

ІНСТИТУТ  
ФІЗИКИ  
КОНДЕНСОВАНИХ  
СИСТЕМ

ICMP-05-09U

М.В. Шовгенюк, Н.С. Писанчин, Л.А. Дідух

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ЦИФРОВОГО РАСТРУВАННЯ  
ЗОБРАЖЕННЯ З МОДУЛЬОВАНОЮ ЧАСТОТОЮ

УДК: 536.75; 538.9; 548:537.621; 538.955-405

PACS: 05.50.+q, 05.70.Ce, 64.60.Fr, 75.10.Hk

**Аналіз способів цифрового растрівання зображення з модульованою частотою**

М.В. Шовгенюк, Н.С. Писанчин, Л.А. Дідух

**Анотація.** Проведено аналіз сучасних способів цифрового растрівання зображень. Приведено способи одержання растрових зображень з амплітудно-модульованими, частотно-модульованими та амплітудно-модульованими– частотно-модульованими структурами. Детально описано спосіб растрівання за принципом поширення похибки. Проведено порівняльний аналіз найбільш відомих алгоритмів цього класу з поелементним опрацюванням зображення. Описано алгоритм блокового поширення похибки, який забезпечує генерування безмуарової растрової структури та приведені результати растрівання.

**Analysis of the digital screening methods of the image with modulate frequency**

M.V. Shovgenyuk, N.S. Pysanchyn, L.A. Didukh

**Abstract.** The analysis of modern methods of the digital screening of images is carried out. The methods of obtaining the screening images with amplitude-modulated, frequency-modulated and amplitude-modulated–frequency-modulated structures are represented. The method of screening on the principle of the distribution error is described in details. The comparative analysis of the most popular algorithms of this class with using the elementwise processing of the image is realized. It is described the algorithm of the block distribution error, which provides the generating of the pattern free moir. The results of the screening are represented.



## 1. Вступ

Цифрове растрування зображень – це квантування півтонового зображення до вигляду 1 біт/піксел для відтворення і друкування його на бінарних пристроях. Метою тонового растрування є імітація градації тонів за допомогою певного розташування бінарних елементів. Цифрове растрування можна класифікувати за трьома категоріями: амплітудно-модульоване (АМ), частотно-модульоване (ЧМ) та амплітудно-частотно модульоване (АМ-ЧМ) або, іншими словами, гібридне растрування елементів. Для амплітудно-модульованих растрів характерне відтворення градації шляхом зміни розмірів растрових елементів, тоді як відстань між ними або частота розташування залишається постійною. Традиційно такі структури генеруються шляхом “кластерного” впорядкованого растрування. ЧМ структури мають сталий розмір растрових елементів, але відстань між ними змінюється відповідно до зміни інтенсивності сірого при відтворенні градації. Традиційно такі структури отримують “дисперсним” впорядкованим раструванням [1, 2], або поширенням похибки [3]. В більшості випадків розмір растрового елемента в таких структурах відповідає розміру одного піксела. В роботах Анастасіо (Anastasio) [4] та Бернарда (Bernard) [5] було доведено, що поширення похибки є двовимірною дельта-сигма модуляцією.

На основі алгоритму Флойда-Стейнберга (Floyd-Steinberg) [3] розроблено чимало алгоритмів поширення похибки, спрямованих на його удосконалення. Для поліпшення якості бінарного зображення автори використовують різні шляхи. Серед них:

- зміну напрямку опрацювання зображення - “серпантин” замість традиційного зліва на право і зверху вниз [6], чи шляхом руху вздовж фрактальної кривої [7–9];
- зміну коефіцієнтів матриці поширення похибки [10–13];
- зміну критичного значення [14–16], де замість одного сталого значення, яке рівне 0.5, Ешбач та Кнокс (Eschbach, Кнокс) пропонують обернено-пропорційну залежність [17].

Експериментальні дослідження показують, що жоден із згаданих вище алгоритмів не забезпечує повного уникнення характерних недоліків, в більшості випадків змінюється лише область градації, в якій виникають небажані регулярні утворення. Однак, алгоритми поширення похибки забезпечують найкращі результати порівняно з іншими техніками бінаризації [6, 18, 19].

АМ-ЧМ растрування [20–26] дозволяє отримати гібридні структури, для яких властива зміна як розміру, так і частоти розташування растрових елементів.

Відомі алгоритми растрування за принципом поширення похибки, які дозволяють керувати розміром і формою растрового елемента [27]. Досягнути цього дозволяють алгоритми блокового опрацювання. Ідея використання блоків і поширення похибки не нова. Фен (Fan) [28] описує алгоритм, який поєднує традиційне “кластерне” впорядковане растрування з блоковим поширенням похибки для уникнення появи зайвих контурів при відтворенні деяких рівнів тону. Ешбач (Eschbach) [29] пропонує принцип поширення похибки для генерування амплітудно-модульованих структур, використовуючи блокову модуляцію “порогу” (матриці критичних значень). Алгоритм, який дозволяє управляти формою растрового елемента в межах зображення відповідно до інформаційного сигналу теж має в основі блоковий принцип поширення похибки [30].

Велика увага приділяється способам введення водяних знаків в растрове зображення [31–37]. Методи [31–33] не практикуються для типових print-scan напрямів. Метод [34] використовують для генерування деяких растрових структур подібно до прямого (спрямованого) двійкового пошуку [38], однак, він дуже повільний для застосування його для способів друку “в реальному часі”. Методи в [35–37] мають практичне застосування, і використовуються для ідентифікації відбитків за невеликим відсотком інформації. Для створення високоякісних водяних знаків використовують метод скалярного поширення похибки, який описаний в [39].

Метою даної роботи є аналіз сучасних способів цифрового растрування, дослідження переваг та недоліків кожного з них та визначення способу, який забезпечує оптимальне відтворення градації зображення та відповідає вимогам сучасних друкарських процесів.

## 2. Алгоритм цифрового растрування за критерієм 0.5

Цифрове растрування можна представити як вирішення проблеми однобітного квантування двовимірного сигналу. Припустимо, що  $X(i, j)$  масив чисел  $[0, 1]$  розміром  $K \times L$ , який відповідає градації сірого від білого - 0 до чорного - 1. Необхідно знайти відповідний масив бінарних значень (0 чи 1)  $B(i, j)$  такого ж розміру таким чином, щоб похибка:

$$E = X - B \quad (1)$$

була мінімальною.

Досягти такого результату дозволяє критерій середньоквадратичного відхилення. Тобто квантизація відбувається порівнянням введених значень з деяким сталим значенням, яке відповідає середині масиву, в даному випадку 0.5:

$$B(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{коли } x(i, j) > 0.5 \\ 0, & \text{коли } x(i, j) < 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

Квантування за одним пороговим значенням гарантує, що кожен елемент матриці похибок  $E(i, j)$  буде обмежений значенням 0.5 (за абсолютною величиною). Такий алгоритм забезпечує мінімальну похибку для кожного елемента  $i$ , відповідно, дає мінімальне середньоквадратичне відхилення. Це найпростіший з алгоритмів, який не забезпечує найкращих результатів, оскільки не дозволяє відтворити градацію і приводить до суттєвої втрати інформації при відтворенні півтонового зображення (рис. 1) [40].

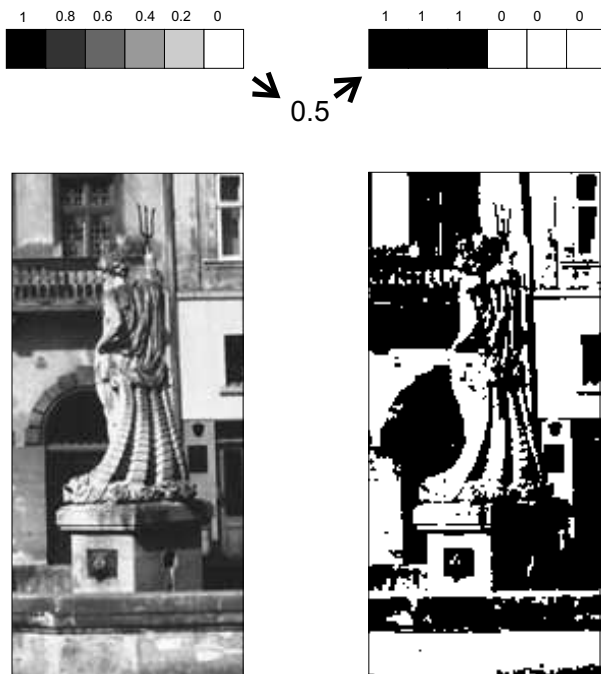


Рис. 1. Результати цифрового растрівання за критерієм 0.5

### 3. Растрівання з використанням матриць критичних значень

Один з шляхів вдосконалення описаного вище алгоритму – растрівання шляхом порівняння півтонового зображення не з одним пороговим значенням, а з матрицею наперед визначених порогових значень  $M$ :

$$b(i, j) = \begin{cases} 1, & x(i, j) > m(i, j) \\ 0, & x(i, j) < m(i, j) \end{cases} \quad (3)$$

Залежно від типу матриці критичних значень можна отримати впорядковані АМ і ЧМ та стохастичні ЧМ і АМ-ЧМ растрові структури.

#### 3.1. Амплітудно-модульовані (кластерні) структури

Як відомо, амплітудна модуляція передбачає зміну розмірів растрових елементів, тому всі алгоритми, які генерують АМ растрові структури мають в основі матриці, де близькі за значенням порогові розташовуються якнайближче один до одного (рис. 2, рис. 3). Таке розташування значень забезпечує збільшення розміру растрових елементів при зростанні рівня інтенсивності (0 - 255) зображення (рис. 4). Растрівання такого типу фактично є цифровим вирішенням традиційного растра, який використовується в аналогових фоторепродукційних процесах. Для прикладу масив критичних значень (рис. 3) застосовується для генерування елементів з кутом повороту растра  $45^\circ$ .

В процесі кольорового друку – це, зазвичай, кут для чорної фарби. Для створення інших кутів повороту растра ( $105^\circ$  для голубої фарби,  $75^\circ$  для пурпурної та  $90^\circ$  для жовтої) потрібно використати інші порогові масиви, створити які досить складно, особливо для кутів з ірраціональними тангенсами ( $105^\circ$  та  $75^\circ$ ) [41].

#### 3.2. Впорядковані ЧМ структури

Впорядковані ЧМ-структури реалізують ідею аналогових растрів із змінною лініатурою. Оскільки критичні значення впорядковані так, що близькі за значенням “пороги” знаходяться якомога далі один від одного (3), це забезпечує одержання різних значень лініатури для кожного поля градації, а кількість відтворюваних градацій залежить від розміру матриці критичних значень. Для прикладу матриця Бауера (3) [42] дозволяє генерувати мінімальну градацію з 4-х рівнів, а із збільшенням матриці відповідно розширюється градація до  $2n$

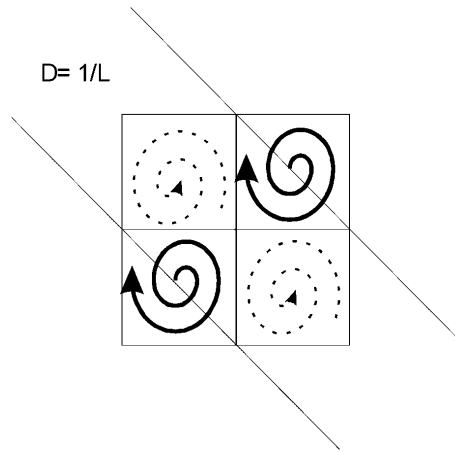


Рис. 2. Стратегія впорядкування матриці критичних значень для генерування АМ структури

$$\begin{bmatrix} 10 & 12 & 11 & 9 & 7 & 8 \\ 13 & 18 & 17 & 6 & 1 & 2 \\ 14 & 15 & 16 & 5 & 4 & 3 \\ 9 & 7 & 8 & 10 & 12 & 11 \\ 6 & 1 & 2 & 13 & 18 & 17 \\ 5 & 4 & 3 & 14 & 15 & 16 \end{bmatrix}$$

Рис. 3. Матриця критичних значень для генерування АМ структури з кутном повороту растра 45°



Рис. 4. Градаційна шкала з АМ растровою структурою

рівнів. Тобто матриця розміром  $4 \times 4$  елементи забезпечує одержання 16-рівневої градації (рис. 5):

$$D_n = \begin{bmatrix} 4D_{n/2} + D_2(1,1) \times U_{n/2} & 4D_{n/2} + D_2(1,2) \times U_{n/2} \\ 4D_{n/2} + D_2(2,1) \times U_{n/2} & 4D_{n/2} + D_2(2,2) \times U_{n/2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де  $D_2$  – елементарна матриця Бауера,  $U_n$  – одинична матриця  $n \times n$  елементів,

$$D_2 = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \quad D_4 = \begin{bmatrix} 15 & 7 & 13 & 5 \\ 3 & 11 & 1 & 9 \\ 12 & 4 & 14 & 6 \\ 0 & 8 & 2 & 10 \end{bmatrix}.$$

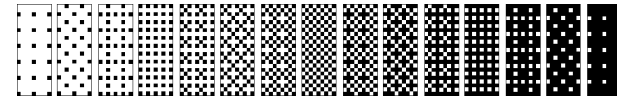


Рис. 5. Градаційна шкала, побудована за алгоритмом Бауера

### 3.3. Стохастичні ЧМ структури

Впорядковані ЧМ растри забезпечують поліпшене відтворення дрібних деталей порівняно з АМ растрованням, але не вирішують проблеми виникнення муару. Для усунення цього недоліку багато авторів пропонують застосування стохастичних ЧМ растрів. Цифрові методи обробки зображень дозволили реалізувати ідею створення частотно-модульованого растру різними способами. За умови растровання порівнянням з матрицею критичних значень використовують матриці, створені на основі генерування деяких видів шумів.

Хаотично та рівномірно розташовані чорні і білі елементи частотно-модульованого зображення створюють випадковий візерунок, який прийнято називати “білим шумом”. Людське око, представляючи собою нелінійний пристрій, володіє різною чутливістю до різних зон спектра. Стосовно “білого шуму” око володіє характеристиками високочастотного фільтра, виділяючи з цього шуму “синю” складову, в результаті чого “білий шум” починає сприйматися як “рожевий”. Для отримання бінарних зображень доброї якості з найбільш сприятливими характеристиками випадкової структури необхідно дещо посилити “синю” складову “білого шуму” і послабити “рожеву”, оскільки візерунки синього шуму задовільняють вимогам неперіодичності, утворюючи некорельовану структуру без низькочастотних складових ці візерунки аперіодичні та радіально симетричні.

Тому растровання з використанням “білого” [43] або “синього шуму” є досить поширеним напрямом розробок та досліджень [44–46].

Найбільш відомий спосіб одержання візерунка “синього шуму” шляхом застосування так званої маски “синього шуму” [45]. Згідно цього способу маска генерується попередньо і, зберігаючись в пам’яті комп’ютера, представляє собою масив критичних значень. Методи генерування маски “синього шуму” описані в роботах [45–47]. В результаті отримується растровий візерунок будь-якого рівня сірого, спектр частот якого наближається до ідеального спектра “синього шуму”.

Один з поширених методів генерування маски “синього шуму” – генерування точкового профілю 50% сірого  $p[i, j, 1/2]$ . Цей профіль генерується з візерунка “білого шуму” через високочастотний радіально симетричний фільтр.

На основі точкового профілю для сірого  $g = 50\% p[i, j, 1/2]$  будуються точкові профілі для всіх інших рівнів:  $1/2 + \Delta g$  [46].

#### 4. Алгоритм поширення похибки

Принципово інший підхід до одержання хаотичних ЧМ структур реалізує алгоритм поширення похибки (рис.6), за яким зображення опрацьовується поелементно, а похибка  $e(i, j)$ , одержана в результаті порівняння півтонового елемента  $x(i, j)$  з пороговим значенням (0.5), певним чином додається до оточуючих неопрацьованих елементів.

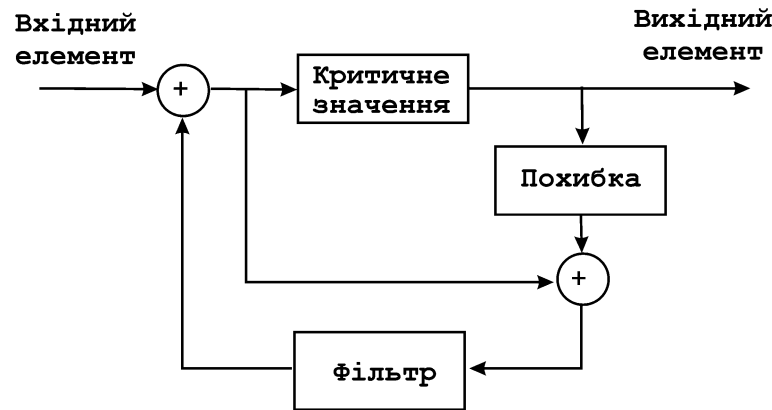


Рис. 6. Схема алгоритму поширення похибки

#### 4.1. Поширення похибки в одному напрямі

Зазвичай зображення опрацьовується зліва на право і зверху вниз. При поширенні похибки бінаризації лише в одному напрямі її значення додається до елемента  $x(i + 1, j)$  [42]. За таким алгоритмом похибка буде від’ємною, якщо значення півтонового елемента перевищує критичне; додатною, якщо навпаки, і дорівнюватиме нулю при раструванні 50%-го тону (5):

$$e(i, j) = \begin{cases} -e(i, j), & x(i, j) > 0,5 \\ 0, & x(i, j) = 0,5 \\ +e(i, j), & x(i, j) < 0,5 \end{cases} \quad (5)$$

Таким чином, при відтворенні тіней фактичне значення сусіднього півтонового елемента зменшується, а в світах збільшується. 50%-вий тон відтворюється за рахунок похибки, одержаної при раструванні попередніх ділянок. На відміну від звичайного растрування за критерієм 0.5 (див. п. 1), поширення похибки забезпечує одержання градації. Але при відтворенні зображення, яке містить великі ділянки суцільного тону, поширення похибки лише в одному напрямі приводить до формування вертикальних смуг (рис. 7) та утворення небажаних візерунків у вигляді “змієподібних” текстур у сюжетному зображенні (рис. 8).

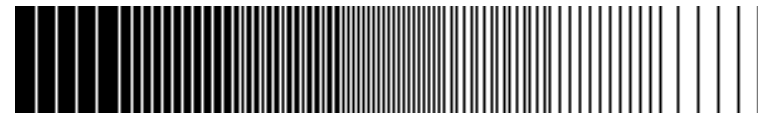


Рис. 7. Градаційна шкала, побудована способом поширення похибки в одному напрямі

#### 4.2. Алгоритм Флойда-Стейнберга

Вперше алгоритм бінаризації за принципом поширення похибки в кількох напрямках запропонували у 1976 р. Флойд та Стейнберг [3]. В процесі бінаризації кожного елемента (пікселя) цифрового зображення беруть участь чотири сусідніх елементи, похибка ділиться на 16 частин і додається до сусідніх пікселів за визначеним пріоритетом:

$$\begin{aligned} e(i, j) &= X(i, j) - B(f(i, j)); \\ X'(i + 1, j) &= X(i + 1, j) + (7/16)e(i, j); \end{aligned}$$



Рис. 8. Фрагмент сюжетного зображення, растрованого способом поширення похибки в одному напрямі

$$\begin{aligned} X'(i-1, j-1) &= X(i-1, j-1) + (3/16)e(i, j); \\ X'(i, j+1) &= X(i, j+1) + (5/16)e(i, j); \\ X'(i+1, j+1) &= X(i+1, j+1) + (1/16)e(i, j). \end{aligned} \quad (6)$$

В одному циклі опрацювання півтонового зображення беруть участь 4 сусідніх елементи, тому сума частин похибки складає 16 ( $16=2^4$ ). Як буде показано нижче, більшість фільтрів поширення похибки мають в основі знаменник, що дорівнює  $2^n$ , де  $n$  - кількість сусідніх елементів, які приймають участь в бінаризації елемента  $x(i, j)$ . Розклавши 16 на чотири близькі за значенням доданки, одержали коефіцієнти, значення яких зростають в арифметичній прогресії і визначають пріоритетні напрями поширення похибки.

Саме такий вигляд матриці пріоритетів (рис. 9) зумовлений тим, що напрям поширення похибки в значній мірі впливає на характер очікуваної растрової структури. Зрозуміло, що при опрацюванні еле-

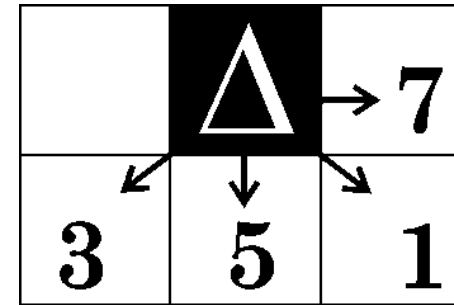


Рис. 9. Поширення похибки за алгоритмом Флойда-Стейнберга

мента  $x(i, j)$  зліва на право та зверху вниз, пріоритетні напрями поширення похибки – до пікселів з розташуванням  $(i+1, j)$  та  $(i, j+1)$ . Але поширення похибки тільки в двох напрямках приводить до утворення явно помітних діагональних структур в межах зображення (рис. 10).

Залучивши до циклу опрацювання сусідні піксели  $x(i-1, j-1)$  та  $x(i+1, j+1)$  з відповідними значеннями частин похибки, Флойд та Стейнберг досягли того, що в процесі опрацювання кожен піксел зображення, крім тих, що розташовані по контуру, отримує в сумі 16 частин похибки. А рівномірний розподіл похибки за всіма напрямками приводить до утворення більш рівномірної та хаотичної структури (рис. 10).

Простота алгоритму в поєднанні з високою якістю відтворення бінарного зображення сприяли його широкому застосуванню у різних сферах цифрової обробки зображень.

Але дослідження алгоритму показали, що, забезпечуючи одержання в цілому аперіодичної растрової структури, він продукує небажані регулярні утворення в ділянках 25%, 50%, 75% тону [48]. Особливо помітним є шахоподібний візерунок, який часто формується при відтворенні ділянки  $S_{\text{відн.}} = 50\%$  (рис. 10ж).

Регулярні структури, а також межі між регулярними та хаотичними ділянками зображення дуже помітні і викликають дискомфорт при спогляданні бінарного зображення. Тому пошук оптимального алгоритму, спрямований на покращення градаційної шкали растрового зображення з модульованою частотою став актуальним напрямом досліджень.

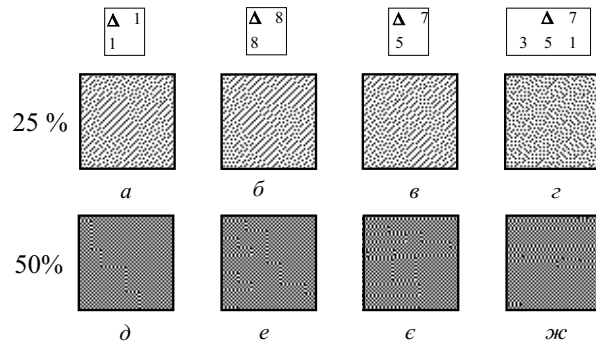


Рис. 10. Фрагменти растрових полів  $S$  25%,  $S$ 50%, генерованих за різними алгоритмами

#### 4.3. Удосконалення матриці пріоритетів поширення похибки

Запропонована Феном (Fan) [49] невелика модифікація матриці Флойда-Стейнберга (Floyd-Steinberg) за рахунок зміни “сусіда”  $x(i+1, j+1)$  на  $x(i-2, j-1)$ , майже не вплинула на характер растрової структури (11б). Ліпші результати забезпечила матриця із додатковим напрямом  $x(i-3, j-1)$  [50] та одночасною заміною значень пріоритетів поширення похибки (11в). Збільшення “сусідів” в протилежному до опрацювання напрямі [49] знову привело до утворення шахівниці в ділянці середніх тонів та інших регулярних утворень в межах зображення (11г). Як видно з рис. 11, дворядкові симетричні матриці (д, е) забезпечують одержання більш рівномірної структури, а із збільшенням напрямів опрацювання (є - з) структура наближається до чисто випадкової, причому зміна значень пріоритетів поширення похибки на структуру впливає не так суттєво, як при використанні дворядкових матриць.

Отже, збільшення матриці пріоритетів поширення похибки забезпечує відсутність регулярних утворень, але разом з тим приводить до втрати інформації при відтворенні зображення (рис. 12).

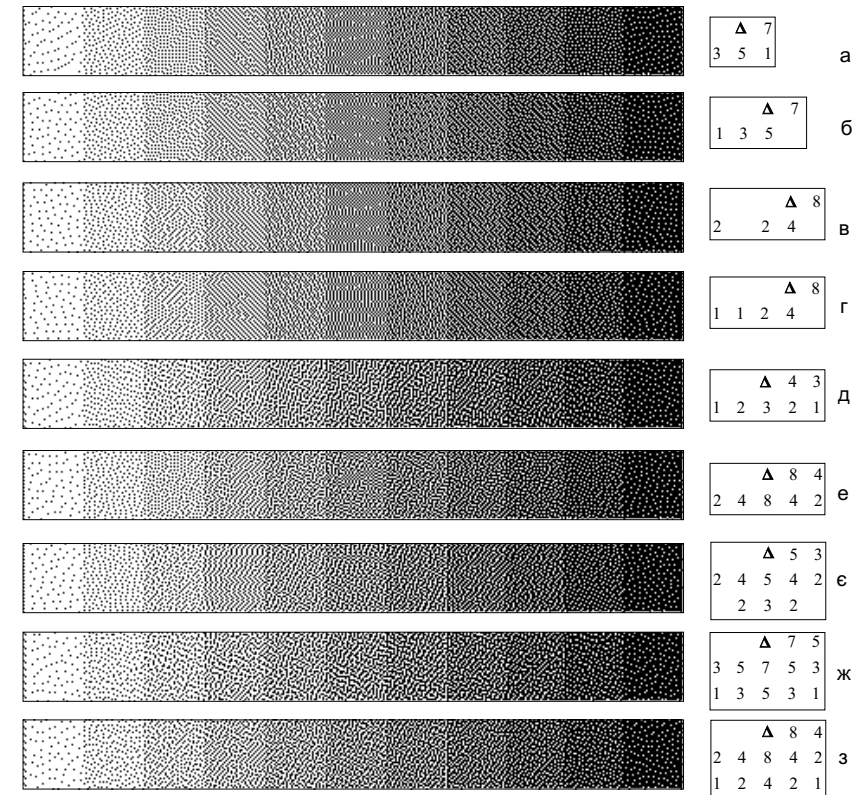


Рис. 11. Градаційні шкали, генеровані способом поширення похибки

#### 4.4. Вплив зміни напрямку опрацювання зображення на алгоритм поширення похибки

##### 4.4.1. “Серпантин”

Традиційно опрацювання зображення відбувається зліва на право і зверху вниз (рис. 13а). Такий напрям опрацювання забезпечує добрі результати, однак, має один недолік поширення похибки, відомий як направлений гістерезис - похибка має тенденцію поширюватися до правої межі зображення. Такий недолік дуже легко виправити, застосувавши так званий серпантинний напрям опрацювання зображення (рис. 13б).

Тобто, традиційний фільтр Флойда-Стейнберга при опрацюванні



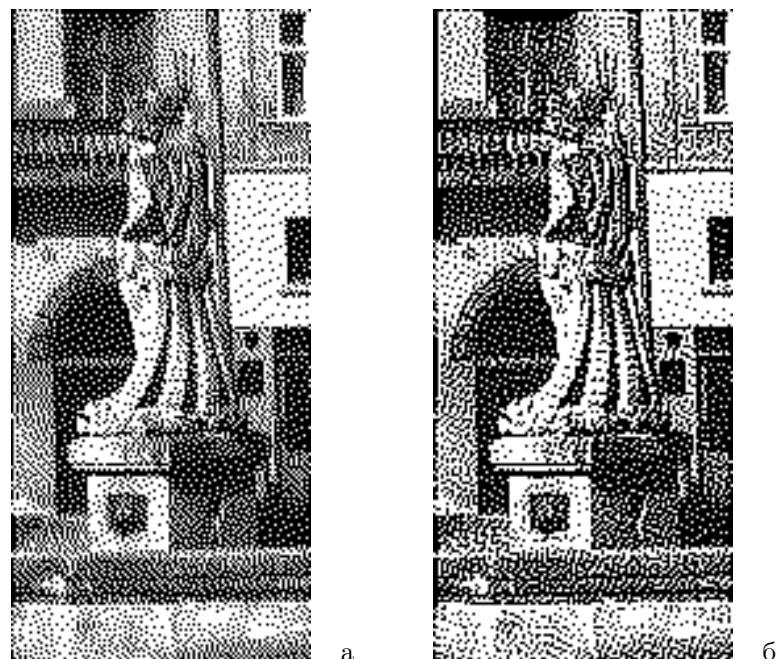


Рис. 12. Фрагменти сюжетних зображень, растрованих за алгорит-

мом: а –  $\begin{matrix} \Delta & 7 \\ 3 & 5 & 1 \end{matrix}$ , б –  $\begin{matrix} \Delta & 7 & 5 \\ 3 & 5 & 7 & 5 & 3 \\ & 1 & 3 & 5 & 3 & 1 \end{matrix}$

зображення за напрямом справа на ліво матиме вигляд  $\begin{bmatrix} 7 & \Delta \\ 1 & 5 & 3 \end{bmatrix}$  [6]. Зміна напрямку опрацювання забезпечує уникнення візуальних недоліків, характерних для алгоритму Флойда-Стейнберга, але разом з тим регулярні структури утворюються в межах інших полів градації.

#### 4.4.2. Поширення похибки по фрактальній кривій

Як альтернативу деякі автори пропонують використовувати для поширення похибки шлях, описаний фрактальною кривою [7, 53, 54], або, іншими словами, кривою просторового заповнення. Таку криву вперше описав Д. Пеано у 1896 р. і означив її як неперервну криву, що проходить через усі елементарні ділянки певної площини лише

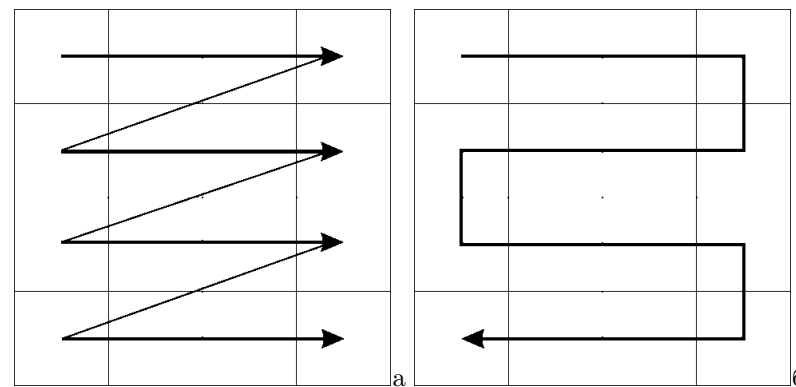


Рис. 13. Напрямок опрацювання пікселів зображення: а – традиційний, б – “серпантин”

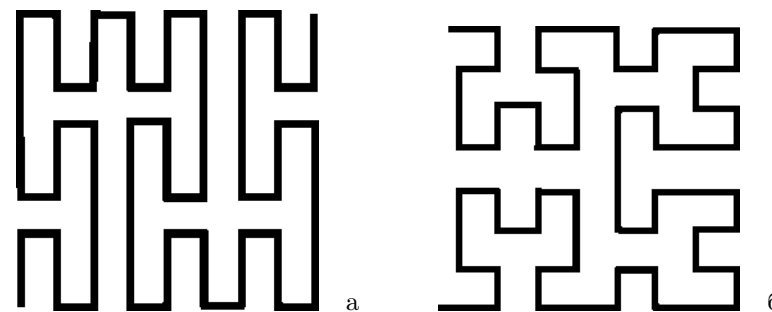


Рис. 14. Фрактальні криві 2-го порядку: а – крива Пеано, б – крива Гілберта.

один раз. Фрактальна крива будується рекурсивним копіюванням її елементарного фрагмента.

Розмірність фрактальної кривої можна виразити в контексті алгоритму мультикопіювання. Розмірність подібності визначається як [58]:

$$D = \frac{\log(n)}{\log(1/f)}, \tag{7}$$

де  $n$  – кількість копій,  $f$  – масштабний коефіцієнт послідовних іте-

рацій. Розглядаючи криву Гілберта, отримуємо:

$$D = \frac{\log [(4^n - 1)/(4^{n-1} - 1)]}{\log [(2^n - 1)/(2^{n-1} - 1)]}. \quad (8)$$

Криві Пеано (рис. 14а) та Гілберта (рис. 14б) найбільш часто використовують в обробці зображень. Як і при застосуванні серпантинного шляху, поширення похибки по фрактальній кривій усуває недоліки в одних ділянках градації, але сприяє їх виникненню в інших.

#### 4.5. Блокове поширення похибки

Відомі алгоритми поширення похибки, за якими опрацювання зображення відбувається не поелементно (рис. 15а), а за прямокутними блоками пікселів (рис. 15б) [57–60].

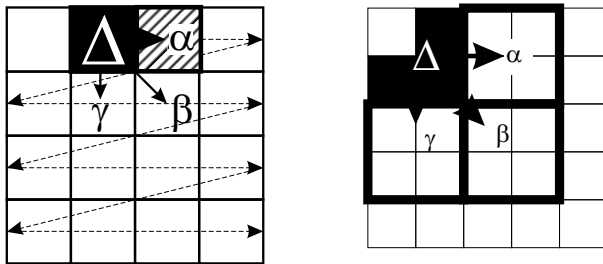


Рис. 15. а – Поелементне опрацювання зображення в процесі растрівання; б – Блокове опрацювання зображення в процесі растрівання

В роботі [59] розглядається обробка векторновеличинної послідовності за допомогою мультифільтра. Векторновеличинна послідовність створюється з груп пікселів півтонового зображення, які представляють собою блоки  $N \times M$  пікселів. Кожен блок розглядається як  $NM \times 1$  вектор, що дозволяє представити зображення як множину векторів.

Якщо  $x$  – векторне зображення, а кожен вектор має  $NM \times 1$  компонент, то  $z$ -перетворення  $x$ :

$$X(z_1, z_2) = \sum_{m_1} \sum_{m_2} x(m_1, m_2) z_1^{-m_1} z_2^{-m_2}. \quad (9)$$

Для фільтрування векторного зображення автори використовують мультифільтр.  $K \times K$  мультифільтр – послідовність, яку складають

$MN \times MN$  матриці.  $z$ -перетворення такого матричновеличинного фільтра  $\tilde{h}$ :

$$\tilde{H}(z_1, z_2) = \sum_{k_1=0}^{K-1} \sum_{k_2=0}^{K-1} \tilde{h}(k_1, k_2) z_1^{-k_1} z_2^{-k_2}. \quad (10)$$

Операція фільтрування мультифільтром  $\tilde{h}$  вхідної величини  $x$  є матрично-векторною згорткою:

$$y(m_1 m_2) = \sum_{k_1=0}^{K-1} \sum_{k_2=0}^{K-1} \tilde{h}(k_1, k_2) x(m_1 - k_1, m_2 - k_2), \quad (11)$$

де представляє вихідне зображення з  $NM \times 1$  векторів. В області визначення  $z$  матрично-векторна згортка стає лінійним перетворенням шляхом  $MN \times MN$  перетворення:

$$Y(z_1, z_2) = \tilde{H}(z_1, z_2) X(z_1, z_2). \quad (12)$$

Виходячи з вищевказаного, автори [59] розглядають кожен блок зображення як вектор  $MN$  елементів, а растрівання – як застосування простого скалярного чи векторного дискретизатора. У випадку скалярної дискретизації:

$$Q(u) = \begin{cases} Q(u_1) \\ Q(u_2) \\ \vdots \\ Q(u_{MN}) \end{cases}, \quad (13)$$

де

$$Q(u_i) = \begin{cases} 1, u_i \geq \frac{1}{2} \\ 0, u_i < \frac{1}{2} \end{cases}, \quad (14)$$

де  $u_i$  – значення кожного  $i$ -го пікселя в блоці  $M \times N$ , а  $i$  змінюється від 1 до  $MN$ .

В роботах [57, 59] закладена ідея обробки зображення за блоками матриці  $2 \times 2$  сусідніх елементів. Це дозволяє проводити обробку зображення за критеріями 5-ти рівнів (рис. 16), що суттєво розширює можливості генерування різноманітних растрових структур.

Результати досліджень [56] показали, що використання блокового принципу поширення похибки дозволяє поліпшити відтворення градації. Особливо важливими перевагами блокового принципу поширення похибки є те, що регулярні утворення відсутні навіть у 50% полі, а матриця поширення похибки майже не впливає на характер

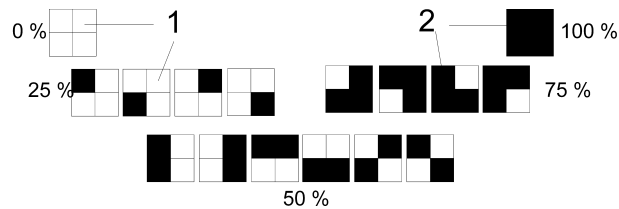


Рис. 16. Конфігурації растрових елементів для різних рівнів інтенсивності

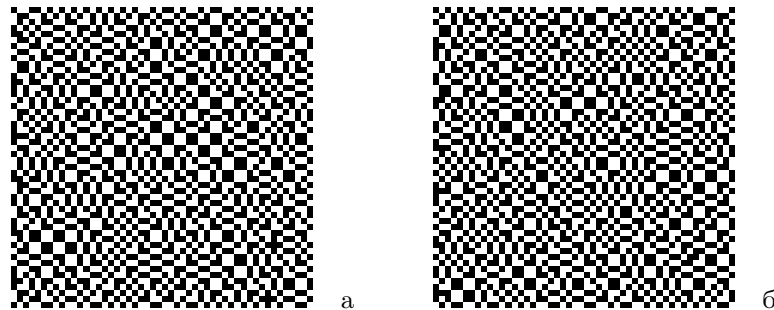


Рис. 17. Фрагмент растрового поля 50%, генерованого за алгоритмом: а –  $\begin{matrix} \Delta & 2 \\ 1 & 1 \end{matrix}$ , б –  $\begin{matrix} \Delta & 7 \\ 3 & 5 & 1 \end{matrix}$

растрової структури (рис.17), тоді як при поелементному опрацюванні матриця є вирішальним фактором.

Проведений порівняльний аналіз сучасних способів цифрового растрування зображень вказує на перспективність використання частотно-модульованого способу растрування. Основний принципом одержання бінарного зображення з модульованою частотою растрових елементів є спосіб вказання поширення похибки. Принципово нові результати відтворення градації забезпечують способи блокового опрацювання зображення, які дозволяють уникати утворення регулярних структур, що підтверджується поданими в роботі зразками зображень, генерованими з допомогою розробленої авторами програми “Растр-ЧМ-1” [61], а також результатами аналітичних досліджень робіт [62–66].

## Література

1. Bayer B. E., An optimum method for two level rendition of continuous-tone pictures//Proc. IEEE International Conference on Communications, Conference Record, 1973. - P. 11 - 26.
2. Rao T., Arce G., and Allebach J. Analysis of ordered dither for arbitrary sampling lattices and screen periodicities, IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 38, pp. 1981-1999, Nov. 1981.
3. Floyd R. and Steinberg L. An adaptive algorithm for spatial grayscale, Proc. Soc. Image Display, vol. 17, №2, pp. 75-77, 1976.
4. Anastassiou D. Error diffusion coding for A/D conversion, IEEE Trans. Circuits and Systems, vol. 36, pp. 1175-1186, Sept. 1989.
5. Bernard T. From - modulation to digital halftoning of images, Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing, pp. 2805-2808, May 1991.
6. Ulichney R. Digital Halftoning. MIT Press, 1987.
7. Velho L. and Gomes J. Digital halftoning with space filling curves. Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 91), 25(4):81-90, 1991.
8. Velho L. and Gomes J. Stochastic screening dithering with adaptive clustering. Proceedings of SIGGRAPH 95, pages 273-276, 1995.
9. Witten H. and Neal R. M. Using peano curves for bilevel display of continuous-tone images. IEEE Computer Graphics & Appl., 2:47-52, 1982.
10. Jarvis J. F., Judice C. N., and Ninke W. H. A survey of techniques for the display of continuous tone pictures on bilevel displays. Computer Graphics and Image Processing, 5:13-40, 1976.
11. Shiau J. and Fan Z. A set of easily implementable coefficients in error diffusion with reduced worm artifacts. SPIE, 2658:222-225, 1996.
12. Stucki P. Mecca-a multiple-error correcting computation algorithm for bilevel image hardcopy reproduction, 1981. Research Report RZ1060, IBM Res. Lab.
13. Eschbach R. Reduction of artifacts in error diffusion by mean of inputdependent weights. JEI, 2(4):352-358, 1993.
14. Damera-Venkata N. and Evans B. L. Adaptive threshold modulation for error diusion halftoning, IEEE Trans. On Image Processing, vol. 10, №1, pp. 104-116, Jan. 2001.
15. Sullivan J., Miller R., and Pios G. Image halftoning using a visual model in error diusion, J. Opt. Soc. Am. A, vol. 10, №8, pp. 1714-1724, Aug. 1993.

16. Eschbach R. Error-diffusion algorithm with homogeneous response in highlight and shadow areas, *J. Electronic Imaging*, vol. 6, pp. 1844-1850, July 1997.
17. Eschbach R. and Knox K. T. Error-diffusion algorithm with edge enhancement. *JOSA (A)*, 8(12):1844-1850, 1991.
18. Kang H.R. *Digital Color Halftoning*. SPIE Press, 1999.
19. Knox K. T. Evolution of error diffusion. *JEI*, 8(4):422-429, 1999.
20. Velho L. and Gomez J. M. Digital halftoning with space filling curves, *Computer Graphics*, vol. 25, pp. 81-90, July 1991.
21. Scheermesser T. and Bryngdahl O. Control of texture in image halftoning, *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 13, pp. 81-90, Aug. 1996.
22. Lau D. L., Arce G. R., and Gallagher N. C. Green-noise digital halftoning, *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, pp. 2424-2442, Dec. 1998.
23. Lau D. L., Arce G. R., and Gallagher N. C. Digital color halftoning with generalized error-diffusion and green-noise masks, *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 9, pp. 923-935, May 2000.
24. Levien R. Output dependent feedback in error diffusion halftoning, *IS&T Imaging Science and Technology*, vol. 1, pp. 115-118, May 1993.
25. He Z. and Bouman C. A. AM-FM halftoning: A method for digital halftoning through simultaneous modulation of dot size and dot density, *Proc. SPIE Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hardcopy, and Applications VII*, vol. 4663, pp. 322-334, Dec. 2001.
26. Lau D. L., Arce G. R., and Gallagher N. C. Green noise digital halftoning, *Proc. IEEE Conf. Image Processing*, vol. 2, pp. 39-43, Oct. 1998.
27. Damera-Venkata N. and Evans B. L. FM halftoning via block error diffusion, *Proc. IEEE Conf. Image Processing*, pp. 1081-1084, Oct. 2001.
28. Fan Z. Dot-to-dot error diffusion, *J. Electronic Imaging*, vol. 2, pp. 62-66, Jan. 1993.
29. Eschbach R. Pixel-based error-diffusion algorithm for producing clustered halftone dots, *J. Electronic Imaging*, vol. 3, pp. 198-202, Apr. 1994.
30. Damera-Venkata N. and Yen J. Image barcodes, *Proc. SPIE Color Imaging: Processing, Hardcopy, and Applications VIII*, vol. 5008, pp. 493-503, Jan. 2003.
31. Tanaka K., Nakamura Y., and Matsui K. Embedding secret information into a dithered multi-level image, *Proc. IEEE Military Communications Conf.*, pp. 216-220, Sept. 1990.

32. Baharav Z. and Shaked D. Watermarking of dither halftoned images, *HP Labs Technical Report*, 1998.
33. Baharav Z. and Shaked D. Watermarking of dithered halftone images, *Proc. SPIE Sym. Electronic Imaging*, 1999.
34. Kacker D. and Allebach J. P. Joint halftoning and watermarking, *IEEE Trans. Signal Processing*, №4, 2003.
35. Knox K. T. and Wang S.-G. Digital watermarks using stochastic screens, *Proc. SPIE*, 1997.
36. Sharma G. and Wang S.-G. Show-through watermarking of duplex printed documents, *Proc. SPIE Sym. Electronic Imaging*, Jan. 2004.
37. Fu M. S. and Au O. C. A multi-bit robust watermark for halftone images, *Proc. IEEE Int. Conf. Multimedia and Expo*, 2003.
38. Analoui M. and Allebach J. Model based halftoning using direct binary search, *Proc. SPIE Human Vision, Visual Processing, and Digital Display III*, vol. 1666, pp. 109-121, Feb. 1992.
39. Fu M. and Au O. Data hiding watermarking for halftone images, *IEEE Trans. Image Processing*, pp. 477-484, Apr. 2002.
40. Ioannis Katsavounidis and Jay Kuo C.-C. A Multiscale Error Diffusion Technique for Digital Halftoning *IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING*, v. 6, №3, 1997.
41. Шовгенюк М. В., Білорус В. Є., Миклушка І. З., Дудяк В. О. Ввід і вивід зображень в комп'ютерних видавничих системах. - Львів: УАД, 1998. - 144с.
42. Bruno J. Shrappe, *Hybrid Screening Algorithms*, 2080 - 840 Project Design - Rochester, NY, 1997. - 54 с.
43. Ulichney R., A review of halftoning techniques // [www.crl.research.digital.com/who/people/ulichney/bio.htm](http://www.crl.research.digital.com/who/people/ulichney/bio.htm).
44. Ulichney R. A. Dithering with blue noise // *Proceedings of the IEEE*.- January 1988.- Vol. 76.- №1.- P. 56 - 79.
45. Mitsa T. and Parker K.J. Digital halftoning technique using a blue noisemask // *Journal of the Optical Society of America*.- 1992. - vol. 9.- P.1920-1929.
46. Spaulding K., Miller R., and Schildkraut J. Methods for generating blue-noise dither matrices for digital halftoning // *Journal of Electronic Imaging*.- 1997.- vol. 6.- №2, P. 208-230.
47. Mitsa T., Parker K. J. Digital halftoning using a blue noise mask // *ICASSP 91. 1991 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE*, (Toronto, Canada) - May 1991.- vol. 2- P. 2809-2812.
48. Ostromukhov V., Herch R. D., Structure artifact free multi-level error diffusion algorithm // *Proceedings Europto Conf. Series, SPIE*

- Vol. 3409, International Symposium on Electronic Image Capture and Publishing, Zurich, May 1998. - P. 215 - 219.
49. Zhigang Fan. A simple modification of error-diffusion weights. In the Proceedings of SPIE'92.
  50. Пат. США N5353127, Method for quantization gray level pixel data with extended distribution set // Jeng-Nan Sh. (США); Zhigang F. (США); XEROX CORP (США); опубл. 10.04.1994.
  51. Sierra F. is unpublished, Pictorial presentations of his filters can be found in LIB17 (Developer's Den) of the CIS Graphics Support Forum as the files
  52. Burkes D., Presentation of the Burkes error filter for use in preparing continuous-tone images for presentation on bi-level devices.// The file BURKES.ARC, 1988.
  53. Пат. США N 5602943 Halftoning with space filling curves // Gomes J. M., Velho L. C., 1997.
  54. Європатент N 062067, Frequency modulation halftone screen and method for making same // Delabastita P., опубл. 19.10.1994.
  55. Feng G., Jiang L., He C., Xue Y. Chaotic spread spectrum watermark of optimal space-filling curves // Chaos solutions & fractal. - 2005. - april. /www.elsevier.com/locate/chaos
  56. Gostman C., Lindenbaum M. On the metric properties of discrete space-filling curves // IEEE Trans Image Process 1996;5(5):794-7/
  57. Патент України N 62093A. Спосіб цифрового растрівання зображень з модульованою частотою // Автори: Шовгенюк М.В., Писанчин Н.С. - Заявл. 17.10.2002. Опубл. 15.12.2003. Бюл. №12. - 5 с., іл.
  58. Патент N EP 0444290A2, Method and system for reproducing monochromatic and color images using ordered dither and error diffusion // Chan C. S. опубл. 04.09.1991
  59. Damera-Venkata N., Yen J., Monga V., Evans Brian L. Hardcopy Image Barcodes ViaBlock Error Diffusion IEEE TRANS. ON IMAGE PROCESSING September 28, 2004.
  60. Писанчин Н.С., Ковальський Б.М., Кміть Н.І. Новий спосіб цифрового растрівання зображень з модульованою частотою // Кваліологія книги – 2005. – випуск 7. – с. 49-59.
  61. Шовгенюк М.В., Ковальський Б.М., Писанчин Н.С., Глушак П.А. Комп'ютерна програма цифрового растрівання з модульованою частотою // Друкарство 2004. – №2. – с. 42-45.
  62. Шовгенюк М.В., Стефанишина Н.С. Особливості вінерівських спектрів растрового зображення з частотно-модульованою структурою // Поліграфія і видавнича справа. – 2002. – №38. –

- с. 103-112.
63. Стефанишина Н.С., Шовгенюк М.В., Дудяк В.О. Частотно-градацийні характеристики цифрового растрівання за принципом поширення похибки // Наукові записки УАД – 2002. – №5. – с. 96-103.
  64. Писанчин Н.С. Дослідження роздільної здатності растрових зображень з модульованою частотою // Друкарство – 2004. – №4. – с. 44-45.
  65. Шовгенюк М.В., Крохмальський Т.Є., Ковальський Б.М., Писанчин Н.С. Лінійність як критерій частотно-градацийних властивостей випадкових растрових структур // Технологія і техніка друкарства – 2004. – №2-3. – с. 55-59.
  66. Писанчин Н.С., Шовгенюк М.В., Ковальський Б.М. Порівняльний аналіз частотно-градацийних характеристик різних алгоритмів цифрового растрівання // Наукові записки УАД – 2004. – №7. – с. 35-39.

Препринти Інституту фізики конденсованих систем НАН України розповсюджуються серед наукових та інформаційних установ. Вони також доступні по електронній комп'ютерній мережі на WWW-сервері інституту за адресою <http://www.icmp.lviv.ua/>

The preprints of the Institute for Condensed Matter Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine are distributed to scientific and informational institutions. They also are available by computer network from Institute's WWW server (<http://www.icmp.lviv.ua/>)

Михайло Васильович Шовгенюк  
Надія Степанівна Писанчин  
Людмила Анатоліївна Дідух

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ЦИФРОВОГО РАСТРУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ З  
МОДУЛЬОВАНОЮ ЧАСТОТОЮ

Роботу отримано 13 вересня 2005 р.

Затверджено до друку Вченою радою ІФКС НАН України

Рекомендовано до друку семінаром відділу СТеКС

Виготовлено при ІФКС НАН України

© Усі права застережені