\frac{\pi}{\Delta t_1}}^{\frac{\pi}{\Delta t_1}} \int_{-\frac{\pi}{\Delta t_2}}^{\frac{\pi}{\Delta t_2}} \sum_{k_1} \sum_{k_2} X(\Omega_1 + \frac{2\pi k_1}{\Delta t_1}, \Omega_2 + \frac{2\pi k_2}{\Delta t_2}) \times \\ \times \exp(j\Omega_1 \Delta t_1 i_1 + j\Omega_2 \Delta t_2 i_2) d\Omega_1 d\Omega_2.$$

Тут враховано, що $\exp(-j2\pi ki) = 1$ при будь-яких цілих значеннях k і i . Цей вираз за своєю формою дуже близький до зворотного перетворення Фур'є. Відмінність полягає лише в неправильному вигляді експонентного множника. Для надання йому необхідного вигляду введемо нормовані частоти $\omega_1 = \Omega_1 \Delta t_1$, $\omega_2 = \Omega_2 \Delta t_2$ й виконаємо відповідно до цього заміну змінних. У результаті одержимо:

$$x(i_1, i_2) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{\Delta t_1 \Delta t_2} \sum_{k_1} \sum_{k_2} X(\frac{\omega_1 + 2\pi k_1}{\Delta t_1}, \frac{\omega_2 + 2\pi k_2}{\Delta t_2}) \times \\ \times \exp(j\omega_1 i_1 + j\omega_2 i_2) d\omega_1 d\omega_2. \quad (1.5)$$

Тепер вираз (1.5) має форму зворотного перетворення Фур'є, отже під знаком інтеграла функція

$$X(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{\Delta t_1 \Delta t_2} \sum_{k_1} \sum_{k_2} X(\frac{\omega_1 + 2\pi k_1}{\Delta t_1}, \frac{\omega_2 + 2\pi k_2}{\Delta t_2}). \quad (1.6)$$

є двовимірним спектром дискретного зображення. У площині ненормованих частот вираз (1.6) такий:

$$X(\Omega_1\Delta t_1, \Omega_2\Delta t_2) = \frac{1}{\Delta t_1\Delta t_2} \sum_{k_1} \sum_{k_2} X_c\left(\Omega_1 + \frac{2\pi k_1}{\Delta t_1}, \Omega_2 + \frac{2\pi k_2}{\Delta t_2}\right). \quad (1.7)$$

З (1.7) випливає, що двовимірний спектр дискретного зображення є прямокутним періодичним з періодами $2\pi/\Delta t_1$ та $2\pi/\Delta t_2$ по осях частот Ω_1 і Ω_2 відповідно. Спектр дискретного зображення $X(\Omega_1, \Omega_2)$ утворюється в результаті додавання нескінченної кількості спектрів $X_H(\Omega_1, \Omega_2)$ безперервного зображення, що відрізняються один від одного частотними зрушеннями $2\pi/\Delta t_1$ та $2\pi/\Delta t_2$. Рис. 1.2 якісно показує співвідношення між двовимірними спектрами безперервного (рис. 1.2.а) і дискретного (рис. 1.2.б) зображень.

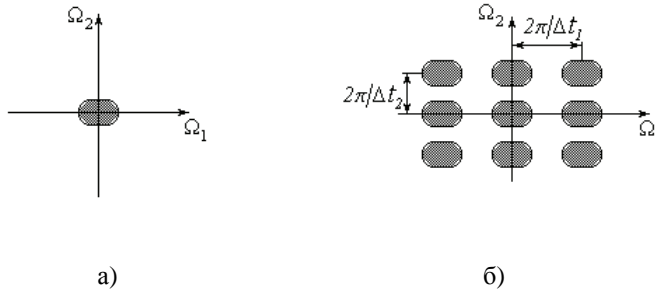


Рис. 1.2. Частотні спектри неперервного й дискретного зображень

Сам результат підсумовування істотно залежить від значень цих частотних зрушень, або, іншими словами, від вибору інтервалів дискретизації $\Delta t_1, \Delta t_2$. Допустимо, що спектр безперервного зображення $X_H(\Omega_1, \Omega_2)$ відмінний від нуля в деякій двовимірній області в околі нульової частоти, тобто описується двовимірною фінітною функцією. Якщо при цьому інтервали дискретизації обрані так, що $X_H(\Omega_1, \Omega_2) = 0$ при $|\Omega_1| \geq \pi/\Delta t_1$, $|\Omega_2| \geq \pi/\Delta t_2$, то накладення окремих околів при формуванні суми (1.7) відбуватися не буде. Отже, у межах

кожної прямокутної ділянки $S(k_1, k_2)$ від нуля буде відрізнятися лише один доданок. Зокрема, при $k_1 = 0, k_2 = 0$ маємо:

$$X(\Omega_1, \Omega_2) = \frac{1}{\Delta t_1 \Delta t_2} X_{\cdot}(\Omega_1, \Omega_2) \text{ при } (\Omega_1 (\geq \pi/\Delta t_1)), (\Omega_2 (\geq \pi/\Delta t_2)). \quad (1.8)$$

Таким чином, у межах частотної області $S(0,0)$ спектри неперервного й дискретного зображень із точністю до постійного множника збігаються. При цьому спектр дискретного зображення в цій частотній області містить повну інформацію про спектр неперервного зображення. Підкреслимо, що такий збіг має місце лише при домовлених умовах, обумовлених вдалим вибором інтервалів дискретизації. Відзначимо, що виконання цих умов, згідно з (1.8), досягається при значеннях інтервалів дискретизації $\Delta t_1, \Delta t_2$, які повинні задовольняти вимоги

$$\Delta t_1 \leq \pi/\Omega_{1\text{гр}}, \quad \Delta t_2 \leq \pi/\Omega_{2\text{гр}}, \quad (1.9)$$

де $\Omega_{1\text{гр}}, \Omega_{2\text{гр}}$ – граничні частоти двовимірного спектра.

Співвідношення (1.8) визначає спосіб одержання неперервного зображення $x_{\text{н}}(t_1, t_2)$ з дискретного $x(i_1, i_2)$. Для цього досить виконати двовимірну фільтрацію дискретного зображення низькочастотним фільтром із частотною характеристикою

$$K(j\Omega_1, j\Omega_2) = \begin{cases} \Delta t_1 \Delta t_2 & \text{для } (\Omega_1 (\leq \pi/\Delta t_1), (\Omega_2 (\leq \pi/\Delta t_2), \\ 0 & \text{для інших } \Omega_1, \Omega_2. \end{cases} \quad (1.10)$$

Спектр зображення на його виході містить ненульові компоненти лише в частотній області $S(0,0)$ й дорівнює, згідно з (1.8), спектра неперервного зображення $X_{\text{н}}(\Omega_1, \Omega_2)$. Це означає, що зображення на виході ідеального фільтра низьких частот збігається з $x_{\text{н}}(t_1, t_2)$

Таким чином, ідеальне інтерполяційне відновлення неперервного зображення виконується за допомогою двовимірного фільтра із прямокутною частотною характеристикою (1.10). Неважко записати в яв-

ному вигляді алгоритм відновлення безперервного зображення. Двовимірна імпульсна характеристика фільтра, що легко отримується за допомогою зворотного перетворення Фур'є від (1.10), має вигляд:

$$h(t_1, t_2) = \frac{\sin(\pi t_1 / \Delta t_1)}{\pi t_1 / \Delta t_1} \frac{\sin(\pi t_2 / \Delta t_2)}{\pi t_2 / \Delta t_2}.$$

Продукт фільтрації може бути визначений за допомогою двовимірної згортки вхідного зображення й даної імпульсної характеристики. Представивши вхідне зображення $x_{\text{вх}}(t_1, t_2)$ у вигляді двовимірної послідовності δ -функцій

$$x_{\text{вх}}(t_1, t_2) = \sum_{i_1} \sum_{i_2} x(i_1, i_2) \cdot \delta(t_1 - i_1 \Delta t_1) \delta(t_2 - i_2 \Delta t_2),$$

після виконання згортки знаходимо:

$$x(t_1, t_2) = \sum_{i_1} \sum_{i_2} x(i_1, i_2) \times \frac{\sin[\pi(t_1 - i_1 \Delta t_1) / \Delta t_1]}{\pi(t_1 - i_1 \Delta t_1) / \Delta t_1} \frac{\sin[\pi(t_2 - i_2 \Delta t_2) / \Delta t_2]}{\pi(t_2 - i_2 \Delta t_2) / \Delta t_2}. \quad (1.11)$$

Отримане співвідношення вказує спосіб точного інтерполяційного відновлення безперервного зображення за відомою послідовністю його двовимірних відліків. Відповідно до цього виразу для точного відновлення в ролі функцій, що інтерполюють, повинні використатися двовимірні функції виду $\sin x/x$. Співвідношення (1.11) являє собою двовимірний варіант теореми Котельникова-Найквіста [18].

Підкреслимо ще раз, що ці результати справедливі, якщо двовимірний спектр сигналу є фінітним, а інтервали дискретизації досить малі. Справедливість зроблених висновків порушується, якщо хоча б одна з цих умов не виконується. Реальні зображення рідко мають спектри з яскраво вираженими граничними частотами. Однією з причин, що приводять до необмеженості спектра, є обмеженість розмірів зображення. Через це при додаванні в (1.7) у кожній із зон $S(k_1, k_2)$ проявляється дія доданків із сусідніх спектральних зон. При цьому то-

чне відновлення неперервного зображення стає взагалі неможливим. Зокрема, не приведе до точного відновлення й використання фільтра із прямокутною частотною характеристикою.

Особливістю оптимального відновлення зображення в проміжках між відліками є використання всіх відліків дискретного зображення, як це пропонується процедурою (1.11). Це не завжди зручно, часто потрібно відновлювати сигнал у локальній області, опираючись на деяку невелику кількість наявних дискретних значень. У цих випадках доцільно застосовувати квазіоптимальне відновлення за допомогою різних функцій, що інтерполюють. Такого роду завдання виникає, наприклад, при розв'язанні проблеми прив'язки двох зображень, коли через геометричні настройки цих зображень наявні відліки одного з них можуть відповідати деяким точкам, що перебувають у проміжках між вузлами іншого [19, 20].

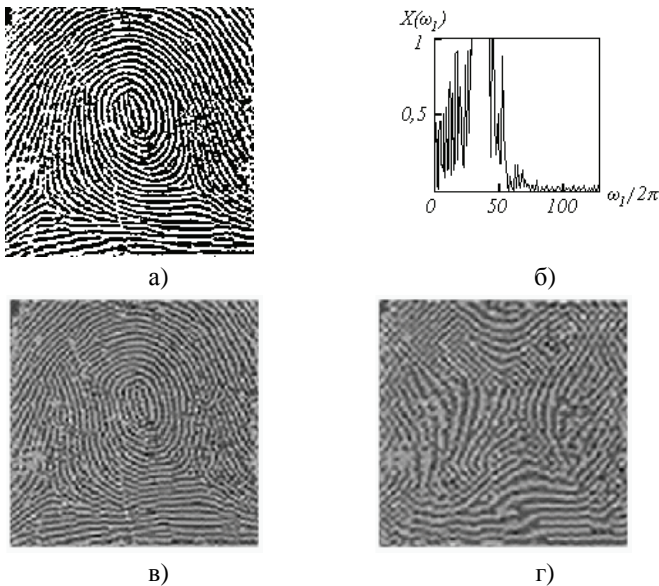


Рис. 1.3. Вплив інтервалу дискретизації на відновлення зображення «Відбиток пальця»

Рис. 1.3 ілюструє вплив інтервалів дискретизації на відновлення зображень. Вихідне зображення, що представляє собою відбиток пальця, наведене на рис. 1.3а, а один з перетинів його нормованого спектра – на рис. 1.3б. Це зображення є дискретним, а як гранична частота використане значення $\omega_{1гр} = 2\pi \cdot 128$. Як видно з рис. 1.3б, значення спектра на цій частоті дуже мале, що гарантує якісне відновлення. По суті справи, спостережувана на рис. 1.3 а картина і є результатом відновлення безперервного зображення, а роль фільтра, що відновлює, виконує пристрій візуалізації – монітор або принтер. У цьому сенсі зображення рис. 1.3а може розглядатися як неперервне.

Рис. 1.3в,г показують наслідки від неправильного вибору інтервалів дискретизації. При їхньому одержанні здійснювалася дискретизація безперервного зображення рис. 1.3а шляхом проріджування його відліків. Рис. 1.3в відповідає збільшенню кроку дискретизації по кожній координаті в три, а рис. 1.3г – у чотири рази. Це було б припустиме, якби значення граничних частот були нижчими в таке ж число раз. У дійсності, як видно з рис.1.3б, відбувається порушення вимог (1.9), особливо грубе при чотириразовому проріджуванні відліків. Тому відновлені за допомогою алгоритму (1.11) зображення виявляються не тільки розфокусованими, але й сильно спотворюють текстуру відбитка.

На рис. 1.4 наведена аналогічна серія результатів, отриманих для зображення типу «Портрет». Наслідки сильнішого проріджування (у чотири рази на рис. 1.4в і в шість разів на рис. 1.4г проявляються в основному у втраті чіткості. Суб'єктивно втрати якості представляються менш значними, ніж на рис. 1.3. Це знаходить своє пояснення в значно меншій ширині спектра, ніж у зображення відбитка пальця. Дискретизація вихідного зображення відповідає граничній частоті $\omega_{1ф} = 2\pi \cdot 86$. Як видно з рис. 1.4б, це значення набагато перевищує значення $\omega_{1гр}$. Тому збільшення інтервалу дискретизації, зображене на рис.1.3в,г, хоча й погіршує картину, все-таки не приводить до таких руйнівних наслідків, як у попередньому прикладі.

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-404-8>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-404-8>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-404-8>

Наукове видання

Володимир Прокопович Кожем'яко
Анатолій Степанович Васюра
Наталія Василівна Сачанюк-Кавецька
Олександр Вікторович Кириченко

Принципи ущільнення та перетворення зображень

Монографія

Оригінал-макет підготовлено О. Кириченко

Редактор С. Малішевська

Підписано до друку 22.03.2011 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. Арк. 13,98
Наклад 100 прим. Зам № 2011-078

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.