УДК 681.391, 519.725

Л.О. ГНАТІВ

ЦІЛОЧИСЛОВІ МОДИФІКОВАНІ СИНУСНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ. МЕТОД ПОБУДОВИ І РОЗДІЛЬНІ НАПРАВЛЕНІ АДАПТИВНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ INTRA-ПРОГНОЗУВАННЯ В КОДУВАННІ ЗОБРАЖЕНЬ/ВІДЕО

Анотація. Запропоновано матричний метод побудови цілочислового модифікованого синусного перетворення типу VII порядку 8, на основі якого побудовано два цілочислові перетворення і розроблено алгоритми швидкого виконання 8-точкових цілочислових модифікованих синусних перетворень типу VII, які потребують тільки цілочислових операцій. Алгоритми мають низьку обчислювальну складність, яка в 4,5 і 10,9 рази менша порівняно з відомим алгоритмом. Перетворення мають більш високі характеристики ефективності кодування за якістю і ступенем стиснення порівняно з відомими синусними перетвореннями. Розроблено алгоритми швидкого виконання 2D 8-точкових роздільних направлених цілочислових косинусного і модифікованих синусних адаптивних перетворень для intra-прогнозування низької обчислювальної складності, яка в 4,62 і 8,24 рази менша порівняно з відомими алгоритмами.

Ключові слова: дискретне косинусне перетворення, дискретне синусне перетворення, цілочислове косинусне перетворення, цілочислове синусне перетворення, цілочислове модифіковане синусне перетворення, роздільне направлене адаптивне перетворення, модозалежне направлене перетворення, швидке виконання перетворення, масштабоване перетворення, intra-прогнозування, відеокодування, H.265.

ВСТУП

Дискретні косинусні та синусні перетворення різних типів добре вивчені, мають розроблені алгоритми для їхнього швидкого обчислення [1–5] і є ефективним інструментом для декореляції даних [6, 7], усунення надлишковості в зображеннях [6, 8–12] і відеосигналах [12–15]. Кларк в [16] першим показав, що оптимальним перетворенням Карунена–Лоева (ПКЛ) для марковського процесу першого порядку з несепарабельною кореляційною моделлю є дискретне косинусне перетворення (ДКП), коли коефіцієнт кореляції ρ між елементами прямує до одиниці, а коли ρ прямує до нуля, відповідним оптимальним перетворенням є дискретне синусне перетворення (ДСП) типу 1 [17]. Це було зроблено на основі введеної ним декореляційної характеристики η (у відсотках), яка вирівнюється для обох перетворень для $\rho \approx 0{,}54$ та становить приблизно 87 %. Також було наведено характеристики η для ДКП і ДСП у разі широкого діапазону ρ для ефективного оброблення і кодування зображень. Таке синусне перетворення вперше було виділено Джайном [1] як «парне» (even) ДСП-1. Джайн у [18] показав, що ПКЛ для залишкових процесів буде ДСП, коли граничні умови є доступними в обох напрямках. Аналогічний результат аналітично отримано в [14] для гаусово-марковського процесу першого порядку, де показано, що ПКЛ для цього процесу є ДСП типу VII для коефіцієнта кореляції ρ, що прямує до нуля, і вперше опубліковано модозалежне ДКП/ДСП. Для покращення intra-прогнозування різниць (лишків) у [19] було вперше введено модозалежне направлене перетворення («mode-dependent directional transform», MDDT), яке є ядром тестової моделі TMuC [20] стандарту відеокодування H.265/HEVC [21]. Це перетворення адаптивно змінюється залежно від моди (режиму), але виникає потреба у додатковій інформації, яка переважно є важливою для малих блоків 4×4 і 8×8. Перетворення MDDT ґрунтується на ПКЛ, яке не є роздільним та є надто вартісним з погляду потрібного обсягу пам'яті та обчислювальної складності.

Якщо X представляє матрицю $N\times N$ блоку пікселів, тоді 2D роздільне направлене перетворення визначається як [19]

$$Y = C_m X R_m,$$

де C_m, R_m — матриці перетворення стовпців і рядків для intra-прогнозування моди m відповідно, Y — матриця $N\times N$ коефіцієнтів 2D перетворення.

У стандарті H.264/AVC [22] $C_m = R_m = T$, де T — матриця цілочислового ДКП. У пропозиціях [23, 24] до стандарту HEVC наведено дві різні однонормові цілочислові апроксимації матричного обчислення ДСП типу VII (ДСП-VII) порядку 8 і 16, а у пропозиції [25] наведено іншу цілочислову апроксимацію матричного обчислення ДСП порядку 8 з різною нормою базисних векторів, що потребує додаткової пам'яті. На сьогодні відсутні літературні джерела, де описано алгоритми швидкого виконання цілочислових синусних перетворень типу VII (ЦСП-VII) порядку 8 і 16. Причина в тому, що матриця ЦСП-VII не має рекурентного представлення, а її структура є складною для факторизації (на основі якої розробляється алгоритм швидкого виконання перетворення). У [5] розглянуто алгоритм 8-точкового швидкого виконання ДСП-VII, який має нерегулярну складну структуру на сім ітерацій і високу обчислювальну складність, що потребує виконання 21 операції множення та 77 операцій додавання.

У цій статті з метою суттєвого скорочення обчислювальних витрат роздільних направлених адаптивних перетворень для intra-прогнозування блоків 8×8 у кодуванні зображень і відео та збільшення ступеня стиснення, що призводить до виграшу у бітрейті, запропоновано метод побудови цілочислового модифікованого синусного перетворення типу VII і показано подальший розвиток алгоритмічного забезпечення швидкого виконання цілочислових косинусного та синусного перетворень.

МЕТОД ПОБУДОВИ ЦІЛОЧИСЛОВОГО МОДИФІКОВАНОГО СИНУСНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ТИПУ VII ПОРЯДКУ 8

Матрицю N-точкового ДСП типу VII (ДСП-VII) можна визначити як [5, 26]

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

У пропозиціях [23, 24] наведено дві різні однонормові цілочислові апроксимації матричного обчислення ДСП-VII порядку 8 і 16. Матриці ДСП-VII порядку 8 $S_8^{\mathrm{VII}}-1$ із [23] і $S_8^{\mathrm{VII}}-2$ із [24] мають такий вигляд:

$$S_8^{\mathrm{VII}}-1 = \begin{bmatrix} 11 & 22 & 33 & 42 & 50 & 56 & 60 & 62 \\ 33 & 56 & 62 & 50 & 22 & -11 & -42 & -60 \\ 50 & 60 & 22 & -33 & -62 & -42 & 11 & 56 \\ 60 & 33 & -42 & -56 & 11 & 62 & 22 & -50 \\ 62 & -11 & -60 & 22 & 56 & -33 & -50 & 42 \\ 56 & -55 & -11 & 60 & -42 & -22 & 62 & -33 \\ 42 & -62 & 50 & -11 & -33 & 60 & -56 & 22 \\ 22 & -42 & 56 & -62 & 60 & -50 & 33 & -11 \end{bmatrix},$$

$$S_8^{\mathrm{VII}} - 2 = \begin{bmatrix} 16 & 32 & 46 & 59 & 70 & 79 & 84 & 87 \\ 46 & 79 & 87 & 70 & 32 & -16 & -59 & -84 \\ 70 & 84 & 32 & -46 & -87 & -59 & 16 & 79 \\ 84 & 46 & -59 & -79 & 16 & 87 & 32 & -70 \\ 87 & -16 & -84 & 32 & 79 & -46 & -70 & 59 \\ 79 & -70 & -16 & 84 & -59 & -32 & 87 & -46 \\ 59 & -87 & 70 & -16 & -46 & 84 & -79 & 32 \\ 32 & -59 & 79 & -87 & 84 & -70 & 46 & -16 \end{bmatrix}.$$

У [5] наведено три способи представлення матриці S_N^{VII} ДСП-VII через уявну частину $2N+1$-точкового дискретного перетворення Фур'є.

Побудуємо матрицю цілочислового модифікованого синусного перетворення типу VII (ЦМСП-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 ДСП типу IV, антисиметричні відносно середини інтервалу. Ці функції називатимемо непарними модифікованими синусними функціями.

Розглянемо матрицю $IMST_8^{\mathrm{VII}^*}$ розміру 8×8 ЦМСП-VII з переставленими рядками на основі обернених досконалих перестановок (ОДП) і простих досконалих перестановок (ПДП) [27]

$$IMST_8^{\mathrm{VII}^*} = \widetilde{P}_8 P_8 IMST_8^{\mathrm{VII}}, \tag{1}$$

де P_8 — матриця 8×8 ОДП, $\widetilde{P}_8$ — блочно-діагональна матриця 8×8, яка містить матрицю 4×4, $\widetilde{P}_4$ ПДП і одиничну матрицю I_4 розміру 4×4, $\widetilde{P}_8 = \mathrm{diag}\,[\widetilde{P}_4, I_4]$:

$$P_8\,(0,7) = (0,2,4,6,1,3,5,7),\ \widetilde{P}_4 = \mathrm{antidiag}\,[I_2, I_2],\ \widetilde{P}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$\widetilde{P}_4$ — антидіагональна матриця 4×4, I_2 — одинична матриця 2×2.

Матрицю $IMST_8^{\mathrm{VII}^*}$ розміру 8×8 ЦМСП-VII з переставленими рядками можна записати через матрицю ядра ЦМСП-VII:

$$IMST_8^{\mathrm{VII}^*} = B_8 MS_8^{\mathrm{VII}^*}, \tag{2}$$

де $MS_8^{\mathrm{VII}^*}$ — матриця 8×8 ядра ЦМСП-VII з переставленими рядками, B_8 — діагональна матриця 8×8 коефіцієнтів нормування.

Матрицю $MS_8^{\mathrm{VII}^*}$ можна побудувати на основі рекурентного методу:

$$MS_8^{\mathrm{VII}^*} = \mathrm{diag}\,[S_4^{\mathrm{VII}^*}, Q_4] H_8^*, \tag{3}$$

де H_8^* — фактор-матриця 8×8 із ненульовими елементами ± 1,

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

I_4, $\bar{I}_4$ — одинична та антидіагональна одинична матриці 4×4; $S_4^{\mathrm{VII}^*}$ — матриця 4×4 ядра ЦСП-VII з переставленими рядками на основі ПДП; $S_4^{\mathrm{VII}^*}=\widetilde{P}_4 S_4^{\mathrm{VII}}$; Q_4 — матриця 4×4, яку можна представити матрицею ядра ЦСП типу IV (ЦСП-IV):

$$Q_4 = S_4^{\mathrm{IV}}\bar{I}_4, \tag{4}$$

де S_4^{IV} — матриця 4×4 ядра ЦСП-IV порядку 4 із цілими елементами $\pm e$, f, $\pm g$, h, i, $\pm j$, k, $\pm l$; S_4^{VII} — матриця ядра ЦСП-VII порядку 4, яка містить цілі елементи $\pm a, b, \pm c$, $\pm d$. При цьому

$$S_4^{\mathrm{VII}}=\begin{bmatrix} a & b & c & d \\ c & c & 0 & -c \\ d & -a & -c & b \\ b & -d & c & -a \end{bmatrix},\ S_4^{\mathrm{IV}}=\begin{bmatrix} e & f & g & h \\ i & j & k & -l \\ l & k & -j & i \\ h & -g & f & -e \end{bmatrix}, \tag{5}$$

де $a<b<c<d$, $a+b=d$, $e<f<g<h$, $k<i<l<j$.

Мають місце співвідношення:

$$\begin{cases} e+h=l, \\ h-e=i; \end{cases} \begin{cases} f+g=j, \\ g-f=k; \end{cases} \quad \begin{cases} e^2+h^2=f^2+g^2=\alpha, \\ i^2+l^2=j^2+k^2=2\alpha. \end{cases}$$

Матриця MS_8^{VII} ядра ЦМСП-VII порядку 8 на основі (3), (4) і (5) має вигляд

$$MS_8^{\mathrm{VII}}=\begin{bmatrix} a & b & c & d & d & c & b & a \\ e & f & g & h & -h & -g & -f & -e \\ c & c & 0 & -c & -c & 0 & c & c \\ i & j & k & -l & l & -k & -j & -i \\ d & -a & -c & b & b & -c & -a & d \\ l & k & -j & i & -i & j & -k & -l \\ b & -d & c & -a & -a & c & -d & b \\ h & -g & f & -e & e & -f & g & -h \end{bmatrix}. \tag{6}$$

Елементи матриці MS_8^{VII} згідно з (6) однонормового масштабованого ЦМСП-1 набувають таких значень: $a=14$, $b=28$, $c=37$, $d=42$, $e=9$, $f=24$, $g=38$, $h=45$, $i=25$, $j=44$, $k=9$, $l=38$.

Матриця $MS_8^{\mathrm{VII}}-1$ запропонованого масштабованого ЦМСП-1 порядку 8 має вигляд

$$MS_8^{\mathrm{VII}}-1=\begin{bmatrix} 14 & 28 & 37 & 42 & 42 & 37 & 28 & 14 \\ 9 & 24 & 38 & 45 & -45 & -38 & -24 & -9 \\ 37 & 37 & 0 & -37 & -37 & 0 & 37 & 37 \\ 25 & 44 & 9 & -38 & 38 & -9 & -44 & -25 \\ 42 & -14 & -37 & 28 & 28 & -37 & -14 & 42 \\ 38 & 9 & -44 & 25 & -25 & 44 & -9 & -38 \\ 28 & -42 & 37 & -14 & -14 & 37 & -42 & 28 \\ 45 & -38 & 24 & -9 & 9 & -24 & 38 & -45 \end{bmatrix}. \tag{7}$$

Базисні вектори матриці $MS_8^{\mathrm{VII}}-1$ 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 набуває значення $\Delta_i = 0{,}24–0{,}73$ %, $i = \overline{0, 7}$, неортогональність становить 0,07–2 %.

У [28] розглянуто інше однонормове масштабоване ЦСП-VII-2 порядку 4 низької обчислювальної складності. Елементи матриці $S_4^{\text{VII}} - 2$ масштабованого ЦСП-VII-2 порядку 4 представлено шістьма бітами, базисні вектори мають однакову L_2-норму, представлену трирозрядним числом, а неортогональність становить 0,5 %. На основі запропонованих масштабованих ЦСП-VII-2 і ЦСП-IV-2 порядку 4 побудовано інше однонормове масштабоване ЦМСП-2 порядку 8. Базисні вектори матриці $MS_8^{\text{VII}} - 2$ запропонованого однонормового масштабованого ЦМСП-2 мають однакову L_2-норму з відхиленням, яке в результаті проведеного аналізу становить $\Delta_i = 0{,}35–2$ %, $i = \overline{0, 7}$, неортогональність становить 0,5%.

АЛГОРИТМ ШВИДКОГО ВИКОНАННЯ 8-ТОЧКОВОГО ПРЯМОГО ЦМСП ПОРЯДКУ 8

Матрицю Q_4 можна записати як добуток двох матриць:

$$Q_4 = H_4^0 T_4, \tag{8}$$

де H_4^0 — блочно-діагональна фактор-матриця 4×4 з елементами 1 і 2×2-матрицею $\overline{H}_2$,

$$H_4^0 = \text{diag}\,[1, \overline{H}_2, 1], \;\; \overline{H}_2 = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}; \tag{9}$$

T_4 — матриця 4×4 з елементами $\pm e$, $\pm f$, $\pm g$, h,

$$T_4 = \begin{bmatrix} h & g & f & e \\ h & -g & -f & e \\ -e & -f & g & h \\ -e & f & -g & h \end{bmatrix}, \;\; Q_4 = \begin{bmatrix} h & g & f & e \\ -l & k & j & i \\ -i & -j & k & l \\ -e & f & -g & h \end{bmatrix}. \tag{10}$$

Матрицю T_4 можна представити як добуток двох матриць:

$$T_4 = H_4 R_4, \;\; H_4 = \text{diag}\,[H_2, \widetilde{H}_2],$$
$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \;\; \widetilde{H}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \tag{11}$$

де H_4 — блочно-діагональна фактор-матриця 4×4, яка містить матриці 2×2 Адамара H_2 і $\widetilde{H}_2$; R_4 — фактор-матриця розтягування 4×4, яка містить на основній діагоналі цілі елементи h, g, а на іншій діагоналі — цілі елементи $\pm e$, $\pm f$. При цьому

$$H_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & & \\ 1 & -1 & & \\ & & 1 & 1 \\ & & -1 & 1 \end{bmatrix}, \;\; R_4 = \begin{bmatrix} h & & & e \\ & g & f & \\ & -f & g & \\ -e & & & h \end{bmatrix}. \tag{12}$$

Тоді матрицю Q_4 на основі (8) і (11) можна записати як добуток трьох матриць:

$$Q_4 = H_4^0 H_4 R_4. \tag{13}$$

Для однонормового ЦМСП матриця H_4^0 містить ненульові елементи 1 і $\pm P / 2^m$.

АЛГОРИТМ ШВИДКОГО ВИКОНАННЯ 4-ТОЧКОВОГО ПРЯМОГО ЦСП-VII ПОРЯДКУ 4

Розглянемо матрицю $S_4^{\text{VII}\otimes}$ розміру 4×4 ядра ЦСП з переставленими рядками і стовпцями, отриману з матриці $S_4^{\text{VII}*}$ з переставленими рядками з використанням ПДП шляхом перестановки стовпців на основі двійково-інверсних перестановок (ДІП) [27]:

$$S_4^{\mathrm{VII}\otimes} = S_4^{\mathrm{VII}^*} P_4,$$

де P_4 — матриця 4×4 ДІП, $P_4 = \mathrm{diag}\,[1, \bar{I}_2, 1]$, $\bar{I}_2$ — антидіагональна одинична матриця 2×2, $\bar{I}_2 = \begin{bmatrix} & 1 \\ 1 & \end{bmatrix}$.

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

$$S_{3,4}^{VII\otimes} = S_2 S_1, \tag{14}$$

де S_1, S_2 — фактор-матриці розміру 4×4 і 3×4 алгоритму, запропонованого у роботі [29], швидкого виконання 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 з ненульовими цілими елементами $\pm a$, b, $\pm c$ і d; $S_{1,4}$ — вектор-рядок розмірності 4 з ненульовими цілими елементами $\pm c$:

$$S_{1,4} = (c, 0, c, -c). \tag{15}$$

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

$$T_{3,4} = M_{3,4} \widetilde{R}_4, \tag{16}$$

де $\widetilde{R}_4$ — діагональна матриця 4×4 з елементами a, b, c, d,

$$\widetilde{R}_4 = \mathrm{diag}\,[d, c, a, b], \tag{17}$$

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

Матрицю $MS_8^{\mathrm{VII}*}$ згідно з (3), (13) та з урахуванням алгоритму швидкого виконання 4-точкового прямого ЦСП-VII (14)–(17) можна представити як добуток чотирьох фактор-матриць:

$$MS_8^{\mathrm{VII}*} = S_{8,4} S_{8,3} S_{8,2} S_{8,1}, \tag{18}$$

де $S_{8,k}$ — k-і, $k = \overline{1,4}$, фактор-матриці 8×8 запропонованого алгоритму швидкого виконання 8-точкового прямого ЦМСП:

$$S_{8,1} = H_8^*,\ S_{8,2} = \mathrm{diag}\,[T_4, R_4], \tag{19}$$

$$S_{8,3} = \mathrm{diag}\,[\widetilde{R}_4, H_4],\ S_{8,4} = \mathrm{diag}\,[M_4, H_4^0],\ M_4 = \begin{bmatrix} M_{3,4} \\ \hline S_{1,4} \end{bmatrix}.$$

Тут M_4 — блочна матриця 4×4, при цьому її верхня частина представляє фактор-матрицю $M_{3,4}$, а нижня частина — вектор-рядок $S_{1,4}$ (15).

АЛГОРИТМ ШВИДКОГО ВИКОНАННЯ 8-ТОЧКОВОГО ОБЕРНЕНОГО ЦМСП

Матрицю $(MS_8^{\mathrm{VII}})^{-1}$ ядра оберненого ЦМСП порядку 8 можна отримати шляхом транспонування:

$$(MS_8^{\mathrm{VII}})^{-1} = MS_8^{\mathrm{VII}^*\mathrm{T}} / k, \tag{20}$$

де $k = 2^m$, m — ціле.

Матрицю $(MS_8^{\text{VII}})^{-1}$ на основі (20), (18), (19) і з урахуванням симетричності фактор-матриць ($H_8^{*\text{T}} = H_8^*$, $R_4^{\text{T}} = R_4$, $H_4^{0\text{T}} = H_4^0$) можна представити як добуток чотирьох обернених фактор-матриць:

$$(MS_8^{\text{VII}})^{-1} = S_{8,1} S_{8,2}^{-1} S_{8,3}^{\text{T}} S_{8,4}^{-1}, \tag{21}$$

де $S_{8,k}^{-1}$ — k-і, $k = \overline{1,4}$, обернені фактор-матриці 8×8 алгоритму запропонованого швидкого виконання 8-точкового оберненого ЦМСП:

$$S_{8,1} = H_8^*,\ S_{8,2}^{-1} = \operatorname{diag}[M_4^{-1}, \overline{R}_4^{\text{T}}], \tag{22}$$

$$S_{8,3}^{\text{T}} = \operatorname{diag}[\overline{\widetilde{R}}_4, H_4^{\text{T}}],\ S_{8,4}^{-1} = \operatorname{diag}[T_4^{-1}, H_4^0],\ M_4^{-1} = \begin{bmatrix} M_{3,4}^{-1} \\ \hline \overline{S}_{1,4}^{-1} \end{bmatrix},\ \overline{R}_4^{\text{T}} = R_4^{\text{T}} / k,$$

$$\overline{\widetilde{R}}_4 = \widetilde{R}_4 / k,\ \overline{S}_{1,4}^{-1} = (-c, c, c, 0)/k),\ \overline{\widetilde{R}}_4 = \operatorname{diag}[d, c, a, b]/k,\ \overline{R}_4^{\text{T}} = \begin{bmatrix} h & & & -e \\ & g & -f & \\ & f & g & \\ e & & & h \end{bmatrix} / k.$$

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

РЕАЛІЗАЦІЯ ШВИДКОГО ВИКОНАННЯ ЦІЛОЧИСЛОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ БЕЗ МНОЖНИКІВ

Під час реалізації швидкого виконання цілочислових перетворень використовуються операції «метелик» (butterfly), де виконуються парні множення, які можуть бути реалізовані за допомогою операцій тільки зсуву і додавання, але в деяких випадках (з метою зменшення обчислювальної складності) і за допомогою операції множення.

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

Таблиця 1

Множники операцій «метелик» матриці $\overline{R}_4^{\text{T}}$ і елементів матриці $\overline{\widetilde{R}}_4$		**Алгоритм виконання операцій $y = h * x$; $z = e * x$**	**Кількість операцій для реалізації «метелик»**			**Кількість використаних операцій**
			Додавання	Зсув	Множення	
$h = 45/32$	$e = 9/32$	$x_1 = x + (x \gg 3)$; $z = x_1 \gg 2$; $y = x_1 + z$	2	2	—	2
$g = 38/32$	$f = 24/32$	$z = x - (x \gg 2)$; $y = x + (z \gg 2)$	2	2	—	2
$d = 42/32$	0	$x_1 = 42 * x$; $y = x_1 \gg 5$; $z = 0$	—	1	1	1
$c = 37/32$	0	$x_1 = 37 * x$; $y = x_1 \gg 5$; $z = 0$	—	1	1	2
$a = 14/32$	0	$x_1 = x - (x \gg 3)$; $y = x_1 \gg 1$; $z = 0$	1	2	—	1
$b = 28/32$	0	$y = x - (x \gg 3)$; $z = 0$	1	1	—	1
$P/2^m$	0	$x_1 = P * x$; $y = x_1 \gg m$; $z = 0$	—	1	1	2
Усього		—	10	16	5	—

Т а б л и ц я 2

Операції	Оцінка обчислювальної складності 1D 8-точкових обернених перетворень				Порівняльний аналіз ЦМСП-1 відносно	
	Запропонованих ЦМСП		Відомих ЦСП-VII, ДСП-VII			
	Повна факторизація		Матричне множення	Повна факторизація	[23–25]	[5]
	ЦМСП-1	ЦМСП-2	із [23–25]	із [5]		
Множення	5	2	64	21	У 12,8 раза менше	У 4,2 раза менше
Додавання + зсув	39+ 16	37 + 11	56	77	На одне додавання менше	На 28,6% менше додавань
Загальне зменшення					У 12,8 раза менше	У 4,5 раза менше

Т а б л и ц я 3

Операції	Оцінка обчислювальної складності 2D роздільних направлених обернених перетворень для блоків 8×8			Порівняльний аналіз ЦМСП-1 (ЦМСП-2) відносно	
	Запропонованих ЦКП+ЦМСП-1 (ЦМСП-2)	Відомих ЦКП+ДСП-VII (ЦСП-VII)			
		H.265[31]+[24]	із [32]+[5]	H.265[31]+[24]	[32]+[5]
Множення	56 (32)	688	264	У 12,3 (у 21,5) раза менше	У 4,7 (у 8,25) раза менше
Додавання +зсув	632+256 (616+216)	672+64	24	На 20,7 (на 13) % більше додавань	На 7,77 (на 0,97) % більше додавань
Необхідність пам'яті	—	—	+	—	—
Загальне зменшення				У 12,1 (в 21,4) раза менше	У 4,62 (у 8,24) раза менше

Обчислювальну складність двох запропонованих алгоритмів 1D 8-точкових обернених ЦМСП-1,2 і відомих [5, 23–25] алгоритмів обчислення ДСП-VII, ЦСП-VII наведено у табл. 2. Запропонований алгоритм 2 швидкого виконання прямого і оберненого ЦМСП-2 порівняно з відомими алгоритмами [23–25] ЦСП-VII на основі матричного множення потребує у 32 раза менше операцій множення і на 14,3 % менше операцій додавання, а порівняно з відомим алгоритмом [5] ДСП-VII потребує в 10,5 раза менше операцій множення і на 37,7 % менше операцій додавання, тобто має в 10,9 раза меншу обчислювальну складність. Розроблені алгоритми 1 і 2 порівняно з відомим алгоритмом [5] із складною структурою на сім ітерацій мають просту регулярну структуру на чотири ітерації, що на три ітерації менше.

Для реалізації алгоритму [30] швидкого виконання 1D 8-точкового оберненого цілочислового косинусного перетворення потрібно дві операції множення, 40 операцій додавання і 16 операцій зсуву.

Обчислювальну складність двох запропонованих роздільних направлених ЦКП + ЦМСП-1(ЦМСП-2), відомих ЦКП (H.265) [31] + ЦСП-VII [23–25] і ЦКП [32] + ДСП-VII [5] 2D 8-точкових обернених цілочислових перетворень наведено у табл. 3.

РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАННЯ НА 2D МОДЕЛІ

Результати тестування за характеристикою 2D G_{2TC} [29, 33] для кореляційної моделі 2D ізотропного марковського процесу з кореляційною функцією $R(m, n) = \rho^{\sqrt{m^2+n^2}}$ з нульовим математичним сподіванням і одиничною дисперсією за середніх значень коефіцієнтів кореляції ρ'_v, $\rho'_h = 0{,}45$–$0{,}8$ у випадку блоків 8×8 [15, 33] для відомих перетворень ЦСП-VII [23, 24] і запропонованих ЦМСП-1, ЦМСП-2 наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Перетворення для блоків 8×8	Оцінка ефективності кодування за характеристикою 2D G_{2TC} (дБ) для коефіцієнтів кореляції ρ_v, ρ_h = 0,45–0,8							
	2D ізотропний марковський процес							
	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
ЦСП-VII [23]	6,718	7,378	8,174	9,214	9,834	11,016	11,673	12,502
ЦСП-VII [24]	6,396	6,946	7,544	8,197	8,919	9,728	10,660	11,780
Запропоноване ЦМСП-1	5,572	5,938	6,381	6,933	7,667	9,053	9,009	10,044
Запропоноване ЦМСП-2	4,950	5,294	5,700	6,194	6,790	7,545	8,791	9,573

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Вихідні зображення класів B і C для тестування наведено в [29]. У табл. 5 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 (параметру квантування) запропонованого 2D направленого адаптивного ЦКП/ЦМСП-1 для блоків 8×8. Ці результати представляють різницю на основі запропонованого і на основі відомих роздільних направлених ЦКП(H.265) [31]/ЦСП-VII [24], а результати для запропонованого ЦКП/ЦМСП-2 наведено у табл. 6. Експериментальні результати кодування за коефіцієнтом стиснення K:1 для запропонованого 2D роздільного ЦКП/ЦМСП-1 для блоків 8×8 наведено у табл. 7, а для запропонованого ЦКП/ЦМСП-2 — у табл. 8. Результати ефективності кодування за коефіцієнтом стиснення K (у %), які представляють різницю на основі запропонованого ЦКП/ЦМСП-1 і на основі відомих ЦКП(H.265)/ЦСП-VII, наведено у табл. 9, а результати на основі запропонованого ЦКП/ЦМСП-2 — у табл. 10.

У табл. 5–10 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 середньокорельовані зображення. Під час тестування використовувалося роздільне направлене перетворення ЦКП/ЦСП без intra-прогнозування, де ЦКП застосовувалося для перетворення стовпців, а ЦСП — для перетворення рядків з метою порівняння за двома характеристиками ефективності кодування (за якістю і ступенем стиснення) запропонованих синусних перетворень з відомими.

Запропоноване цілочислове модифіковане синусне 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 на 0,032–0,483 дБ, а для QP = 32 — знижує на 0,087 дБ. При цьому середнє значення коефіцієнта стиснення K збільшується на 1,043 % і 1,998 % для QP = 32 і 37 відповідно і зменшується на 1,4 % і 0,114 % для QP = 22 і 27 відповідно.

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)	0,795	0,242	0,112	0,498
	Місто (НК)	0,387	−0,154	−0,343	−0,295
C 1280×768	Гори (СК)	0,470	−0,127	−0,162	−0,002
	Пейзаж (НК)	0,282	0,168	0,047	−0,001
Середнє значення		0,483	0,032	−0,087	0,050

Таблиця 6

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)	−1,754	−0,944	−0,368	0,405
	Місто (НК)	−1,052	−0,668	−0,436	−0,252
C 1280×768	Гори (СК)	−1,114	−0,689	−0,299	0,01
	Пейзаж (НК)	−0,875	−0,28	−0,114	−0,021
Середнє значення		−1,119	−0,645	−0,304	0,035

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)	3,08	3,94	5,38	7,74
	Місто (НК)	2,26	2,71	3,47	4,91
C 1280×768	Гори (СК)	2,22	2,74	3,55	5,46
	Пейзаж (НК)	1,58	1,90	2,54	4,05
Середнє значення		2,29	2,82	3,74	5,54

Таблиця 8

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)	3,23	4,18	5,87	8,78
	Місто (НК)	2,39	2,87	3,66	5,23
C 1280×768	Гори (СК)	2,33	2,87	3,73	5,93
	Пейзаж (НК)	1,60	1,92	2,62	4,28
Середнє значення		2,39	2,96	3,97	6,06

Запропоноване цілочислове модифіковане синусне перетворення 2 типу VII порядку 8 порівняно з відомим синусним перетворенням за характеристикою PSNR для чотирьох тестових зображень класів B і C знижує середнє значення на 1,199–0,304 дБ для QP = 22–32 і підвищує на 0,035 дБ для високого QP = 37. При цьому середнє значення коефіцієнта стиснення K збільшується на 0,259–3,395 %.

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)	0,529	1,987	2,763	3,227
	Місто (НК)	−3,591	−2,352	−0,395	1,317
C 1280×768	Гори (СК)	−2,719	−0,601	1,543	2,567
	Пейзаж (НК)	0,182	0,509	0,259	0,882
Середнє значення		−1,400	−0,114	1,043	1,998

Таблиця 10

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)	2,021	3,413	4,294	4,765
	Місто (НК)	−1,151	−0,393	1,138	2,586
C 1280×768	Гори (СК)	−0,720	1,034	2,926	4,020
	Пейзаж (НК)	0,885	1,232	1,386	2,209
Середнє значення		0,259	1,322	2,436	3,395

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 0,483 дБ або зниження PSNR на 0,087 дБ для запропонованого модифікованого синусного перетворення 1 буде візуально непомітним, тобто зберігається візуальна якість зображення. Для запропонованого модифікованого синусного перетворення 2 зниження середніх значень PSNR на 1,199 і 0,645 дБ для малих значень 22 і 27 нормального діапазону QP буде візуально помітним, а для значень QP ≥ 32 зниження середнього значення PSNR на 0,304 дБ або його підвищення на 0,035 дБ буде візуально непомітним, тобто зберігається візуальна якість зображення.

ВИСНОВКИ

Запропоновано матричний метод побудови цілочислового модифікованого синусного перетворення типу VII порядку 8. На основі запропонованого методу побудовано два цілочислові модифіковані синусні перетворення типу VII порядку 8 і розроблено алгоритми швидкого виконання цілочислових перетворень, які порівняно з відомим алгоритмом мають у 4,5 і 10,9 рази меншу обчислювальну складність та потребують виконання тільки цілочислових операцій. 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 перетвореннями. Розроблено алгоритми швидкого виконання 2D 8-точкових роздільних направлених цілочислових косинусного і модифікованих синусних адаптивних перетворень низької обчислювальної складності, яка в 10,4 і 18,5 рази менша порівняно з відомими алгоритмами. Перетворення мають більш високі характеристики ефективності кодування: підвищення середнього значення для чотирьох тестових зображень класів B і C за характеристикою спотворень PSNR для запропонованого модифікованого синусного перетворення 1 становить 0,032–0,483 дБ, а зниження середнього значення PSNR становить 0,087 дБ, що згідно із суб'єктивним порогом PSNR = 0,5 дБ буде візуально непомітним, тобто зберігається візуальна якість зображення. При цьому середнє значення коефіцієнта стиснення для малих значень 22 і 27 нормального діапазону QP зменшується на 1,4 і 0,114 %, а для значень QP ≥ 32 середнє значення коефіцієнта стиснення *K* збільшується на 1,043 і 1,998 %. Для запропонованого модифікованого синусного перетворення 2 зниження середніх значень PSNR становить 0,304–1,199 дБ, а підвищення середнього значення PSNR становить 0,035 дБ для великого значення QP = 37. Зниження середніх значень PSNR на 1,199 і 0,645 дБ для малих значень QP = 22 і 27 буде візуально помітним, а для значень QP ≥ 32 зниження середнього значення PSNR на 0,304 дБ або його підвищення на 0,035 дБ буде візуально не відчутним, тобто зберігається візуальна якість зображення. При цьому середнє значення коефіцієнта стиснення *K* збільшується на 0,259–3,395 %.

Отже, розроблені роздільні направлені адаптивні цілочислові перетворення на основі швидкого виконання 8-точкових цілочислових косинусного і модифікованих синусних перетворень 1 і 2 типу VII можуть бути використані для покращення стандарту H.265 з метою збільшення швидкодії, ступеня стиснення (що призводить до покращення бітрейту), зменшення обчислювальних та енергетичних витрат.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Jain A.K. A sinusoidal family of unitary transforms. *IEEE Trans. Patt. Anal. and Mach. Intell.* 1979. Vol. 1, N 4. P. 356–365.
2. Wang Z., Hunt B.R. The discrete W transform. *Appl. Math. and Comput.* 1985. Vol. 16, Iss. 1. P. 19–48.
3. Wang Z. Fast algorithms for the discrete W transform and for the discrete Fourier transform. *IEEE Trans. Acoust., Speeh, Signal Process*. 1984. Vol. 32, N 8. P. 803–816.
4. Britanak V., Rao K.R., Yip P. Discrete cosine and sine transforms: general properties, fast algorithms and integer approximations. Oxford: Academic Press Elsevier, 2007. 368 p.
5. Chivukula R.K., Reznik Y.A. Fast computing of discrete cosine and sine transforms of types VI and VII. *Proc. SPIE Appl. Digital Image Processing XXXIV Conf.* (22–24 August 2011, San Diego, California, USA). San Diego, 2011. Vol. 8135. P 813505–813509.
6. Clarke R.J. Transform coding of images. London: Academic Press,1985. 429 p.
7. Clarke R.J. Performance of Karhunen–Loeve and discrete cosine transform for data having widely varying values of intersample correlation coefficient. *Electron*. *Lett.* 1983. Vol. 19, Iss. 7. P. 251–253.
8. 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.
9. Clarke R.J. Application of sine transform in image processing. *Electron. Lett.* 1983. Vol. 19, Iss. 13. P. 490–491.
10. Jain A.K., Famelle P.M., Algazi V.R. Image data compression. In: *Digital Image Processing Technigues*. Ekstrom M.P. (Ed.). New York: Academic Press, 1984. P. 188–226.
11. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. Москва: Техносфера, 2004. 368 с.
12. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Москва: Техносфера, 2005. 1072 с.
13. Джаин А.К. Сжатие видеоданных: Обзор ТИИЭР. 1981. Т. 69, № 3. С. 71–117.
14. 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.

15. Гнатів Л.О. Метод побудови швидких цілочисельних синусних перетворень для кодування зображень та intra-прогнозування у відеокодуванні. *Тези доп. міжн. наук. конф. «Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку»* (12–13 вересня, Україна, Київ). Київ, 2013. С. 261–263.
16. Clarke R.J. Relation between the Karhunen–Loeve and cosine transforms. *IEEE Proc. F (Commun., Radar & Signal Process).* 1981. Vol. 128, Pt F, N 6. P. 359–360.
17. Clarke R.J. Relation between the Karhunen–Loeve and sine transforms. *Electron. Lett.* 1984. Vol. 20, Iss. 1. P. 12–13.
18. Jain A.K. Image coding via nearest neighbors image model. *IEEE Trans. on Commun*. 1975. Vol. 23, N 3. P. 318–321.
19. Ye Y., Karczewicz M. Improved intra coding. ITU-T Q.6/SG16 VCEG, VCEG-AG11. Shenzhen, China, 2007.
20. 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.
21. 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.
22. ITU-T Rec. H.264|ISO/IEC 14496-10: 2009. Information technology — Coding of audio-visual objects — Part 10: Advanced Video Coding, 2009.
23. Yeo C., Tan Y.H., Li Z., Rahardia S. Mode-dependent fast separable KLT for block based intra coding. Doc. JCTVC-B024, Geneva, CH, July 2010.
24. An J., Zhao X., Guo X., Lei S. Non-CE 7: Boundary-dependent transform for inter-predicted residue. ITU-T, doc. JCTVC-G281, Geneva, CH, Nov 2011.
25. Saxena A., Fernandes F. CE 7: Mode-dependent DCT/DST without 4×4 full matrix multiplication for intra prediction. ITU-T, doc. JCTVC-E125, Geneva, Switzerland, Mar 2011.
26. Yueh W.C. Eigenvalues of several tridiagonal matrices. *Appl. Mathematics E-Notes*. 2005. Vol. 5. P. 66–74.
27. 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. 375 с.
28. Гнатів Л.О., Луц В.К. Метод побудови моде-залежного швидкого роздільного цілочисельного ПКЛ для адаптивного кодування зображень і відео. *Пр. міжн. конф. «Питання оптимізації обчислень (ПОО-2013)»* (вересень 2013, Україна, Крим, Велика Ялта, смт. Кацивелі). Кацивелі, 2013. С. 68–69.
29. 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.
30. Гнатив Л.А. Целочисленные косинусные преобразования для высокоэффективного кодирования изображений и видео. *Кибернетика и системный анализ*. 2016. Т. 52, № 5. С. 161–176
31. Fuldseth A., Bjøntegaard G., Sadafale M., Sze V. CE10: Core transform design for HEVC. ITU-T, doc. JCTVC-G495. Geneva, CH, Nov. 2011.
32. 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.
33. Гнатив Л.А. Целочисленные косинусные преобразования: методы построения новых быстрых преобразований порядка 8, 16 и их применение. *Кибернетика и системный анализ*. 2014. Т. 50, № 6. С. 104–121.

Надійшла до редакції 07.06.2019

Л.А. Гнатив

ЦЕЛОЧИСЛЕННЫЕ МОДИФИЦИРОВАННЫЕ СИНУСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ. МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ И РАЗДЕЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ АДАПТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ INTRA-ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В КОДИРОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ/ВИДЕО

Аннотация. Предложен матричный метод построения целочисленного модифицированного синусного преобразования типа VII порядка 8, на основе которого построены два целочисленных преобразования и разработаны алгоритмы быстрого выполнения 8-точечных целочисленных модифицированных синусных преобразований типа VII, требующие выполнения только целочисленных операций. Алгоритмы имеют низкую вычислительную сложность, которая в 4,5 и 10,9 раз меньше по сравнению с известным алгоритмом. Преобразования имеют более высокие характеристики эффективности кодирования по качеству степени сжатия, чем известные синусные преобразования. Разработаны алгоритмы быстрого выполнения 2D 8-точечных раздельных направленных целочисленных косинусного и модифицированных синусных адаптивных преобразований для intra-прогнозирования низкой вычислительной сложности, которая в 4,62 и 8,24 раз меньше по сравнению с известными алгоритмами.

Ключевые слова: дискретное косинусное преобразование, дискретное синусное преобразование, целочисленное косинусное преобразование, целочисленное синусное преобразование, целочисленное модифицированное синусное преобразование, раздельное направленное адаптивное преобразование, модозависимое направленное преобразование, быстрое выполнение преобразования, масштабированное преобразование, intra-прогнозирование, видеокодирование, H.265.

L.O. Hnativ

INTEGER MODIFIED SINE TRANSFORMS. A CONSTRUCTION METHOD AND SEPARABLE DIRECTIONAL ADAPTIVE TRANSFORMS FOR INTRA PREDICTION IN IMAGE/VIDEO CODING

Abstract. The author proposes a matrix method for constructing a modified order-8 integer sine transform type VII. Based on the method, two modified order-8 integer sine transforms type VII are constructed and algorithms for fast implementation at 8-point modified integer sine transforms type VII are developed, which require only integer operations. These algorithms are of low computational complexity and their computational complexity is 4.5 and 10.9 times less than for the well-known algorithm. These transforms have higher coding performance for quality and compression ratio than the well-known sine transforms. Algorithms for fast implementation of 2D 8-point separable directional integer cosine and modified sine adaptive transforms for intra prediction with low computational complexity are developed, and their computational complexity is 4.62 and 8.24 times less than that in the well-known algorithms.

Keywords: discrete cosine transform, discrete sine transform, integer cosine transform, integer sine transform, modified integer sine transform, separable directional adaptive transform, mode-depended directional transform, fast implementation transform, scaled transform, intra prediction, video coding, 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.