

УДК 004.054.53 (045)

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ З ВТРАТОЮ ЯКОСТІ В ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

О. К. Юдін, д-р техн. наук, проф.; **Ю. В. Куц**, д-р техн. наук, проф.;
Т. І. Олешко, д-р техн. наук, проф.; **А. Ю. Школьник**

Національний авіаційний університет

kszi@ukr.net

Проведено порівняльну оцінку відомих і розробленого методів стиснення з втратою якості за ступенем компактного подання. Визначено кількість операцій, що витрачаються на обробку позиційних чисел з нерівними сусідніми елементами. У результаті визначено, що для запропонованого методу стиснення на основі формування узагальнених кодових комбінацій і попереднього виявлення апертур у режимі втрати якості ступінь компресії для сильнонасичених зображень досягає 7 разів, а для середньо насичених зображень до 10 разів.

Ключові слова: стиснення, зображення, коефіцієнт стиснення, апертура.

In operation is carried out the comparative assessment of the known and developed compression methods with quality loss on a level of compact representation. The number of the operations spent for processing of positional numbers with unequal adjacent elements is defined. As a result, it is determined that the proposed compression method based on the formation of generalized codewords and preliminary identification of the apertures in the mode of loss of quality the compression level for the highly saturated images of up to 7 times, and for medium-saturated images up to 10 times.

Keywords: compression, image, compression ratio, the aperture.

Вступ

Одним з питань теорії інформації є значний обсяг графічних файлів. Якщо не брати до уваги заголовки файлів і неграфічні дані, то розмір цього файлу пропорційний кількості пікселів у зображенні і кількості біт, необхідних для представлення шкірного пікселя [1].

Відповідно для вирішення проблеми занадто великих файлів використовується стиснення. Використання алгоритмів стиснення зображень має безліч переваг — економія пам'яті, значне збільшення часу передавання і приймання файлів.

Розглядаючи алгоритми стиснення зображень з утратами, основну увагу приділяють ступеню стиснення і змінам якості зображення, однак час стиснення зміщується на другий план. У більшості випадків такий підхід виправданий, але існують ситуації, коли час стиснення може бути дуже важливим. Наприклад, для відеокамер найчастіше необхідне стиснення в режимі реального часу. Отже, одним з найважливіших завдань сучасної теорії інформації є розробка і реалізація нових методів стиснення, що забезпечують максимальну ступінь компресії з одночасною мінімізацією рівня спотворень даних у відновленій інформаційній структурі [1].

Мета роботи — порівняння відомих і запропонованого методів стиснення зображень з втратою якості. Визначення залежності ступеня стиснення від параметрів зображень, а також експериментальна оцінка рівня стиснення залежно від класу зображень.

Оцінка міри стиснення зображень

Ефективність технологій стиснення зображень з обмеженою втратою якості визначається коефіцієнтом компресії $k_{\text{сж}}$, кількістю операцій на обробку (стиснення $v(V)_{\text{сж}}$ і відновлення $v(V)_{\text{в}}$) і піковим відношенням сигнал/шум. Тут V — кількість елементів в зображенні, тобто

$$V = Z_{\text{стр}} Z_{\text{стб}},$$

де $Z_{\text{стр}}$, $Z_{\text{стб}}$ — відповідно кількість рядків і стовпців в кадрі.

У загальному випадку ці характеристики залежать як від особливостей реалізації методів стиснення, так і від класів зображень. Класифікація зображень здійснюється залежно від міри їх насиченості дрібними деталями. Для цього використовується такий параметр як міра кореляції r між сусідніми елементами. Із зростанням міри насиченості, тобто з пониженням коефіцієнта кореляції, скорочується кількість, надмірності, що міститься в зображеннях. Це у свою чергу призводить до зменшення міри стиснення, який може бути досягнутий у результаті використання методу компресії.

Характеристики міри стиснення і кількості операцій на обробку у свою чергу впливають на такі показники як час $T(W_{\text{сж}})_{\text{пер}}$ передачі стислих відеоданих по каналах зв'язку і час на їх оброблення, $T_{\text{сж}}$ і $T_{\text{в}}$. З іншого боку, тимчасові

характеристики залежать від швидкості U_k передачі по каналу зв'язку, швидкодії U_{σ} обчислювального комплексу, що оцінюється як кількість машинних операцій за одну секунду.

Розглянемо оцінку коефіцієнта стиснення $k_{сж}^{(ок)}$, що забезпечується в процесі стиснення для розробленого методу на базі формування узагальнених кодових конструкцій для кодограм апроксимуючих складових фрагмента зображення. Узагальнена кодова комбінація включає:

– кодограму рядка масиву рядково-масштабуючої складової що містить значення коду $E(h)_u$ позиційного числа з нерівними сусідніми елементами. Довжина кодограми рівна $D(h)_u$ біт;

– сегмент кодограми рядка координатно-структурної складової, що містить кодового значення $E(\ell)_{\xi}$ диференціального позиційного числа з локально-рівномірною основою. Довжина сегменту рівна $\Delta_u D(\ell)_{\xi}$.

Звідси довжина узагальненого коду, рівна D_{nec} біт будується на базі двох двійкових складових $D(h)_u$ і $\Delta_u D(\ell)_{\xi}$

Позначимо кількість сегментів, на які розбивається кодограма рядка координатно-структурної складової як U , тоді отримаємо

$$D(\ell)_{\xi} = \bigcup_{u=1}^U \Delta_u D(\ell)_{\xi}, \quad (4.1)$$

де $D(\ell)_{\xi}$ — довжина кодограми, що містить значення коду $E(\ell)_{\xi}$ для ξ -го диференціального позиційного числа з локально-рівномірною основою; $\Delta_u D(\ell)_{\xi}$ — довжина u -го сегменту.

Довжина $D(\ell)_{\xi}$ розподіленої кодограми знаходиться на базі значення основи $w(\ell)_{\xi}$ для елементів ξ -го ДПЧ за формулою

$$D(\ell)_{\xi} = [n \log_2(w(\ell)_{\xi} - 1)] + 1 \text{ (біт)}.$$

Довжина $D(h)_u$ для u -ої базової кодограми визначається на підставі $w(h)$ як

$$D(h)_u = [n \log_2(w(h) - 1)] + 1 \text{ (біт)}.$$

Якщо в процесі формування чергової узагальненої кодової комбінації у відповідному масиві координатно-структурної складової не залишилося необроблених елементів, тобто усі кодограми в результаті сегментації були розподілені по базових кодограмах, то її довжина визначається з розрахунку заданої довжини, рівної D_{nec} біт.

Таким чином, для фрагмента зображення, представленого рядково-масштабованим і

координатно-структурним масивами кількість $v_{ок}$ узагальнених кодових комбінацій дорівнюватиме кількості базових кодограм. У свою чергу кількість базових кодограм визначається кількістю рядків у масиві $\Delta H_{m,n}^{(v)}$ і дорівнює $v_{ок} = m$.

Тому сумарна довжина D_i інформаційної частини стислого представлення фрагмента зображення буде

$$D_i = m D_{nec} \text{ (біт)}. \quad (4.2)$$

При цьому для формування інформаційної частини представлення фрагмента зображення на основі розробленого підходу потрібно використати такі службові дані:

1) одна основа $w(h)$ для формування базових кодограм;

2) n підстав $w(\ell)_{\xi}$, $\xi = \overline{1, n}$ для формування розподілених кодограм.

Значення основи $w(h)$ перебуває як максимальний динамічний діапазон елементів рядково-масштабуючої складової, тобто

$$w(h) = \max_{\substack{1 \leq i \leq m \\ 1 \leq j \leq n}} \{h_{i,j}\} + 1.$$

Тому для представлення значення основи відводиться $\log_2 U_i^{(кв)}$ біт — кількість розрядів на елемент ПЗС-матриці

$$d(h) = \log_2 U_i^{(кв)} \text{ (біт)}.$$

Основа $w(\ell)_{\xi}$ визначається динамічним діапазоном елементів масиву координатно-структурної складової, тобто

$$w(\ell)_{\xi} = \ell_{\xi, \max} - \ell_{\min} + 1,$$

де $\ell_{\xi, \max}$ — максимальне значення в ξ -го рядка масиву $L_{m,n}^{(v)}$, визначуваного як,

$\ell_{\xi, \max} = \max_{1 \leq j \leq n} \{\ell_{\xi, j}\}$; ℓ_{\min} — мінімальне значення в масиві $L_{m,n}^{(v)}$ складової кодового слова, яке

знаходиться як, $\ell_{\min} = \min_{\substack{1 \leq j \leq n \\ 1 \leq i \leq m}} \{\ell_{i,j}\}$.

Звідси кількість $d(\ell)$ розрядів на представлення однієї основи диференціального позиційного числа, буде

$$d(\ell) = \log_2 \ell_{\max} \text{ (біт)}.$$

У сумі $d(\ell)^{(m)}$ на представлення усіх підстав масиву координатно-структурної складової необхідно витратити

$$d(\ell)^{(m)} = m \log_2 \ell_{\max} + \log_2 \ell_{\min} \text{ (біт)},$$

де $\log_2 \ell_{\min}$ — кількість розрядів на представлення мінімального значення в масиві координатно-структурної складової.

Тоді сумарна кількість D_c двійкових розрядів на представлення службових даних, що формується при обробці одного фрагмента зображення буде рівне

$$D_c = \log_2 U_i^{(кв)} + m \log_2 \ell_{\max} + \log_2 \ell_{\min} \text{ (біт)}.$$

Сумарна кількість D_Σ двійкових розрядів на усе стиснуте представлення фрагмента зображення, включаючи інформаційну і службову складові, буде рівна

$$D_\Sigma = m D_{nec} + \log_2 U_i^{(кв)} + m \log_2 \ell_{\max} + \log_2 \ell_{\min}.$$

Початковий об'єм W фрагмента зображення визначається з умови підсумовування всіх довжин апертур, які були для нього отримані, тобто

$$w = \log_2 U_i^{(кв)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \ell_{i,j}, \text{ (біт)}$$

де $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \ell_{i,j}$ — кількість елементів у початковому фрагменті, для якого був отриманий масив координатно-структурної складової; m , n —

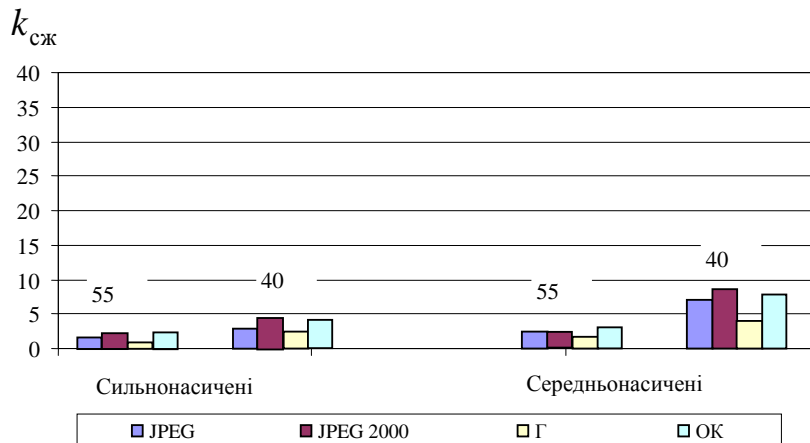
кількість рядків і стовпців у масиві координатно-структурної складової відповідно.

З урахуванням цього коефіцієнт стиснення визначатиметься таким співвідношенням:

$$k_{сж}^{(ок)} = \frac{\log_2 U_i^{(кв)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \ell_{i,j}}{m D_{nec} + \log_2 U_i^{(кв)} + m \log_2 \ell_{\max} + \log_2 \ell_{\min}}.$$

Цей вираз показує, що міра стиснення збільшуватиметься зі зростанням довжини апертури, тобто кількості елементів початкового фрагмента, що замінюється одним числом, і досягається значною мірою в результаті розподілу кодограм рядків масиву координатно-структурної складової по базових кодограмах рядково-масштабуючих складових.

Порівняльна оцінка відомих і розробленого методів стиснення з втратою якості за мірою компактного представлення розглянуто на рисунку. Порівняння виконувалось за методами JPEG, JPEG2000 і гібридним методом (ГМ), викладеним в роботі [2–4]. Це обґрунтовано тим, що ці методи працюють у режимі втрати якості відновлених зображень. Гібридний метод стиснення також використовує попереднє виявлення елементів зображення, що апроксимуються.



Залежність $k_{сж}$ для різних методів від класу оброблюваного зображення

Унаслідок можна зазначити, що:

– міра стиснення для сильнонасичених зображень досягає 7 разів, а для середньонасичених — до 10 разів;

– міру стиснення для запропонованого методу перевищує міра стиснення відомих методів із втратою якості в середньому на 10 % для пікового відношення сигнал/шум на рівні 55 дБ;

– міра стиснення для розробленого методу перебуває на одному рівні у разі оброблення сильнонасичених зображень з мірою спотворень відповідної пікового відношення сигнал/шум 40 дБ.

Звідси можна визначити, що запропонований метод забезпечує міру стиснення відносно відо-

мих методів у режимі втрати якості на одному рівні.

Оцінка тимчасових характеристик компресії зображень

Розглянемо оцінку кількості операцій $v(V)_{сж}^{(ок)}$ і $v(V)_в^{(ок)}$, що витрачаються відповідно на стиснення і відновлення зображень на основі методу формування узагальнених кодових комбінацій для кодограм координатно-структурної і рядково-масштабуючої складових фрагмента зображення.

Основна кількість операцій витрачається на формування масивів складових апроксимуючого

опису фрагментів зображення, і побудову узагальнених кодограм.

У результаті побудови двох складових фрагмента зображення з виявленими апертурами утворюються два масиви елементів, що містять $m n$, кожна. На утворення всіх масивів апертурних складових для зображення необхідно виконати $Z_{\text{стр}} Z_{\text{стб}}$ операцій порівняння.

Оцінка кількості операцій, що витрачаються на обробку позиційних чисел з нерівними сусідніми елементами. Тут вимагається виконати основні операції, включаючи:

1. Обрахувати основу $w(h)$ масиву рядково-масштабуючої складової, рядки якого є позиційними числами. Для цього витрачається $m n$ операцій порівняння.

2. Сформувати для елементів апроксимуючих величин $h_{i,j}$ елементи $\mu_{i,j}$, що враховують нерівність сусідніх елементів.

3. Визначити значення $\Delta V(H)_{u,j}$ вагових коефіцієнтів для елементів, позиційне число з нерівномірно зєднаними елементами (ПЧНЗЕ), тобто $\Delta V(H)_{u,j} = (w(h) - 1)^{n-j}$. Тут вимагається враховувати, що вагові коефіцієнти будуть однаковими для елементів ПЧНЗЕ, розташованих на однакових позиціях у рядках, відповідно до чого, необхідно виконати n операцій множення.

4. Обчислити значення коду $E(h)_u$ для рядка масиву рядково-масштабуючої складової як позиційного числа з нерівними сусідніми елементами вимагає виконати n операцій множення і n операцій складання. Відповідно для формування кодових значень усім m рядкам масиву зажадає виконання $m n$ операцій складання і $m n$ операцій множення.

Усього на обробку масиву рядково-масштабуючою складовою витрачається: $2 m n$ операцій порівняння; $2 m n$ операцій складання; $(m n + n)$ операцій множення.

Оцінка кількості операцій кодових значень, що витрачаються на формування, диференціальним позиційним числам з локально-рівномірною основою. Для цього необхідно виконати такі операції:

1. Для знаходження компонент вектора $W(\ell)$ підстав з урахуванням їх постійності для елементів рядків масиву координатно-структурної складової необхідно виконати $2 m n$ операцій порівняння і $m n$ операцій віднімання.

2. Після визначення вектора підстав для формування вагових коефіцієнтів $V(\ell)_j$ з урахуванням виразу

$$V(\ell)_j = w(\ell)_\xi^{n-j}$$

вимагається виконати $m n$ операцій множення.

3. Щоб сформувати елементи масиву довжин апертур у диференціальне позиційне число на основі формули $\ell'_{i,j} = \ell_{i,j} - \ell_{\min}$ необхідно виконати $m n$ операцій віднімання.

4. Для обчислення кодового значення $E(\ell)_\xi$ елементам рядка масиву координатно-структурної складової, що розглядається як диференціальне позиційне число необхідно витратити n операцій складання і множення. Звідси формування кодів для усіх m рядків масиву $L_{m,n}^{(v)}$ пов'язане з виконанням $m n$ операцій складання і $m n$ операцій множення.

Тоді на обробку масиву координатно-структурною складовою необхідно витратити: $2 m n$ операцій порівняння; $3 m n$ операцій віднімання/складання; $2 m n$ операцій множення.

Оцінка кількості операцій на формування узагальнених кодових комбінацій. Формування узагальнених кодограм проводиться з використанням наступних дій:

1. Визначення довжини $D(h)_u$ базової кодограми, що проводиться за формулою $D(h)_u = [\log_2 \Delta V(H)_u] + 1$. Для цього необхідно виконати операцію множення, щоб визначити значення $\Delta V(H)_u = (w(h) - 1)^{(n)}$ та операцію логарифмування для обчислення величини $\log_2 \Delta V(H)_u$. Оскільки основа є загальною для всіх елементів ПЧНЗЕ, то така довжина буде однаковою для базових кодограм оброблюваного масиву рядково-масштабуючої складової.

2. Визначення кількості ΔD надлишкових розрядів, для чого витрачається операція віднімання.

3. Знаходження довжини розподілюваної кодограми $D(\ell)_\xi$. Тут щоб знайти довжину однієї такої кодограми необхідно виконати операцію множення для обчислення величини $\Delta V(L)_\xi = w(\ell)_\xi^n$ і операцію логарифмування для визначення довжини, тобто $D(\ell)_\xi = [\Delta V(L)_\xi] + 1$.

Відповідно для визначення кодограм усіх рядків масиву координатно-структурної складової витрачається m операцій віднімання і m операцій логарифмування.

4. Максимум на визначення довжин $\Delta_u D(\ell)_\xi$ сегментів для всіх базових кодограм необхідно виконати m операцій сегментації.

Усього на формування узагальнених кодограм вимагається витратити таку кількість операцій :

- $2+m$ операцій віднімання;
- $1+m$ операцій логарифмування;
- m операцій сегментації.

Сумарна кількість операцій, яку необхідно виконати для стиснення розробленим методом усього зображення розміром $Z_{\text{стр}} Z_{\text{стрб}}$ зводиться до таких витрат:

- операцій порівняння кількістю

$$Z_{\text{стр}} Z_{\text{стр}} + Z_{\text{стр}} Z_{\text{стр}} (4mn) / \ell_{\text{cp}} mn = \\ = Z_{\text{стр}} Z_{\text{стр}} + 4Z_{\text{стр}} Z_{\text{стр}} / \ell_{\text{cp}};$$

- операцій множення кількістю

$$Z_{\text{стр}} Z_{\text{стр}} (3m n + n) / \ell_{\text{cp}} mn \approx 3Z_{\text{стр}} Z_{\text{стр}} / \ell_{\text{cp}};$$

- операцій складання/віднімання кількістю

$$Z_{\text{стр}} Z_{\text{стр}} (5m n + m + 2) / mn \ell_{\text{cp}} \approx 5Z_{\text{стр}} Z_{\text{стр}} / \ell_{\text{cp}};$$

- операцій логарифмування кількістю

$$Z_{\text{стр}} Z_{\text{стр}} (1+m) / \ell_{\text{cp}} mn \approx Z_{\text{стр}} Z_{\text{стр}} / \ell_{\text{cp}} n;$$

- операцій сегментації кількістю

$$Z_{\text{стр}} Z_{\text{стр}} m / \ell_{\text{cp}} mn \approx Z_{\text{стр}} Z_{\text{стр}} / \ell_{\text{cp}} n.$$

Ураховувалося, що кількість фрагментів у кадрі зображення дорівнює $Z_{\text{стр}} Z_{\text{стрб}} / \ell_{\text{cp}} mn$, де ℓ_{cp} — середня довжина апертури.

Отже, кількість операцій для запропонованого методу залежить від міри насиченості фрагмента зображення і від рівня спотворень, що вносяться.

Аналіз співвідношення для оцінки кількості операцій під кожен етап методу стиснення дозволяє визначити, що, всі операції є цілочисельними; відсутні операції ділення; із зменшенням міри насиченості фрагментів і зниженням пікового відношення сигнал/шум виграш за кількістю операцій для розробленого методу відносно відомих методів з втратою якості збільшується прямопропорційно підвищенню середньої довжини апертури.

Порівняльна оцінка за середнім часом обробки зображень для запропонованого методу й існуючих методів стиснення з втратами якості наведені в таблиці.

Порівняльна оцінка тимчасових витрат на обробку зображень для різних методів стиснення залежно від типу обчислювальних систем (с)

Модель процесора	Розмірність	Метод стиснення		
		JPEG	JPEG2000	Запропонований
DragonBall, тактова частота 66 МГц	576×768	8,229	5,283	0,8
	2048×1536	58,5	37,56	3,7
ARM-11 (Nokia 5700), тактова частота 369 МГц	576×768	1,35	1,21	0,1
	2048×1536	7,701	6,33	1
VIA C3, тактова частота 800 МГц	576×768	0,465	0,39	0,06
	2048×1536	3,297	2,775	0,63
Snapdragon (HTC HD2), тактова частота 1000 МГц	576×768	0,366	0,309	0,06
	2048×1536	2,604	2,208	0,4

За даними таблиці можна зробити наступні висновки:

1) для запропонованого, методу порівняно з існуючими методами, з втратою якості досягається зниження часу обробки в середньому в 7 разів.

Це відбувається в результаті скорочення кількості оброблюваних даних внаслідок попереднього виявлення апертур, скорочення кількості операцій множення і складання, а також виконання обчислень з цілими числами;

2) запропонована технологія в режимі втрат якості порівняно з існуючими технологіями

формує можливість здійснювати обробку статичних зображень у реальному часі для :

- зображень розміром 576×768 з використанням МП DragonBall, тактова частота 66 МГц;
- зображень розміром 2048×1536 з використанням МП ARM-11 (Nokia 5700), тактова частота 369 МГц.

Висновок

Таким чином визначено, що для запропонованого методу стиснення на підставі формування узагальнених кодових комбінацій і попереднього виявлення апертур у режимі

втрати якості, ступінь компресії для сильнонасичених зображень досягає 7 разів, а для середньонасичених зображень до 10 разів. Максимальний рівень стиснення досягається для зображень з низькою концентрацією деталей. Ступінь стиснення для запропонованого методу перевищує ступінь стиснення відомих методів з втратою якості у середньому на 10 % для пікового відношення сигнал/шум на рівні 55 дБ. Коефіцієнт стиснення для розробленого методу знаходиться на одному рівні в разі обробки сильнонасичених зображень зі ступенем спотворень відповідно піковому відношенню сигнал/шум 40 дБ. Запропонований метод забезпечує ступінь стиснення щодо відомих методів у режимі втрати якості на одному рівні.

Для запропонованого методу, порівняно з існуючими методами з втратою якості, досягається зниження часу обробки в середньому в 7 разів. Це відбувається в результаті скорочення кількості оброблюваних даних внаслідок попереднього виявлення апертур, скорочення кількості операцій множення і додавання, а також виконання обчислень з цілими числами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Юдін О. К. Розробка сучасних стандартів стиснення відеоданих / О. К. Юдін, К. О. Курін // *Захист інформації*. — 2010. — Т. 12. — №. 3 (48).
2. Претт У. Цифрова обробка зображень. У 2 т. / У. Претт. — М. : Світ. — 1982.
3. Yudin O. Decompression of images on base of method of decoding according to the amount of bit changes / O. Yudin, K. Kurin // *Наукоємні технології*. — 2013. — Т. 18. — №. 2. — С. 197–201.
4. *Методы* восстановления цифровых изображений на основе декомпозиции обобщенной базовой кодограммы: Věda a vzdělání – 2013/2014: X mezinárodní vědecko-praktická konference, 27.12.2013-05.01.2014, Praha (Česká republika). — Praha : Education and Science, 2013/2014. — Т. 34. — P. 71–75.
5. *Обоснование* двухкомпонентного подхода сжатия видеоданных в информационно-телекоммуникационных системах / А. К. Юдин, Н. А. Королева, А. Ю. Школьник // *Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте*. — 2012. — № 4. — С. 23–28.

Стаття надійшла до редакції 20.01.2014