

КОМПРЕСІЯ ЦИФРОВИХ ВІДЕОСИГНАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МАЛОХВИЛЬОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ

© Кіренко І.О., 2002

Описано принципи компресії цифрових відеосигналів за допомогою малохвильового перетворення. Досліджено методи компенсації руху в малохвильових відеокодерах.

The principles of the digital video compression using wavelets transform are presented in the paper. The approaches to implementation of the motion compensation have been studied.

1. Вступ. Більшість стандартів кодування цифрових відеосигналів використовують як основу один з типів перетворення. Сигнал представляється за допомогою лінійної комбінації базових функцій перетворення і коефіцієнти при таких функціях називаються коефіцієнтами перетворення. Компресія відеосигналу досягається ефективним квантуванням та ентропійним кодуванням цих коефіцієнтів. Залучення відповідного типу базових функцій визначає структуру усєї схеми кодування. Водночас на вибір базової функції впливає можливість оптимального використання специфічних особливостей функцій перетворення на етапі квантування та кодування коефіцієнтів.

Відеосигнали є нестационарними за природою як в просторовому, так і в частотному вимірі. Тому разом з усуненням просторової надлишковості деякий метод передбачення зміни руху у відеоряді повинен бути використаний для зменшення надлишковості в часі. Існує велика кількість алгоритмів оцінки та компенсації руху. У добре відомих стандартах відеокодування (H.261, H.263, MPEG) кожен кадр поділений на маленькі блоки, які використовуються для оцінки руху. Чим менші за розміром блоки, тим точнішим є передбачення, але тим більше бітів необхідно виділяти для кодування векторів руху.

Кодування з розбиттям на блоки має недолік, який проявляється при високих ступенях компресії у вигляді спотворення відновленого зображення на границях блоків (блочні ефекти). Малохвильовий (Wavelet) розклад забезпечує альтернативний підхід до представлення нестационарності відеосигналу. Порівняно зі звичним дискретним косинусним перетворенням, яке використовується в чинних стандартах, дискретне малохвильове перетворення (ДМП) є гнучкішим і більш адаптованим до особливостей системи зору людини. ДМП також не призводить до появи блокових ефектів навіть при залученні поблокової оцінки руху завдяки глобальній природі розкладу.

В наступних розділах будуть розглядатись методи усунення просторової та часової надлишковості в алгоритмах компресії цифрового відеосигналу за допомогою малохвильового перетворення. Дослідження особливостей самого ДМП виходить за рамки статті.

2. Структури малохвильових відеокодерів. В основі алгоритмів відеокомпресії лежить ідея квантування коефіцієнтів перетворення. Оптимальний квантувач повинен використовувати особливості розподілу коефіцієнтів перетворення, тому вибір методу квантування однозначно залежить від вибраної функції перетворення.

Найпростішим квантувачем, що використовується не тільки в малохвильових схемах є однорідний квантувач з мертвою зоною. Хоча на практиці окреме використання цього методу не є оптимальним, він є складовою частиною складніших квантувачів.

Існує ряд схем квантування, розроблених спеціально для малохвильового перетворення. Вони ефективно використовують існуючі взаємозалежності між малохвильовими коефіцієнтами різних частотних підсмуг. Великі області високочастотних смуг вміщують мало енергії, мала кількість значущих коефіцієнтів цих смуг формує регіони, що подібні за формою та розміщенням вздовж різних смуг. Такі області відповідають контурам та іншим особливостям зображення. Методи просторово-частотного квантування/кодування (ПЧК) використовують подібні залежності. Одним з найвідоміших методів ПЧК є кодування нуль-дерева [1]. В цьому алгоритмі результат малохвильового перетворення окремих кадрів відеосигналу представляється у вигляді деревоподібного масиву даних. Алгоритм, розроблений Шапіро, базується на трьох ключових ідеях:

- Використання природної самоподібності малохвильового перетворення для передбачення місця розташування вагової інформації вздовж різних масштабів.
- Поступово-апроксимуюче квантування малохвильових коефіцієнтів.
- Використання адаптивного арифметичного кодера.

Окрім генерування прогресуючого коду за допомогою побітового сканування, схема Шапіро забезпечує добрі результати щодо співвідношення ступінь компресії – спотворення та точний бітовий контроль. Недоліком є необхідність послідовних серій порівняння та відстеження взаємозалежностей коефіцієнтів різних смуг, що вимагає потужної шини пам'яті.

Сайд та Пеарлман вдосконалили алгоритм Шапіро, запропонувавши алгоритм поділу наборів у ієрархічних деревах [2]. Підхід використовує принципи часткового впорядкування за величиною відносно октавно спадаючих порогів, передача за допомогою побітового сканування тощо [2]. Алгоритм спочатку був розроблений для компресії нерухомих зображень, але пізніше був вдосконалений і для відеокодування. Основною перевагою методу є висока швидкодія та генерування прогресуючого коду. Недоліком є необхідність збереження всієї матриці коефіцієнтів з великою кількістю додаткової інформації, частий доступ до коефіцієнтів, що розташовані на різних рівнях матриці. Це робить неможливим використання алгоритму в апаратних засобах та ускладнює практичну реалізацію за допомогою програмованих мікропроцесорів, оскільки вимагає надшвидкої пам'яті з широкою шиною даних та великої кількості буферів. Практична реалізація можлива тільки за допомогою комп'ютерного програмного забезпечення.

Стефен Мартуччі та Ірай Содагар запропонували малохвильовий відеокодер, який використовує метод нуль-дерева для кодування відео при малій швидкості передачі бітів (високому ступеню компресії). Кодер був розроблений в дослідницькому центрі Давида Сарнова як часткова пропозиція до стандарту MPEG-4 для потреб підвищення якості кодування в діапазоні високих ступенів компресії. Основним елементом кодера є новий ефективний метод кодування малохвильових коефіцієнтів, названий ентропійним кодуванням нуль-дерева (КНД). Цей метод, що є вдосконаленням відомого алгоритму Шапіро, не генерує прогресуючий код, але забезпечує вищі результати та гнучкість для відеокодування. Загалом можна визначити основні відмінності між алгоритмом Шапіро та КНД :

- Квантування є явним і може бути виконане як окремо від побудови нуль-дерева, так і як його частина. Це дає змогу оптимізувати крок квантування відповідно до місця розташування малохвильових коефіцієнтів та характеру відповідної інформації зображення (адаптація до відеоконтексту).

- Сканування коефіцієнтів, формування дерева та кодування здійснюється за один прохід на відміну від великої кількості переходів від одного бітового розряду до іншого.
- Сканування коефіцієнтів змінюється від підсмуги до підсмуги, від низької частоти до високої для кожного дерева. Це є вагомою перевагою з погляду бітового контролю та поблокової адаптації квантування.
- Зменшений алфавіт класифікації вузлів дерева, який дає змогу досягнути вищого ступеня компресії.

Блок-схема запропонованого алгоритму наведена на рис. 1 [3].

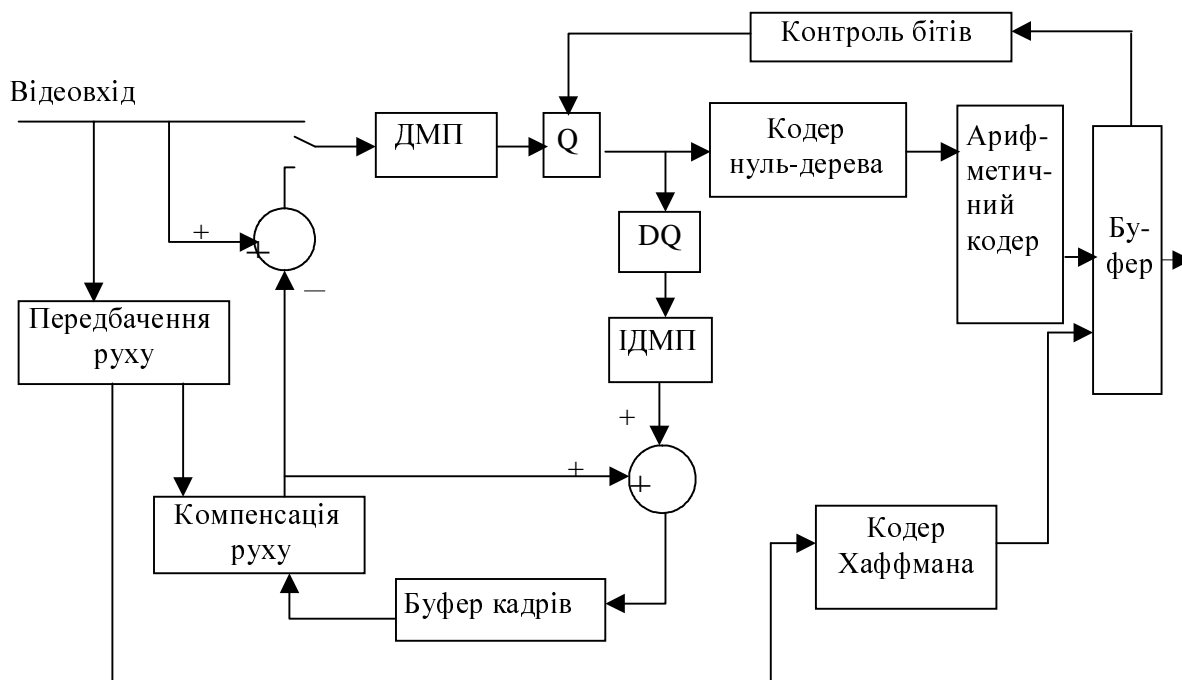


Рис.1. Блок-схема малохвильового відеокодера [3]

Для оцінки ефективності наведеного алгоритму його порівнюють з моделлю кодера MPEG-4. Результати об'єктивної оцінки якості (PSNR) є майже однаковими, але згідно з суб'єктивною оцінкою цей алгоритм забезпечує значно вищу якість завдяки усуненню блокових ефектів та кращому відображенню об'єктів. У 1996 році повний кодер був запропонований як алгоритм фінального стандарту MPEG-4.

У відеокодуванні деякий тип міжкадрового передбачення використовується для усунення часової надлишковості. Схема передбачення руху широко застосовується у вигляді такого передбачення. Існує велика кількість алгоритмів оцінки передбачення руху: співвідношення блоків з різними стратегіями пошуку, ієрархічна оцінка руху, об'єктно-орієнтовні алгоритми оцінки руху тощо [4]. Вибір алгоритму передбачення залежить від типу перетворення та від того, чи здійснюється передбачення в домейні пікселів, чи в домейні коефіцієнтів перетворення.

Одним з таких методів, що використовує особливості малохвильового перетворення, є багатороздільна (multiresolution) оцінка руху. За допомогою малохвильового перетворення відеокадри представляються через набори коефіцієнтів різних масштабів та частотних підсмуг. Активність руху на різних рівнях піраміди є різною, але високорельованою, оскільки характеризує одну і ту саму структуру руху на різних масштабах та діапазонах частот. Тому є природним використання ієрархічної структури малохвильового представлення сигналу в схемі багатороздільної (або ієрархічної) оцінки руху.

Спочатку визначають вектори руху для підзображення з найменшою роздільною здатністю (вершина піраміди). Далі вектори руху уточнюються на нижчих рівнях піраміди. Насправді рух оцінюється тільки на смузі з найнижчою частотою, що значно зменшує час на пошук та співвідношення блоків. Ще однією перевагою такого підходу є мала складність. Алгоритми повного пошуку потребують здійснення $O(d^2)$ (де d – максимальний розмір зони пошуку і є насправді деякою частиною зображення). Отже, із збільшенням розміру зображення складність алгоритму зростає квадратично. На противагу цьому можуть бути розроблені схеми багатомасштабної оцінки руху з майже логарифмічною залежністю складності розрахунків.

Недоліком схеми є можливе виникнення дрейфу помилки в часі, особливо при компресії відеозображення з високою роздільною здатністю завдяки використанню можливо неточних первинних векторів. Для зменшення цього недоліку Охта та ін. [5, 6] запропонували використовувати "перекриваючу" блокову оцінку руху.

Сохаїл Зафар запропонував малохвильовий відеокодер зі схемою компенсації руху [7]. В алгоритмі запропонований метод багатороздільної компенсації руху з блоками різного розміру залежно від рівня блока в піраміді. Компенсація руху оцінюється в малохвильовому просторі. Використання блоків різного розміру дає змогу уникати недоліків, які пов'язані з описом активності малих об'єктів при застосуванні блоків фіксованого розміру. Вектори руху на рівні m піраміди визначаються так

$$V_{i,j}(x,y)^{(m)} = V_0(x,y) \cdot 2^{M-m} + d(\delta x, \delta y), \quad \text{для } \{i = 1, 2, 3; j = 2, 4, 8\},$$

де $V_0(x,y)^M$ – вектор руху для підзображення найнижчої частоти, $d(\delta x, \delta y)$ – приріст вектора руху, знайдений методом повного пошуку в обмеженій області (рис. 2). Ця схема забезпечує досить однорідні вектори руху при переході від блока до блока.

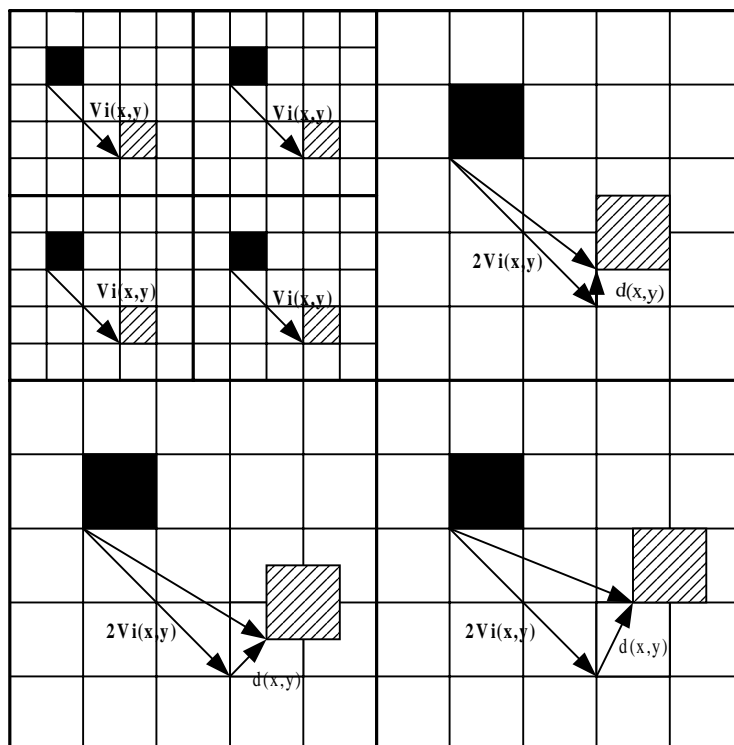


Рис. 2. Схема багатороздільної компенсації руху з блоками різного розміру для дворівневого ДМП

Складність розрахунків можна значно зменшити, якщо не уточнювати вектори руху (звести $d(\delta x, \delta y)$ до нуля), однак це може привести до сильного дрейфу помилки.

На основі малохвильового перетворення, ієрархічного методу оцінки руху та одно-рідного квантувача було визначено два варіанти системи малохвильової відеокомпресії.

Малохвильове перетворення – компенсація руху на рівнях з різною роздільною здатністю – багатомасштабне квантування – ентропійне кодування. Малохвильове перетворення здійснюється над окремими вхідними кадрами відеоряду. Потім, використовуючи схему компенсації руху, формують зміщені залишкові кадри (ЗЗК), після чого їх квантують.

Компенсація руху – малохвильовий розклад – багатомасштабне квантування – ентропійне кодування. Малохвильове перетворення здійснюється над ЗЗК, що були знайдені звичайною схемою передбачення руху в площині пікселів за допомогою блоків 8×8 пікселів. Багатомасштабний квантувач надалі застосовується до вже перетворених ЗЗК в малохвильовій площині.

Така система відеокодування була випробувана на черезстрічковому відеоряді з форматом кадру 720×480 пікселів. Результати доводять, що алгоритм ДМП оригінального відеосигналу разом з запропонованою схемою передбачення руху з блоками різних розмірів забезпечує кращі показники, ніж ДМП, отриманих в площині пікселів ЗЗК. Різниця в PSNR для одного і того самого ступеня компресії становить приблизно 3 dB.

Необхідно зазначити, що використання методів компенсації/передбачення руху в малохвильовій площині пов'язано зі значними труднощами. Просторовий зсув у малохвильовій площині призводить до виникнення фазового зсуву (інваріантність зміщення). Результатом цього можуть бути деякі спотворення руху, що особливо проявляється в областях високочастотних коефіцієнтів.

3. Адаптивна компенсація руху. Проблемою будь-якого алгоритму відеокодування зі змінним ступенем компресії є неспроможність кодера підтримувати постійну якість зображення на різних швидкостях передачі бітів (тобто різному ступені компресії). Часто спотворення кодованого відеоряду змінюється від кадру до кадру. Спотворення кожного зображення погіршує візуальну якість всього ряду внаслідок виникнення ефекту дрейфу. Він є наслідком поширення спотворення через схеми передбачення/компенсації руху. Для підтримання візуальної якості необхідно використовувати один і той самий базовий (початковий) кадр при здійсненні передбачення/компенсації руху на декодері та кодері.

Кі Шен та Едвард Делп запропонували малохвильовий алгоритм адаптивної змінної компенсації руху (Scalable Adaptive Motion Compensated Wavelet (SAMCoW), [8]), з додатковим зворотним зв'язком в декодері. Декодований базовий кадр як на декодері, так і на кодері прив'язаний до одного деякого високого ступеня компресії (з малою кількістю необхідних бітів). Залишкові кадри передбачення та інтракадри закодовуються методом, подібним до алгоритму вбудованого малохвильового нуль-дерева (Embedded Zerotree Wavelet, EZW) Шапіро, що забезпечує неперервно-змінний ступінь компресії. На рис. 3 зображено структури кодера і декодера.

Передбачається, що дійсна швидкість передачі даних R знаходиться в межах $R_L \leq R \leq R_H$, і кількість бітів, яка необхідна для закодування векторів руху, становить R_{MV} , де $R_{MV} < R_L$. Оскільки R_{MV} є відомим, то на кодері вкладений потік бітів може бути завжди декодований на рівні $R_L - R_{MV}$, який потім додається до передбаченого кадру для створення базового з метою оцінки руху кадру. На декодері вкладений бітовий потік

декодується для двох значень швидкості: реальної $R - R_{MV}$ та фіксованої $R_L - R_{MV}$. Кадр, декодований на рівні $R_L - R_{MV}$, додається до передбаченого кадру для створення базового зображення, яке повністю збігається з використаним на кодері. Кадр, декодований на рівні $R - R_{MV}$, додається до передбаченого кадру для генерації фінального декодованого зображення. У такий спосіб усувається можливість поширення помилки.

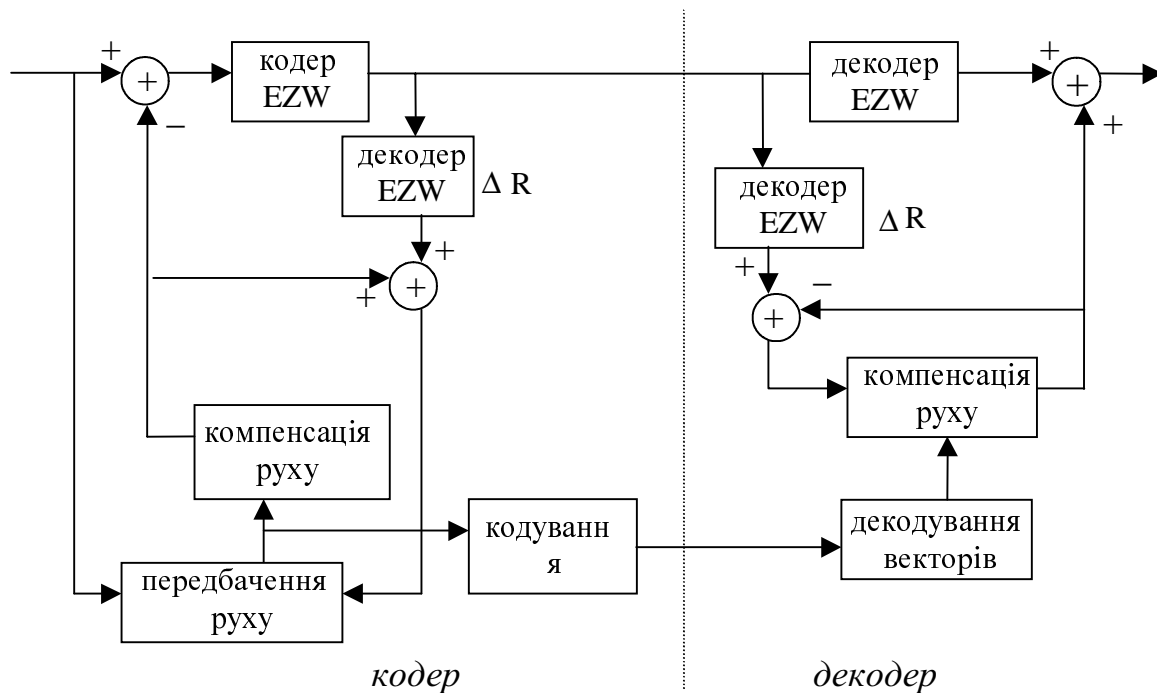


Рис. 3. Блок-схема кодера/декодера SAMCoW [8]

Результати експериментів свідчать, що SAMCoW може працювати в широкому діапазоні швидкостей – від 1 Мб/с до 6 Мб/с. Хоча згідно з об'єктивними оцінками показники цього алгоритму є гіршими за MPEG-1, візуальна, суб'єктивна якість декодованого алгоритмом відео є подібною до MPEG-1 на усьому діапазоні зміни ступеня компресії. Для значень, вищих за 32кб/с, алгоритм має показники, подібні до H.263, але на рівнях, нижчих від 32кб/с, для відео з високою інтенсивністю зміни руху SAMCoW є значно гіршим від H.263.

На підставі результатів експериментів можна зробити такі висновки про загальний недолік більшості малохвильових кодерів зображення, що використовують передбачення/компенсацію руху в площині пікселів. Завдяки тому факту, що малохвильове перетворення обробляє цілий інтракадр або залишковий кадр без розбиття на блоки, малохвильові алгоритми не можуть окремо розглядати активні та пасивні, з погляду інтенсивності руху, області зображення, наприклад, використовуючи нуль-дерева. На противагу цьому стандартні MPEG або H.263, що застосовують поблокове косинусне перетворення, здатні вибірково розподілити біти для різних областей з різними інтенсивностями руху.

4. Тривимірне кодування. Альтернативним підходом до використання часової кореляції відеосигналу є тривимірне (3D) підсмугове/малохвильове кодування з або без компенсації руху. Методи 3D-відеокодування використовують розширення 2D-підсмугового/малохвильового перетворення на часовий вимір і відрізняються переважно методами обробки тривимірних підсмуг.

Шонг Йонг Чой та Джон Вудс розробили систему відеокодування, яка базується на 3D малохвильовому кодуванні з компенсацією руху (Motion Compensated 3D Subband/Wavelet Coding, MC-3DSBC) [11]. У цій новій схемі просторово-частотні смуги утворюються за допомогою окремого часового аналізу та просторового малохвильового перетворення, а потім кодуються за допомогою підсмугового скалярного квантувача (3D subband-finite state scalar quantization, 3DSB-FSSQ). Блок-схема цього кодера наведена на рис. 4

Вхідний відеосигнал спочатку розкладається на просторово-частотні підсмуги, які потім квантуються, кодуються і передаються разом з векторами руху. Експериментальні результати свідчать, що ефективність MC-3DSBC перевищує показники популярного MPEG-1 для тестових відеозображень з різними типами рухів об'єктів та камери. Перевага видається особливо значною для комплексних просторових деталей та повільного руху об'єктів. Перевага звичайно є малою, якщо об'єкти рухаються з великою інтенсивністю. Навіть схема компенсації руху не допомагає в цих випадках.

Головна (і, можливо, єдина) перевага 3D-підходу полягає в тому, що заміна схеми передбачення/компенсації руху тривимірним малохвильовим перетворенням значно зменшує складність розрахунків. Наприклад, в таблиці наведено час виконання відомого кодера 3D SPIHT [12], розробленого Пеарлманом та Зіхіянг Хьонгом. Тест був виконаний на SUN SPARC 20 для 96 кадрів відеоряду. З таблиці зрозуміло, що 57% часу кодування та 78% часу декодування було витрачено на 3D-малохвильове перетворення. Кодер 3D SPIHT в 3.5 раза швидший від MPEG-2. Для стандарту QSIF він є в 2.53 раза швидший від H.263.

Якщо існує інтенсивний рух об'єктів або камери, то значення PSNR відновленого відеосигналу буде сильно коливатись завдяки коефіцієнтам з великою амплітудою у високочастотній області вздовж осі часу. Для кращого усунення часової надлишковості та стрибків PSNR в алгоритм 3D SPIHT вводиться схема компенсації руху. З такою схемою весь алгоритм працює в 1.2 раза повільніше порівняно з H.263, причому більшість часу витрачається на здійснення ієрархічної оцінки векторів руху.

Час виконання операцій кодером 3D SPIHT

Функція	абсолютний час,с	відносний час, %
3D-малохвильове перетворення	16,22	56,95
3D SPIHT-кодування	1,27	4,46
Визначення максимального значення	6,16	21,63
I/O	4,83	16,96
Загальний час	28,48	100,00
<hr/>		
Зворотне 3D-малохвильове перетворення	14,60	78,37
3D SPIHT декодування	0,86	4,62
I/O	3,17	17,01
Загальний час	18,63	100,00

Необхідно зауважити, що в схемах з 3D-перетворенням якість декодованого відео є тим вищою, чим довшою є група кадрів (ГК), що перетворюються. За декількома тестами було встановлено, що більші розміри ГК є загалом менш чутливими до миттєвих змін кадру. Для підвищення якості та адаптивності до змін руху необхідно збільшувати кількість кадрів у ГК, однак це приводить до підвищення вимог щодо розміру буфера, а це, своєю чергою, унеможливає практичне використання алгоритму. Враховуючи вищесказане,

можна зробити висновок, що 3D-підхід може бути використаний в інтерактивних відеокommунікаційних системах, таких, як відеотелефонія або відеоконференції, оскільки вони не мають великої інтенсивності зміни зображення і тому можуть використовувати короткі фільтри у часовому вимірі.

Висновки

Багатомасштабний підхід у системах відеокодування для генерування бітового потоку з різними ступенями компресії є одним з найперспективніших. Цей підхід звичайно вимагає використання нових методів перетворення, таких, як малохвильове перетворення, яке є водночас складнішим і дорожчим з погляду обчислень. Це накладає обмеження на застосування подібних кодерів у системах реального часу. Просторово-частотне квантування/кодування малохвильових коефіцієнтів вимагає потужної шини пам'яті, що ускладнює впровадження цих методів у мікросхемних відеокодерах.

Водночас малохвильова технологія забезпечує оптимальне співвідношення між якістю та ступенем компресії, і завдяки своїй гнучкості уможливує адаптивну компресію. Іншою перевагою кодерів з ДМП є природна простота утворення вкладеного коду для бітового потоку зі змінним ступенем компресії або просторової роздільної здатності.

Головною проблемою використання малохвильового перетворення у системах відеокомпресії є складність реалізації передбачення/компенсації руху в малохвильовій області через інваріантність зсуву, яка властива цьому перетворенню. У такому разі пропонуються два підходи:

- Здійснення часового передбачення в домейні пікселів і використання ДМП тільки для кодування інтракадрів, які потребують високої якості при високому ступені компресії. Використання іншого типу перетворення (можливо перехресного біортогонального перетворення) разом з передбаченням руху в домейні пікселів для утворення Р- або В-кадрів. У такому разі отримується кодер, що може працювати однаково добре в діапазоні низьких та високих ступенів компресії. Проте залучення різних типів перетворень призводить до ускладнення всієї системи.

- Використання 3D-підходу для генерування коду зі змінною бітовою, просторовою та часовою роздільною здатністю. У такий спосіб усувається потреба в рекурсивній структурі декодера і досягається висока енергетична компактність. Однак для створення кодера, що забезпечує високу якість відеосигналу з високою інтенсивністю руху зображення, необхідною є схема компенсації руху перед 3D-перетворенням, що ускладнює систему. Крім того, 3D-кодери вимагають великих буферів для збереження цілих кадрів (до 16 кадрів) перед часовим фільтруванням, що ускладнює кодування-декодування в реальному часі.

Однією з можливостей ефективного використання переваг малохвильового та дискретного косинусного перетворень є представлення матриці малохвильових коефіцієнтів у вигляді структури, подібної до структури блоків коефіцієнтів ДКП, що застосовуються в стандартних компресорах зображення MPEG та H.26x. Можливість і ефективність такого представлення є темою подальших досліджень.

1. Shapiro, *Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients*, *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.41, 1993. 2.. Said A. and Pearlman W.A. *A new and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees*, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Tech.*, vol.6, 1996. 3. Martucci S.A., Sodagar I., Chiang T., *Zerotree A. Wavelet Video Coder*, *IEEE Transactions on Circuits and systems for video Technology*, Vol.7, No.1, 1997. 4. G. de Haan, *Video processing for multimedia systems*, University Press Eindhoven, 2000. 5. Ohta M., Nogaki S. *Hybrid picture coding with wavelet transform and overlapped motion-*

compensated interframe prediction coding, *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.41, 1993. 6. Karro J., Ochti J., Nogaki S., Ohta M., Wavelet A. Codec with overlapped motion compensation for very low bit rate environment, *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol.4, 1994. 7. Ya-Qin Zhang, Sohail Zafar, Motion-Compensated Wavelet Transform Coding for Color Video Compression, *IEEE Transaction on circuits and systems for video technology*, vol.2, No.3, 1992. 8. Ke Shen, Edward J. Delp, Wavelet based Rate Scalable Video Compression, Video and image processing laboratory (VIPER), 1998. 9. Kronander K. Some aspects of perception based image coding, Ph.D. dissertation, Linkoping Univ., Sweden, 1989. 10. Ohm J.R. Three-dimensional subband coding with motion compensation, *IEEE Trans. Image Processing*, vol.3, 1994. 11. Seung-Jong Choi, John W. Woods, Motion-Compensated 3D Subband Coding of Video, *IEEE Transactions on image processing*, vol.8, No.2, 1999. 12. William A. Pearlman, Zixiang Xiong, Embedded Video Subband Coding with 3D SPIHT, *IEEE Transactions on image processing*, 1998.

УДК 536.532:621.3.036

Т.З. Бубела

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра “Метрологія, стандартизація та сертифікація”

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНОЇ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРОДІВ

© Бубела Т.З., 2002

Подано результати дослідження фізичної термоелектричної неоднорідності термоелектродних матеріалів. Розглянуто вплив пластичної деформації на зміну термоелектрорушійної сили зразків та їх електричних характеристик.

In the article the findings of investigation of developments of a physical thermoelectric nonhomogenous of thermoelectrod materials to a strand is submitted. Influencing plastic deformation on change of thermoelectric power is reviewed is model and on change of their electrical characteristics.

Одним з різновидів термоелектричної неоднорідності термоелектродів є фізична неоднорідність, що виявляється у нестабільності фазового складу, порушенні впорядкованості, зміні структури зерен по об'єму термоелектродного дроту [1]. Такі неоднорідності можуть бути викликані явищами наклепу, певними видами термообробки, впливом радіації.

Серед процесів, що викликають структурні зміни у термоелектродах, важливе місце займає пластична деформація. Залежно від типу та ступеня деформації у металах і стопах формується певна деформаційна структура, яка значною мірою визначає термоелектричну стабільність термоелектродного матеріалу.

Структурний стан деформованих термоелектродних стопів типу хромель досліджувався у режимі попередньої деформації. Активний одноосьовий розтяг термоелектродів забезпечував різний ступінь пластичної деформації. Діючі напруження у процесі попереднього навантаження під час активного розтягу вибирались згідно із співвідношенням [2]:

$$\sigma_{\text{м.деф.}} = k \cdot \sigma_{\text{м.міц.}}^{T^{\circ}\text{C}}, \quad (1)$$

де $\sigma_{\text{м.деф.}}$ – межа деформації, $\sigma_{\text{м.міц.}}^{T^{\circ}\text{C}}$ – межа міцності при температурі $T^{\circ}\text{C}$, k – безрозмірний коефіцієнт, значення якого знаходяться в межах від 0 до 1.