

УДК 004.627(045)

МЕТОД КОДУВАННЯ ДВІЙКОВИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ ЗА КІЛЬКІСТЮ БІТОВИХ ПЕРЕХОДІВ

О. К. Юдін, д-р техн. наук, проф.; *М.Г. Луцький*, д-р техн. наук, проф.; *К. О. Курінь*

Національний авіаційний університет

kszi@ukr.net

Обґрунтовано доцільність використання структурного кодування в задачах стиснення даних. Визначено структурні ознаки двійкових послідовностей й обмеження, які на них накладаються. Представлено та доведено правило визначення кількості двійкових послідовностей, які формують структурні групи за спільними структурними ознаками. Розроблено методику розрахунку порядкового номера двійкової послідовності в структурній групі за значенням кількості переходів між двійковими елементами послідовності. Проведено оцінювання очікуваного ступеня стиснення для послідовностей різної довжини.

Ключові слова: стиснення, структурне кодування, структурні ознаки, бітові переходи, структурна група, коефіцієнт стиснення

The expedience of the use of structural code in the tasks of compression of dat is proved. The structural signs of binary sequences are defined. Structural signs of binary sequences and limitations that on are laid on them are defined. The rule of determination of amount of binary sequences which form structural groups is is described. The rule of calculation of sequence number of binary sequence based on the amount of bit changes is described. The estimation of the expected degree of compression is done for the sequences of different length.

Keywords: compression, structural coding, structural signs, bit changes, structural group, compression coefficient.

Вступ

Технології стиснення даних є цілком актуальними в умовах формування світового інформаційного простору. Головна причина використання зазначених технологій стиснення даних в інформаційно-комунікаційних системах полягає в бажанні передавати, обробляти й зберігати інформацію з найбільшою ефективністю. В деякому сенсі задача стиснення даних полягає у виділенні з інформаційного потоку найбільш значущої та інформативної його частини, яка дозволить відновити з втратами або без втрат всю початкову інформацію.

У зв'язку з тенденцією постійного інтенсивного розвитку комп'ютерної графіки бурхливо розвивається певна область теорії компресії — методи стиснення зображень.

Найбільш компактне представлення даних, згідно з відомою працею Клода Шеннона [1], спирається на ентропію — числову характеристику, яка визначає нижню межу коефіцієнта стиснення. Ця величина дає кількісну оцінку інформації, що міститься в повідомленні, на основі її статистичних характеристик.

Постановка задачі

Останнім часом у теорії інформації з'явилися нові — не статистичні підходи до оцінки кількості інформації для процедур стиснення. Це зумовлено тим, що при використанні статистичних методів для стиску інформації, досягнути коефіцієнта стиску без втрат більш ніж 1,7–2,2 для реалістичних зображень важко. Тому новими напрямками формування сучасних технологій по-

винні бути методи, що використовують не тільки суцільно статистичні параметри, а також і структурний вміст даних [2].

Мета статті — розроблення методу кодування, який використовує принципово відмінні від статистичних характеристики інформаційного повідомлення, з урахуванням можливості його подальшого використання в технології стиснення зображень.

Аналіз недоліків статистичних методів

В основі статистичних методів стиснення лежить оцінка ймовірностей появи елементарних символів у масиві інформації, що підлягає стисненню. Зазначена статистика визначає коди змінної довжини, які співставляються з даними символами.

Найпоширеніші на сьогодні технології стиснення зображень JPEG та JPEG-2000 забезпечують високі ступені (з втратами інформації) стиснення за рахунок скорочення психовізуальної надмірності і подальшого статистичного кодування компонент трансформант ортогональних перетворень.

Психовізуальна надмірність скорочується в результаті обнулення високочастотних складових компонент трансформант за умови їх подальшого квантування. Для кодування квантованих трансформант використовуються статистичні методи стиснення такі, як кодування Хаффмена (для стандарту JPEG) й арифметичне кодування (JPEG-2000).

Для даних методів кодування характерні такі недоліки [3]:

– кількість машинних операцій, що відводиться на оброблення трансформованих зображень, може скласти до 70 % від загальної кількості операцій процедури їх стиснення; це зумовлено тим, що необхідно врахувати витрати кількості операцій на обчислення статистики, на побудову кодових таблиць і на організацію подвійного проходу за оброблюваними даними, а при відновленні весь фрагмент буде відновлений тільки після перекодування всіх нерівномірних кодових слів;

– кількість операцій, необхідних для виконання статистичного кодування для трансформант, сформованих на основі ДКП і ДВП, досягає 80 % від сумарної кількості операцій, що витрачаються на одержання стисненого зображення, й може перевищувати кількість операцій на виконання перетворень (для режимів, які забезпечують високу якість зображення);

– у зв'язку з необхідністю синхронізації й маркування нерівномірних кодових комбінацій на межах оброблюваних фрагментів трансформованого зображення значно підвищується складність програмно-апаратної реалізації процедури кодування;

– паралельне оброблення статистичних кодів досить складно реалізується;

– при обробці сильнокогерентних зображень різко знижується ступінь стиснення, що обумовлено збільшенням значень високочастотних компонентів трансформанти, а також необхідністю використання кодових таблиць і маркерів;

– статистичне кодування не забезпечить додаткового стиску трансформанти за наявності серій нулів невеликих довжин.

Структурне кодування даних

Серед сукупності технологій компактного представлення даних виділяють новий клас методів стиснення, заснований на усуненні структурної надмірності шляхом виявлення структурних закономірностей у двійкових послідовностях за визначеними ознаками — методи структурного кодування [3].

Методи структурного кодування для підвищення ступеня стиснення за умови одночасного збереження заданої якості відтворюваного зображення, повинні забезпечувати дотримання таких вимог [3]:

1) обробці піддаються двійкові дані, оскільки двійкове представлення є універсальним для представлення інформації від різних джерел;

2) процес стиснення даних організовується на основі усунення структурної надмірності;

3) у процесі стиснення враховуються структурні закономірності одночасно по декількох ви-

значених ознаках; при цьому для забезпечення збільшення ступеня стиснення ознаки мають бути взаємозалежними.

Вибір ознак структурної природи зумовлений такими міркуваннями [3]:

– вони мають кількісну міру;

– враховують закономірності, що дозволяють виключити надмірність без втрати якості;

– використовуються лише цілочисельні операції, що скорочує час оброблення;

– не вимагається знання апріорної інформації для кодування.

Розглянемо такі структурні ознаки двійкових послідовностей: кількість переходів від одиничного елемента до нульового $p_{1 \rightarrow 0}$ та кількість переходів від нульового елемента до одиничного $p_{0 \rightarrow 1}$.

У таблицях 1–3 наведені двійкові послідовності довжиною n в 4, 3 та 2 біти. Для кожної з послідовностей вказані значення структурних ознак $p_{0 \rightarrow 1}$ та $p_{1 \rightarrow 0}$.

Зазначимо, що аналіз значень структурних ознак ведеться з урахуванням того, що в двійкову послідовність вводиться додатковий нульовий розряд (в таблиці виділений сірим). Таку послідовність називатимемо розширеною.

Таблиця 1

Значення порядкових номерів та структурних ознак для двійкових послідовностей довжиною $n = 4$ біти

Номер з/п	Двійкова послідовність	Структурні ознаки		Номер структурної групи	Порядковий номер у СГ
		$p_{0 \rightarrow 1}$	$p_{1 \rightarrow 0}$		
0	00000	0	0	0	0
1	00001	1	0	1	0
2	00010	1	1	2	0
3	00011	1	0	1	1
4	00100	1	1	2	1
5	00101	2	1	3	0
6	00110	1	1	2	2
7	00111	1	0	1	2
8	01000	1	1	2	3
9	01001	2	1	3	1
10	01010	2	2	4	0
11	01011	2	1	3	2
12	01100	1	1	2	4
13	01101	2	1	3	3
14	01110	1	1	2	5
15	01111	1	0	1	3

Таблиця 2

Значення порядкових номерів та структурних ознак для двійкових послідовностей довжиною $n = 3$ біти

Но- мер з/п	Двійко- ва по- слідов- ність	Структурні ознаки		Но- мер струк- тур- ної групи	Порядко- вий номер у структу- рній групі
		$P_{0 \rightarrow 1}$	$P_{1 \rightarrow 0}$		
0	0000	0	0	0	0
1	0001	1	0	1	0
2	0010	1	1	2	0
3	0011	1	0	1	1
4	0100	1	1	2	1
5	0101	2	1	3	0
6	0110	1	1	2	2
7	0111	1	0	1	2

Таблиця 3

Значення порядкових номерів та структурних ознак для двійкових послідовностей довжиною $n = 2$ біти

Но- мер з/п	Двійкова послідов- ність	Структур- ні ознаки		Номер структу- рної групи	Поряд- ковий номер в структу- рній групі
		$P_{0 \rightarrow 1}$	$P_{1 \rightarrow 0}$		
0	000	0	0	0	0
1	001	1	0	1	0
2	010	1	1	2	0
3	011	1	0	1	1

Очевидно, що двійкові послідовності, які характеризуються однаковими значеннями структурних ознак, можна згрупувати в структурні групи. В табл. 1–3 структурні групи (СГ) виділені різними відтінками сірого.

При цьому кодування полягатиме в привласненні послідовності її порядкового номера у даній групі. Значення порядкового номера буде меншим за десяткове значення двійкової послідовності. На основі визначеного підходу буде забезпечуватися подальша процедура стиснення.

У табл. 4–6 зведені значення числа двійкових послідовностей у структурних групах та значення структурних ознак, які їх визначають, для послідовностей різної довжини. Очевидно, що значення, яким кодуватиметься двійкова послідовність $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ у структурній групі залежить від довжини двійкової послідовності n та значень структурних ознак $P_{0 \rightarrow 1}$ та $P_{1 \rightarrow 0}$.

Таблиця 4

Кількість двійкових послідовностей у структурних групах ($n = 4$ біти)

Структурні ознаки		Номер структурної групи	Кількість послідов- ностей в структурній
$P_{0 \rightarrow 1}$	$P_{1 \rightarrow 0}$		

			групі
0	0	0	1
1	0	1	4
1	1	2	6
2	1	3	4
2	2	4	1

Таблиця 5

Кількість двійкових послідовностей у структурних групах ($n = 3$ біти)

Структурні ознаки		Номер структурної групи	Кількість послідов- ностей в структурній групі
$P_{0 \rightarrow 1}$	$P_{1 \rightarrow 0}$		
0	0	0	1
1	0	1	3
1	1	2	3
2	1	3	1

Таблиця 6

Кількість двійкових послідовностей у структурних групах ($n = 2$ біти)

Структурні ознаки		Номер структурної групи	Кількість пос- лідовностей в структурній групі
$P_{0 \rightarrow 1}$	$P_{1 \rightarrow 0}$		
0	0	0	1
1	0	1	2
1	1	2	1

Разом з тим комбінація $p_{0 \rightarrow 1}$ та $p_{1 \rightarrow 0}$ однозначно визначає ще одну ознаку, яка характеризує двійкову послідовність — номер структурної групи S . Параметр S також визначає загальну кількість переходів між нулем та одиницею в послідовності. При чому значення S , $p_{0 \rightarrow 1}$ та $p_{1 \rightarrow 0}$ зв'язують такі співвідношення:

$$p_{0 \rightarrow 1} = \left\lfloor \frac{S+1}{2} \right\rfloor;$$

$$p_{1 \rightarrow 0} = \left\lfloor \frac{S}{2} \right\rfloor;$$

$$S = p_{1 \rightarrow 0} + p_{0 \rightarrow 1}.$$

Отримані дані дозволяють виявити такі закономірності:

1. Для послідовності довжиною n біт кількість структурних груп становитиме $n+1$.

Це твердження легко довести, розглянувши обмеження, які накладаються на значення структурних ознак:

– значення кількості переходів від нуля до одиниці $p_{0 \rightarrow 1}$ для послідовності довжиною n біт

з урахуванням розширення коливатимуться в діапазоні $0.. \left\lceil \frac{n+1}{2} \right\rceil$;

– значення кількості переходів від одиниці до нуля $p_{1 \rightarrow 0}$ для послідовності довжиною n біт з урахуванням розширення коливатимуться в діапазоні $0.. \left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil$;

$$p_{1 \rightarrow 0} + p_{0 \rightarrow 1} \leq n;$$

– за рахунок того, що розширена двійкова послідовність завжди починається з нуля кількість переходів від нуля до одиниці не може перевищувати кількість переходів від одиниці до нуля;

– очевидно, що взаємна залежність $p_{0 \rightarrow 1}$ та $p_{1 \rightarrow 0}$ різниця між значеннями цих ознак не може перевищувати 1.

Отже, загальна кількість структурних груп для послідовності довжиною n біт визначає кількість можливих комбінацій значень $p_{0 \rightarrow 1}$ та $p_{1 \rightarrow 0}$. З урахуванням перерахованих обмежень на значення структурних ознак можна стверджувати, що кожне можливе значення структурної ознаки $p_{0 \rightarrow 1}$ визначає дві комбінації — в парі із значенням ознаки $p_{1 \rightarrow 0}$, яке дорівнює йому або є меншою на одиницю. Тоді загальна кількість можливих комбінацій становитиме:

$$2 \left(\left\lceil \frac{n+1}{2} \right\rceil + 1 \right) - 1 = n + 1.$$

Одиниця, яка віднімається, враховує одну зайву комбінацію $p_{0 \rightarrow 1} = 0$ та $p_{1 \rightarrow 0} = 0$.

2. Для кожної структурної групи S ($S \in 0..n$) кількість $N(S, n)$ послідовностей у групі, а отже й діапазон порядкових номерів, якими кодуватимуться послідовності групи, визначається як кількість способів, якими можна розмістити S переходів між нулем та одиницею на n позиціях у розширеній послідовності довжиною $n+1$ біт, й розраховується як відповідний коефіцієнт бінома Ньютона n -го ступеня за формулою:

$$N(S, n) = \binom{n}{S} = \frac{n!}{S!(n-S)!}.$$

Даний висновок дає змогу зробити припущення про значення найбільшого й найменшого ступеня стиснення, що забезпечуватиметься при використанні даного методу кодування.

Найбільший ступінь стиснення досягатиметься, коли двійкова послідовність довжиною n кодуватиметься порядковим номером 0 або 1, для

представлення яких необхідний лише один біт. Чисельно значення максимального ступеня стиснення дорівнюватиме:

$$k_{\max} = n.$$

Найменший ступінь стиснення буде отриманий у тому випадку, якщо двійкова послідовність кодуватиметься значенням найбільшого можливого біноміального коефіцієнта для заданої довжини двійкової послідовності, зменшеним на 1 (врахуємо, що нумерація послідовностей у структурній групі починається з 0). При цьому значення біноміального коефіцієнта дорівнює:

$$\left\lceil \binom{n}{\left\lceil \frac{n+1}{2} \right\rceil} \right\rceil.$$

Тут операція $\lceil \cdot \rceil$ позначає взяття цілої частини від дробового числа.

Чисельно значення найменшого ступеня стиснення дорівнюватиме:

$$k_{\min} = \left\lceil \frac{n}{\left[\log_2 \left(\left\lceil \binom{n}{\left\lceil \frac{n+1}{2} \right\rceil} \right\rceil - 1 \right) \right] + 1} \right\rceil.$$

В табл. 7 наведені значення ступенів стиснення k_{\max} та k_{\min} для двійкових послідовностей різної довжини.

Таблиця 7

Значення максимального та мінімального ступенів стиснення для двійкових послідовностей різної довжини

Довжина двійкової послідовності n , біт	Максимальний коефіцієнт стиснення k_{\max}	Мінімальний коефіцієнт стиснення k_{\min}
4	4	1,333
8	8	1,143
16	16	1,143
32	32	1,067
64	64	1,049

Отже, значення порядкового номера двійкової послідовності $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ у структурній групі є функцією від довжини n двійкової послідовності й номера S структурної групи. Позначимо дане значення через $NUM(A, S, n)$.

Зрозуміло, що процедуру кодування, тобто визначення $NUM(A, S, n)$, можна здійснювати шляхом побудови кодером таблиць кодування, подібних до табл. 1–3 й наступним пошуком у

них відповідних заданим двійковим послідовностям порядкових номерів $NUM(A, S, n)$.

На приймальній стороні процедура декодування відбуватиметься подібним же чином — згідно з отриманими значеннями n та S будуватимуться кодові таблиці, й по значенню $NUM(S, n)$ визначатиметься необхідна двійкова послідовність. Але емпірично такий принцип кодування видається недоцільним. Тому наступною задачею буде пошук математичної моделі, яка описуватиме правило розрахунку значення порядкового номера $NUM(A, S, n)$ для двійкової послідовності $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ згідно з визначеною структурною ознакою S .

Порядковий номер $NUM(A, S, n)$ для двійкової послідовності $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ довжиною n біт згідно до значення структурної ознаки S розраховується за формулою:

$$NUM(A, S, n) = \sum_{i=0}^{n-1} (a_{i+1} - a_i) \frac{(n-i)!}{l_i!(n-i-l_i)!} - a_n.$$

Тут l_i — кількість залишкових переходів між нульовими та одиничними елементами двійкової послідовності при обробці переходу між a_{i+1} та a_i , яка чисельно дорівнює:

$$l_i = l_{i-1} - |a_i - a_{i-1}|; \quad l_0 = s; \quad a_0 = 0.$$

Таким чином, обґрунтовано процедуру кодування даних та доцільність використання структурних ознак в задачах стиснення інформаційних потоків.

Висновок

Розроблено метод кодування джерела повідомлення, без втрат інформації, який використовує принципово відмінні від статистичних характеристики даних — структурні ознаки.

Наукова новизна дослідження щодо формування методу кодування двійкових переходів за кількістю бітових переходів полягає в такому:

- визначені структурні ознаки двійкових послідовностей й обмеження, які на них накладаються;

- описано та доведено правило визначення кількості двійкових послідовностей, які формують структурні групи за спільними структурними ознаками;

- описано та доведено правило кодування з умов розрахунку порядкового номера двійкової послідовності в структурній групі за значенням кількості переходів між двійковими елементами послідовності.

Проведено оцінювання очікуваного ступеня стиснення для послідовностей різної довжини.

Отримані результати дають змогу зробити висновок про доцільність подальшого використання запропоновано методу кодування двійкових даних у технологіях стиснення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Урсул А. Д. Нестатистические подходы в теории информации / А. Д. Урсул // Вопросы кибернетики. — 1967. — № 2. — С. 88–93.
2. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963. — 793 с.
3. Юдін О. К. Методи структурного кодування даних в автоматизованих системах управління / О. К. Юдін. — К.: НАУ, 2007.

Стаття надійшла до редакції 28.11.2012.