

Ю.О. Подчашинський, д.т.н., проф.

М.Г. Криворучко, студент

Л.О. Чепук, к.т.н.

Л.Й. Шавурська, асистент

Державний університет «Житомирська політехніка»

Вейвлет-стиснення відеозображень з вимірювальною інформацією в автоматизованих системах

Відеозображення з вимірювальною інформацією в автоматизованих системах мають великий обсяг. Так, наприклад, обсяг відеозображень структур природного походження становить кіло- та мегабайти інформації. Відеозображенням структур природного походження властивий високий рівень надмірності. Скорочення обсягів файлів можна досягти за рахунок стиснення. Рішення проблем стиснення, або у більш загальному розумінні – кодування відеозображень, використовує досягнення і стимулює розвиток багатьох областей техніки і математики. В процесі дослідження було обрано вейвлет-стиснення відеозображень, що використовує структуру нуль-дерева вейвлета. Результатом проведених дослідів став розвиток існуючих методів вейвлет-стиснення та виявлення оптимальної вейвлет-функції для відеозображень такого типу. Оптимальною вейвлет-функцією для відеозображень з вимірювальною інформацією в автоматизованих системах є вейвлет Хаара, характеристичні показники якого дають змогу ефективного стиснення та досить задовільного відновлення. Такими показниками стали коефіцієнт стиснення та похибка відновлення. Отримані експериментальні результати для п'яти зразків відеозображень структур природного походження дали можливість побачити закономірність і зв'язок між зовнішнім виглядом зразка та його коефіцієнтами. Можна помітити деяку еквівалентність значень коефіцієнтів стиснення, що свідчить про схожість відеозображень, а саме про ідентичність зовнішніх поверхонь твердих порід.

Ключові слова: відеозображення; вимірювальна інформація; вейвлет-перетворення; стиснення відеозображень.

Актуальність теми. Сьогодні актуальною є проблема зберігання великих об'ємів інформації. Навіть сучасні розробки ЕОМ не можуть досягнути достатнього обсягу пам'яті для зберігання та обробки інформації. Особливо це стосується відеозображень, обсяг яких, зазвичай, становить кіло- та мегабайти інформації. Одним із рішень у цьому питанні є скорочення обсягів файлів саме за рахунок стиснення. Існує багато методів стиснення, які у свою чергу класифікуються відповідно до виду інформації, що підлягає стисненню. Стиснення даних важливе як для швидкості передачі, так і ефективності зберігання. Рішення проблеми стиснення, або у більш загальному розумінні – кодування відеозображень, використовує досягнення і стимулює розвиток багатьох областей техніки і математики.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Методи комп'ютерної обробки зображень розглянуто у працях таких авторів, як Р.Гонсалес і Р.Вудс [1], Б.Яне [2], А.А. Лук'янича та А.Г. Шишкін [3], В.Сойфер [4]. Вейвлет-аналіз розглянуто К.Блаттером [5]. Методи стиснення зображень розглянули Д.Селомон [6], С.Уелстід [7] та ін.

Метою статті є удосконалення існуючих методів стиснення відеозображень з вимірювальною інформацією об'єктів природного походження в автоматизованих системах та підвищення ступеня стиснення, насамперед за рахунок заміни дискретного косинусного перетворення на вейвлет-перетворення.

Викладення основного матеріалу. Враховуючи особливості відеозображень з вимірювальною інформацією в автоматизованих системах, що розглядаються у роботі, а саме відеозображень структур природного походження, необхідним є обрання методу, якому властиві такі характеристики:

- великий коефіцієнт стиснення;
- відносно мала похибка;
- проста реалізація;
- швидке обчислення.

Таким є метод стиснення на основі вейвлет-перетворення. Цифровим відеозображенням з вимірювальною інформацією в автоматизованих системах управління, зокрема відеозображенням структур природного походження, властивий високий рівень надмірності. Але використання методу вейвлет-перетворення дає можливість уникнути цього і зберегти для подальшого використання еквівалент вихідного відеозображення, який становить 10 і менше відсотків об'єму від початкового відеозображення. Найчастіше використання подібних еквівалентів є припустимим і не становить проблем, таких як викривлення даних та незручності у візуальному сприйнятті.

Існує два способи покращення коефіцієнта стиснення під час вейвлет-кодування відеозображення. Перший – це зберігання самих коефіцієнтів, а друге – це кодування інформації про розміщення коефіцієнтів.

Методи стиснення значень коефіцієнтів містять:

- скалярне квантування – як однорідне, так і неоднорідне;
- прирівняння найменших $x\%$ коефіцієнтів нулю і квантування залишених коефіцієнтів. Це – форма неоднорідного кодування. До нульових коефіцієнтів може бути застосоване кодування довжин послідовностей;

- ентропійне кодування коефіцієнтів.

Методи стиснення інформації про розміщення коефіцієнтів містять:

- квантування коефіцієнтів на місці. Стиснення відбувається за рахунок більш низького бітрейта квантування. Цей метод може сполучатися з кодуванням довжин послідовностей;

- зберігання інформації про розміщення (тобто номери рядків і стовпців) разом зі значенням коефіцієнтів. Це можливо тільки якщо кількість залишених коефіцієнтів мала;

- використання двійкової карти значень. Це структура з одним бітом на кожен коефіцієнт. Значення «1» показує значущий коефіцієнт, а значення «0» показує коефіцієнт, що був квантований до значення 0. Розмір карти значущості залежить тільки від розміру відеозображення, він не залежить від кількості значущих коефіцієнтів;

- використання структури нуль-дерева вейвлета.

Останній з цих методів, що використовує структуру нуль-дерева вейвлета, – це напрям у вейвлет-стисненні відеозображень, у якому проводиться найбільша кількість сучасних досліджень.

Двомірне вейвлет-перетворення (ВП) можна представити як послідовність вертикальних і горизонтальних високочастотних і низькочастотних операторів, що застосовуються до відеозображення з вимірною інформацією про геометричні параметри об'єктів. Існує чотири варіанти композиції операторів: композиція вертикального високочастотного і горизонтального високочастотного (HH_x); композиція вертикального високочастотного і горизонтального низькочастотного (LH_x); композиція вертикального низькочастотного і горизонтального високочастотного (HL_x); композиція вертикального низькочастотного і горизонтального низькочастотного (LL_x) [7]. Ці блоки можуть бути структуровані у дерево. Кожен коефіцієнт у блоці має чотири «дочірні» у відповідних блоках наступного рівня. Наприклад, на рисунку 1 представлено ВП відеозображення 8×8 , де LL_3 , HH_3 , HL_3 і LH_3 – це блоки 1×1 ; HH_2 , HL_2 і LH_2 – блоки 2×2 і HH_1 , HH_2 і LH_1 – блоки 4×4 .

Сенс введення структури дерева в тому, що, зазвичай, коефіцієнти у блоках на різних рівнях мають значний ступінь подібності. Тобто дочірні коефіцієнти на деякому рівні, ймовірно, будуть схожими на своїх «батьків», що знаходяться на попередньому рівні. Досить поширений випадок, коли коефіцієнт квантується до нуля, то і його дочірні коефіцієнти також квантуються до нуля. Це спостереження покладено в основу так званого вейвлет-кодування з нуль-деревом, вперше застосованого Льюїсом і Ноулесом [7].

Такий алгоритм швидкий, дає гарний ступінь стиснення і якість декодованого відеозображення, має важливу властивість забезпечувати прогресивну передачу (закодована інформація зберігається, а нащадок передається таким чином, що проміжний варіант відеозображення, яке передається, містить повне наближення до кінцевого зображення).

Розглянемо піддіапазони дерева HH , HL і LH . Низькочастотні (LL) елементи зосереджуються в області найбільших по модулю коефіцієнтів. Будемо записувати значення цих виразів без кодування.

При переміщенні зверху вниз кожний блок на наступному, нижньому рівні у кожному діапазоні має двічі більше рядків і стовпців, ніж блок на попередньому рівні. Таким чином, кожний блок на наступному рівні має вчетверо більше коефіцієнтів, ніж блок на попередньому рівні. Кожний коефіцієнт у цьому блоці, окрім найнижчого, має чотири «нащадків» у відповідних точках у блоці під ним. Чотири безпосередніх «нащадки» коефіцієнта у точці (i, j) , що розташовуються у відповідних точках, – це $(2i-1, 2j-1)$, $(2i-1, 2j)$, $(2i, 2j-1)$ і $(2i, 2j)$. Всі елементи у піддереві під коефіцієнтом будуть нащадками цього коефіцієнта). Аналогічно, коефіцієнт є батьківським для всіх нащадків у піддереві під ним.

Щоб відстежити етап обробки відеозображення, створюється символний масив того ж розміру, що і початкове відеозображення. Кожний елемент символного масиву перед початком кожного порівняння з пороговим значенням вважається рівним «0» (елемент ще не оброблявся). Для позначення елемента, що обробляється, будемо використовувати множину із п'яти символів: **POS** – відповідний вейвлет-коефіцієнт після проходження порога є значущим і позитивним; **NEG** – відповідний вейвлет-коефіцієнт після проходження порога є значущим і негативним; **IZ** – ізольований «0», відповідний вейвлет-коефіцієнт після проходження порога є незначущим, але має значущих нащадків у піддереві під ним; **ZR** – корінь нуль-дерева, відповідний вейвлет-коефіцієнт після проходження порога є незначущим і все піддерево нащадків цього коефіцієнта містить тільки незначущі коефіцієнти; **ZT** – незначущий нащадок коефіцієнта, є коренем нуль-дерева.

У вихідний файл записуються тільки чотири символи: POS, NEG, IZ і ZR. Під час декодування символи ZT розкриваються, щоб заповнити свої ненульові піддерева, тому записувати їх у файл немає необхідності. Отже, можна використовувати по два біти на кожен із чотирьох символів. Можна виписувати символи після кожного проходження порога, і таким чином, необхідно зберігати у пам'яті всього один символний масив, а не по окремому масиву для кожного порогового значення.

Значущі коефіцієнти обробляються таким чином: якщо абсолютне значення коефіцієнта перевищує поріг, то записується символ POS або NEG залежно від знака коефіцієнта. Перед тим як вибрати один із символів IZ, ZR або ZT для незначущого коефіцієнта, необхідна інформація про всі коефіцієнти, що розташовані як вище, так і нижче поточного коефіцієнта у дереві. Таку інформацію можна отримати після виконання двох проходів по коефіцієнтах: знизу вгору, щоб виявити корені нуль-дерева. В середині піддіапазону (LN, NN або NL) спочатку здійснюється прохід знизу вгору.

Починаючи з нижнього блоку, у піддіапазоні виявляємо значущі коефіцієнти і присвоюємо відповідним елементам у символному масиві символи POS або NEG. Одночасно отримуємо інформацію про предків цих коефіцієнтів: жоден із предків цих значущих коефіцієнтів не може бути коренем нуль-дерева (ZR) і нащадком кореня нуль-дерева (ZT); всі вони можуть бути закодовані символами POS, NEG або IZ. У цій точці помічаємо всіх предків цих значущих коефіцієнтів як IZ. Таким чином, виконуємо зіставлення символу IZ всім елементам у символному масиві, що відповідає предкам цих коефіцієнтів. У міру того, як піднімаємося по дереву, ці елементи можуть самі виявитися відповідними значущим коефіцієнтам, і тоді символи IZ замінюємо символами POS або NEG.

У кінці переходу знизу вгору для цього діапазону всі значущі коефіцієнти будуть визначені й закодовані символами POS або NEG, всі ізольовані нулі будуть визначені й закодовані символами IZ. Всі коефіцієнти, що залишилися, – це або корені дерева (ZR), або нащадки коренів нуль-дерев (ZT). Прохід зверху вгору визначає, чим саме вони є. Починаючи згори піддіапазону, перевіряємо масив символів, щоб дізнатися, які коефіцієнти були закодовані. Оскільки починаємо згори, то будь-який коефіцієнт, що ще незакодований, має бути коренем нуль-дерева. Це справедливо для всіх коефіцієнтів, за виключенням коефіцієнтів найнижчого блоку. Коефіцієнти у нижньому блоці не мають нащадків і тому за визначенням не можуть бути коренями нуль-дерева. Незакодованим коефіцієнтам цього блоку ставиться у відповідність символ IZ, а не ZR. Коли корінь нуль-дерева знайдений, всі його нащадки у піддереві нижче не позначаються символом ZT. Прохід згори вниз також записує символи у двійковий вихідний файл. Коли зустрічається символ POS, NEG, IZ або ZR, він записується з відповідним 2-бітним кодом. Символ ZT не записується у вихідний файл.

На рисунку 1 зображена блок-схема алгоритму кодування. Перший крок алгоритму – це застосування до відеозображення двомірного вейвлет-перетворення. Цей алгоритм може використовувати такі види вейвлетів: Хаара, D4-вейвлети Добеші і D6-вейвлети Добеші та інші види вейвлетів. Потім задаємо початковий поріг T , рівний найбільшому степені 2, але менший за максимальне значення вейвлет-коефіцієнтів. Часто найбільшу величину у масиві перетворення має низькочастотний фільтр LL (єдиний коефіцієнт у лівому верхньому кутку масиву перетворення). Цей коефіцієнт не є частиною трьох піддіапазонів LN, NN і NL, а тому не розглядається під час визначення максимального коефіцієнта перетворення. Він записується у вихідний файл так, як є. Крім того, у вихідний файл (у його початок) записується деяка додаткова інформація, необхідна декодеру: вид вейвлетів, розмір – кількість рядків (алгоритм працює тільки з квадратними відеозображеннями) і $\log_2(T)$.

Далі алгоритм входить у цикл. На початку кожного циклу символний масив ініціалізується нулями. Для кожного піддіапазону алгоритм виконує прохід знизу вгору і згори вниз, як було описано вище. Піддіапазони обробляються у такому порядку: LN, NN, NL. Символи записуються у вихідний файл при проході згори вниз. У кінці циклу порогове значення T віднімається від значень усіх значущих коефіцієнтів (тобто всіх коефіцієнтів, з яким зіставлені символи POS або NEG). Після цього поріг зменшується наполовину, і нове порогове значення становить $T/2$. Наступний прохід циклу зрівнює нові вейвлет-коефіцієнти з цим новим порогом. Символи, отримані у результаті, записуються у вихідний файл. Цикл повторюється до тих пір, поки T не стане рівним 1. Крім того, існує опція, що дозволяє відновити цикл ще до виконання цієї умови.

Під час кодування фактично будуються послідовні представлення вейвлет-перетворення відеозображення у вигляді бітових площин. На кожному пороговому рівні ніде не зберігається явна інформація про фактичні значення значущих коефіцієнтів (крім їх знака). Шляхом віднімання степенів 2 з коефіцієнтів, алгоритм отримує двійкове представлення значень цих коефіцієнтів. У результаті кожен прохід циклу складає бітову площину, що починається з найбільш значущих бітів і закінчується найменш значущими.

Декодування відеозображення, що закодоване за допомогою нуль-дерева, простіше, ніж кодування вхідного. Блок-схема процесу декодування наведено на рисунку 2. Заголовок файла містить таку інформацію: вид вейвлетів, кількість рядків (що дорівнює кількості стовпців і, таким чином, є розміром відеозображення), низькочастотне значення $N = \log_2$ (поріг) і кількість бітових площин.

Як для кодування, так і для зберігання символів використовуємо символний масив такого ж розміру, що і відеозображення. Символьний масив ініціалізується нулями під час кожного порогового проходу. Для кожного порогового значення зчитуємо символи для піддіапазонів LH, HH і HL згори вниз із символного масиву. Кожного разу, коли зустрічається символ кореня нуль-деревця ZR, він поширюється на все нульове піддерево шляхом зіставлення символу ZT всім його нащадкам у символному масиві [7].

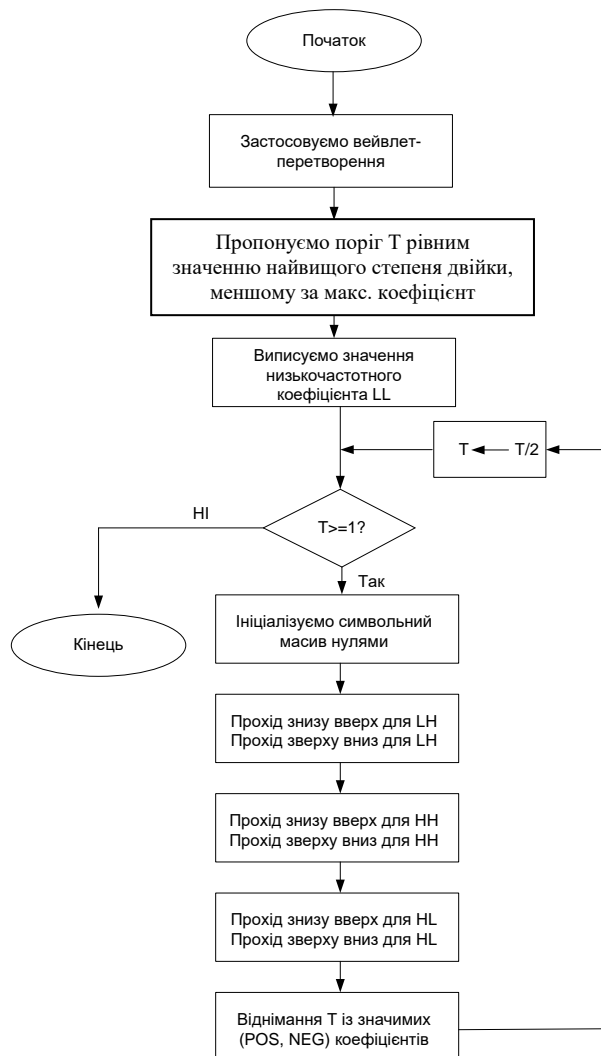


Рис. 1. Алгоритм кодування з нуль-деревом

Значення коефіцієнтів вейвлет-перетворення містяться в окремому масиві. На початку процедури декодування цей масив вейвлет-перетворення ініціалізується нулями. Як тільки символний масив буде весь заповнений для цього значення порога, значення у масиві вейвлет-перетворення оновлюються шляхом додання порогового значення T з кожного елемента масиву, що відповідає символу NEG.

Таким чином, значення коефіцієнтів вейвлет-перетворення будуть реконструйовані за їх двійковим представленням. Спочатку входять у процес найбільш значущі біти, а потім менш значущі. Декодоване відеозображення отримуємо шляхом застосування оберненого вейвлет-перетворення, після того як побудована остання бітова площина.

Було виконано моделювання системи вейвлет-стиснення для відеозображень з вимірною інформацією структур природного походження в автоматизованих системах. Першим етапом моделювання було встановлення оптимальної вейвлет-функції. Критерієм відбору стало найнижче значення відношення похибки відновлення до коефіцієнта стиснення. Цей показник свідчить про величину викривлення отриманого відеозображення на одиницю коефіцієнта стиснення. Дослідження проводилися для двох значень порога T , що використовується під час квантування коефіцієнтів вейвлет-перетворення: $T = 2,5$ та $T = 4,2$. Крайні результати виявилися за $T = 2,5$.

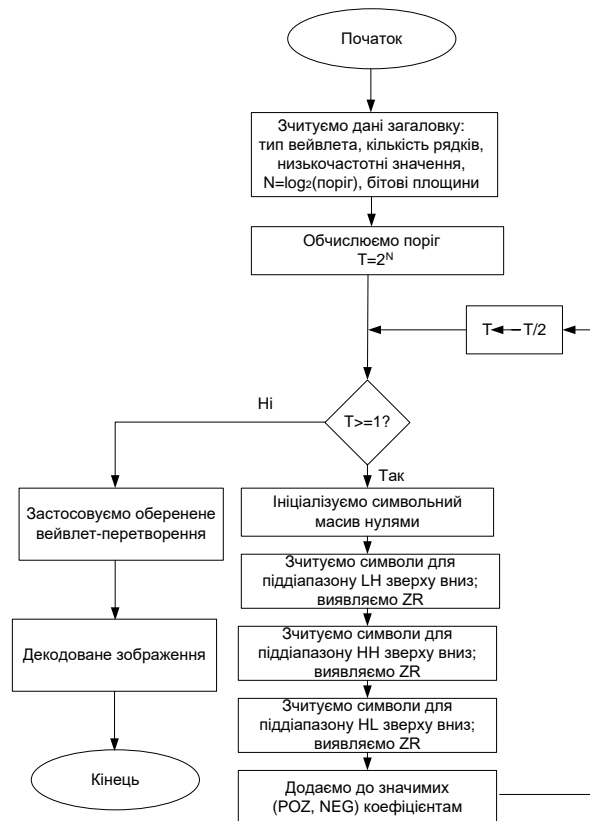


Рис. 2. Алгоритм декодування з нуль-деревом

Такі особливості відеозображень, як велика кількість високочастотних складових, різкі перепади у кольорі тощо призвели до того, що кращою вейвлет-функцією виявився вейвлет Хаара. Результати проведених дослідів наведені у таблиці 1. Під час аналізу цієї таблиці можна помітити деяку еквівалентність значень коефіцієнтів стиснення, що свідчить про схожість відеозображень, а точніше про ідентичність зовнішніх поверхонь твердих порід. Але водночас можна побачити відмінності в обчислених похибках, що вказує на наявність більшої палітри та кількості переходів на поверхні твердої породи.

Таблиця 1

Результати моделювання системи вейвлет-стиснення для різних вейвлет-функцій

Вейвлет	Зображення	K_{CT} , разів	ϵ , %	K_{CT}/ϵ
Вейвлет Добеші DB4	1	20,2773	3,0055	0,1482
	2	20,8773	9,2528	0,4432
	3	20,8773	7,0481	0,3376
	4	20,8773	8,9723	0,4298
	5	20,8773	5,4051	0,2588
Вейвлет Добеші DB6	1	19,7061	2,9071	0,1475
	2	19,7061	8,9829	0,4559
	3	19,7061	6,9834	0,3544
	4	19,7061	8,4921	0,4309
	5	19,7061	5,2076	0,2642
Вейвлет Хаара	1	23,9030	2,9868	0,1249
	2	23,9707	9,8849	0,4124
	3	23,9226	7,4016	0,3094
	4	23,9598	10,4101	0,4345
	5	23,9117	6,0256	0,2519

Наступним кроком у моделюванні є дослідження залежності коефіцієнта стиснення K_{CT} та похибки відеозображення після відновлення ϵ від збільшення порога T , що використовується під час квантування коефіцієнтів вейвлет-перетворення.

Загальний результат моделювання алгоритму вейвлет-стиснення наведено на рисунку 3. Останній етап моделювання – це розрахунок граничного значення коефіцієнта стиснення та похибки, що є середнім для п'ятиох зразків відеозображень текстур природного походження. У результаті середнє значення всіх отриманих граничних показників становлять: $K_{CT} = 49,8687$ разів, $\varepsilon = 9,98688$ %.

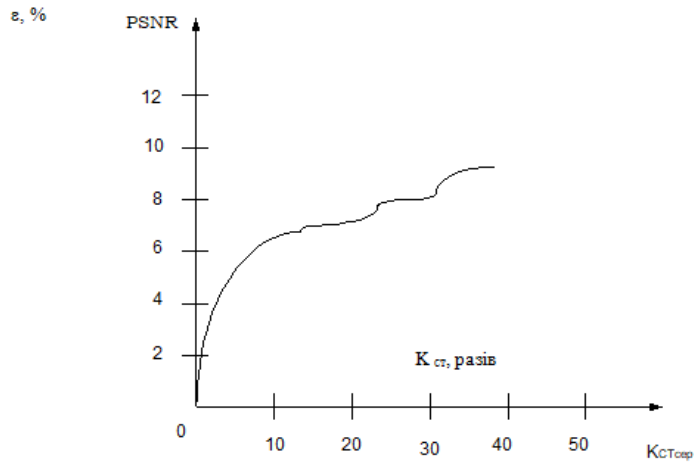
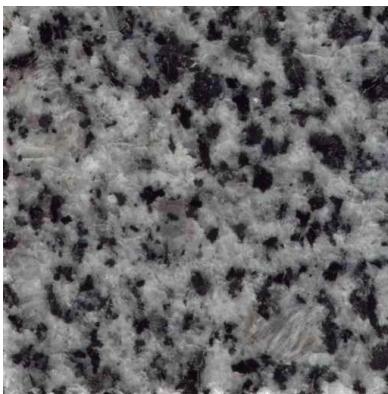
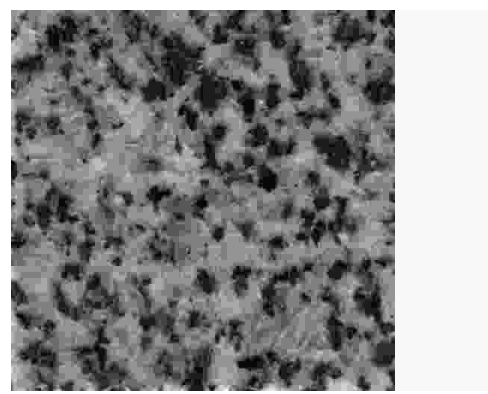


Рис. 3. Графік залежності відносної похибки амплітуди відновленого відеозображення від коефіцієнта стиснення

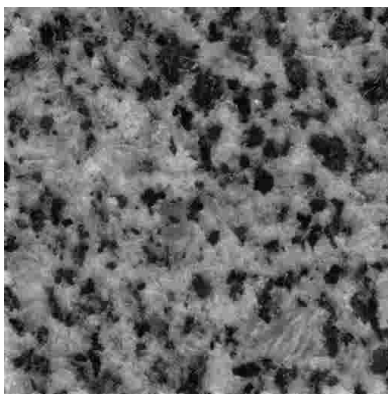
На рисунку 4 наведено відеозображення зразків текстур природного походження з різними коефіцієнтами стиснення.



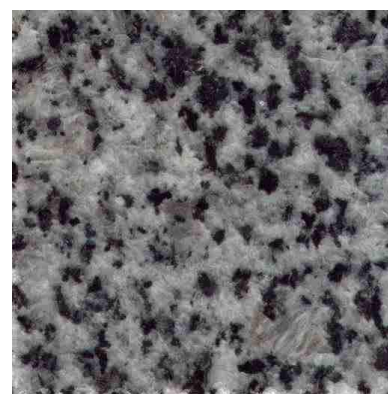
Початковий зразок № 1



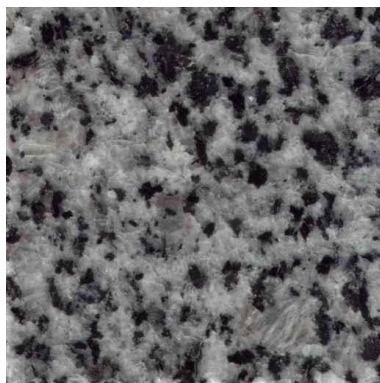
Коефіцієнт стиснення 5 разів



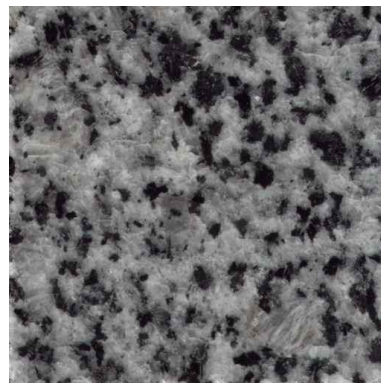
Коефіцієнт стиснення 10 разів



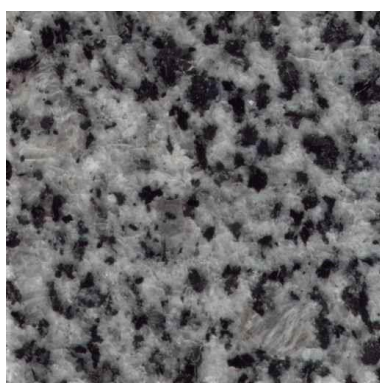
Коефіцієнт стиснення 20 разів



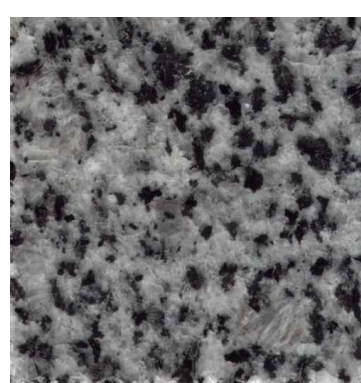
Коефіцієнт стиснення 40 разів



Коефіцієнт стиснення 60 разів



Коефіцієнт стиснення 80 разів



Коефіцієнт стиснення 100 разів

Рис. 4. Відеозображення зразків текстур природного походження з різними коефіцієнтами стиснення

Висновки та перспективи подальших досліджень. Результатом проведених дослідів став розвиток існуючих методів вейвлет-стиснення та виявлення оптимальної вейвлет-функції для відеозображень такого типу. Оптимальною вейвлет-функцією для відеозображень з вимірювальною інформацією в автоматизованих системах є вейвлет Хаара, характеристичні показники якого дають змогу ефективного стиснення та досить задовільного відновлення. Такими показниками стали коефіцієнт стиснення та похибка відновлення.

Отримані експериментальні результати для п'яти зразків відеозображень структур природного походження дали можливість побачити закономірність і зв'язок між зовнішнім виглядом зразка та його коефіцієнтами. Можна помітити деяку еквівалентність значень коефіцієнтів стиснення, що свідчить про схожість відеозображень, а саме про ідентичність зовнішніх поверхонь твердих порід. Але водночас можна побачити відмінності в обчислених похибках, що підтверджує наявність більшої палітри та кількості переходів на поверхні твердої породи.

Завершальним кроком у процесі проведення досліджень є обчислення середніх значень показників, які є граничними для стиснення відеозображень твердих порід. Ними є відносна похибка, що дорівнює 10 %, та відповідний коефіцієнт стиснення, здатний скоротити об'єм відеозображення до 50 разів.

Список використаної літератури:

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р.Гонсалес, Р.Вудс. – М. : Техносфера, 2006. – 616 с.
2. Яне Б. Цифровая обработка изображений / Б.Яне. – М. : Техносфера, 2007. – 584 с.
3. Лукьяница А.А. Цифровая обработка видеозображений / А.А. Лукьяница, А.Г. Шишкин. – М. : Ай-Эс-Эс Пресс, 2009. – 518 с.
4. Методы компьютерной обработки изображений / под. ред. В.А. Соифера. – М. : Физматлит, 2003. – 784 с.
5. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории / К.Блаттер. – М. : Техносфера, 2004. – 280 с.
6. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука / Д.Сэломон. – М. : Техносфера, 2004. – 384 с.
7. Уэлстид С. Фракталы и вейвлеты для сжатия изображения в действии : учеб. пособие / С.Уэлстид. – М. : Триумф, 2003. – 320 с.

8. Подчашинський Ю.О. Стиснення цифрових відеозображень, що містять вимірювальну інформацію про механічні величини / Ю.О. Подчашинський // Вісник ЖДТУ. Серія : Технічні науки. – 2008. – № 2 (45). – С. 93–102.
9. Подчашинський Ю.О. Стиснення та перетворення цифрових відеозображень з вимірювальною інформацією про геометричні параметри об'єктів : монографія / Ю.О. Подчашинський. – Житомир : ЖДТУ, 2019. – 200 с.
10. Подчашинський Ю.О. Технологія вейвлет-стиснення відеозображень поверхні виробів з природного каменю / Ю.О. Подчашинський, Т.С. Воронова, Л.О. Чепюк // Збірник тез доповідей Всеукр. науково-практ. on-line конф. аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки / МОНУ, ЖДТУ. – Житомир, 2016. – С. 75–76.

References:

1. Gonsales, R. and Vuds, R. (2006), *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii v srede MATLAB*, Tekhnosfera, M., 616 p.
2. Yane, B. (2007), *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii*, Tekhnosfera, M., 584 p.
3. Luk'yanitsa, A.A. and Shishkin, A.G. (2009), *Tsifrovaya obrabotka videoizobrazhenii*, Ai-Es-Es Press, M., 518 p.
4. Soifera, V.A. (ed.) (2003), *Metody komp'yuternoї obrabotki izobrazhenii*, Fizmatlit, M., 784 p.
5. Blatter, K. (2004), *Veivlet-analiz. Osnovy teorii*, Tekhnosfera, M., 280 p.
6. Selomon, D. (2004), *Szhatie dannykh, izobrazhenii i zvuka*, Tekhnosfera, M., 384 p.
7. Uelstid, S. (2003), *Fraktaly i veivlety dlya szhatiya izobrazheniya v deistvii*, ucheb. posobie, Triumph, M., 320 p.
8. Podchashyn's'kyj, Ju.O. (2008), «Stysnennja cyfrovyyh videozobrazhen', shho mistjat' vymirjuval'nu informaciju pro mehanichni velychynu», *Visnyk ZhDTU, Serija Tehnichni nauky*, No. 2 (45), pp. 93–102.
9. Podchashyn's'kyj, Ju.O. (2019), *Stysnennja ta peretvorennja cyfrovyyh videozobrazhen' z vymirjuval'noju informacijeju pro geometrychni parametry ob'ektiv*, monografija, ZhDTU, Zhytomyr, 200 p.
10. Podchashyn's'kyj, Ju.O., Voronova, T.S. and Chepjuk, L.O. (2016), «Tehnologija veivlet-stysnennja videozobrazhen' poverhni vyrobiv z pryrodnoho kamenju», *Zbirnyk tez dopovidej Vseukr. naukovo-prakt. on-line konf. aspirantiv, molodyh uchenyh ta studentiv, prysvjachenoi' Dnju nauky*, MONU, ZhDTU, Zhytomyr, pp. 75–76.

Подчашинський Юрій Олександрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- цифрова обробка сигналів і відеозображень;
- системи стабілізації.

Криворучко Максим Геннадійович – студент групи МТ-1 Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційні системи;
- цифрова обробка сигналів і зображень.

Чепюк Ларіна Олексіївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційні системи;
- цифрова обробка сигналів і зображень;
- системи стабілізації.

Шавурська Людмила Йосипівна – асистент кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- цифрова обробка сигналів і зображень.

Стаття надійшла до редакції 20.07.2020.