

¹П.О. Приставка, д.т.н., проф.
²М.О. Рябий, асп.

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ВІДСОТКА СТИСНЕННЯ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ ЛІНІЙНИХ ФІЛЬТРІВ

Національний авіаційний університет

¹E-mail: chindakor@mail.ru

²E-mail: smayluk@mail.ru

Запропоновано інформаційну технологію стиснення цифрованих зображень із втратами. Розглянуто методи попередньої обробки зображень. Проведено експериментальні дослідження визначення якості відтворених зображень за допомогою групи незалежних користувачів.

Ключові слова: інформаційна технологія, лінійні фільтри, обробка зображень, оцінка якості, стиснення з втратами.

Постановка проблеми

Поширення цифрових фотографій потребує забезпечення їх зберігання в постійно зростаючих обсягах.

Менший обсяг файлу, що містить цифрове зображення (ЦЗ), означає більшу їх кількість на носії та вищу швидкість передачі зорового образу в мережі.

На сьогодні існує безліч способів стиснення ЦЗ, проте в реальній практиці компресії реалістичних зображень (фото) використовують лише ті методи, що не вносять суттєвих спотворень. Тому підвищення відсотку стиснення ЦЗ, зокрема цифрових фотографій, без «привнесення» змін, що є помітними для людського ока, є актуальним.

Аналіз публікацій

За відправну точку візьмемо положення про існування деякого способу, що забезпечує задовільний відсоток стиснення при прийнятній якості ЦЗ одночасно. Спосіб може бути будь-яким, наприклад, jpeg-компресія з низьким рівнем втрат або архіватор.

Теоретично може існувати два напрями досліджень, що забезпечать підвищення рівня стиску без помітних втрат якості ЦЗ.

Перший напрям – запропонування нового методу стиснення або вдосконалення існуючого. Більшість досліджень зосереджені на такому підході. Про їх ефективність можна скласти уявлення, оцінюючи нові інформаційні технології. Незважаючи на сотні наукових статей про «нові» методи, пересічний користувач персонального комп'ютера працює з обмеженою кількістю загальновідомих технологій стиску.

Можливі два пояснення: або «новий» метод – чергова спроба видати бажане за дійсне, або ефективний спосіб стиснення ЦЗ без помітних втрат потребує тривалого часу «визнання», насамперед серед розробників відповідного програмного забезпечення.

Другий напрям можливих досліджень полягає в пошуку нових інваріантних перетворень ЦЗ, які можливо дозволять у разі використання відомих методів компресії вирішувати сформульоване цільове завдання.

У роботі [1] проведено статистичне дослідження відсотка стиснення відомими методами на вибірці цифрових фотографій. Установлено, що відсоток компресії вище для зображень зі слабо вираженою високочастотною складовою (зображень із низькою деталізацією).

Однією з відповідей на питання, як «змінити» ЦЗ, щоб метод компресії надав би більший відсоток стиснення і як після декомпресії відновити вигляд зображення, що є максимально близьким до початкового, є дослідження використання лінійних операторів низькочастотної (НЧ) фільтрації та псевдозворотних до них операторів контрастування.

У роботі [2] на основі експериментів статистично значуще доведено:

– підвищення відсотка стиснення (jpeg-стиснення та RAR архівація) ЦЗ, що були оброблені лінійними НЧ фільтрами [3; 4];

– спотворення після декомпресії та застосування псевдозворотних операторів контрастування [4; 5] для відтворення початкового вигляду ЦЗ в межах відносної похибки 1–5 % та рівня PSNR від 40 до 50.

Похибка відтворення може бути ще меншою, якщо використовувати уточнені в роботі [6] фільтри контрастування. Сама похибка може й не сприйматися людським оком, проте для статистично значущого висновку потрібне окреме дослідження з залученням незалежних учасників експерименту.

Метою роботи є:

– формальне викладення технології підвищення відсотка стиснення фотореалістичних ЦЗ, що пропонується, тестування її із залученням незалежних користувачів;

– отримання конкретних показників стиснення для різних за деталізацією ЦЗ;

– установлення форми залежності рівня деталізації до та після НЧ фільтрації.

Підвищення відсотка стиснення цифрових зображень

Нехай задано растр деякого ЦЗ, кожному пікселю якого поставлено у відповідність двійка індексів $\{(i, j)\}_{i, j \in \mathbb{Z}}$, що визначають його місцеположення. Не зменшуючи загальності, позначимо $\{p_{i,j}\}_{i, j \in \mathbb{Z}}$ – послідовність кольорової складової (наприклад, з простору RGB) вихідного растра.

Під визначенням лінійного фільтра будемо розуміти лінійний оператор $A(p^{i,j})$, що призводить до зміни (фільтрації) як форми, так і образу кольорових складових растра:

$$\tilde{p}_{i,j} = A(p^{i,j}) = \sum_{\tilde{i}=i-r_i}^{i+r_i} \sum_{\tilde{j}=j-r_j}^{j+r_j} \gamma_{\tilde{i}-i, \tilde{j}-j} p_{\tilde{i}, \tilde{j}};$$

$$i = \overline{-W/2, W/2};$$

$$j = \overline{-H/2, H/2};$$

$$r_i, r_j = 1, 2, \dots,$$

або (не зменшуючи загальності) $i, j \in \mathbb{Z}$,

де $\tilde{p}_{i,j}$ – кольорова складова растра після дії оператора $A(p^{i,j})$;

(i, j) – індекс пікселя растра;

$\gamma_{\tilde{i}-i, \tilde{j}-j}$ – елемент маски фільтра;

W, H – розміри кадру зображення;

$(2r_i + 1) \times (2r_j + 1)$ – розмір маски фільтра.

Якщо $L(p^{i,j})$ – оператор низькочастотної фільтрації, а $H(p^{i,j})$ – оператор високочастотної, то [3]

$$p_{i,j} = L(p^{i,j}) + H(p^{i,j}).$$

У роботі [1] запропоновано оцінювати рівень деталізації ЦЗ на основі функціонала

$$I = \frac{1}{3WH} \left(\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H H(p_r^{i,j}) + \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H H(p_g^{i,j}) + \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H H(p_b^{i,j}) \right),$$

де P_r, P_g, P_b – послідовності кольорових складових RGB-растра.

Надалі для визначеності пропонується використовувати маску високочастотного фільтра:

$$\gamma_H = \frac{1}{64} \begin{pmatrix} -1 & -6 & -1 \\ -6 & 28 & -6 \\ -1 & -6 & -1 \end{pmatrix}.$$

Зворотним до $L(p^{i,j})$ оператором назвемо [4]

оператор $K(p^{i,j})$, такий, що

$$K(L(p^{i,j})) = p_{i,j}. \quad (1)$$

Якщо у виразі (1) рівність приблизна

$$K(L(p^{i,j})) \approx p_{i,j},$$

то оператор $K(p^{i,j})$ називають псевдозворотним.

Зворотний фільтр на відміну від псевдозворотного мав би маску нескінченних розмірів, хоч і з прямуючими до нуля елементами у міру віддалення від центрального елемента маски з індексами (i, j) .

Для зменшення деталізації ЦЗ пропонується використовувати такі маски НЧ фільтрів [3; 4]:

$$\gamma_{L20} = \frac{1}{64} \begin{pmatrix} 1 & 6 & 1 \\ 6 & 36 & 6 \\ 1 & 6 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\gamma_{L30} = \frac{1}{36} \begin{pmatrix} 1 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\gamma_{L40} = \frac{1}{147456} \begin{pmatrix} 1 & 76 & 230 & 76 & 1 \\ 76 & 5776 & 17480 & 5776 & 76 \\ 230 & 17480 & 52900 & 17480 & 230 \\ 76 & 5776 & 17480 & 5776 & 76 \\ 1 & 76 & 230 & 76 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\gamma_{L50} = \frac{1}{14400} \begin{pmatrix} 1 & 26 & 66 & 26 & 1 \\ 26 & 676 & 1716 & 676 & 26 \\ 66 & 1716 & 4356 & 1716 & 66 \\ 26 & 676 & 1716 & 676 & 26 \\ 1 & 26 & 66 & 26 & 1 \end{pmatrix}.$$

Маски відповідних псевдозворотних фільтрів до наведених НЧ фільтрів такі [4; 5]:

$$\gamma_{K20} = \frac{1}{1156} \begin{pmatrix} 1 & -8 & 48 & -8 & 1 \\ -8 & 64 & -384 & 64 & -8 \\ 48 & -384 & 2304 & -384 & 48 \\ -8 & 64 & -384 & 64 & -8 \\ 1 & -8 & 48 & -8 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\gamma_{K30} = \frac{1}{196} \begin{pmatrix} 1 & -6 & 24 & -6 & 1 \\ -6 & 36 & -144 & 36 & -6 \\ 24 & -144 & 576 & -144 & 24 \\ -6 & 36 & -144 & 36 & -6 \\ 1 & -6 & 24 & -6 & 1 \end{pmatrix}$$

та з урахуванням симетричності масок:

$$\gamma_{K40} = \begin{pmatrix} 0,00000451 & 0,00032858 & -0,000173172 & 0,000543531 & -0,001478877 & \dots \\ 0,00032858 & 0,002394093 & -0,012617568 & 0,039602551 & -0,107753344 & \dots \\ -0,000173172 & -0,012617568 & 0,066498257 & -0,20871698 & 0,567891511 & \dots \\ 0,000543531 & 0,039602551 & -0,20871698 & 0,655096535 & -1,782431695 & \dots \\ -0,001478877 & -0,107753344 & 0,567891511 & -1,782431695 & 4,84976271 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix};$$

$$\gamma_{K50} = \begin{pmatrix} 0,00001438 & 0,00033407 & -0,00172610 & 0,00478999 & -0,01061734 & \dots \\ 0,00033407 & 0,00775879 & -0,04008855 & 0,11124737 & -0,24658736 & \dots \\ -0,00172610 & -0,04008855 & 0,20713173 & -0,57479904 & 1,27408119 & \dots \\ 0,00478999 & 0,11124737 & -0,57479904 & 1,59509094 & -3,53562762 & \dots \\ -0,01061734 & -0,24658736 & 1,27408119 & -3,53562762 & 7,83695920 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}.$$

Уточнені в роботі [6] маски псевдозворотних фільтрів мають великий розмір, тому обмежимося однією:

$$\gamma_{K20} = \frac{1}{39204} \begin{pmatrix} 1 & -8 & 48 & -280 & 48 & -8 & 1 \\ -8 & 64 & -384 & 2240 & -384 & 64 & -8 \\ 48 & -384 & 2304 & -13440 & 2304 & -384 & 48 \\ -280 & 2240 & -13440 & 78400 & -13440 & 2240 & -280 \\ 48 & -384 & 2304 & -13440 & 2304 & -384 & 48 \\ -8 & 64 & -384 & 2240 & -384 & 64 & -8 \\ 1 & -8 & 48 & -280 & 48 & -8 & 1 \end{pmatrix}.$$

Технологія підвищення рівня стиснення реалістичних ЦЗ (цифрових фото) без помітних для людського ока втрат [7] складається з двох етапів:

- фільтрації ЦЗ НЧ фільтром з будь-якою з масок $\gamma_{L20}, \gamma_{L30}, \gamma_{L40}, \gamma_{L50}$;
- компресії відомим методом стиснення з низькими втратами або архівації.

Для визначеності пропонується використовувати jpeg-компресію з мінімальним рівнем втрат або архіватор RAR.

Після декомпресії обов'язковою є обробка ЦЗ псевдозворотним фільтром, відповідним до НЧ, який застосовувався на початку. Наприклад, якщо застосовували фільтр з маскою γ_{L20} , то наприкінці маємо використовувати фільтр з маскою γ_{K20} або уточнений з маскою $\hat{\gamma}_{K20}$.

Для тестування візуальної якості зображень після декомпресії було проведено експеримент із залученням незалежних користувачів (близько 200 осіб). Для кожного з опитаних користувачів з вибірки в 100 цифрових фото високої якості (без помітних артефактів та спотворень) випадковим чином вилучалось без повторень 10 ЦЗ. Над кожним із ЦЗ здійснювалась операція фільтрації, після чого зображення підлягало jpeg-стисненню з низьким рівнем втрат, декомпресії та оброблялося псевдозворотним фільтром.

Учасники експерименту візуально оцінювали якість цифрового фото після всіх указаних дій по такій шкалі якості ЦЗ:

- помітно погіршилось;
- незначні спотворення;
- без змін;
- трохи поліпшилось;
- значно поліпшилось.

У ході експерименту більшість відповідей про якість ЦЗ була «без змін»:

а) 98,03 % при застосуванні двійки фільтрів з масками $\gamma_{L20}, \gamma_{K20}$:

- помітно погіршилось 0,06 %;
- незначні спотворення 0,64 %;
- трохи поліпшилось 1,16 %;
- значно поліпшилось 0,11 %

б) 96,12 % для фільтрів з масками $\gamma_{L30}, \gamma_{K30}$:

- помітно погіршилось 0,26 %;
- незначні спотворення 1,55 %;
- трохи поліпшилось 1,64 %;
- значно поліпшилось 0,43 %.

Якщо аналізувати відповіді кожного з опитаних сукупно (одночасно за 10 ЦЗ, що були оброблені), то при застосуванні фільтрів з масками $\gamma_{L20}, \gamma_{K20}$ 87,28 % не помічали змін одночасно в 10 ЦЗ, 11,56 % побачили зміну в 1-му з 10 ЦЗ, 1,16 % в двох із 10 зображеннях (для двійки масок $\gamma_{L30}, \gamma_{K30}$, відповідно 68,11; 26,72 та 5,17 %).

Навіть, якщо вважати відповіді «погіршення...» та «поліпшення...» як тотожні відповіді «бачені зміни», результати експерименту доводять, що запропонована технологія підвищення стиснення реалістичних ЦЗ працює без бачених змін у статистично значущій більшості випадків.

Існує залежність між відсотком стиснення та показником I рівня деталізації ЦЗ. Так, на основі експерименту, що викладено в роботі [1], встановлено:

$$\overline{\%_{\text{jpg}}}(I) = -0,149I + 80,241; \quad (2)$$

$$\overline{\%_{\text{rar}}}(I) = -0,301I + 70,168, \quad (3)$$

де $\overline{\%_{\text{jpg}}}(I)$ – лінійна регресія відсотка jpg -стиснення залежно від I ;

$\overline{\%_{\text{rar}}}(I)$ – лінійна регресія RAR-архівації залежно від I (рис. 1).

Відсоток стиснення ЦЗ залежить від багатьох факторів, а не лише від показника I .

Близько 20 % варіабельності рівня стиснення пояснюється саме лінійною регресією (коефіцієнти детермінації для jpg -стиснення та RAR-архівації 18,02 та 26,22 % відповідно), що дозволяє приблизно оцінювати можливий рівень компресії ЦЗ за технологією, що пропонується. Для цього встановимо форму залежності зміни показника I деталізації ЦЗ після застосування НЧ фільтрів з масками γ_{L20} , γ_{L30} , γ_{L40} , γ_{L50} .

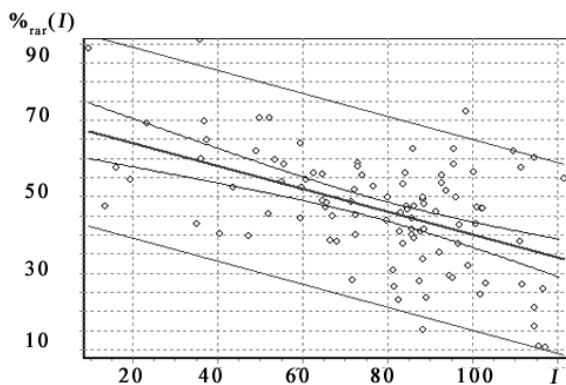


Рис. 1. Лінійна регресія $\overline{\%_{\text{rar}}}(I)$, довірчий інтервал та 95-відсоткові толерантні межі

Для проведення досліджень використали вибірку ЦЗ у форматі BMP обсягом 100 [1; 2]. Суть експерименту полягала в послідовному застосуванні до кожного ЦЗ НЧ фільтрів з різними масками та визначенні показників деталізації I (відповідно I_{L20} , I_{L30} , I_{L40} , I_{L50}).

Цифрові зображення, що оброблялися фільтрами, наведено в табл. 1.

Результати обробки даних табл. 1 показано на рис. 2 (а – стовпчики 2 та 3; б – стовпчики 2 та 4; в – стовпчики 2 та 5; г – стовпчики 2 та 6).

Таблиця 1

Показники деталізації I ЦЗ

Номер ЦЗ	I	I_{L20}	I_{L30}	I_{L40}	I_{L50}
1	2	3	4	5	6
1	59,6	39,98	34,45	30,63	28,13
2	100,14	89,97	84,09	77,72	72,25
3	53,46	31,32	25,58	22,04	19,98
...
98	73,02	63,64	52,02	46,81	40,79
99	36,03	22,98	17,84	13,11	12,03
100	13,65	9,89	7,12	6,65	6,02

У результаті експерименту встановлено існування статистично значущої залежності показника I до та після НЧ фільтрації у формі параболічної регресії (рис. 2):

$$\overline{I_{L20}}(I) = 0,0031I^2 + 0,509I + 4,169; \quad (4)$$

$$\overline{I_{L30}}(I) = 0,0038I^2 + 0,375I + 3,961; \quad (5)$$

$$\overline{I_{L40}}(I) = 0,0043I^2 + 0,263I + 4,372; \quad (6)$$

$$\overline{I_{L50}}(I) = 0,0049I^2 + 0,138I + 5,597. \quad (7)$$

Коефіцієнти детермінації (відсоток поясненої регресією дисперсії залежної ознаки) становлять 95,81, 93,69, 91,37 та 89,28 % відповідно моделям (4) – (7).

Отже, підставляючи оцінки регресій (4) – (7) у вирази для оцінок (2) та (3), можна для кожного ЦЗ в середньому оцінювати, на який відсоток збільшується відсоток стиснення, залежно від НЧ фільтра, який застосовується.

Наприклад, підставляючи вираз (5) у формулу (2), отримуємо:

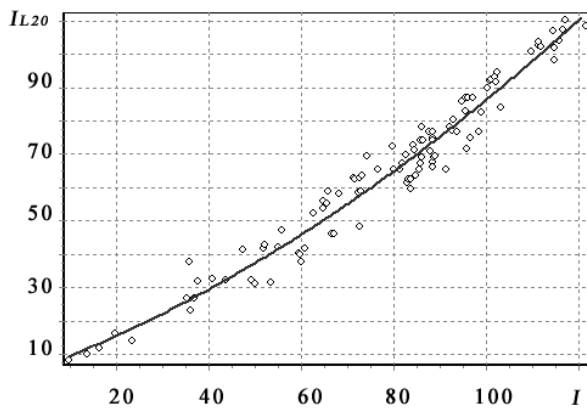
$$\overline{\%_{\text{jpg}}}(I)_{L30} = -0,149\overline{I_{L30}}(I) + 80,241$$

або

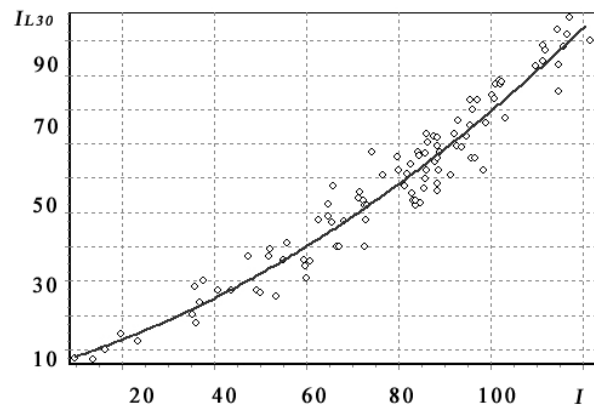
$$\overline{\%_{\text{jpg}}}(I)_{L30} = -0,149(0,0038I^2 + 0,375I + 3,961) + 80,241,$$

отже:

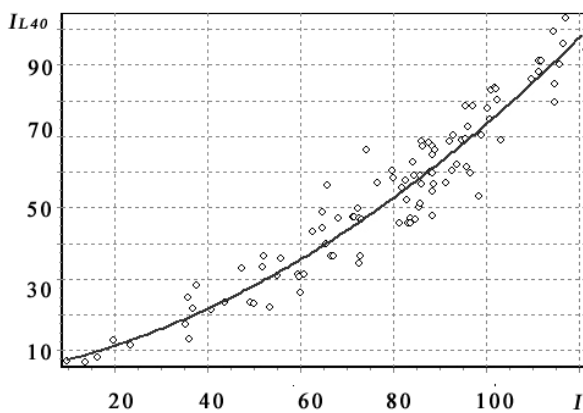
$$\overline{\%_{\text{jpg}}}(I)_{L30} = -0,000566I^2 - 0,056I + 79,561.$$



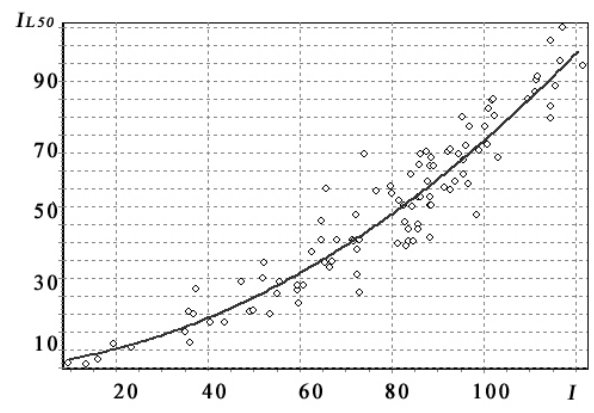
a



б



в



г

Рис. 2. Параболічна регресія:

$$a - \overline{I_{L20}}(I);$$

$$б - \overline{I_{L30}}(I);$$

$$в - \overline{I_{L40}}(I);$$

$$г - \overline{I_{L50}}(I)$$

Ураховуючи, що розподіли різниць значень стовпчиків 2 та 3, 2 та 4, 2 та 5, 2 та 6 табл. 1 близькі до нормальних (рис. 3), можна за допомогою виразів (2), (3) загально оцінити, на скільки в середньому зростає відсоток стиснення.

Таблиця 2

Оцінки математичного сподівання та теоретичної медіани

Показник	Стовпчики			
	2 та 3	2 та 4	2 та 5	2 та 6
Середнє	13,03	19,17	24,30	28,73
Медіана	12,19	18,52	24,02	29,44

За результатами експерименту було отримано та зведено до табл. 2 оцінки математичного сподівання та теоретичної медіани різниць даних табл. 1.

Скориставшись результатами експериментів робіт [1; 2], даними табл. 2, 3 та виразами (2), (3), отримаємо для фільтра з маскою γ_{L30} :

– якщо середня різниця між показником I оцінена величиною вибіркового середнього:

$$\Delta(\overline{\%_{\text{jpg}}}(I)) = \overline{\%_{\text{jpg}}}(I) - \overline{\%_{\text{jpg}}}(I_{L30}) = 0,149 \cdot 19,17 = 2,86;$$

$$\Delta(\overline{\%_{\text{RAR}}}(I)) = \overline{\%_{\text{RAR}}}(I) - \overline{\%_{\text{RAR}}}(I_{L30}) = 0,301 \cdot 19,17 = 5,77;$$

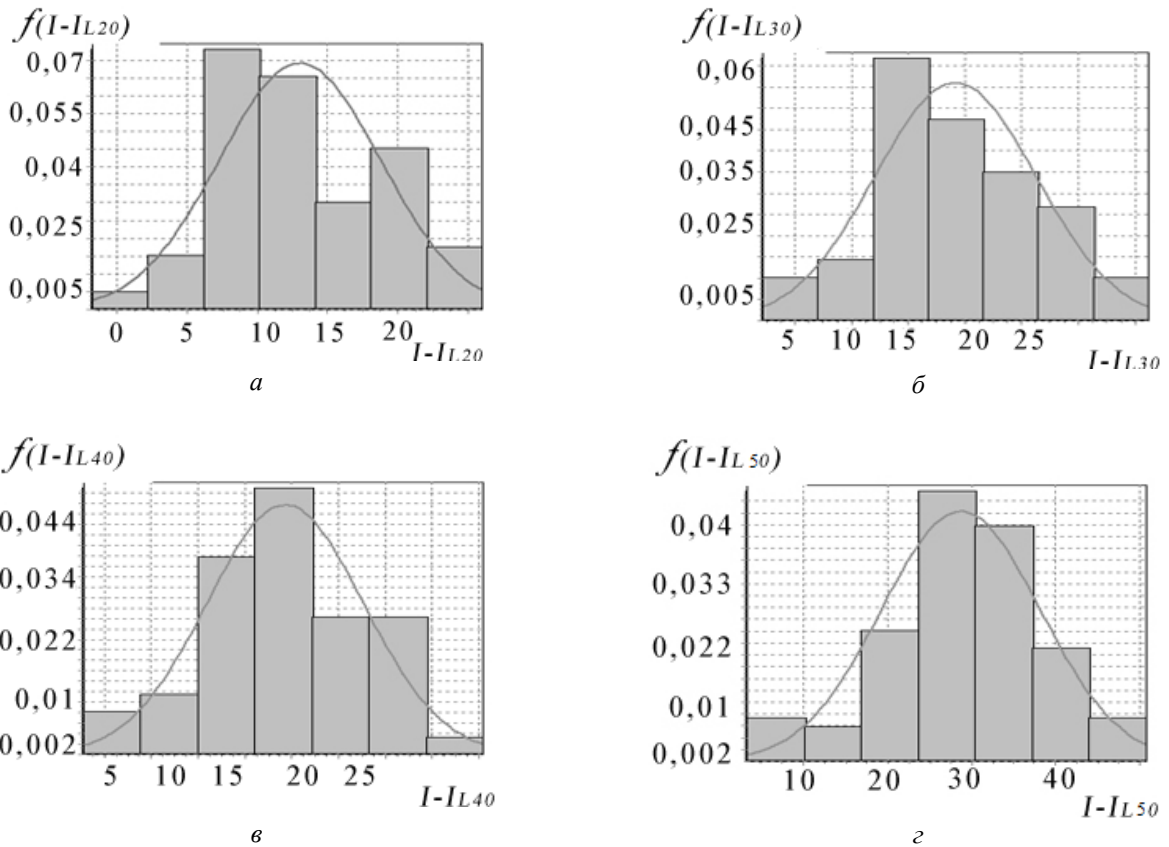


Рис. 3. Щільність нормального розподілу за даними табл. 1:
 а – стовпчики 2 та 3;
 б – стовпчики 2 та 4;
 в – стовпчики 2 та 5;
 г – стовпчики 2 та 6

– якщо середня різниця між показником I оцінена величиною вибіркової медіани:

$$\tilde{\Delta}(\overline{\%_{\text{jpg}}}(I)) = 0,149 \cdot 18,52 = 2,76.$$

Порівнюючи $\Delta(\overline{\%_{\text{jpg}}}(I))$, $\tilde{\Delta}(\overline{\%_{\text{jpg}}}(I))$ та $\Delta(\overline{\%_{\text{RAR}}}(I))$, $\tilde{\Delta}(\overline{\%_{\text{RAR}}}(I))$ з різницею відсотка стиснення за даними табл. 3, зокрема 6,33 і 4,99 та 9,89 і 8,68, неважко переконатися, що отримані результати надають оцінку підвищення відсотка стиснення знизу. Такий факт пояснюється тим, що відсоток компресії залежить не лише від деталізації ЦЗ.

Висновки

Подано математичне ядро інформаційної технології підвищення відсотка стиснення фотореалістичних ЦЗ на основі інваріантних перетворень за допомогою лінійних НЧ та псевдозворотних до них контрастних фільтрів.

Таблиця 3

Оцінки математичного сподівання та теоретичної медіани відсотка jpeg-стиснення та RAR-архівзації

Показник		Розрахунок		
		без НЧ фільтра	після фільтра з маскою	
			γ_{L20}	γ_{L30}
Jpeg	Середнє	68,66	73,67	74,99
	Медіана	68,69	72,64	73,68
RAR	Середнє	46,71	54,30	56,60
	Медіана	47,45	55,12	56,13

Результати апробації технології за участі незалежних користувачів засвідчили, що при підвищенні відсотка стиснення ЦЗ відбуваються втрати, що візуально в переважній більшості випадків не сприймаються людським оком.

Отримано оцінки у вигляді лінійних та параболічних регресій для jpeg-компресії та RAR-архівзації, що дозволяють проводити оцінку величини відсотка стиснення для конкретних ЦЗ та в середньому залежно від деталізації зображення та типів фільтрів, які застосовуються.

Усі висновки статистично значущі на рівні похибки з імовірністю 0,05.

Подальші дослідження можуть полягати в реалізації аналогічних математичних підходів при обробці цифрового відео та в проведенні експериментів із використання інваріантних перетворень з іншими методами стиснення.

Література

1. *Приставка П.О.* Експериментальний аналіз методів стиснення цифрових зображень / П.О. Приставка, М.О. Рябий // Проблеми інформатизації та управління: зб. наук. пр. – К.: НАУ, 2010. – С. 78–84.
2. *Приставка П.О.* Підвищення рівня стиснення з втратами цифрових зображень за використанням низькочастотних фільтрів / П.О. Приставка, М.О. Рябий // Наукоємні технології: зб. наук. пр. – К.: НАУ, 2012. – 1 (13) – С. 20–26.
3. *Приставка П.О.* Обчислювальні аспекти застосування поліноміальних сплайнів при побудові фільтрів / П.О. Приставка // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій: зб. наук. пр. – Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2006. – С. 3–14.
4. *Чолишкіна О.Г.* Застосування поліноміальних сплайнів на основі *B*-сплайнів п'ятого порядку під час побудови фільтрів / О.Г. Чолишкіна // Вісник НАУ. – 2009. – № 1. – С. 214–218.
5. *Приставка П.О.* Побудова контрастних фільтрів за використанням поліноміальних сплайнів / П.О. Приставка // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій: зб. наук. пр. – Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2007. – С. 15–22.
6. *Рябий М.О.* Побудова уточнених контрастних фільтрів для задач стиснення цифрових зображень / М.О. Рябий // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій: зб. наук. пр. – Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2011. – С. 26–38.
7. *Приставка П.О.* Інформаційна технологія стиснення цифрових зображень з втратами з використанням методів фільтрації / П.О. Приставка, М.О. Рябий // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2011) : тези доп. IX міжнар. наук.-практ. конф. (23-25 листоп. 2011 р.). – Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2011. – С. 224–225.

Стаття надійшла до редакції 12.03.2012.