УДК 621.391, 519.72

Л.О. ГНАТІВ, В.К. ЛУЦ

ЦІЛОЧИСЛОВІ МОДИФІКОВАНІ СИНУС-КОСИНУСНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТИПУ VII. МЕТОД ПОБУДОВИ І РОЗДІЛЬНІ НАПРАВЛЕНІ АДАПТИВНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ INTRA-ПРОГНОЗУВАННЯ З БЛОКАМИ ЯСКРАВОСТІ 8×8 У КОДУВАННІ ЗОБРАЖЕНЬ/ВІДЕО

Анотація. Запропоновано матричний метод побудови цілочислового модифікованого синус-косинусного перетворення типу VII порядку 8, на основі якого побудовано два цілочислові модифіковані синус-косинусні перетворення типу VII і розроблено алгоритми їх швидкого обчислення, які потребують виконання тільки цілочислових операцій. Алгоритми мають низьку мультиплікативну складність, яка в 7 і 10,5 рази менша порівняно з відомим алгоритмом дискретного синусного перетворення типу VII. Перетворення мають більш високі характеристики ефективності кодування за якістю і ступенем стиснення порівняно з відомими синусними перетвореннями. Розроблено алгоритми швидкого виконання 2D роздільних направлених цілочислових косинусного і модифікованих синус-косинусних типу VII адаптивних перетворень для intra-прогнозування з блоками яскравості 8×8. Алгоритми мають низьку мультиплікативну складність, яка в 6,6 і 16,5 рази менша порівняно з відомими алгоритмами.

Ключові слова: дискретне косинусне перетворення, дискретне синусне перетворення, дискретне синус-косинусне перетворення, цілочислове косинусне перетворення, цілочислове синусне перетворення, цілочислове модифіковане синус-косинусне перетворення, роздільне направлене адаптивне перетворення, масштабоване перетворення, мультиплікативна складність, intra-прогнозування, відеокодування, H.264, H.265.

ВСТУП

Для усунення надлишковості в зображеннях і відеосигналах шляхом їхнього ефективного стиснення використовують методи кодування на основі перетворення. Вибір найкращого перетворення для конкретного застосування залежить від величини допустимої похибки відновлення та від обчислювальних витрат. У більшості стандартів кодування зображень і відео, наприклад, JPEG, H.264/AVC, VC-1, H.265/HEVC, застосовують блочне кодування на основі перетворення як інструмент для ефективного стиснення вхідного зображення та відеосигналів. Стандарти стиснення відеоданих розширюють методи блочного кодування з перетворенням нерухомих зображень шляхом скорочення часової або міжкадрової надишковості.

У роботі [1] показано, що дискретне косинусне перетворення (ДКП) є привабливою альтернативою перетворенню Карунела–Лоєва (ПКЛ), оскільки забезпечує ущільнення енергії та продуктивність, близькі до відповідних характеристик ПКЛ. Але з появою intra- (внутрішнього) прогнозування ця ситуація змінюється і оптимальне перетворення має бути адаптивним до inter (між кадрами) чи intra-прогнозувальної моди (режиму). Джайн [2, 3] показав, що ПКЛ для залишкових процесів буде дискретним синусним перетворенням (ДСП), коли граничні умови є доступними в обох напрямках. Це перетворення Джайн [4] назвав «непарним» (odd) ДСП типу 1, а пізніше у роботі [5] воно отримало назву «непарне» ДСП типу III (ДСП-III). Для покращення кодування з перетворенням прогнозованих блоків у моді intra в [6] було введено модозалежне направлене перетворення («mode-dependent directional transform», MDDT) яке є ядром тестової моделі TMuC [7] стандарту відеокодування H.265/HEVC [8]. У роботі [9] було показано, що залишкові процеси, отримані в результаті intra-прогнозування під час кодування зображень/відео, представляють сепарабельну кореляційну модель зображення з коефіцієнтами кореляції між сусідніми пікселями у вертикальній та горизонтальній проєкціях. Відмічено, що ПКЛ коваріаційної теплицевої матриці, отриманої з рядка залишку після intra-прогнозування, наближено є ДКП. Оскільки коваріаційна матриця, отримана зі стовпця залишку, не є теплицевою матрицею, то ДКП є підоптимальним (субоптимальним) перетворенням. Оптимальним перетворенням ПКЛ, яке приводить цю коваріаційну матрицю до діагонального вигляду, є тридіагональна матриця, власні вектори якої можна обчислити [10, 11] як дискретне синусне перетворення типу VII (ДСП-VII). Такий самий результат в аналітичний спосіб отримано в [11] для гаусово-марковського процесу першого порядку, де показано, що ПКЛ для цього процесу є ДСП-VII для коефіцієнта кореляції ρ, що прямує до нуля. Тут також було вперше опубліковано модозалежне ДКП/ДСП.

У пропозиції [9] до стандарту HEVC отримано цілочислові апроксимації матричного обчислення ДСП-VII порядку $N = 4, 8, 16$, а також наведено алгоритм 4-точкового швидкого виконання цілочислового синусного перетворення типу VII (ЦСП-VII), який не є досконалим за мультиплікативними операціями, оскільки потребує виконання восьми операцій множення.

У роботі [12] Кекре і Соланкі ввели дискретне синус-косинусне перетворення типу II, яке було протестовано за характеристикою середньоквадратичної похибки на зображенні «фото» з роздільною здатністю 256×256 пікселів для задачі кодування з коефіцієнтом стиснення $4:1$ для блоків 16×16. Це перетворення зменшує середнє значення похибки на 0,31 % порівняно з ДСП-II і збільшує середнє значення похибки на 0,35 % порівняно з ДКП-II та найближче за точністю до нього порівняно з іншими перетвореннями. У цій статті з метою суттєвого скорочення обчислювальних витрат, пов'язаних з виконанням роздільних направлених адаптивних перетворень для intra-прогнозування блоків яскравості 8×8 у кодуванні зображень і відео, та збільшення ступеня стиснення, що призводить до виграшу у бітрейті, запропоновано метод побудови цілочислового модифікованого синус-косинусного перетворення типу VII. Також побудовано два цілочислових перетворення низької мультиплікативної складності та показано напрямок подальшого розвитку алгоритмічного забезпечення для швидкого обчислення цілочислових модифікованих синус-косинусних перетворень.

МЕТОД ПОБУДОВИ ЦІЛОЧИСЛОВОГО МОДИФІКОВАНОГО СИНУС-КОСИНУСНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ТИПУ VII ПОРЯДКУ 8

У пропозиціях [9, 13] наведено дві різні однонормові цілочислові апроксимації матричного обчислення ДСП-VII порядку 8 і 16. У [14] наведено три способи представлення матриці S_N^{VII} N-точкового ДСП-VII через уявну частину $2N+1$-точкового дискретного перетворення Фур'є.

Матрицю N-точкового ДСП-VII (також відомого як «непарне» (odd) перетворення типу III [5] або типу I [4]) можна визначити як

$$[S_N^{\mathrm{VII}}]_{k,n} = \frac{2}{\sqrt{2N+1}} \sin\left[\frac{(2k+1)(n+1)\pi}{2N+1}\right],\ k, n = 0, 1, \ldots, N-1. \qquad (1)$$

Побудуємо матрицю цілочислового модифікованого синус-косинусного перетворення типу VII (ЦМСКП-VII) порядку 8, в якій рядки з парними номерами представляють базисні синусні функції ДСП-VII, симетричні відносно середини інтервалу. Ці функції будемо називати парними модифікованими синусними функціями. Рядки з непарними номерами представляють базисні функції ДКП, антисиметричні відносно середини інтервалу. Ці функції називатимемо непарними модифікованими косинусними функціями.

Розглянемо матрицю $IMSCT_8^{\mathrm{VII}*}$ розміру 8×8 ЦМСКП-VII з переставленими рядками, отриману шляхом перестановки рядків на основі обернених досконалих перестановок (ОДП), простих досконалих перестановок (ПДП) і двійково-інверсних перестановок (ДІП) [15]:

$$IMSCT_8^{\mathrm{VII}*} = \widetilde{P}_8 P_8 IMSCT_8^{\mathrm{VII}}, \tag{2}$$

де P_8 — матриця 8×8 ОДП, $P_8(0,\,7) = (0, 2, 4, 6, 1, 3, 5, 7)$, $\widetilde{P}_8$ — блочно-діагональна матриця 8×8, яка містить матрицю розміру 4×4 $\bar{P}_4$ ПДП і матрицю розміру 4×4 ДІП, $\widetilde{P}_8 = \mathrm{diag}\,[\bar{P}_4, P_4]$, $\bar{P}_4 = \mathrm{antidiag}\,[I_2, I_2]$ — антидіагональна матриця 4×4, яка містить одиничні матриці I_2 розміру 2×2, $P_4 = \mathrm{diag}\,[1, \bar{I}_2, 1]$ — діагональна матриця 4×4, яка містить елементи 1 і антидіагональну одиничну матрицю $\bar{I}_2$ розміру 2×2, $\bar{I}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $\bar{P}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $P_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$.

Матрицю $IMSCT_8^{\mathrm{VII}*}$ розміру 8×8 ЦМСКП-VII з переставленими рядками можна записати через матрицю ядра ЦМСКП-VII:

$$IMSCT_8^{\mathrm{VII}*} = B_8\, MSC_8^{\mathrm{VII}*}, \tag{3}$$

де $MSC_8^{\mathrm{VII}*}$ — матриця 8×8 ядра ЦМСКП-VII з переставленими рядками, B_8 — діагональна матриця 8×8 коефіцієнтів нормування.

Матрицю $MSC_8^{\mathrm{VII}*}$ можна побудувати з використанням рекурентного методу:

$$MSC_8^{\mathrm{VII}*} = \mathrm{diag}\,[S_4^{\mathrm{VII}*}, C_4^*]\, H_8^*, \tag{4}$$

де $S_4^{\mathrm{VII}*}$ — матриця 4×4 ядра ЦСП-VII з переставленими рядками на основі ПДП, C_4^* — матриця 4×4 ядра ЦКП з переставленими рядками на основі ДІП:

$$S_4^{\mathrm{VII}*} = \widetilde{P}_4 S_4^{\mathrm{VII}},\ C_4^* = P_4 C_4, \tag{5}$$

S_4^{VII}, C_4 — матриці 4×4 ядер ЦСП-VII і ЦКП відповідно, H_8^* — фактор-матриця 8×8 із ненульовими елементами ± 1,

$$H_8^* = \begin{bmatrix} I_4 & \bar{I}_4 \\ \bar{I}_4 & -I_4 \end{bmatrix},\ \bar{I}_4 = \mathrm{antidiag}\, I_4,\ \bar{I}_4 = \begin{bmatrix} & & & 1 \\ & & 1 & \\ & 1 & & \\ 1 & & & \end{bmatrix}, \tag{6}$$

I_4, $\bar{I}_4$ — одинична та антидіагональна одинична матриці 4×4.

При цьому

$$S_4^{\mathrm{VII}} = \begin{bmatrix} a & b & c & d \\ c & c & 0 & -c \\ d & -a & -c & b \\ b & -d & c & -a \end{bmatrix},\ C_4 = \begin{bmatrix} g & g & g & g \\ e & f & -f & -e \\ g & -g & -g & g \\ f & -e & e & -f \end{bmatrix}, \tag{7}$$

де $a < b < c < d$, $a + b = d$, $e > f$.

Матриця MSC_8^{VII} ядра ЦМСКП-VII порядку 8 на основі (4), (5) і (7) має вигляд

$$MSC_8^{\text{VII}} = \begin{bmatrix} a & b & c & d & d & c & b & a \\ g & g & g & g & -g & -g & -g & -g \\ c & c & 0 & -c & -c & 0 & c & c \\ e & f & -f & -e & e & f & -f & -e \\ d & -a & -c & b & b & -c & -a & d \\ g & -g & -g & g & -g & g & g & -g \\ b & -d & c & -a & -a & c & -d & b \\ f & -e & e & -f & f & -e & e & -f \end{bmatrix}, \qquad (8)$$

Елементи матриці MSC_8^{VII} згідно з (8) однонормового масштабованого модифікованого ЦСКП-VII-1 набувають таких значень: $a = 14$, $b = 28$, $c = 37$, $d = 42$, $e = 43$, $f = 14$, $g = 32$.

Матриця MSC_8^{VII}-1 запропонованого масштабованого ЦСКП-VII-1 порядку 8 має вигляд

$$MSC_8^{\text{VII}}\text{-}1 = \begin{bmatrix} 14 & 28 & 37 & 42 & 42 & 37 & 28 & 14 \\ 32 & 32 & 32 & 32 & -32 & -32 & -32 & -32 \\ 37 & 37 & 0 & -37 & -37 & 0 & 37 & 37 \\ 43 & 14 & -14 & -43 & 43 & 14 & -14 & -43 \\ 42 & -14 & -37 & 28 & 28 & -37 & -14 & 42 \\ 32 & -32 & -32 & 32 & -32 & 32 & 32 & -32 \\ 28 & -42 & 37 & -14 & -14 & 37 & -42 & 28 \\ 14 & -43 & 43 & -14 & 14 & -43 & 43 & -14 \end{bmatrix}. \qquad (9)$$

Базисні вектори матриці MSC_8^{VII}-1 мають L_2-норму, яка наближається до степеня числа два: $\|S_i^{(1)}\|^2 = 8192 \pm \Delta_i$, де $\|S_i\|^2$ — L_2-норма i-ї базисної функції матриці перетворення (яка прямує до одиниці для перетворення з ортонормованим базисом), Δ_i (у відсотках) — відхилення L_2-норми i-ї базисної функції, яке в результаті проведеного аналізу становить $\Delta_i = 0{,}15$–$0{,}42$ %, $i = \overline{0, 7}$, неортогональність становить 0,07 %.

У роботі [16] розглянуто інше однонормове масштабоване ЦСП-VII-2 порядку 4 низької обчислювальної складності. Елементи матриці S_4^{VII}-2 масштабованого ЦСП-VII-2 порядку 4 представлено шістьма бітами, базисні вектори мають однакову L_2-норму, представлену трирозрядним числом, з відхиленням, яке в результаті проведеного аналізу становить $\Delta_i = 1$–2 %, $i = \overline{0, 3}$, а неортогональність — 0,5 %. На основі запропонованих масштабованих ЦСП-VII-2 і ЦКП-2 порядку 4 побудовано інше однонормове масштабоване ЦМСКП-VII-2 порядку 8. Базисні вектори матриці MSC_8^{VII}-2 запропонованого однонормового масштабованого ЦМСКП-VII-2 мають однакову L_2-норму з відхиленням, яке в результаті проведеного аналізу становить $\Delta_i = 1$–2 %, $i = \overline{0, 7}$, а неортогональність — 0,5 %.

АЛГОРИТМ ШВИДКОГО ОБЧИСЛЕННЯ 8-ТОЧКОВОГО ПРЯМОГО ЦМСКП-VII

Матрицю C_4^* ядра ЦКП порядку 4 можна записати як добуток двох фактор-матриць:

$$C_4^* = C_2 C_1, \qquad (10)$$

де C_2, C_1 — фактор-матриці 4×4 алгоритму 4-точкового швидкого обчислення прямого ЦКП:

$$C_1 = H_4^*,\ C_2 = \operatorname{diag}[T_2, Q_2],\ T_2 = \begin{bmatrix} g & g \\ g & -g \end{bmatrix},\ Q_2 = \begin{bmatrix} f & e \\ -e & f \end{bmatrix},\ H_4^* = \begin{bmatrix} I_2 & \bar{I}_2 \\ \bar{I}_2 & -I_2 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

H_4^* — фактор-матриця з ненульовими елементами ± 1.

Розглянемо матрицю $S_4^{\mathrm{VII}\otimes}$ розміру 4×4 ядра ЦСП-VII з переставленими рядками і стовпцями, отриману з матриці $S_4^{\mathrm{VII}*}$ з переставленими рядками з використанням ПДП і перестановки стовпців на основі ДІП [15]:

$$S_4^{\mathrm{VII}\otimes} = S_4^{\mathrm{VII}*} \bar{P}_4. \quad (12)$$

Матрицю $S_4^{\mathrm{VII}\otimes}$ можна представити прямокутною матрицею $S_{3,4}^{\mathrm{VII}\otimes}$ розміру 3×4 і вектор-рядком $S_{1,4}^{\otimes}$ розмірності 4; тоді матрицю $S_{3,4}^{\mathrm{VII}\otimes}$ можна факторизовано представити як добуток двох матриць:

$$S_{3,4}^{\mathrm{VII}\otimes} = S_2 S_1, \quad (13)$$

де S_1, S_2 — фактор-матриці розміру 4×4 і 3×4 алгоритму, запропонованого у роботі [17] для швидкого обчислення 4-точкового прямого ЦСП-VII: $S_1 = T_4$, $S_2 = T_{3,4}$. Тут T_4 — фактор-матриця 4×4, яка у трьох рядках містить по два ненульові елементи ± 1, $T_{3,4}$ — фактор-матриця 3×4, яка у рядках містить по три ненульові цілі елементи $\pm a, b, \pm c$ і d; $S_{1,4}^{\otimes}$ — вектор-рядок розмірності 4 з цілими елементами $\pm c$ і нулем:

$$S_{1,4}^{\otimes} = (c, 0, c, -c). \quad (14)$$

Матрицю $T_{3,4}$ можна записати як добуток двох матриць:

$$T_{3,4} = M_{3,4} R_4, \quad (15)$$

де R_4 — діагональна матриця 4×4 з елементами $a, b, c,\ d$,

$$R_4 = \operatorname{diag}[d, c, a, b], \quad (16)$$

$M_{3,4}$ — фактор-матриця 3×4, яка містить у кожному рядку по три ненульові елементи ± 1.

Матрицю $MSC_8^{\mathrm{VII}*}$ відповідно до (4) та з урахуванням алгоритму швидкого обчислення 4-точкового прямого ЦКП згідно з (10), (11), а також алгоритму швидкого обчислення 4-точкового прямого ЦСП-VII (13)–(16) можна факторизовано представити як добуток чотирьох матриць:

$$MSC_8^{\mathrm{VII}*} = T_{8,4}\, T_{8,3}\, T_{8,2}\, T_{8,1}, \quad (17)$$

де $T_{8,k}$ — k-ті, $k = \overline{1,4}$, фактор-матриці 8×8 запропонованого алгоритму швидкого обчислення 8-точкового прямого ЦМСКП-VII:

$$T_{8,1} = H_8^*,\ T_{8,2} = \operatorname{diag}[T_4, H_4^*],\ T_{8,3} = \operatorname{diag}[R_4, T_2, Q_2],$$
$$T_{8,4} = \operatorname{diag}[M_4, I_4],\ M_4 = \begin{bmatrix} M_{3,4} \\ \hline S_{1,4}^{\otimes} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Тут M_4 — блочна матриця 4×4, при цьому її верхня частина представляє фактор-матрицю $M_{3,4}$, а нижня частина — вектор-рядок $S_{1,4}^{\otimes}$ (14).

АЛГОРИТМ ШВИДКОГО ОБЧИСЛЕННЯ 8-ТОЧКОВОГО ОБЕРНЕНОГО ЦМСКП-VII

Матрицю $(MSC_8^{\mathrm{VII}})^{-1}$ ядра оберненого ЦМСКП-VII порядку 8 можна отримати шляхом транспонування:

$$(MSC_8^{\mathrm{VII}})^{-1} = (SC_8^{\mathrm{VII}*})^{\mathrm{T}} / k, \tag{19}$$

де $k = 2^m$, m — ціле.

Матрицю $(MSC_8^{\mathrm{VII}})^{-1}$ на основі (19), (17), (18) з урахуванням симетричності фактор-матриць ($H_8^{*\mathrm{T}} = H_8^*$, $H_4^{*\mathrm{T}} = H_4^*$) можна факторизовано представити як добуток чотирьох обернених фактор-матриць:

$$(MSC_8^{\mathrm{VII}})^{-1} = T_{8,1} T_{8,2}^{-1} \overline{T}_{8,3}^{\mathrm{T}} T_{8,4}^{-1}, \tag{20}$$

де $\overline{T}_{8,3}^{\mathrm{T}}$, $T_{8,k}^{-1}$ — k-ті, $k = 2, 4$, відповідно транспонована і обернені фактор-матриці 8×8 запропонованого алгоритму швидкого обчислення 8-точкового оберненого ЦМСКП-VII:

$$T_{8,1} = H_8^*,\ T_{8,2}^{-1} = \mathrm{diag}\,[M_{4i}^{-1}, H_4^*],\ \overline{T}_{8,3} = \mathrm{diag}\,[\overline{R}_4, \overline{T}_2, \overline{Q}_2^{\mathrm{T}}],\ T_{8,4}^{-1} = \mathrm{diag}\,[T_4^{-1}, I_4],$$

$$M_{4i}^{-1} = \begin{bmatrix} M_{3,4}^{-1} \\ \hline \overline{S}_{1,4i}^{-1} \end{bmatrix},\ \overline{S}_{1,4i}^{-1} = (-c, c, c, 0) / k. \tag{21}$$

При цьому фактор-матриця $M_{3,4}^{-1} \neq M_{3,4}^{\mathrm{T}}$ та містить у кожному рядку по три ненульові елементи ± 1, фактор-матриця $T_4^{-1} \neq T_4^{\mathrm{T}}$ і містить у трьох рядках по два ненульові елементи ± 1,

$$\overline{R}_4 = R_4 / k = \mathrm{diag}\,[d, c, a, b] / k,\ \overline{T}_2 = T_2 / k = H_2,\ \overline{Q}_2^{\mathrm{T}} = Q_2^{\mathrm{T}} / k,\ \overline{Q}_2^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} f & -e \\ e & f \end{bmatrix} / k,$$

де H_2 — матриця Адамара розміру 2×2, $H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$.

РЕАЛІЗАЦІЯ ШВИДКОГО ОБЧИСЛЕННЯ ЦІЛОЧИСЛОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ БЕЗ МНОЖНИКІВ

Під час реалізації швидкого обчислення цілочислових перетворень використовують операції «метелик» (butterfly), де виконуються парні множення, які можна реалізувати операціями лише зсуву і додавання, але в деяких випадках (для зменшення обчислювальної складності) — і за допомогою операції множення.

Для реалізації запропонованого алгоритму швидкого обчислення 1D 8-точкового однонормового ЦМСКП-VII-1 застосовано здебільшого операції зсуву і додавання, а також деякі операції множення. У табл. 1 представлено схему обчислення спеціальних парних множень, які використовуються в операціях «метелик» для реалізації запропонованого алгоритму швидкого обчислення 1D 8-точкового оберненого ЦМСКП-VII-1.

Обчислювальну складність запропонованих алгоритмів швидкого обчислення 1D 8-точкових обернених ЦМСКП-VII-1,2 і відомих алгоритмів ДСП-VII [14] і ЦСП-VII [9, 13] перетворень наведено у табл. 2.

Запропонований алгоритм 2 швидкого обчислення 8-точкового оберненого ЦМСКП-VII-2 порівняно із відомими алгоритмами [9, 13] на основі матричного множення обчислення ЦСП-VII має у 32 раза меншу мультиплікативну склад-

Т а б л и ц я 1

<table>
<tr><th colspan="2">Множники операцій «метелик» матриці $\overline{Q}_2^{\mathrm{T}}$ і елементів матриці $\overline{R}_4$</th><th rowspan="2">Алгоритм виконання операцій $y = f * x$; $z = e * x$</th><th colspan="3">Кількість операцій для реалізації «метелика»</th><th rowspan="2">Кількість використаних операцій</th></tr>
<tr><th></th><th></th><th>Додавання</th><th>Зсув</th><th>Множення</th></tr>
<tr><td>$f = 14/32$</td><td>$e = 43/32$</td><td>$x_1 = x - (x \gg 3)$;
$y = x_1 \gg 1$; $x_2 = x + x_1$;
$z = x_1 + (x_2 \gg 2)$</td><td>3</td><td>3</td><td>—</td><td>2</td></tr>
<tr><td>$a = 14/32$</td><td>0</td><td>$x_1 = x - (x \gg 3)$;
$y = x_1 \gg 1$; $z = 0$</td><td>1</td><td>2</td><td>—</td><td>1</td></tr>
<tr><td>$b = 28/32$</td><td>0</td><td>$y = x - (x \gg 3)$; $z = 0$</td><td>1</td><td>1</td><td>—</td><td>1</td></tr>
<tr><td>$c = 37/32$</td><td>0</td><td>$x_1 = 37 * x$; $y = x_1 \gg 5$;
$z = 0$</td><td>—</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr>
<tr><td>$d = 42/32$</td><td>0</td><td>$x_1 = 21 * x$; $y = x_1 \gg 4$;
$z = 0$</td><td>—</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr>
<tr><td colspan="2">Усього</td><td>—</td><td>8</td><td>12</td><td>3</td><td>—</td></tr>
</table>

Т а б л и ц я 2

<table>
<tr><th rowspan="4">Операції</th><th colspan="4">Оцінка обчислювальної складності 1D 8-точкових обернених перетворень</th><th colspan="2">Порівняльний аналіз ЦМСКП-VII-1 відносно</th></tr>
<tr><td colspan="2">Запропонованих ЦМСКП-VII-1,2</td><td colspan="2">Відомих ДСП-VII, ЦСП-VII</td><td rowspan="3">[9, 13, 18]</td><td rowspan="3">[14]</td></tr>
<tr><td colspan="2">Повна факторизація</td><td>Матричне множення</td><td>Повна факторизація</td></tr>
<tr><td>ЦМСКП-VII-1</td><td>ЦМСКП-VII-2</td><td>ЦСП-VII із [9, 13, 18]</td><td>ЦСП-VII із [14]</td></tr>
<tr><td>Множення</td><td>3</td><td>2(0)</td><td>64</td><td>21</td><td>У 21,3 раза менше</td><td>У 7 разів менше</td></tr>
<tr><td>Додавання + зсув</td><td>35 + 12</td><td>33 + 10
(35+12)</td><td>56</td><td>77</td><td>На 16,1 % менше додавань</td><td>На 39 % менше додавань</td></tr>
<tr><td colspan="5">Загальне зменшення</td><td>У 21,5 раза менше</td><td>У 7,4 рази менше</td></tr>
</table>

ність і потребує на 23,3 % менше операцій додавання. Порівняно із відомим швидким алгоритмом [14] обчислення ДСП-VII він має в 10,5 раза меншу мультиплікативну складність і потребує на 44,2 % менше операцій додавання, або на 39 % менше операцій додавання, та не потребує 21 операції множення, тобто має у 21,4 раза меншу обчислювальну складність. Розроблені швидкі алгоритми 1 і 2 порівняно з відомим швидким алгоритмом [14] із складною структурою на сім ітерацій мають просту регулярну структуру на чотири ітерації, що на три ітерації менше.

Для реалізації алгоритму [19] швидкого обчислення 1D 8-точкового оберненого ЦКП потрібно дві операції множення, 40 операцій додавання і 16 операцій зсуву.

Обчислювальну складність двох запропонованих алгоритмів швидкого обчислення роздільних направлених ЦКП+ЦМСКП-VII-1 (ЦМСКП-VII-2), відомих ЦКП (H.265) [20]+ЦСП-VII [13] і ЦКП [21]+ДСП-VII [14] 2D 8-точкових обернених цілочислових перетворень наведено у табл. 3.

Таблиця 3

<table>
<tr><th rowspan="3">Операції</th><th colspan="3">Оцінка обчислювальної складності 2D роздільних направлених обернених перетворень для блоків 8×8</th><th colspan="2">Порівняльний аналіз ЦКП+ЦМСКП-VII-1 (ЦМСКП-VII-2) відносно</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Запропонованих ЦКП+ ЦМСКП-VII-1 (ЦМСКП-VII-2)</td><td colspan="2">Відомих ЦКП+ДСП-VII (ЦСП-VII)</td><td rowspan="2">H.265[20]+[13]</td><td rowspan="2">[21]+[14]</td></tr>
<tr><td>H.265 [20]+[13]</td><td>із [21]+[14]</td></tr>
<tr><td>Множення</td><td>0,625 (0,25)</td><td>10,75</td><td>4,125</td><td>У 17,2 (у 43) раза менше</td><td>У 6,6 (у 16,5) раза менше</td></tr>
<tr><td>Додавання+зсув</td><td>12,875 (12,875)</td><td>11,5</td><td>12,875</td><td>На 12 % більше додавань</td><td>0</td></tr>
<tr><td colspan="4">Загальне зменшення</td><td>У 17,1 (у 42,9) раза менше</td><td>У 6,6 (у 16,5) раза менше</td></tr>
</table>

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Вихідні зображення класів B і C для тестування наведено в [17]. У табл. 4 представлено експериментальні результати ефективності кодування за характеристикою стандартної кількісної оцінки спотворень PSNR (дБ) для стиснених двох тестових зображень класу B з роздільною здатністю 1920×1072 пікселів і двох — класу C з роздільною здатністю 1280×768 пікселів для нормального (22–37) діапазону QP (параметра квантування) [22] запропонованого 2D роздільного направленого адаптивного ЦКП/ЦМСКП-VII-1 для блоків яскравості 8×8. Ці результати представляють різницю на основі запропонованого і на основі відомих роздільних направлених ЦКП (H.265) [20]/ЦСП-VII[13], а результати для запропонованого ЦКП/ЦМСКП-VII-2 наведено у табл. 5. Експериментальні результати кодування за коефіцієнтом стиснення $K:1$ для запропонованого 2D роздільного ЦКП/ЦМСКП-VII-1 для блоків яскравості 8×8 наведено у табл. 6, а для запропонованого ЦКП/ЦМСКП-VII-2 — у табл. 7. Результати ефективності кодування за коефіцієнтом стиснення K (у %), які представляють різницю на основі запропонованого ЦКП/ЦМСКП-VII-1 і на основі відомих ЦКП(H.265)/ЦСП-VII, наведено у табл. 8, а результати на основі запропонованого ЦКП/ЦМСКП-VII-2 — у табл. 9.

У табл. 4–9 наведено середні значення експериментальних результатів ефективності кодування за характеристикою PSNR і коефіцієнтом стиснення K для чотирьох тестових зображень класів B і C, де НК, СК — низько- та середньоко-

Таблиця 4

<table>
<tr><th rowspan="2">Клас</th><th rowspan="2">Зображення з блоками 8×8</th><th colspan="4">Результати ефективності кодування за характеристикою PSNR (дБ) для QP (діапазони)</th></tr>
<tr><td>22</td><td>27</td><td>32</td><td>37</td></tr>
<tr><td rowspan="2">B
1920×1072</td><td>Храм (СК)</td><td>1,15</td><td>0,56</td><td>0,34</td><td>0,74</td></tr>
<tr><td>Місто (НК)</td><td>0,85</td><td>0,26</td><td>0,09</td><td>0,06</td></tr>
<tr><td rowspan="2">C
1280×768</td><td>Гори (СК)</td><td>0,84</td><td>0,27</td><td>0,12</td><td>0,20</td></tr>
<tr><td>Пейзаж (НК)</td><td>0,47</td><td>0,24</td><td>0,10</td><td>0,08</td></tr>
<tr><td colspan="2">Середнє значення</td><td>0,827</td><td>0,332</td><td>0,164</td><td>0,271</td></tr>
</table>

Таблиця 5

Клас	Зображення з блоками 8×8	Результати ефективності кодування за характеристикою PSNR (дБ) для QP (діапазони)			
		22	27	32	37
B 1920×1072	Храм (СК)	–1,64	–0,75	–0,20	0,63
	Місто (НК)	–0,88	–0,35	–0,05	0,08
C 1280×768	Гори (СК)	–0,96	–0,39	–0,06	0,20
	Пейзаж (НК)	–0,87	–0,28	–0,09	0,04
Середнє значення		–1,086	–0,444	–0,102	0,236

Таблиця 6

Клас	Зображення з блоками 8×8	Результати кодування за коефіцієнтом стиснення $K:1$ для QP (діапазони)			
		22	27	32	37
B 1920×1072	Храм (СК)	3,243	4,146	5,662	8,063
	Місто (НК)	2,453	2,927	3,680	5,165
C 1280×768	Гори (СК)	2,364	2,876	3,684	5,595
	Пейзаж (НК)	1,598	1,930	2,608	4,206
Середнє значення		2,415	2,970	3,908	5,757

Таблиця 7

Клас	Зображення з блоками 8×8	Результати кодування за коефіцієнтом стиснення $K:1$ для QP (діапазони)			
		22	27	32	37
B 1920×1072	Храм (СК)	3,403	4,400	6,193	9,199
	Місто (НК)	2,618	3,102	3,891	5,520
C 1280×768	Гори (СК)	2,485	3,011	3,874	6,082
	Пейзаж (НК)	1,616	1,955	2,683	4,445
Середнє значення		2,531	3,117	4,161	6,311

рельовані зображення. Під час тестування використовувалися роздільні направлені перетворення ЦКП/ЦСП (ЦМСКП) без intra-прогнозування, де ЦКП застосовувалося для перетворення стовпців, а ЦСП (ЦМСКП) — для перетворення рядків з метою спрощеного порівняння за двома характеристиками ефективності кодування (за якістю і ступенем стиснення) запропонованих модифікованих синус-косинусних перетворень з відомим синусним перетворенням.

Запропоноване цілочислове модифіковане синус-косинусне перетворення 1 типу VII порядку 8 порівняно з відомим синусним перетворенням за характеристикою PSNR для чотирьох тестових зображень класів B і C підвищує середнє значення PSNR на 0,164–0,827 дБ. При цьому середнє значення коефіцієнта стиснення K збільшується на 2,00–16,66 %.

Запропоноване цілочислове модифіковане синус-косинусне перетворення 2 типу VII порядку 8 порівняно з відомим синусним перетворенням за характерис-

Таблиця 8

Клас	Зображення з блоками 8×8	Результати ефективності кодування за коефіцієнтом стиснення K (у %) для QP (діапазони)			
		22	27	32	37
B 1920×1072	Храм (СК)	7,07	13,35	20,80	30,23
	Місто (НК)	– 0,28	0,98	4,66	12,07
C 1280×768	Гори (СК)	– 0,13	3,12	9,56	16,82
	Пейзаж (НК)	1,33	2,75	3,32	7,49
Середнє значення		1,998	5,053	9,584	16,655

Таблиця 9

Клас	Зображення з блоками 8×8	Результати ефективності кодування за коефіцієнтом стиснення K (у %) для QP (діапазони)			
		22	27	32	37
B 1920×1072	Храм (СК)	12,35	20,29	32,13	48,58
	Місто (НК)	6,42	7,00	10,68	19,76
C 1280×768	Гори (СК)	4,99	7,94	15,21	27,00
	Пейзаж (НК)	2,47	4,13	6,32	13,61
Середнє значення		6,56	9,84	16,08	27,24

тикою PSNR для чотирьох тестових зображень класів B і C знижує середнє значення PSNR на 0,102–1,086 дБ. При цьому середнє значення коефіцієнта стиснення K збільшується на 6,56–27,24 %.

Згідно з прийнятим Комітетом MPEG визначеним суб'єктивним порогом PSNR = 0,5 дБ у разі прийняття кодової оптимізації вважається, що збільшення (або зменшення) PSNR на цю величину буде помітним візуально [11], а для PSNR < 0,5 дБ візуально не відчувається. Отже, підвищення найбільшого середнього значення PSNR на 0,827 дБ для запропонованого модифікованого синус-косинусного перетворення 1 буде візуально помітним, тобто візуальна якість зображення покращиться. Для запропонованого модифікованого синус-косинусного перетворення 2 зниження найбільшого середнього значення PSNR на 1,086 дБ для малого значення 22 нормального діапазону QP буде візуально помітним, а для більших значень QP ≥ 27 зниження найбільшого середнього значення PSNR на 0,444 дБ або його підвищення на 0,236 дБ буде візуально непомітним, тобто зберігається візуальна якість зображення.

ВИСНОВКИ

Запропоновано матричний метод побудови дискретного модифікованого синус-косинусного перетворення типу VII порядку 8. На основі запропонованого методу побудовано два цілочислові модифіковані синус-косинусні перетворення типу VII порядку 8 і розроблено алгоритми їх швидкого обчислення, які потребують виконання тільки цілочислових операцій. Ці алгоритми мають низьку мультиплікативну складність, яка в 7 і 10,5 рази менша, і потребують на 23,3 % і 44,2 % менше операцій додавання порівняно з відомим алгоритмом дискретного синусного перетворення типу VII. Запропоновані алгоритми порівняно з відомим алгоритмом із складною структурою на сім ітерацій мають просту регулярну структуру на чотири ітерації, що на три ітерації менше. Ці перетворення мають більш високі характеристики ефективності кодування за якістю і коефіцієнтом стиснення порівняно з відомими синусними перетвореннями. Розроблено алгоритми швидкого обчислення 2D 8-точкових роздільних направлених цілочислових косинусного і модифікованих синус-косинусних типу VII адаптивних перетворень для intra-прогнозування для блоків яскравості 8×8. Алгоритми мають низьку мультиплікативну складність, яка в 6,6 і 16,5 рази менша порівняно з відомими алгоритмами. Перетворення мають більш високі характеристики ефективності кодування: підвищення найбільшого середнього значення PSNR на 0,827 дБ згідно із суб'єктивним порогом PSNR = 0,5 дБ для запропонованого модифікованого синус-косинусного перетворення 1 буде візуально помітним з покращеною візуальною якістю зображення. При цьому середнє значення коефіцієнта стиснення K збільшується на 2,00–16,66 %. Для запропонованого модифікованого синус-косинусного перетворення 2 зниження найбільшого середнього значення PSNR на 1,086 дБ для малого значення 22 нормального діапазону QP буде візуально помітним, а для більших значень $QP \geq 27$ зниження найбільшого середнього значення PSNR на 0,444 дБ або його підвищення на 0,236 дБ буде візуально непомітним, тобто зберігається візуальна якість зображення, при цьому середнє значення коефіцієнта стиснення K збільшується на 6,56–27,24 %.

Отже, розроблені алгоритми швидкого обчислення 2D роздільних направлених цілочислових косинусного і модифікованих синус-косинусних типу VII адаптивних перетворень для intra-прогнозування з блоками яскравості 8×8 можуть бути використані для покращення стандарту H.265 з метою збільшення швидкодії, ступеня стиснення (що призводить до підвищення бітрейту), покращення візуальної якості зображення та зменшення обсягу обчислювальних і енергетичних витрат.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rao K.R., Yip P. Discrete cosine transform: algorithms, advantagex, applications. Boston: Academic Press, 1990. 490 p.
2. Jain A.K. A fast Karhunen–Loeve transform for a class of stochastic process. *IEEE Tran. on Commun.* 1976. Vol. COM-24, N 9. P. 1023–1029.
3. Jain A.K. Image coding via nearest neighbors image model. *IEEE Trans. on Commun*. 1975. Vol. 23, N 3. P. 318–321.
4. Jain A.K. A sinusoidal family of unitary transforms. *IEEE Trans. Patt. Anal. and Mach. Intell*. 1979. Vol. 1, N 4. P. 356–365.
5. Wang Z., Hunt B.R. The discrete W transform. *Appl. Math. and Comput*. 1985. Vol. 16, Iss. 1. P. 19–48.
6. Ye Y., Karczewicz M. Improved intra coding. Doc. VCEG-AG11; ITU-T Q.6/SG16, Shenzhen, China, Oct. 2007.
7. McCann K., Bross B., Sekiguchi S., Han W.-J. HM4: High Efficiency Video Coding (HEVC) test model 4 encoder description. ITU-T, doc. JCTVC-F802, Torino, IT, July, 2011.
8. ITU-T Rec. H.265|ISO/IEC 23008-2: 2013. Information technology — High efficiency coding and media delivery in heterogeneous environments — Part 2: High efficiency video coding, 2013.
9. Yeo C., Tan Y.H., Li Z., Rahardja S. Mode-dependent fast separable KLT for block-based intra coding. ITU-T, doc. ICTVC-B024, Geneva, CH, July 2010.
10. Yueh W.C. Eigenvalues of several tridiagonal matrices. *Appl. Mathematics E-Notes*. 2005. Vol. 5. P. 66–74.
11. Han J., Saxena A., Rose K. Towards jointly optimal spatial prediction and adaptive transform in video/image coding. *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process (ICASSP)* (14–19 March 2010, Dallas, TX, USA). Dallas, 2010. P. 726–729.

12. Kekre H.B; Solanki J.K. Comparative performance of various trigonometric unitary transforms for transform image coding. *Int. J. Electronics.* 1978. Vol. 44, Iss. 3. P. 305–315.

13. An J., Zhao X., Guo X., Lei S. Non-CE7: Boundary-dependent transform for inter-predicted residue. Resreport, Joint Collaborative Team on Video Coding (JCT-VC) of ITU-t SG16 WP3 and ISO IEC JTC1 SC29 WG11 JCTVC G281. Geneva, CH, Nov. 2011.

14. Chivukula R.K., Reznik Y.A. Fast computing of discrete cosine and sine transforms of types VI and VII. *Proc. SPIE 8135, Applications of Digital Image Processing XXXIV, 813505* (19 September 2011, San Diego, USA). San Diego, 2011. 10 p. https://doi.org/10.1117/12.903685.

15. Шевчук Б.М., Задірака В.К., Гнатів Л.О., Фраєр С.В. Технологія багатофункціональної обробки і передачі інформації в моніторингових мережах. Київ: Наук. думка, 2010. 378 с.

16. Гнатів Л.О., Луц В.К. Метод побудови моде-залежного швидкого роздільного цілочисельного ПКЛ для адаптивного кодування зображень і відео. *Пр. міжн. наук. конф. «Питання оптимізації обчислень (ПОО-XL)»* (вересень 2013, Україна, Крим, Велика Ялта, смт. Кацивелі). Кацивелі, 2013. С. 68–69.

17. Гнатів Л.О., Луц В.К. Алгоритми швидкого виконання 4-точкових цілочислових синусних перетворень типу VII без множення і роздільні направлені адаптивні перетворення для intra-прогнозування в кодуванні зображень/відео. *Кибернетика и системный анализ*. 2020. Т. 56, № 1. С. 186–199.

18. Saxena A., Fernandes F. CE7: Mode-dependent DCT/DST without 4*4 full matrix multiplication for intra prediction. ITU-T, doc. JCTVC- E125, Geneva, Switzerland, Mar. 2011.

19. Гнатив Л.А. Целочисленные косинусные преобразования для высокоэффективного кодирования изображений и видео. *Кибернетика и системный анализ*. 2016. Т. 52, № 5. С. 161–176.

20. Fuldseth A., Bjøntegaard G., Sadafale M., Sze V. CE10: Core transform design for HEVC. ITU-T, doc. JCTVC-G495, Geneva, CH, Nov. 2011.

21. Joshi R., Reznik Y., Sole J.K., Karczewicz M. CE-10: Scaled orthogonal integer transforms supporting recursive factorization structure. ITU-T, doc. JCTVC-F352. Torino, IT, July, 2011.

22. Ричардсон Я. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 — стандарты нового поколения. Москва: Техносфера, 2005. 368 с.

Надійшла до редакції 06.07.2020

Л.А. Гнатив, В.К. Луц

ЦЕЛОЧИСЛЕННЫЕ МОДИФИЦИРОВАННЫЕ СИНУС-КОСИНУСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТИПА VII. МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ И РАЗДЕЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ АДАПТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ INTRA-ПРОГНОЗИРОВАНИЯ С БЛОКАМИ ЯРКОСТИ 8 × 8 В КОДИРОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ/ВИДЕО

Аннотация. Предложен матричный метод построения целочисленного модифицированного синус-косинусного преобразования типа VII порядка 8, на основании котрого построены два целочисленных модифицированных синус-косинусных преобразования типа VII и разработаны алгоритмы их быстрого вычисления, которые требуют выполнения только целочисленных операций. Алгоритмы имеют низкую мультипликативную сложность, которая в 7 и 10,5 раз меньше по сравнению с известным алгоритмом дискретного синусного преобразования типа VII. Преобразования обладают более высокими характеристиками ефективности кодирования по качеству и степени сжатия по сравнению с известными синусными преобразованиями. Разработаны алгоритмы быстрого вычисления 2D раздельных направленных целочисленных косинусного и модифицированных синус-косинусных типа VII адаптивных преобразований для intra-прогнозирования с блоками яркости 8×8. Алгоритмы имеют низкую мультипликативную сложность, которая в 6,6 и 16,5 раз меньше по сравнению с известными алгоритмами.

Ключевые слова: дискретное косинусное преобразование, дискретное синусное преобразование, дискретное синус-косинусное преобразование, целочисленное косинусное преобразование, целочисленное синусное преобразование, целочисленное модифицированное синус-косинусное преобразование, раздельное направленное адаптивное преобразование, масштабируемое преобразование, мультипликативная сложность, intra-прогнозирование, видеокодирование, H.264, H.265.

L.O. Hnativ, V.K. Luts

INTEGER MODIFIED SINE–COSINE TRANSFORMS TYPE VII. A CONSTRUCTION METHODAND SEPARABLE DIRECTIONAL ADAPTIVE TRANSFORMS FOR INTRA PREDICTION WITH 8X8 CHROMA BLOCKS IN IMAGE/VIDEO CODING

Abstract. A matrix method for constructing a modified order-8 integer sine–cosine transform type VII is proposed. Based on the method, two order-8 integer modified sine–cosine transforms type VII are constructed and algorithms for fast computing of these transforms are developed, which require only integer operations. These algorithms are of low computational complexity and their multiplicative complexity is 7 and 10.5 times less and require 23.3 and 44.2% less of addition operations than for the well-known algorithm of the discrete sine transform type VII. These transforms have higher coding gain performance for quality and compression ratio as compared with the well-known sine transforms. Algorithms for fast computing of 2D separable directional integer cosine and modified sine–cosine type VII adaptive transforms for intra prediction with 8×8 chroma blocks are developed. These algorithms have low multiplicative complexity and their computational complexity is 6.6 and 16.5 times less than that in the well-known algorithms.

Keywords: discrete cosine transform, discrete sine transform, discrete sine cosine transform, integer cosine transform, integer sine transform, integer modified sine cosine transform, separable directional adaptive transform, scaled transform, multiplicative complexity, intra prediction, video coding, H.264, H.265.

Гнатів Лев Олексійович,
кандидат техн. наук, старший науковий співробітник Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, e-mail: levhnativ@gmail.com.

Луц Василь Костянтинович,
молодший науковий співробітник Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, e-mail: vkluts@gmail.com.