УДК 004.932:531.7

Ю.О. Подчашинський, к.т.н., доц.
Житомирський державний технологічний університет

СТИСНЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ВІДЕОІНФОРМАЦІЇ В КОМП'ЮТЕРНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ

В статті розглянуто стиснення цифрової вимірювальної відеоінформації на основі JPEG-алгоритму. Таке стиснення є складовою частиною процесу перетворення даних в комп'ютерних автоматизованих системах, що призначені для вимірювання лінійних і кутових переміщень об'єктів. Наведено експериментальну оцінку похибок вимірювань, пов'язаних із стисненням.

Вимірювання динаміки лінійних і кутових переміщень об'єктів (наприклад, при дослідженні процесів механічної деформації зразків конструкційних матеріалів) вимагає отримання послідовності відеозображень з високою частотою кадрів. Це приводить до необхідності реєстрації та накопичення в реальному масштабі часу дуже великого об'єму цифрової відеоінформації, що неможливо навіть для сучасних апаратних засобів [1], [8], [10], [11]. Тому актуальною є задача зменшення об'єму цифрової відеоінформації про об'єкт вимірювань.

Для зменшення об'єму цієї відеоінформації необхідно застосовувати стиснення відеозображень. Ефективне стиснення відеозображень можливе тільки на основі методів із втратами деякої частини інформації [5], [11]. Це, наприклад, методи на основі кодування з перетворенням, wavelet-стиснення, стиснення на основі фракталів тощо [2], [5], [6], [9], [10].

Для стиснення відеозображень процесів механічної деформації доцільніше використовувати JPEG-алгоритм стиснення, який базується на дискретному косинусному перетворенні (ДКП) цифрового зображення [10], [11], [12], [13]. Це обумовлено такими факторами:

– даний алгоритм фактично є стандартом для стиснення нерухомих цифрових зображень і забезпечує стиснення в декілька десятків разів без суттєвих викривлень зображення;

– JPEG-алгоритм, реалізований в апаратних засобах формування відеозображень та їх введення в комп'ютер [11], забезпечує стиснення послідовностей відеозображень в реальному масштабі часу, що важливо при дослідженні розвитку механічної деформації в часі;

– стиснення відеозображень за JPEG-алгоритмом може виконуватися безпосередньо при формуванні відеозображень в цифровому фотоапараті і цифровій відеокамері або при введенні відеозображень в комп'ютер [3].

В результаті даний алгоритм забезпечує: зменшення часу введення відеозображень в комп'ютер; можливість дослідження динаміки різних процесів в реальному масштабі часу; раціональну організацію зберігання цифрових відеозображень.

При стисненні цифрових відеозображень за JPEG-алгоритмом виникають втрати деякої частини відеоінформації. В основному це інформація про амплітуду верхніх частот в спектрі зображення. Вплив стиснення на якість відеозображення може бути оцінений на основі об'єктивних [5], [7] або суб'єктивних критеріїв, наприклад методом експертних оцінок [4], [9]. Основою об'єктивних критеріїв є оцінювання розбіжності яскравості і кольору всієї множини дискретних точок початкового і відновленого після стиснення відеозображення.

В даному випадку кінцевою метою є відеовимірювання лінійних і кутових переміщень об'єктів. При таких вимірюваннях необхідно оцінити розбіжність між початковим і відновленим після стиснення зображеннями в області контурів об'єктів. Важливість такої оцінки пояснюється тим, що визначення координат точок контурів об'єктів виконується на основі обробки перепадів яскравості на зображенні, а ці перепади значною мірою визначаються верхніми частотами в спектрі зображення, які частково вилучаються при стисненні за JPEG-алгоритмом. Тому існуючі методи оцінювання якості стиснутого зображення в даному випадку не підходять. Виникає задача визначення впливу стиснення за JPEG-алгоритмом на похибки вимірювань механічних величин, а також визначення параметрів JPEG-алгоритму, які забезпечують зменшення похибок вимірювань.

Для вирішення вказаної задачі пропонується розглядати JPEG-алгоритм на основі теорії цифрової фільтрації сигналів. З цієї точки зору JPEG-алгоритм є нерекурсивний цифровий

фільтр нижніх частот, що виконує фільтрацію сигналу в частотній області. Точнісні характеристики цифрового фільтра можна визначити відомими методами на основі детермінованого або ймовірнісного підходів.

На основі застосування ймовірнісного підходу до JPEG-алгоритму як цифрового фільтра визначено похибки геометричних вимірювань на стиснутих відеозображеннях.

При стисненні за JPEG-алгоритмом відеозображень процесів механічної деформації виникають похибки, що мають вплив на точність відеовимірювань лінійних і кутових переміщень об'єктів:

– трансформована похибка, обумовлена перетворенням похибок, що мають місце на початковому нестиснутому відеозображенні;

– похибка квантування, що виникає в результаті квантування частотних коефіцієнтів в спектрі відеозображення в процесі стиснення;

– похибка, що пов'язана з викривленнями відеозображення в результаті вилучення верхніх частот із спектра цього відеозображення в процесі стиснення;

– похибка виконання обчислень за даним алгоритмом з обмеженою розрядністю даних.

Розрахунок трансформованої похибки виконано, виходячи з того, що шум на початковому нестиснутому відеозображенні є некорельований стаціонарний випадковий процес з нульовим середнім значенням, некорельований з корисним відеосигналом [14]. Це відповідає дійсності для відеозображень, що досліджуються. Дисперсія трансформованої похибки на стиснутих відеозображеннях обчислюється за формулою:

$$\sigma^2_{вих} = \sigma^2_{вх} \cdot \frac{\delta_Д}{\pi} \int_0^{\pi/\delta_Д} A^2(\omega) \cdot d\omega = \sigma^2_{вх} \cdot \frac{\delta_Д}{\pi} \int_0^{\omega_M} 1^2 \cdot d\omega = \sigma^2_{вх} \cdot \frac{M}{N},$$

де $\sigma^2_{вх}$ – дисперсія шуму, що має місце на початковому нестиснутому відеозображенні;

$\delta_Д$ – відстань між дискретними точками цифрового відеозображення (інтервал дискретизації);

$A(\omega)$ – амплітудно-частотна характеристика JPEG-алгоритму як цифрового фільтра нижніх частот;

$\omega_M = \frac{M \cdot \pi}{\delta_Д \cdot N}$ – верхня межа смуги перепускання фільтра, що відповідає JPEG-алгоритму;

M – номер (рахуючи з 0) останнього частотного коефіцієнта (в першому рядку матриці частотних коефіцієнтів), що залишається в спектрі зображення при стисненні за JPEG-алгоритмом;

N – розмірність дискретного косинусного перетворення (ДКП), яке використовується для отримання спектра відеозображення (для JPEG-алгоритму $N = 8$).

З урахуванням того, що в процесі формування і перетворення відеозображень має місце обмеження смуги частот відеосигналу, дисперсія трансформованої похибки

$$\sigma^2_{вих} = \begin{cases} \sigma^2_{вх} \cdot \frac{M}{N'}, & M < N', \\ \sigma^2_{вх}, & M \geq N', \end{cases} \qquad (1)$$

де N' – номер частотного коефіцієнта, що відповідає максимально можливій частоті відеосигналу ($N' \leq N$).

Обираючи $M < N'$ або $M < N$, можна знизити рівень шумів на відеозображенні і в результаті зменшити похибки відеовимірювань.

Вилучення верхніх частот із спектра відеозображення виникає в результаті стиснення за JPEG-алгоритмом. На основі властивостей ДКП і JPEG-алгоритму можна вважати, що початковий відеосигнал яскравості $Y(x)$ в рядку відеозображення замінюється частковою сумою ряду Фур'є $Y^*(x)$.

Величина похибки відеовимірювань дорівнює різниці між значенням координати після вилучення верхніх частот $x^*_к$ і точним значенням координати $x_к$, тобто $x^*_к - x_к$. Значення $x^*_к$ можна знайти з рівняння:

$$Y^*(x^*_к, M) = Y_п,$$

де $Y_п$ – порогове значення яскравості, що використовується для розподілу відеозображення на об'єкт і фон.

Оскільки аналітичне розв'язання даного рівняння для сигналів, що утворюють перепади яскравості на відеозображеннях, досить ускладнено, було проведене програмне моделювання даного типу похибок. В результаті зроблено висновок про те, що для перепадів яскравості на відеозображеннях процесів механічної деформації виключення 4 верхніх частотних коефіцієнтів з 8 не призводить до суттєвих похибок. Це дозволяє досягти значного стиснення даного типу відеозображень без суттєвого збільшення похибки відеовимірювань.

В загальному випадку квантування частотних коефіцієнтів в спектрі відеозображення – це є нелінійне перетворення зображення, що виконується шляхом цілочисельного ділення частотних коефіцієнтів $F(u, v)$ на коефіцієнти $Q(u, v)$ з таблиці квантування. Похибку квантування частотних коефіцієнтів будемо розглядати як адитивний шум, що додається до зображення, відновленого після стиснення. При такому підході JPEG-алгоритм можна вважати лінійним цифровим фільтром. В результаті отримано вираз для оцінки згори максимальної амплітуди шуму квантування частотних коефіцієнтів:

$$\Delta_{\text{кв ч max}} = \frac{1}{4\sqrt{N}} \cdot \sum_{u=0}^{M} C(u) \cdot Q(u,0),$$
$$C(u) = \begin{cases} 1/\sqrt{2}, & u = 0, \\ 1, & u > 0. \end{cases} \qquad (2)$$

Визначення M виконується на основі порівняння максимальних значень частотних коефіцієнтів для відеозображень, що досліджуються, і коефіцієнтів таблиці квантування. Якщо $F(u, 0) < Q(u, 0) / 2$, то $M = u - 1$.

Ступінь стиснення відеозображень і точність відеовимірювань значною мірою залежать від таблиці квантування частотних коефіцієнтів. Пропонується при дослідженні розвитку механічної деформації в часі використовувати таку таблицю квантування:

$$Q(u, v) = \begin{cases} 1, & 0 \le u \le M,\ 0 \le v \le M, \\ Q_{\max}, & M < u < N \quad \text{або} \quad M < v < N, \end{cases} \qquad (3)$$

де $Q_{\max}$ – максимальне значення елементу таблиці, $Q_{\max} = 2^{n_T} - 1$;

n_T – кількість двійкових розрядів для зберігання елементу таблиці.

Дана таблиця квантування при $M = 3...5$ забезпечує зменшення похибки відеовимірювань за рахунок зниження рівня шумів на відеозображеннях і незначної величини похибки, пов'язаної з квантуванням і вилученням частотних коефіцієнтів.

На рис. 1 наведено результати експериментальних досліджень стиснення відеозображень за JPEG-алгоритмом з використанням таблиці квантування (3).

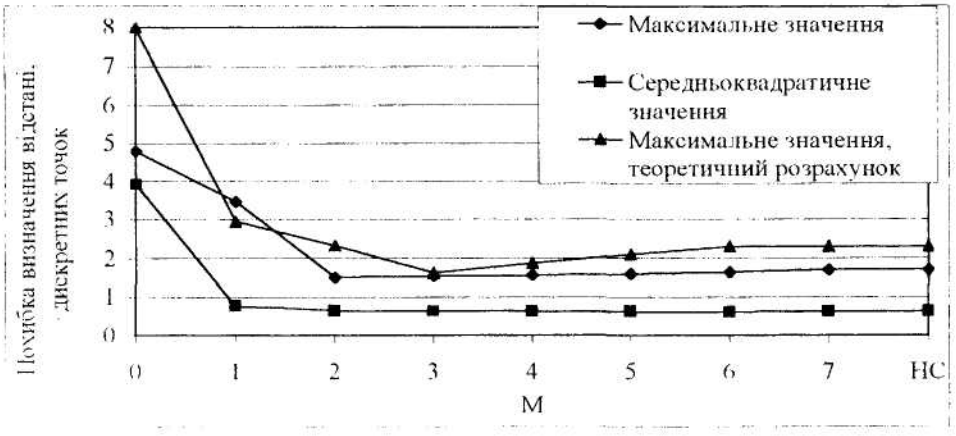


Рис. 1. Похибка визначення відстані при стисненні цифрового зображення за JPEG-алгоритмом з використанням розробленої таблиці квантування: НС – нестиснуте зображення

Для стиснення використовувалась послідовність тестових напівтонових відеозображень, подібних до відеозображень процесів механічної деформації. Ці відеозображення були

отримані за допомогою відеокамери Panasonic NV–M3000EM і пристрою введення відеозображень Cirrus Logic 544XP+. Розмір зображення після перетворення в цифрову форму дорівнював 640x480 дискретних точок.

Для формування таблиці квантування (3) використовувалися такі дані: $N = 8$, $n_T = 8$, $M = 0, 1, \ldots, 7$. Теоретичні значення похибок обчислені на основі формул (1) і (2).

На рис. 2 наведено фрагменти відеозображень, відновлених після стиснення з використанням даної таблиці квантування.

Аналізуючи результати використання таблиці квантування, розробленої для відеозображень процесів механічної деформації, можна зробити такі висновки:

1. Використання даної таблиці при $M = 3...5$ забезпечує:

– зниження рівня вхідних шумів і відповідно зменшення трансформованої похибки;

– незначні викривлення форми перепаду яскравості, пов'язані з вилученням верхніх частот;

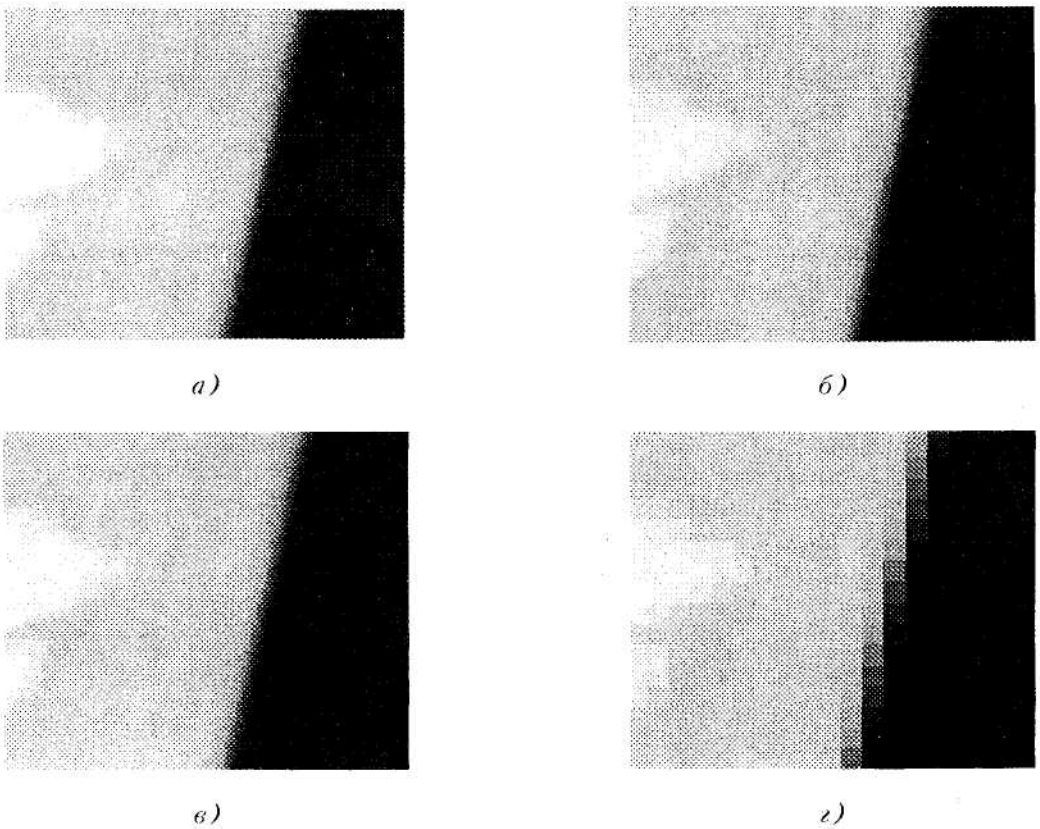
– відсутність похибки, пов'язаної з квантуванням частотних коефіцієнтів;

– зменшення на (5–10) % загальної похибки визначення відстані у порівнянні з нестиснутим зображенням;

– коефіцієнт стиснення зображень не менше ніж 1:4–1:1,7, який забезпечується за рахунок виключення верхніх частот.

2. При виборі значення M потрібно також враховувати ширину смуги частот відеосигналу.

3. Якщо потрібно забезпечити добру візуальну якість стиснутого зображення, то потрібно вибрати $M = 3...5$. Якщо потрібно забезпечити високий коефіцієнт стиснення, то потрібно вибрати $M = 2$. В цьому випадку на зображенні будуть помітні деякі викривлення у вигляді блочної структури.



а) *б)*

в) *г)*

Рис. 2. Фрагменти відеозображення, стиснутого за JPEG-алгоритмом з використанням розробленої таблиці квантування: а) нестиснуте зображення; б) $M = 4$; в) $M = 2$; г) $M = 0$

Загальні висновки:

1. Важливе значення для відеовимірювань динаміки лінійних і кутових переміщень об'єктів має стиснення відеозображень. Таке стиснення дозволяє зменшити об'єм цифрової відеоінформації до рівня, який можливо реєструвати і обробляти за допомогою апаратних засобів. Визначено, що доцільніше в даному випадку використовувати JPEG-алгоритм стиснення.

2. Існуючі методи визначення похибок на стиснутих цифрових відеозображеннях орієнтовані на оцінювання візуальної якості відеозображення при його спостеріганні людиною. Тому були розроблені математичні моделі, що дозволять оцінити точність відеовимірювань лінійних і кутових переміщень об'єктів на стиснутих відеозображеннях в залежності від параметрів алгоритму стиснення.

3. Стиснення за JPEG-алгоритмом вимірювальної відеоінформації забезпечує вирішення двох задач, суттєвих для геометричних вимірювань в процесі дослідження механічних деформацій:

– стиснення відеозображень в декілька десятків разів, що робить можливим реєстрацію і вимірювання розвитку деформації в часі, тобто досягається розширення функціональних можливостей засобів вимірювань;

– підвищення точності вимірювань за рахунок фільтрації шумів, що виникли в процесі формування відеозображень, за умови використання параметрів алгоритму стиснення (3).

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Гук М.* Аппаратные средства IBM PC. Энциклопедия. – СПб.: Питер Ком, 1999. – 816 с.
2. *Мюррей Д., Ван Райпер У.* Энциклопедия форматов графических файлов: Пер. с англ. – К.: BHV, 1997. – 672 с.
3. Невидимые горизонты цифровой фотографии. Обзор // Компьютеры+программы. – 1999. – № 2. – С. 46–50.
4. *Певзнер Б.М.* Качество цветных телевизионных изображений. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1988. – 224 с.
5. *Прэтт У.* Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 792 с.
6. *Федер Е.* Фракталы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 260 с.
7. *Фоли Дж.* Как измеряют качество видеосигнала. Новые методы оценки цифрового видео // Цифровое видео. – 1999. – № 3.
8. *Хоган Т.* Аппаратные и программные средства персональных компьютеров: Справочник: Пер. с англ. В 2-х кн. Кн. 2. – М.: Радио и связь, 1995. – 376 с.
9. Цифровое кодирование телевизионных изображений / И.И. Цуккерман, Б.М. Кац, Д.С. Лебедев и др.; Под ред. И.И. Цуккермана. – М.: Радио и связь, 1981. – 240 с.
10. *Чертега В.С.* Сжатие информации в компьютерных сетях: Учебное пособие для вузов / Под ред. В.К. Маригодова. – Севастополь: СевГТУ, 1997. – 214 с.
11. *Шлихт Г.Ю.* Цифровая обработка цветных изображений. – М.: ЭКОМ, 1997. – 336 с.
12. ISO/IEC 10918-1 (ITU-T T.81). Digital Compression and Coding of Continuous-tone Still Images. Part 1: Requirements and Guidelines. – 1992. – 186 p.
13. *Wallace G.K.* The JPEG Still Picture Compression Standard // Communication of the ACM. – 1991. – Vol. 34. – № 4. – P. 31–44.
14. *Подчашинський Ю.О.* Метод розрахунку похибок геометричних вимірювань на цифрових зображеннях // Вісник ЖІТІ. – 2000. – № 14. – С. 164–174.

ПОДЧАШИНСЬКИЙ Юрій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та управління в технічних системах Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– методи вимірювання геометричних величин;

– цифрова обробка відеозображень.

Подано 25.03.2003