

УДК 621.327:681.5

ТЕХНОЛОГІЯ КОМПРЕСІЇ ДЛЯ СКОРОЧЕННЯ ОБСЯГУ ТРАНСФОРМАНТ НА ОСНОВІ КОДУВАННЯ ЇХ БІНАРНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ

О. К. Юдін, д-р техн. наук, проф.; Ю. П. Бойко

Національний авіаційний університет

kszi@ukr.net

Показано необхідність подальшого вдосконалення технологій стиснення трансформованих зображень на базі платформи JPEG. Викладено розробку методу компресії зображень із попереднім квантуванням компонент трансформант дискретного косинусного перетворення, що враховує умови вбудовування адаптивного одноосновного позиційного кодування, і забезпечує підвищення ступеня стиснення, виключення неконтрольованих втрат якості відновлюваних зображень; зниження часу обробки як на етапах попередньої обробки так і на етапах кодування для скорочення надмірності.

Ключові слова: стиснення трансформованих зображень; одноосновне кодування.

The necessity of further improving the compression technology transformed images based platform JPEG. Set out to develop a method of image compression with advanced quantization component transforms the discrete cosine transform, taking into account the conditions of the adaptive embedding monobasic positional coding and provides enhanced compression ratio exception uncontrolled loss of quality the reconstructed image, reduction of processing time as a pre-processing step, so and encoding step for reducing the redundancy.

Keywords: compression of transformed images; monobasic coding.

Вступ

Актуальним для розвитку інформаційних технологій, у тому числі і технологій обробки даних, є підвищення якості надання сервісних послуг [1].

Проблемність виникає у разі надання відеоінформаційних послуг. Для цього в телекомунікаційні системи інтегруються технології компресії зображень [2; 3].

Найбільш потрібними нині є технології, що використовують JPEG платформу [2–5].

Однак сучасних характеристик, які забезпечуються існуючими методами, недостатньо для надання якісних відеоінформаційних послуг [3–6]. Це означає, що зниження обсягів високоякісних відеозображень в умовах збереження необхідного рівня їх візуального сприйняття є актуальною науково-прикладною тематикою досліджень.

Актуальний варіант розвитку технологій стиснення полягає в модифікації методів кодування бітових площин.

Такий підхід розглядається в роботах [7–9]. Показано, що перспективним напрямом є кодування бітового опису трансформанти (БОТ) з попереднім виявленням серій двійкових елементів (СДЕ). Подальше кодування масивів СДЕ організовується на основі адаптивного одноосновного позиційного (АОП) кодування [5; 6].

Мета статті — розробити умови інтеграції створеного кодека в технологію компресії трансформованих зображень в умовах виключення неконтрольованих втрат інформації і скорочення витрат на службові дані.

Основний матеріал

У процесі розробки методів стиснення зображень для скорочення їх обсягу в умовах обмежених втрат якості візуалізації потрібно забезпечити:

– виключення неконтрольованих втрат якості реконструйованих зображень, зумовлених як процесами скорочення психовізуальної надмірності, так і недостатнім вибором службових даних для опису структурних компонент на етапах перетворення даних;

– зменшення часу обробки, включаючи процеси прямого і зворотного перетворень на етапах попередньої обробки та кодування для скорочення просторової надмірності.

Створення умов для скорочення психовізуальної надмірності відбувається на попередньому етапі технології компресії зображень. Даний етап забезпечує отримання перетвореної форми зображень, яка враховує такі особливості сприйняття візуальної інформації зором людини (особою, що приймає рішення):

а) велика чутливість до характеристик яскравості зображення, і менша сприйнятливості до кольорних складових;

б) підвищена чутливість до об'єктів низькочастотного характеру, і навпаки знижена реакція на спотворення об'єктів високочастотного спектрального діапазону.

Для підкреслення першої особливості вихідні триколірові зображення перетворюються в кольороворізницеве уявлення. На виході формуються три компоненти, але одна з них є яскравістю і має найбільше значення для сприйняття, а дві інші є монохромними доповненнями. Почат-

кове зображення з RGB опису переводиться в колірний простір YUV , у результаті чого утворюються три компоненти з однаковими розмірами по горизонталі і вертикалі (M — кількість рядків у зображенні; N — кількість стовпців у зображенні) [4–6]:

– складова яскравості $Y = \{y_{ij}\}$, для цього потрібно конвертувати $y_{ij} = \left[(r_{ij} + 2g_{ij} + b_{ij}) / 4 \right]$. Тут r_{ij} , g_{ij} , b_{ij} — елементи, розташовані на $(i; j)$ -й позиції відповідно до колірної площини R , G і B ;

– монохромна складова червоного кольору $U = \{u_{ij}\}$, де $u_{ij} = r_{ij} - g_{ij}$;

– монохромна складова синього кольору $V = \{v_{ij}\}$, для чого використовується формула $v_{ij} = b_{ij} - g_{ij}$.

Друга передумова для зменшення психовізуальної надмірності з'являється в результаті виконання блочного двовимірного дискретного косинусного перетворення. Завдяки властивості роздільності ядра базисної функції дискретне косинусне перетворення виконується в два етапи. На першому етапі здійснюється одновимірне ДКП для стовпців масиву вихідного зображення. В результаті чого утворюється масив $Z'(\xi, \chi)$ одновимірних трансформант ДКП, тобто $Z'(\xi, \chi) = F(\xi) X(i, j)_{\xi, \chi}$. Тут $X(i, j)_{\xi, \chi}$ — масив відеоданих вихідного зображення; ξ , χ — відповідно індекс рядка і стовпця елемента масиву $X(i, j)_{\xi, \chi}$, $\xi = \overline{1, m}$; $\chi = \overline{1, n}$.

Розписавши компоненту $F(\xi)$, отримаємо

$$Z'(1, \chi) = \frac{1}{\sqrt{m}} \sum_{\xi=1}^m X_{\xi, \chi}^{(i, j)};$$

$$Z'(\xi, \chi) = \sqrt{\frac{2}{m}} \sum_{\xi=1}^m X_{\xi, \chi}^{(i, j)} \cos \frac{(2m+1)\xi\pi}{2m},$$

$$\xi = \overline{2, m},$$

де $X_{\xi, \chi}^{(i, j)}$ — елемент масиву $X(i, j)$, розташований на перетині ξ -го рядка і χ -го стовпця масиву вихідного зображення; $m \times n$ — розмірність масиву.

На другому етапі виконується одновимірне ДКП для рядків масиву $Z'(\xi, \chi)$. У результаті чого формується трансформанта $Z''(\xi, \chi)$ двовимірного ДКП, тобто $Z''(\xi, \chi) = Z'(\xi, \chi) F(\chi)^{(-1)}$, де $F(\chi)^{(-1)}$ — транспонований вектор дискретних значень базисних функцій ДКП.

У результаті застосування до масиву зображення розміром 8×8 пікселів дискретного коси-

нусного перетворення отримаємо двовимірний спектр, який має також розмір 8×8 . Іншими словами, 64 числа, що представляють відліки зображення, перетворюються на 64 числа, що представляють відліки його ДКП — спектра. Для 8×8 ДКП система базисних функцій задається формулою $F(\xi; \chi) = \cos \left[\frac{(2\xi+1)u\pi}{16} \right] \cos \left[\frac{(2\chi+1)v\pi}{16} \right]$.

Виконання дискретного косинусного перетворення дозволяє досягти перетрансформування енергії вихідного сигналу і отримати області, що несуть меншу кількість інформаційного навантаження про вихідні зображення з позиції їх візуального сприйняття зоровою системою. Цей факт дозволяє усунути психовізуальну надмірність.

Для цього використовується етап реалізації нерівномірного бітового розподілу по компонентах трансформанти на основі зигзагоподібної квантизації. Дана технологія полягає в скалярному квантуванні компонент трансформант яка задається формулою:

$$z_{\xi, \chi} = \left[\left(z_{\xi, \chi}'' + \frac{1}{2} \right) / q_{\xi, \chi} \right], \quad (1)$$

де $z_{\xi, \chi}$ — квантовані значення компоненти трансформанти, після округлення в більшу сторону.

Тут $q_{\xi, \chi}$ — компонента матриці квантизації, значення якої знаходиться як $q_{\xi, \chi} = 1 + ((1 + (\xi - 1) + (\chi - 1))f)$, де f — значення фактора якості.

При цьому для обліку навантаження кожної складової кольороворізницевої моделі, для кожної з компонент Y , U , V вибирається свій фактор якості f . У результаті квантизації компонент трансформанти здійснюється зниження їх динамічного діапазону, аж до нульового значення. При цьому найбільше зниження динамічного діапазону досягається для високочастотних компонент трансформанти. Тим самим здійснюється скорочення психовізуальної надмірності.

З позиції бінарного опису компонент трансформант проявляються такі властивості розподілу областей нульових елементів за допомогою бінарного подання: розміщення і довжина нульових зон для компоненти залежить від її позиції в трансформанті. Для компонент відповідних низькочастотним складовим — нульові області розміщуються в середині і в кінці двійкового подання. Для високочастотних компонент характерне розміщення областей елементів з нульовими значеннями на початку двійкового подання. Причому кількість нулів у старших розрядах істотно перевищує кількість одиничних елементів. Отже, для бінарних площин, при утворенні на

основі молодших розрядів компонент, буде характерна висока частота зміни нульових і одиничних бітів.

Для того щоб скоротити найбільшу кількість просторової надмірності в бінарному описі трансформанти, необхідно забезпечити можливість для утворення областей двійкових елементів, що містять найбільшу кількість нулів. У зв'язку з цим, пропонується враховувати особливості контексту бінарних площин, утворених для відповідних зрізів двійкового представлення компонент трансформанти. Обробка для виявлення розмірів двійкових областей у цьому випадку буде проводитися для окремих бітових площин. Напрямок обходу площин для зниження часу візуалізації на засобах відображення пропонується вибирати, починаючи зі старших розрядів компонент трансформанти. Бітова площина $W(h) = \{w(h)_{\ell,\gamma}\}$ будується на основі двійкових елементів відповідних h -му розряду компоненти трансформанти. Розміри площин дорівнюють розмірам трансформанти, тобто $\ell = \overline{1, m}$, $\gamma = \overline{1, n}$.

Отримання двійкового подання для кожної компоненти $z_{\xi,\chi}$ трансформанти здійснюється за формулою, що дозволяє перевести десяткове число в двійкову форму, починаючи зі старших розрядів, і враховуючи, що старші розряди компонент мають вищий порядковий індекс h , $d-1 \geq h \geq 0$, тобто

$$w(h)_{\xi,\chi} = \left[\frac{z_{\xi,\chi}}{2^h} \right] - \left[\frac{z_{\xi,\chi}}{2^{h+1}} \right] 2, \quad h = \overline{(d-1), 0}, \quad (2)$$

де 2^h — ваговий коефіцієнт двійкового елемента $w(h)_{\xi,\chi}$; d — кількість двійкових розрядів на представлення компоненти трансформанти.

З аналізу отриманого співвідношення випливає, що якщо виконується умова

$$[z_{\xi,\chi} / 2^h] = 0, \quad (3)$$

то тим більше $[z_{\xi,\chi} / 2^{h+1}] = 0$.

Отже, для умови (3) виконується рівність $w(h)_{\xi,\chi} = 0$. Це дозволяє для отримання значення двійкового розряду компоненти трансформанти виконувати тільки одну операцію ділення. Звідси умову (3) пропонується використовувати для скорочення часу на формування БОТ.

У результаті виконання перетворень, заданих співвідношенням (2) для всіх компонент трансформанти будується її бінарний опис (БОТ). Сукупність $W(h) = \{w(h)_{\xi,\chi}\}$, $\ell = \overline{1, m}$, двійкових елементів, відповідають одному бітовому рівню h утворює бінарну площину (рис. 1).

| | | | | |
|--------------|--|-------------------|--|--------------|
| $w(h)_{1,1}$ | | $w(h)_{1,\chi}$ | | $w(h)_{1,n}$ |
| | | | | |
| | | $w(h)_{\xi,\chi}$ | | |
| | | | | |
| $w(h)_{m,1}$ | | $w(h)_{m,\chi}$ | | $w(h)_{m,n}$ |

Рис. 1. Схема бітової площини для БОТ

У межах удосконалення методів стиснення зображень на основі кодування бітового опису трансформанти необхідно передбачити виконання трьох умов.

Перша умова полягає в забезпеченні скорочення просторової надмірності і можливості використання технології адаптивного одноосновного позиційного кодування для послідовності довжин двійкових областей. Для цього пропонується з окремих довжин серій двійкових елементів, які виявляються, формувати масиви даних. При цьому потрібно забезпечити підвищення ступеня стиснення і зниження тимчасових затримок на обробку. Необхідно враховувати напрямки потоків надходження двійкових даних на обробку та можливість для збільшення середньої довжини серії ДЕ. Для цього виявлення довжин серій ДЕ організовується в напрямку діагонального обходу, кожного разу, заново починаючи з елемента двійкової площини на позиції з координатами (1;1). Це дає змогу додатково враховувати залежність позиціонування областей нульових елементів від розташування високочастотних компонент у трансформанти, і наявність нульових елементів для бітових площин старших порядків, відповідних високочастотним компонентам.

Виявлення серій ДЕ для кожної окремої площини потребує встановлення угоди, що складається в тому, що кожен рядок починається з серії нульових елементів, і допускається, що його довжина може дорівнювати нулю. Наприклад, якщо перший рядок бітової площини починається з одиничного значення, то формується послідовність $\{0; v\}$, де v — довжина серії одиниць. Навпаки, якщо перший рядок починається з нульового значення, то формується елемент $\{v\}$. Тут v — довжина серії нулів, $v \geq 1$. Такий підхід дозволяє в процесі відтворення розрізняти серії за змістом у них двійкових елементів.

Друга умова полягає в інтеграції адаптивного одноосновного позиційного кодування. Тут потрібно врахувати особливості технології кодування АОП чисел, яке формується на базі стовпців масиву довжин серій двійкових елементів у рамках окремих бітових площин для побудови

кодових конструкцій стиснутого представлення зображення. При цьому необхідно скоротити кількість службових даних, які забезпечують виключення випадків, що призводять до неконтрольованих втрат інформації, в тому числі на етапах обробки структурних характеристик бінарного опису та формування кодових слів компактного представлення трансформант. Оскільки АОП числа формуються на базі стовпців масиву довжин серій ДЕ, то для визначення довжини кодових слів *пропонується* використовувати інформацію, адаптивно сформовану підставу одновимірних позиційних чисел. У цьому випадку використовується їх властивість, яка полягає в тому, що величина коду $C(\lambda)_k$ для АОП числа буде завжди меншою, ніж величина накопиченого множення підстави p його елементів, тобто

$$C(\lambda)_k \leq p^\lambda - 1, \quad (4)$$

де λ — довжина АОП числа.

Тоді це дає можливість забезпечити те, що кількість розрядів $V(C)_k^{(\lambda)}$, що відводиться на представлення коду $C(\lambda)_k$, не перевищуватиме заздалегідь задану довжину V кодового слова (машинного слова, що використовується обчислювальною системою), тобто

$$V(C)_k^{(\lambda)} \leq V. \quad (5)$$

Справді, виконується нерівність

$$V(C)_k^{(\lambda)} \leq \lceil \log_2 p^\lambda - 1 \rceil + 1 = V(\lambda)_{\max}, \quad (6)$$

де $V(\lambda)_{\max}$ — максимальна кількість розрядів на представлення коду АОП числа довжиною λ елементів.

При цьому умова (5) досягається без внесення додаткової службової інформації. Адже інформація про адаптивну підставу елементів АОП числа використовується для обчислення коду. Довжина кодових слів, що містять інформацію про код АОП числа, буде визначатися на підставі нерівності (6). Однак величина $V(C)_k^{(\lambda)}$ залежить від довжини адаптивного позиційного числа. Для визначення довжини АОП числа *пропонується* використовувати обмеження по довжині стовпця. Максимальне значення v_{\max} довжин серій ДЕ обмежено зверху розмірами бітових площин, тобто виконується нерівність $v_{\max} \leq m \cdot n$. Звідси для накопиченої адаптивної підстави буде виконуватися таке співвідношення:

$$\lceil \log_2 p^\lambda - 1 \rceil + 1 \leq \lambda (\lceil \log_2 m \cdot n \rceil + 1).$$

Тому для визначення довжини λ АОП числа *пропонується* вибирати значення довжини S стовпця масиву довжин СДЕ так, щоб виконувалася умова (5). Для такого варіанта з урахуван-

ням обмеження $v_{\max} \leq m \cdot n$ на максимальну довжину серії ДЕ максимальну кількість розрядів $V(C)_k^{(S)}$ на представлення S елементів стовпця масиву довжин ДС буде обмежено величиною $S(\lceil \log_2 m \cdot n \rceil + 1)$, тобто $V(C)_k^{(S)} \leq S(\lceil \log_2 m \cdot n \rceil + 1)$. Звідки для виконання умови (5) достатньо забезпечити, щоб $S(\lceil \log_2 m \cdot n \rceil + 1) \leq V$. Даний вираз дозволяє визначити величину, так, що виключаються варіанти переповнення кодового слова. Для цього використовується така нерівність $S \leq V / (\lceil \log_2 m \cdot n \rceil + 1)$. Таким чином, забезпечується умова $V(C)_k^{(S)} \leq V$ для невідомих заздалегідь значень елементів вектора підстав.

Третя умова інтеграції полягає в необхідності формування на базі послідовностей довжин серій ДЕ адаптивних одноосновних позиційних чисел. Для цього потрібна наявність як мінімум одного стовпця масиву даних. Водночас кількість S_Σ довжин серій ДЕ, що виявляються для бінарного опису трансформанти, заздалегідь невідома. Можуть виникнути варіанти, коли $S_\Sigma \leq S$, що наприклад, можливо для сильнокогерентних зображень.

У разі заповнення масиву довжин СДЕ по рядках не буде сформовано повне АОП число. Тому пропонується здійснювати побудову масивів довжин СДЕ по стовпцях.

Процес формування послідовності довжин серій двійкових елементів закінчується після того, як оброблена бітова площа з індексом $h=0$. У результаті формується послідовність, яка складається з елементів, значення яких дорівнюють довжинам серій ДЕ, $\{v_1, \dots, v_\xi, \dots, v_{S_\Sigma}\}$. Після чого на другому етапі організується індексування послідовності довжин серій ДЕ на підпослідовності (рис. 2) як підготовка для чергового етапу.

Довжина підпослідовності дорівнює величині S , яка вибирається згідно з виключенням варіантів переповнення кодового слова. На завершальному етапі на основі виділених підпослідовностей формуються стовпці масиву A_v .

Принцип індексування елементів у підпослідовність вибирається на основі таких дій:

– за поточною позицією ξ довжини серії ДЕ в послідовності визначається індекс k підпослідовності, якій належатиме оброблюваний елемент v_ξ : $k = \lceil \xi / S \rceil + 1$.

Даний індекс зачеплений індекс підпослідовностей;

– за значеннями ξ і k визначається індекс s елементу у підпослідовності $s = \xi - (k - 1)S$.

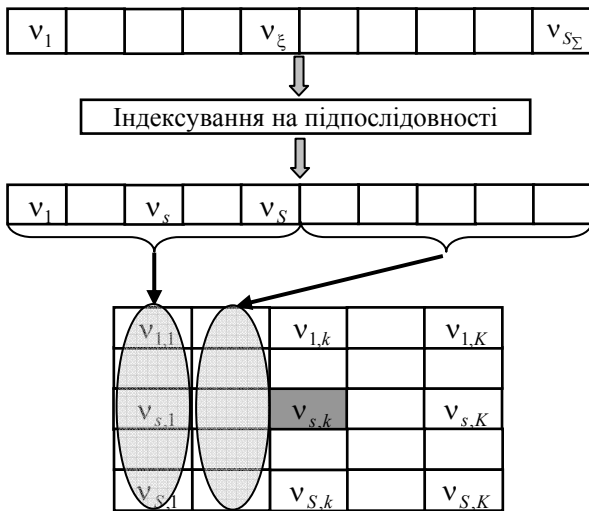


Рис. 2. Схема формування масиву довжин серій двійкових елементів

Таким чином, у результаті індексування вихідні елементи v_ξ розбиваються на підпоследовності, тобто $v_\xi \rightarrow v_{s+(k-1)S}$ (рис. 2).

Тепер на основі виділених підпоследовностей будуються стовпці масиву A_v . Для цього індекс підпоследовності визначає індекс стовпця, тобто позицію елемента в рядку масиву A_v , а індекс позиції в підпоследовності задає позицію елемента в стовпці, $v_{s+(k-1)S} \rightarrow v_{s,k}$ (рис. 2). Отже, елементи масиву A_v можуть позиціонуватися одним із двох способів:

$$A_v = \begin{pmatrix} v_{1,1} & v_{1+S,1} & \dots & v_{1+(k-1)S,k} & \dots & v_{1+(K-1)S,K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{s,1} & v_{s+S,2} & \dots & v_{s+(k-1)S,k} & \dots & v_{s+(K-1)S,K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{S,1} & v_{S+S,2} & \dots & v_{S+(k-1)S,k} & \dots & v_{S+(K-1)S,K} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & \dots & v_{1,k} & \dots & v_{1,K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{s,1} & v_{s,2} & \dots & v_{s,k} & \dots & v_{s,K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{S,1} & v_{S,2} & \dots & v_{S,k} & \dots & v_{S,K} \end{pmatrix}$$

У загальному випадку, з урахуванням того, що останній стовпець може бути заповненим неповністю, отримуємо такий вираз для довжини S' стовпця масиву A_v :

$$S' = \begin{cases} S, & \rightarrow k \leq K-1; \\ S_K, & \rightarrow k = K. \end{cases}$$

Кількість стовпців у цілому знаходиться за формулою $K = \lfloor S_\Sigma / S \rfloor + 1$.

Висновки

1. Розроблено метод компресії зображень із попереднім квантуванням компонент трансформант дискретного косинусного перетворення, що враховує умови вбудовування адаптивного одноосновного позиційного кодування, і забезпечує:

- підвищення ступеня стиснення;
- виключення неконтрольованих втрат якості відновлюваних зображень, зумовлених як усуненням психовізуальної надмірності, так і недостатнім вибором службових даних для опису структурних компонент на етапах перетворення даних;
- зниження часу обробки, як на етапах попередньої обробки, так і на етапах кодування для скорочення надмірності.

2. Метод стиснення містить у собі такі етапи:

- перетворення зображення з моделі кольорового опису RGB у кольороворізничеве перетворення для розділення кольорних складових, що мають різне значення для візуального сприйняття;
- виконання двовимірного блочного дискретного косинусного перетворення забезпечує перетрансформування енергії вихідного сигналу і отримання областей, що несуть меншу кількість інформації про вихідні зображення з позиції їх візуального сприйняття;
- бінарний опис квантованих компонент трансформант на основі їх двійкового подання, який дозволяє враховувати особливості розподілу нульових областей у БОТ, а саме враховувати особливості розміщення та довжини областей нульових елементів для різних позицій бінарного опису трансформанти;
- формування масивів довжин серій двійкових елементів у напрямку бітових площин БОТ, що дає змогу сформувати найдовші серії нульових елементів;
- адаптивне одноосновне позиційне кодування АОП чисел, утворених для стовпців масиву довжин серій ДЕ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Уолренд Дж. Телекомунікаційні та комп'ютерні мережі / Дж. Уолренд. — М. : Постмаркет, 2001. — 480 с.
2. Ватолін В. И. Методи компресії даних. Побудова архіваторів, стиснення зображень і відео / В. И. Ватолін, А. Рагушняк, М. Смірнов, В. Юкин. — М. : ДІАЛОГ — МІФІ, 2002. — 384 с.
3. Barannik V. Image Encoding Design Based On 2-D Combinatory Transformation / V. Barannik, V. Hahanov // International Symposium [IEEE East-West Design & Test], (Yerevan, Armenia, September 7–10, 2007) / Yerevan: 2007. — P. 124–127.
4. Barannik V. Method Of Encoding Transformant Uolsha Is In Systems Air Monitoring Of Earth /

V. Barannik, A. Yakovenko, A. Krasnorutkiy // International Conference TCSET'2009 [Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science] (Lviv-Slavsko, Ukraine, February 19–23, 2009) / Lviv Polytechnic National University, 2009. — P. 381–383.

5. Юдін А. К. Обоснование направления совершенствования технологий компрессии аэроизображений / А. К. Юдін, В. В. Баранник, А. Ю. Школьник // Сучасна спеціальна техніка. — №1 (28). — 2012. — С. 15–22.

6. Юдин А. К. Метод восстановления изображений на основе декомпозиции обобщенных кодовых конструкций / А. К. Юдин, А. Ю. Школьник // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. — №52. — 2013. — С. 30–37.

7. Юдін О. К. Обоснование двухкомпонентного подхода сжатия видеоданных в информационно-телекоммуникационных системах / О. К. Юдін, А. Ю. Школьник, Н. А. Королёва // Информационные управляющие системы на ЖТ. — №4. — 2012. — С. 45–50.

8. Бойко Ю. П. Адаптивне одноосновне позиційне кодування масивів довжин серій двійкових елементів / Ю. П. Бойко, П. Н Гуржій, В. Ф. Третьак // Радіоелектроніка й інформатика. — 2013. — №2. — С. 22–27.

9. Бойко Ю. П. Технологія реконструкції масивів довжин серій двійкових елементів для систем доставки відеоданих в телекомунікаційних мережах / Ю. П. Бойко, Н. А. Королёва // Сучасна спеціальна техніка. — №1. — 2014. — С. 15–24.

Стаття надійшла до редакції 12.02.2014