

УДК 519.713

КЛИМЕНКО Л. А., к.т.н. доцент,
ГОРДІЄНКО А. Ю., магістрант
(Український державний університет залізничного транспорту)

Аналіз методів стиснення зображень на основі дискретно - косинусного перетворення

У статті проводиться аналіз методів стиснення динамічних зображень, що набули найбільшого практичного застосування, – JPEG, MPEG, ДКП. Розглядається дискретно-косинусне перетворення як найбільш ефективний метод стиснення надмірної інформації. Стиснення у ДКП виконується за допомогою квантування коефіцієнтів ДКП, які були обчислені із застосуванням вхідних даних. Квантування коефіцієнтів ДКП може істотно покращити стиснення, причому при досить малій втраті даних. Також ці значення можна використовувати для відновлення вхідних даних.

Ключові слова: інформація, стиснення, відеозображення, MPEG, дискретно-косинусне стиснення, перетворення Фур'є, одновимірне ДКП, двовимірне ДКП, зворотне ДКП, квантування, вектор.

Вступ

Пропускна спроможність систем передачі даних не може зростати одночасно зі збільшенням кількості інформації. Ця проблема має три рішення. Перше – обмеження кількості інформації, але, на жаль, це не завжди допустимо. Наприклад, для динамічних даних це означає зменшення розширення, що призведе до втрати, і може зробити зображення взагалі некорисним (наприклад для медичних або космічних зображень). Друге – збільшення об'єму носіїв інформації і пропускної спроможності каналів зв'язку. Це рішення пов'язано з матеріальними витратами, між іншим, деколи дуже значними. Третє рішення – використання стиснення інформації. Це рішення дає змогу в декілька разів зменшити вимоги до об'єму пристроїв зберігання інформації і пропускної спроможності каналів зв'язку без додаткових витрат (крім витрат на реалізацію алгоритмів стиснення). Умовами його застосування є надлишок інформації і можливість встановлення спеціального програмного забезпечення або апаратури як поблизу джерела, так і поблизу приймача інформації. Саме завдяки необхідності використання стиснення інформації методи стиснення є досить поширеними.

Постановка проблеми

Особливість сучасних інформаційно-обчислювальних систем – обробка та передача великих обсягів відеоданих, при цьому швидкість може бути обмежена. Це призводить до затримок при передачі та втрат частини інформації.

Надлишковість даних для людини зазвичай полегшує сприйняття інформації. Але при зберіганні та передачі інформації засобами комп'ютерної техніки по каналах зв'язку надлишковість призводить до зростання вартості апаратури. Актуальною є ця проблема у разі потреби обробки великих обсягів інформації при незначних об'ємах носіїв даних. У зв'язку з цим постійно виникає проблема усунення надлишковості або стиснення даних.

Метою статті є аналіз найбільш ефективних методів стиснення зображень з точки зору можливості їх застосування для вирішення поставленої проблеми та визначення ефективності дискретно-косинусного перетворення як методу стиснення зображень.

Виокремлення частин загальної проблеми, яким присвячується стаття

Усунення повторення фрагментів заміною повторюваних послідовностей більш коротким значенням (кодом). Стиснення без втрат актуальне при роботі з текстовими і програмними файлами, у задачах криптографії. Існують також методи стиснення із втратами. Вони найчастіше використовуються для мультимедіа даних (аудіо, відео, зображення), для потокової передачі даних. У цьому контексті такі методи часто називаються кодеками. Існують дві основні схеми стиснення із втратами:

– у трансформувальних кодах стиснення (англ. lossy transform codecs) беруться фрейми зображень або звуку, розрізаються на невеликі сегменти, трансформуються в новий базисний простір і здійснюється квантування. Результат потім стискається ентропійними методами;

– у предиктивних кодах стиснення (англ. *lossy predictive codecs*) попередні і/або наступні дані використовуються для того, щоб передбачити поточний фрейм зображення або звуку. Помилка між передбаченими даними і реальними разом з додатковою інформацією, необхідною для здійснення предикта, потім квантується і кодується.

У деяких системах ці дві техніки комбінуються шляхом використання трансформувальних кодеків для стиску помилкових сигналів, згенерованих на стадії передбачення.

Основний матеріал

Виходячи з аналізу літератури [1-6] та проведених досліджень, можна зробити такі висновки. Поточкові алгоритми стиснення працюють з послідовністю кадрів, а статичні стискають кожне окреме зображення. Більшість алгоритмів мають за основу дискретно-косинусне стиснення (ДКС), в загальному випадку цифровому еквіваленту надається вигляд, зручний для скорочення надлишкової інформації. В цьому відношенні найбільш ефективним є перетворення відеоінформації з часової області у спектральну. Це перетворення, як правило, розбиває зображення на фрагменти (MPEG-блоки), які потім окремо підлягають необхідній обробці. Результат перетворення являє собою сукупність спектральних коефіцієнтів, які характеризують амплітуди просторових частот зображення.

В основу перетворення зображень можуть бути покладені різні прийоми. Найбільш часто використовуються методи лінійних ортогональних перетворень. Лінійність перетворень означає, що операції додавання, віднімання і множення на скаляр залишаються такими самими після перетворень, точка залишається точкою, пряма – прямою, з можливою зміною масштабу, положення, кута нахилу, а ортогональність – фрагмент, що перетворено представляється обмеженим набором ортогональних функцій. Лінійні перетворення можна здійснювати як з безперервним, так і з дискретним сигналом. У першому випадку процесу перетворення відповідає інтегральна форма запису, в другому – матрична.

Формат JPEG є поширеним для стиснення зображень. Такий алгоритм фактично є стандартом для стиснення нерухомих цифрових зображень і забезпечує стиснення зображення в декілька десятків разів. JPEG-алгоритм є основною складовою частиною багатьох методів стиснення послідовностей рухомих зображень, наприклад методу MJPEG. Також він реалізований в апаратних засобах формування відеозображень і їх введення в комп'ютер, і це забезпечує стиснення послідовностей даних у реальному масштабі часу, що важливо при дослідженні розвитку деформації в часі. Стиснення за

JPEG-алгоритмом може виконуватися безпосередньо при формуванні відеоданих у цифровому форматі.

У результаті цей алгоритм забезпечує: зменшення часу прийому даних; можливість дослідження динаміки різних процесів у реальному масштабі часу; раціональну організацію зберігання цифрових відеозображень.

При стисненні цифрових відеоданих за JPEG-алгоритмом виникають втрати деякої частини інформації про яскравість і колір дискретних точок цих зображень. В основному це інформація про амплітуду верхніх частот у спектрі зображення. Можливість вилучення цієї частини інформації впливає з особливостей сприйняття відеозображень людиною. В результаті стиснення до певних меж не має суттєвого впливу на візуальну якість зображення. Ця якість може бути оцінена на основі об'єктивних або суб'єктивних критеріїв, наприклад, методом експертних оцінок. Основою об'єктивних критеріїв оцінки якості відновлених після стиснення зображень є оцінювання розбіжності яскравості і кольору всієї множини дискретних точок та в області контурів об'єктів початкового і відновленого після стиснення відеозображення.

Важливість такої оцінки пояснюється тим, що визначення координат точок контурів об'єктів виконується на основі обробки перепадів яскравості на зображенні, а ці перепади в значній мірі визначаються верхніми частотами у спектрі зображення, які частково вилучаються при стисненні за JPEG-алгоритмом. Узагальнену схему алгоритму JPEG зображено на рис. 1.

Для динамічних зображень використовують MPEG. Методи стиснення, зокрема MPEG, є асиметричними, оскільки алгоритми кодування набагато складніші за алгоритм декодування. Кодер має бути алгоритмічним або адаптивним, тимчасом як декодер простий і виконує обмежений набір дій. Такий підхід застосовано для спрощення використання відеозображень, оскільки складних та дорожчих кодерів набагато менше, ніж простіших та дешевих декодерів. Застосований підхід незвичний для ISO, оскільки стандартизовано не кодери, а визначено алгоритм обробки декодером потоку даних. Декодер, здатний коректно обробляти потік даних, називається сумісним. Перевага стандартизації декодерів полягає в тому, що в майбутньому алгоритми кодування можуть поліпшуватись, а сумісні декодери зможуть обробляти створені потоки даних. Стандарти MPEG містять не багато інформації про структуру та дію кодерів, тому реалізації можуть бути пропріетарними. Це створює умови для конкуренції між різними реалізаціями кодерів, користувачі матимуть вибір серед різних позицій якості та ціни, а сумісні декодери працюватимуть зі всіма кодерами. Існує кілька стандартів алгоритму MPEG:

– MPEG-1. Використовується потокове стиснення відео, коли аналізується динаміка зміни зображень на сусідніх кадрах. За рахунок цього усуваються надлишкові дані. MPEG-1 починає стиснення зі створення ключового або базового кадру (I-кадру). I-кадри відіграють роль опорних при відновленні решти кадрів зображень і розміщуються послідовно через кожні 10-15 кадрів. Тільки деякі фрагменти зображення між I-кадрами зазнають змін. Саме ця різниця зберігається при стисненні;

– MPEG-2 визначає стандарт відео і звуку при інтенсивності потоку від 2 до 10 Мбайт/с;

– MPEG-3 розроблявся для телебачення високої чіткості HDTV, але виявилось, що MPEG-1 і MPEG-2 повністю задовольняють ці задачі;

– MPEG-4 задає правила об'єктно-орієнтованого середовища. Ключовими поняттями є медіа-об'єкти – аудіо, відео, графічні (2- і 3-вимірні) і текстові. Об'єкти можуть бути як природними, тобто знятими з відеокамери або сканера, так і синтезованими, тобто штучно створеними засобами комп'ютерної графіки та обробки.



Рис. 1. Структурна схема алгоритму JPEG

Головна відмінність MPEG-4 – це те, що остаточне складання образу відбувається на кінцевому пристрої – комп'ютері або відеоприставці. Тому існує можливість спрямовано використовувати на зображення різні ефекти, задавати параметри окремих об'єктів або здійснювати зворотний зв'язок. Він може змінити в майбутньому всю концепцію телебачення. Глядач може впливати на перегляд відеозображення. Команди користувача, на які має зреагувати пристрій декодування, можуть бути складнішими – зміна точки спостереження, видалення певних об'єктів, зміна мови для конкретного персонажа. Але зміни мають бути передбачені авторами фільму. Для створення зворотного зв'язку користувачка сторона може передавати зворотні дані на сервер.

Стандартом MPEG також описано протокол та синтаксис, які дають змогу поєднати аудіо- та відеодані аби створити цифровий еквівалент телепрограми. Декілька програм можуть бути передані в одному потоку даних. Також визначаються метадані, що використовуються декодерами для коректного демультимплексування.

MJPEG (Motion JPEG) – покадровий метод відеостиснення, основною особливістю якого є стиснення кожного окремого кадру відеопотоку за допомогою алгоритму стиснення зображень JPEG.

MJPEG поєднує в собі переваги Inter і Intra кодеків. Досвід використання мегапіксельних систем

IP-відеоспостереження показав, що доступні стандарти стиснення були створені для запису великих об'ємів відео високої роздільної здатності. Однією з головних причин цього є факт, що при використанні відео з метою спостереження точна ідентифікація того, що змінилося в межах зони контролю, є критичним чинником. Саме з цією функцією у Inter-кодеків виникають проблеми. MJPEG фактично об'єднує сильні сторони Intra і Inter кодер-декодерів у методі компресії власної розробки – MJPEG. Цей метод надає можливість передачі потоку, яку можна отримати за допомогою Inter-кодека (MPEG), і неперевершену якість зображення, як з використанням Intra-кодека (JPEG).

Таким чином, з MJPEG стає можливим використання як статичних зображень, так і змінених сегментів для ідентифікації об'єктів. Перевагами MJPEG є те, що майже немає затримок при передачі з камери на екран і MJPEG також забезпечує аудіопотік, який синхронізований з відео. Стандартний комп'ютер P4 (IntelPentium IV 3.0 GHz, 512mb RAM, 16mb Відео) може обробляти до 40 потоків MJPEG одночасно на перегляд і запис при 25fps. Це просто неможливо з Inter-кодеками, такими як MPEG - 4/H.264.

З різних ортогональних перетворень, що дозволяють ефективно виявляти надмірну інформацію, стандартом MPEG рекомендовано використовувати дискретно-косинусне перетворення (ДКП), що є

окремим випадком двовимірного перетворення Фур'є. У цифрових системах сигнал – це послідовність дискретних відліків. При використанні перетворення Фур'є для фрагмента цифрового сигналу з деякого обмеженого числа відліків останній можна розкласти на таке саме число дискретних частот. Це перетворення називають дискретним перетворенням Фур'є.

Оскільки будь-яке зображення або його фрагмент можна розглядати як функцію зміни яскравості (кольоровості) як по осі X, так і по осі Y, то дискретне ортогональне перетворення Фур'є буде являти собою заміну масиву відліків зображення відповідного фрагмента на масив коефіцієнтів, відповідних амплітудам частотних складових Фур'є.

$$F_{(m,n)} = \frac{2}{n} C_{(m)} C_{(n)} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f_{(x,y)} \cos \frac{\pi m(2x+1)}{2N-1} \cos \frac{\pi n(2y+1)}{2N-1}, \quad (1)$$

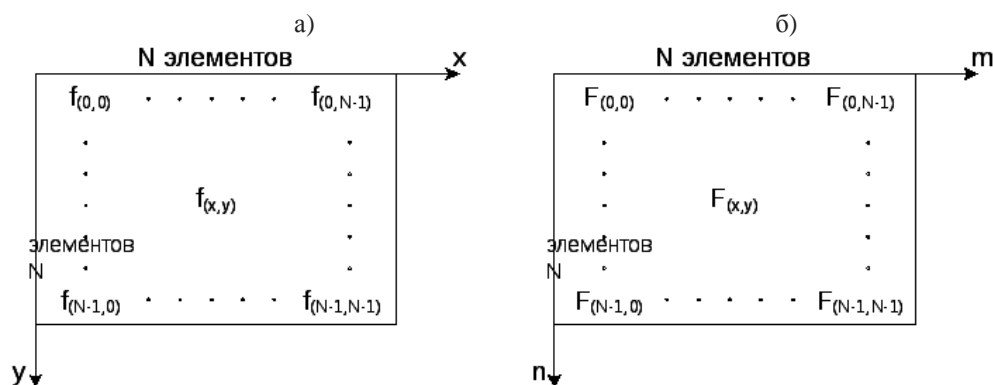
де $C_{(m)} = 1$ при $m \neq 1$, $C_{(m)} = 0$ при $m = 0$;
 $C_{(n)} = 1$ при $n \neq 1$, $C_{(n)} = 0$ при $n = 0$;
 $f_{(x,y)}$ – відліки зображення з просторовими координатами x, y (від 0 до $N-1$);
 N – розмір блока зображення ($N \times N$ елементів);
 $F_{(m,n)}$ – коефіцієнти, що характеризують зображення у спектральній площині m, N (від 0 до $N-1$).

Обсяг розрахунків для знаходження цих коефіцієнтів досить значний. Тому перетворення здійснюються над невеликими за розміром фрагментами, зазвичай 8×8 елементів. Дискретно-косинусне перетворення Фур'є певною мірою мінімізує обсяг цих обчислень використанням як набору перетворювальних (базисних) функцій тільки косинусних складових. У результаті масиву вихідних значень сигналу відповідає масив з такого самого числа коефіцієнтів. Приклад можна розглянути на рис. 2.

Аналітично двовимірне дискретно-косинусне перетворення описується таким чином:

ДКП є зворотним – за розподілом $F_{(m,n)}$ зворотним перетворенням однозначно відновлюється $f_{(x,y)}$.

Оскільки число відліків перетвореного сигналу дорівнює числу відліків перетвореного сигналу, усунення надмірності інформації в результаті такого перетворення не відбувається. Однак слід звернути увагу на значну зміну змісту блока коефіцієнтів ДКП по відношенню до блока перетворюваного зображення. Приклад дискретно-косинусного перетворення подано на рис. 3.



а – блок зображення; б – блок коефіцієнтів дискретно-косинусного перетворення

Рис. 2. Перетворення блока зображення $f(x, y)$ у блок коефіцієнтів $F(m, n)$

За фізичним змістом блок коефіцієнтів ДКП являє собою сукупність значень амплітуд просторових косинусоїдальних гармонік з частотами m і n . При цьому значення $F_{(0,0)}$ пропорційне середньому рівню (постійної складової) в блоці і може досягати при 256 рівнях квантування значення 2040 (щоб помилки від округлення коефіцієнтів ДКП не позначалися істотним чином на точності перетворення, їх значення на етапі

перетворення збільшені у вісім разів порівняно з їхніми дійсними значеннями).

Компоненти $F_{(0,1)}$ і $F_{(1,0)}$ характеризують плавну зміну яскравості в блоці. Різничастотні зміни яскравості пікселів з діагональними структурами характеризуються діагональними спектральними компонентами $F_{(1,1)}, F_{(1,2)}, F_{(1,3)}$.

Зазвичай, для більшості блоків зображення, лише мала частина коефіцієнтів має значну величину. Це пояснюється невеликими розмірами блока, всередині якого яскравість змінюється мало, і тому відносно

великі величини мають тільки постійні складові і кілька низькочастотних компонентів, розташованих у лівому верхньому кутку матриці коефіцієнтів ДКП.

59	59	59	60	60	65	64	64
63	62	62	62	62	61	61	62
137	123	111	101	96	89	88	86
237	236	235	233	231	216	213	208
225	229	232	232	231	237	238	239
193	195	197	198	199	204	204	205
182	182	181	181	181	180	180	180
183	182	181	180	179	178	178	177

1249	19	3	1	1	0	1
-381	14	3	2	2	0	1
-318	-14	3	1	-1	0	1
31	-45	-4	-3	-5	0	2
154	-7	-8	-2	-2	0	-1
38	20	-3	2	2	0	-2
-39	11	8	3	0	1	1
-42	3	10	1	-1	1	1

а – блок зображення; б – блок коефіцієнтів дискретно-косинусного перетворення

Рис. 3. Приклад дискретно-косинусного перетворення для деякого довільного сюжету

Дрібним деталям зображення, як відомо, відповідають високі просторові частоти, а коефіцієнти ДКП характеризують їх амплітуди, розташовуються правіше і нижче. Оскільки дрібні деталі зображення, як правило, виражені енергетично слабо щодо середнього рівня, то і відповідні їм коефіцієнти ДКП порівняно з $F_{(0,0)}$ малі або взагалі дорівнюють нулю.

Таким чином, якщо передавати замість значень яскравості зображення коефіцієнти ДКП, то збільшення швидкості передачі даних може бути досягнуто вже хоча б за рахунок виключення нульових коефіцієнтів.

Передусім розглянемо одновимірне (векторне) перетворення ДКП. Одновимірне ДКП можна також інтерпретувати як подвійне обертання. Або можна розглянути векторний простір, базисом якого служать вектори v_i , і виразити будь-який вектор цього простору у вигляді лінійної комбінації векторів.

Наприклад, виберемо 8 (корельованих) чисел $p=(0.6, 0.5, 0.4, 0.5, 0.6, 0.5, 0.4, 0.55)$ як дані. Визначимо вектор p у вигляді суми восьми векторів $p = \sum_i w_i v_i$.

Розв'язавши цю систему з 8 лінійних рівнянь, знаходимо вісім ваг $w_0 = 0.506, w_1 = 0.0143, w_2 = 0.0115, w_3 = 0.0439, w_4 = 0.0795, w_5 = -0.0432, w_6 = 0.00478, w_7 = -0.0077$.

Вага w_0 не дуже відрізняється від елементів вектора p , але інші сім ваг набагато менші. Це показує, як ДКП (або будь-яке інше ортогональне перетворення) виробляє стиснення. Тепер можна просто записати ці вісім ваг в стислий файл, де вони будуть займати менше місця, ніж вісім компонентів вихідного вектора. Квантування ваг може істотно підвищити чинник стиснення, причому при досить малій втраті даних.

На практиці одновимірне ДКП простіше обчислити за формулою:

$$G_f = C_f \sum_{t=0}^{N-1} p(t) \cos\left(\frac{(2t+1)f\pi}{2N}\right), \quad (2)$$

$$\text{де } C_f = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}}, f = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, f > 0 \end{cases}, \text{ при } f = 0, 1, \dots, N - 1.$$

Наступний приклад демонструє переваги методу ДКП. Розглянемо множину $p(t)$, що складається з 8 величин (вхідних даних) $p=(12, 10, 8, 10, 12, 10, 8, 11)$, при цьому $t = 0, \dots, 7$, а $N = 8$ відповідно.

Застосовуємо ДКП до вхідних даних за допомогою формули (2):

$$G_0 = \sqrt{\frac{1}{8}} \left(12 \cos \frac{(2 \cdot 0 + 1) \cdot \pi \cdot 0}{2 \cdot 8} + 10 \cos \frac{(2 \cdot 1 + 1) \cdot \pi \cdot 0}{2 \cdot 8} + 8 \cos \frac{(2 \cdot 2 + 1) \cdot \pi \cdot 0}{2 \cdot 8} + \right. \\ \left. + 10 \cos \frac{(2 \cdot 3 + 1) \cdot \pi \cdot 0}{2 \cdot 8} + 12 \cos \frac{(2 \cdot 4 + 1) \cdot \pi \cdot 0}{2 \cdot 8} + 10 \cos \frac{(2 \cdot 5 + 1) \cdot \pi \cdot 0}{2 \cdot 8} + 8 \cos \frac{(2 \cdot 6 + 1) \cdot \pi \cdot 0}{2 \cdot 8} + \right. \\ \left. + 11 \cos \frac{(2 \cdot 7 + 1) \cdot \pi \cdot 0}{2 \cdot 8} \right)$$

Підставивши f , що дорівнює 0, в косинуси, отримуємо $\cos 0^\circ = 1$, тому формулу можна спростити.

$$G_0 = \sqrt{\frac{1}{8}}(12 + 10 + 8 + 10 + 12 + 10 + 8 + 11) = \frac{81}{\sqrt{8}} = \frac{81}{2,828} = 28,642.$$

Перший коефіцієнт дорівнює 28,642. За таким принципом знаходимо інші коефіцієнти.

$$G_1 = \sqrt{\frac{2}{8}}(12 \cos \frac{\pi}{16} + 10 \cos \frac{3\pi}{16} + 8 \cos \frac{5\pi}{16} + 10 \cos \frac{7\pi}{16} + 12 \cos \frac{9\pi}{16} + 10 \cos \frac{11\pi}{16} + 8 \cos \frac{13\pi}{16} + 11 \cos \frac{15\pi}{16}) = \frac{1}{2}(11,769 + 8,315 + 4,445 + 1,951 - 2,941 - 5,556 - 6,652 - 10,789) = \frac{1,142}{2} = 0,571$$

$$G_2 = \sqrt{\frac{2}{8}}(12 \cos \frac{\pi}{8} + 10 \cos \frac{3\pi}{8} + 8 \cos \frac{5\pi}{8} + 10 \cos \frac{7\pi}{8} + 12 \cos \frac{9\pi}{8} + 10 \cos \frac{11\pi}{8} + 8 \cos \frac{13\pi}{8} + 11 \cos \frac{15\pi}{8}) = \frac{1}{2}(11,087 + 3,827 - 3,062 - 9,239 - 11,087 - 3,827 + 3,062 + 10,163) = \frac{0,924}{2} = 0,462$$

$$G_3 = \sqrt{\frac{2}{8}}(12 \cos \frac{3\pi}{16} + 10 \cos \frac{9\pi}{16} + 8 \cos \frac{15\pi}{16} + 10 \cos \frac{21\pi}{16} + 12 \cos \frac{27\pi}{16} + 10 \cos \frac{33\pi}{16} + 8 \cos \frac{39\pi}{16} + 11 \cos \frac{45\pi}{16}) = \frac{1}{2}(9,978 - 1,951 - 7,846 - 5,556 + 6,667 + 9,808 + 1,561 - 9,146) = \frac{3,515}{2} = 1,7575$$

$$G_4 = \sqrt{\frac{2}{8}}(12 \cos \frac{\pi}{4} + 10 \cos \frac{3\pi}{4} + 8 \cos \frac{5\pi}{4} + 10 \cos \frac{7\pi}{4} + 12 \cos \frac{9\pi}{4} + 10 \cos \frac{11\pi}{4} + 8 \cos \frac{13\pi}{4} + 11 \cos \frac{15\pi}{4}) = \frac{1}{2}(8,485 - 7,071 - 5,657 + 7,071 + 8,485 - 7,071 - 5,657 + 7,778) = \frac{6,363}{2} = 3,1815$$

$$G_5 = \sqrt{\frac{2}{8}}(12 \cos \frac{5\pi}{16} + 10 \cos \frac{15\pi}{16} + 8 \cos \frac{25\pi}{16} + 10 \cos \frac{35\pi}{16} + 12 \cos \frac{45\pi}{16} + 10 \cos \frac{55\pi}{16} + 8 \cos \frac{65\pi}{16} + 11 \cos \frac{75\pi}{16}) = \frac{1}{2}(6,667 - 9,808 + 1,561 + 8,315 - 9,978 - 1,951 + 7,846 - 6,111) = \frac{-3,459}{2} = -1,7295$$

$$G_6 = \sqrt{\frac{2}{8}}(12 \cos \frac{3\pi}{8} + 10 \cos \frac{9\pi}{8} + 8 \cos \frac{15\pi}{8} + 10 \cos \frac{21\pi}{8} + 12 \cos \frac{27\pi}{8} + 10 \cos \frac{33\pi}{8} + 8 \cos \frac{39\pi}{8} + 11 \cos \frac{45\pi}{8}) = \frac{1}{2}(4,592 - 9,239 + 7,391 - 3,827 - 4,592 + 9,239 - 7,391 + 4,2095) = \frac{0,3825}{2} = 0,19125$$

$$G_7 = \sqrt{\frac{2}{8}}(12 \cos \frac{7\pi}{16} + 10 \cos \frac{21\pi}{16} + 8 \cos \frac{35\pi}{16} + 10 \cos \frac{49\pi}{16} + 12 \cos \frac{63\pi}{16} + 10 \cos \frac{77\pi}{16} + 8 \cos \frac{91\pi}{16} + 11 \cos \frac{105\pi}{16}) = \frac{1}{2}(2,341 - 5,556 + 6,652 - 9,808 + 11,769 - 8,315 + 4,445 - 2,146) = \frac{-0,618}{2} = -0,309$$

У результаті обчислень отримуємо 8 коефіцієнтів 28.642, 0.571, 0.462, 1.7575, 3.1815, - 1.7295, 0.19125, - 0.309. Ці значення можна використовувати для точного відновлення вхідних даних, але наша мета – покращити стиснення за допомогою квантування коефіцієнтів. Округляємо їх до 28.6, 0.6, 0.5, 1.8, 3.2, - 1.8, 0.2, -0.3, застосовуємо зворотне ДКП та отримуємо 12.0254, 10.0233, 7.96054, 9.93097, 12.0164, 9.99321, 7.94354, 10.9989.

Ще раз квантуємо (округляємо) коефіцієнти до 28, 1, 1, 2, 3, -2, 0, 0 і знову за допомогою ДКП отримуємо результат 12.1883, 10.2315, 7.74931, 9.20863, 11.7876, 9.54549, 7.82865, 10.6557.

Квантуємо останній раз до 28, 0, 0, 2, 3, -2, 0, 0 і отримуємо з допомогою ДКП послідовність 11.236, 9.62443, 7.66286, 9.57302, 12.3471, 10.0146, 8.05304, 10.6842, в якій найбільша різниця між вихідними даними (12) та реконструйованими (11.236) дорівнює 0.764 (6.4 % від 12).

Добре відомо, що пікселі зображення мають кореляцію за двома напрямками, а не тільки за одним (пікселі корелюються зі своїми сусідами зліва, справа, а також зверху і знизу). Тому методи стиснення зображень використовують двовимірне ДКП, яке задається формулою:

$$G_{ij} = \frac{1}{\sqrt{2n}} C_i C_j \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=0}^{n-1} p_{xy} \cos\left(\frac{(2y+1)j\pi}{2n}\right) \cos\left(\frac{(2x+1)i\pi}{2n}\right), \quad (3)$$

При $0 \leq i, j \leq n - 1$. Зображення розбивається на блоки пікселів p_{xy} розміром $n \times n$ (у нашому прикладі $n = 8$), та формулу використовують для знаходження коефіцієнтів G_{ij} для кожного блока пікселів. Якщо допускається часткова втрата інформації, то коефіцієнти квантуються. Декодер відновлює стиснутий блок даних (точно або наближено), обчислюючи зворотне ДКП (IDCT) за формулою:

$$p_{xy} = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 C_i C_j C_{ij} \cos\left(\frac{(2y+1)j\pi}{16}\right) \cos\left(\frac{(2x+1)i\pi}{16}\right), \quad (4)$$

$$\text{де } C_f = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, f = 0 \\ 1, f > 0 \end{cases}$$

Двовимірне ДКП можна розглядати двома способами. Перший – за допомогою обертання (композиції двох обертань), другий – за допомогою бази у n -вимірному векторному просторі.

Висновки та перспективи подальшого застосування

Виходячи з результатів проведених досліджень, стиснення будь-якого зображення за допомогою ДКП можна виконати таким чином:

1. Розділити його на k блоків пікселів розміром $n \times n$ (зазвичай 8×8).

2. Застосувати ДКП до кожного з блоків, тобто подати кожен блок у вигляді лінійної комбінації 64 базисних блоків. Результатом будуть блоки $W^{(i)}$ з 64 ваг w_j^i , де $j = 0, 1, \dots, 63$.

3. Всі k векторів $W^{(i)}$ ($i = 1, 2, \dots, k$) розділити на 64 вектори коефіцієнтів $C^{(i)}$ компонентами $(w_j^{(1)}, w_j^{(2)}, \dots, w_j^{(k)})$. Вектор перших компонентів $C^{(0)}$ складається з k коефіцієнтів ДКП.

4. Зробити квантування кожного вектора коефіцієнтів $C^{(i)}$ незалежно один від одного. Отриманий квантований вектор $Q^{(i)}$ записати у стиснений файл.

Декодер зчитує 64 квантованих вектори коефіцієнтів, використовує їх для побудови k вагових векторів $W^{(i)}$ та застосовує зворотне ДКП до кожного вагового вектора для реконструкції 64 пікселів блока B_i .

Основна мета полягає у знаходженні оптимального компромісу між високим рівнем стиснення, тобто якістю зображення без особливо помітних втрат.

Переваги та недоліки таких методів:

– закруглення гострих кутів зображення (випадкове «розмивання» гострих країв зображень);

– кодування – дуже трудомісткий процес, тільки останнім часом вдалося здійснити процес кодування програмно, а не апаратно;

– застосування ДКП на блоці з N вибірок задає $N \cdot N$ операцій множення і додавання. Однак, завдяки рекурсивній структурі матриці, ДКП потрібна набагато менша кількість математичних операцій, а саме $N \log(N)$. Ця властивість робить ДКП методом, який застосовується на сучасних математичних процесорах персональних ЕОМ.

Список використаних джерел

1. Білинський Й. Й., Огородник К. В., Юкиш М. Й. Електронні системи : навч. посіб. / Він. держ. техн. ун-т. Вінниця : ВДТУ, 2011. 208 с.
2. Loeffler C., Ligtenberg A., Moschytz G. Practical Fast 1-D DCT Algorithms with 11 Multiplications. *Proc. Int'l. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing* 1989 (ICASSP '89). P. 991.
3. Hongqing Zhu, Huazhong S., Liang J., Lumin L., Coatrieux J. Image analysis by discrete orthogonal Racah moments. *Signal Processing*. April, 2007. P. 708.
4. Цифрова обробка аудіо- та відеоінформації у мультимедійних системах : навч. посіб. /

- О. В. Дробик, В. В. Кідалов, В. В. Коваль, Б. Я. Костік, В. С. Лазебний, Г. М. Розорінов, Г. О. Сукач. Київ : Наукова думка, 2008. 144 с.
5. Михалевський Д. В. Мельник В. М., Є. С. Наугольних Оцінка параметрів відеозображення в телекомунікаційних системах. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. № 1. 2013. С. 4.
 6. Клименко Л. А. Козелков О.А. Анализ методов сжатия цифрового изображения. *Системы обработки информации*. Харьков : 2004. Вип. 2. С. 191-194.
 7. H.264: High efficiency video coding. URL : // <http://www.itu.int/rec/T-REC-H.265-201304-I>

Клименко Л. А., Гордиенко А. Ю. Анализ метода сжатия изображений на основе дискретно косинусного преобразования.

Аннотация. В статье проводится анализ методов сжатия динамических изображений, которые наиболее часто применяются на практике – JPEG, MPEG, ДКП. Рассматривается дискретно-косинусное преобразование как наиболее эффективный метод сжатия избыточной информации. Сжатие в ДКП выполняется с помощью квантования коэффициентов ДКП, которые были рассчитаны с использованием входных данных. Квантование коэффициентов ДКП может существенно улучшить сжатие, причем при достаточно малой потере данных. Также эти значения можно использовать для восстановления исходных данных.

Ключевые слова: информация, сжатие, изображение, MPEG, дискретно-косинусное сжатие, преобразование Фурье, одномерное ДКП, двумерное ДКП, обратное ДКП, квантование, вектор.

Klymenko L.A., Hordiienko A.Y. The analysis by a method of image compression on the basis of discrete cosine transform.

Abstract. The article analyzes the methods of compressing dynamic images that have found the most practical application – JPEG, MPEG, DCT. The discrete - cosine transformation is considered as the most effective method for compressing redundant information. Compression in DCT is performed by quantizing the DCT coefficients, which were calculated using the input data. Quantization of DCT coefficients can significantly improve compression, and with a fairly small loss of data. You can also use these values to restore the original data. A primary purpose consists in being of optimal compromise between the high level of compression - quality of image without especially noticeable losses. Advantages and lacks of such methods: rounding of acute angles of image (casual «washing» out of sharp edges of images); a code is a very

labour intensive process, only it was lately succeeded to carry out a code process programmatic, but not hardwarily; ДКП needs far less of mathematical operations, namely N of $\log(N)$, this property does ДКП a method that is used on the modern math processors of the personal computers.

Key word: Information, compression, images, MPEG, discretely cosine compression, Fourier transform, one-dimensional DCT, two-dimensional DCT, return DCT, quantization, vector.

Надійшла 30.09.2019 р.

Клименко Любов Анатоліївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри СКС, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

E-mail: lyubasha@email.ua ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-8252-7425>

Гордієнко Анастасія Юріївна, магістрант кафедри СКС, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: nastya4997@gmail.com

Liybov Klymenko, Doctor of Philosophy, associate professor department of specialized computer systems, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: lyubasha@email.ua

<http://orcid.org/0000-0002-8252-7425>

Anastasiia Hordiienko, Master student of the Department of specialized computer systems, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: nastya4997@gmail.com