

УДК 655.027

М.В. Шовгенюк, Н.С. Стефанишина

**ОСОБЛИВОСТІ ВІНЕРІВСЬКИХ СПЕКТРІВ
РАСТРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ
З ЧАСТОТНО-МОДУЛЬОВАНОЮ СТРУКТУРОЮ**

Відтворення градації методом частотно-модульованого растрування відбувається шляхом задання певного значення просторової частоти для кожного конкретного рівня інтенсивності. Аперіодична растрова структура кожного поля градаційної шкали описується набором характерних періодів між елементами, властивим лише даному рівню. Тому кількісно оцінити частотно-модульовану структуру можна лише за допомогою спеціальних

методів, які дозволяють визначити усереднені значення частотних характеристик градаційної шкали.

Авторами в роботі [4] запропоновано розраховувати дискретні статистичні розподіли $p(l)$ характерних відстаней l_k між сусідніми елементами a_{ij} по рядках і стовпцях матриці-зображення. Звідси для досліджуваної растрової структури можна визначити величини: $\langle l \rangle$ – середньостатистичну віддаль між двома сусідніми елементами і відповідну їм середньостатистичну частоту $\langle \nu \rangle$ растрових елементів.

Для доведення ефективності запропонованого методу проаналізовано растрові структури, отримані за різними алгоритмами поширення похибки. Але кількість напрямів поширення не перевищувала чотирьох. Цілком ймовірно, що складніші хаотичні структури, створені за цими алгоритмами, потребують ретельнішого дослідження по всіх напрямках.

Відомо, що в поліграфії для дослідження традиційних амплітудно-модульованих структур використовують метод фур'є-аналізу. Зокрема, для виявлення муароутворюючих частот, які виникають при накладанні кольороподілених растрових зображень (багатофарбовий друк) [1]. Або ж при використанні робочих поверхонь з періодичною структурою, як, наприклад, анілоксовий вал для нанесення фарбового шару у флексографічному друці [2] чи формна основа у трафаретному.

У випадку частотно-модульованої структури в роботі [9] запропоновано за результатами розрахунку фур'є-спектра растрового зображення обчислювати усереднене значення радіальної частоти, яка слугитиме характеристикою для даного рівня інтенсивності по градаційній шкалі.

Метою даної роботи є використання спектрального аналізу для опису частотно-модульованої структури з довільним розподілом растрових елементів.

Сформулюємо загальний підхід. Розглянемо растрове зображення у вигляді двовимірної матриці $\mathbf{A} = [A_{nm}]$ розмірності $N \times M$ елементарних комірок, кожна з яких набуває бінарних значень: 0 (чорне/непрозоре) або 1 (біле/прозоре). Якщо записати функцію амплітудного пропускання комірки як

$$t_{n,m}(x, y) = A_{nm} \text{rect}(x) \text{rect}(y), \quad (1)$$

де $rect(x)$ – функція одиничного прямокутного імпульсу, то при освітленні растрового зображення плоскою когерентною хвилею формується розподіл комплексної амплітуди, який описується формулою [3]

$$f(x, y) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_{nm} rect(x - [n - (N + 1) / 2]) \times \times rect(y - [m - (M + 1) / 2]) . \quad (2)$$

Виходячи з (1) – (2), фур'є-спектр растрового зображення подаємо у вигляді добутку

$$F(v_x, v_y) = F_0(v_x, v_y) \Phi(v_x, v_y), \quad (3)$$

де $F_0(v_x, v_y)$ – фур'є-спектр елементарної комірки (1); $\Phi(v_x, v_y)$ – фур'є-спектр розподілу бінарних растрових елементів.

У роботі [5] отримано загальний аналітичний вираз для розрахунку вінерівського спектра просторових частот для фазових голографічних оптичних елементів з довільним розподілом фаз.

Використаємо цей метод для дослідження бінарного растрового зображення. В цьому випадку вінерівський спектр растрового поля в одиницях лінійних частот v , (mm^{-1})

$$|F(v_x, v_y)|^2 = \sin c^2(v_x) \sin c^2(v_y) \times M(v_x, v_y). \quad (4)$$

Тут $M(v_x, v_y)$ – модулююча функція має вигляд дискретного фур'є-розкладу

$$M(v_x, v_y) = \sum_{k=-(N-1)}^{N-1} \sum_{l=-(M-1)}^{M-1} Q_{kl} \exp(-i[2\pi k v_x + 2\pi l v_y]), \quad (5)$$

де Q_{kl} – кореляційні коефіцієнти розраховуються за формулою

$$Q_{kl} = \sum_{n=1}^{N-k} \sum_{m=1}^{M-l} A_{n+k, m+l} A_{nm}. \quad (6)$$

Зауважимо, що для довільно вибраної матриці $A = [A_{ij}]$ коефіцієнти Q_k завжди дорівнюють цілому числу, а $M(v_x, v_y) \geq 0$.

Набір кореляційних коефіцієнтів Q_k описує взаємне розташування растрових елементів. Причому для будь-якого елемента a_{ij} аналізуються всі оточуючі „сусіди” у будь-якому напрямі. Для матриці (рис. 1) $Q_{00} = 4$, Q_{30} , Q_{03} , Q_{21} , Q_{12} дорівнюють одиниці, усі інші – нулю.

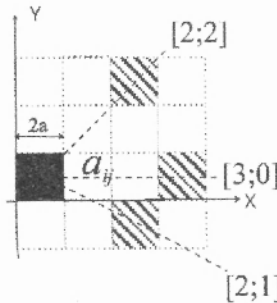


Рис. 1. Оцінка взаємного розташування растрових елементів

На основі отриманих значень кореляційних коефіцієнтів Q_k розраховуються по рядках і стовпцях частотні модулюючі функції.

$$M(v_x) = Q_{00} + 2 \sum_{k=1}^{N-1} Q_{k0} \cos 2\pi k v_x. \quad (7)$$

$$M(v_y) = Q_{00} + 2 \sum_{l=1}^{M-1} Q_{0l} \cos 2\pi l v_y. \quad (8)$$

Дані функції однозначно і повно характеризують частотні властивості растрового зображення з довільним розподілом растрових елементів. Для реалізації запропонованого методу розроблена спеціальна комп'ютерна програма*.

* Автори вдячні к. фіз.-мат. н. Крохмальському Т.С. за допомогу у підготовці комп'ютерної програми розрахунку спектрів.

Розглянемо спочатку два характерні типи растрових структур: випадкову та періодичну.

Випадкова структура характеризується рівномірним розподілом просторових частот. Тобто вірогідність знайти однакові комбінації відстаней між растровими елементами у рядках чи стовпцях такого зображення дуже мала. Причому тим менша, чим більша розмірність растрового поля. З рис.2а видно, що спектр частот рівномірний, ні одна з них не домінує. Слід зауважити, що цей вид спектра характерний для всіх хаотичних структур незалежно від способу їх генерування, а також залишається незмінним для всіх полів градаційної шкали.

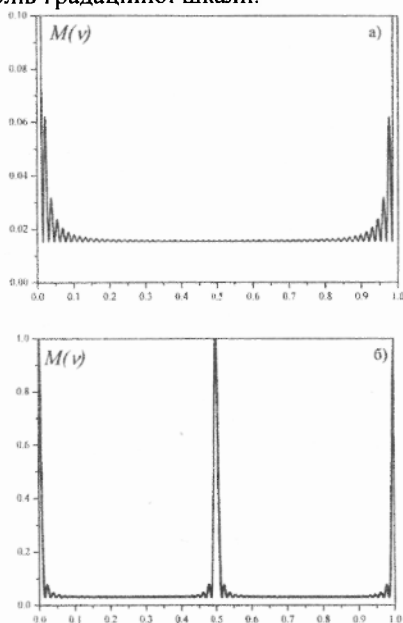


Рис. 2. Модулююча функція, яка характеризує растрову структуру:

а – випадкову; б – періодичну (шахівницю)

Елементи, що утворюють періодичний візерунок, навпаки, знаходяться на однаковій відстані один від одного. У випадку шахівниці частота розташування растрових елементів у стовпцях чи рядках зображення завжди дорівнює одиниці. Тому фор-

мується лише один, характерний періоду, як це видно на спектрі (рис.26). Присутність ще кількох частот, відмінних від нуля, у даному випадку зумовлена малою розмірністю досліджуваного поля (256x256 елементів).

Особливістю алгоритмів поширення похибки [3] є те, що вони дозволяють отримати різні бінарні зображення.

Залежно від рівня інтенсивності півтонового оригіналу отримуємо растрові візерунки, які можуть наближатися як до хаотичної, так і до впорядкованої структури.

Розглянемо фрагменти растрових зображень, що імітують $S_{\dots} = 12,5\%$ та $S_{\text{відн.}} = 50\%$ тону. Оскільки вони вважаються найбільш проблемними при репродукуванні частотно-модульованих структур, то при $S_{\text{відн.}} = 50\%$ дуже часто виникають регулярні візерунки, а при $S_{\dots} = 12,5\%$ і менше властива втрата елементів зображення.

Отже, за класичним алгоритмом Флойда – Стейнберга (див. таблицю) поле $S_{\text{відн.}} = 50\%$ відтворюється шахівницею та вертикальними смугами (рис.3а), відповідно, модулююча функція, що характеризує дану структуру по напрямку y , має один, яскраво виражений, максимум – одну переважаючу частоту (рис.4б, графік 1). А те, що структура не є суцільною шахівницею і містить вертикальні смуги, вказує значення $M < 1$ та більша кількість періодів між елементами, у стовпцях (рис.4а, графік 1).

Алгоритм	Автор
Δ 7 3 5 1	Флойд–Стейнберг[7]
Δ 5 3 2 4 5 4 2 2 3 2	Сієрра[8]
Δ 8 4 2 4 8 4 2	Баркес[6]

За алгоритмом Сієрри візерунок растрового поля $S_{\text{відн.}} = 50\%$ візуально нерегулярний (рис.3б), але, крім суб'єктивного відчуття діагонального напрямку, два чіткі максимуми модулюючої функції $M(v_y)$ та декілька домінуючих час-

тот розташування елементів у стовпцях (рис.4а – 4б, графік 2) вказують на те, що структура псевдовипадкова.

За алгоритмом Баркеса і візуально (рис. 3в), і за спектром частот (рис.4а – 4б, графік 3) отримуємо хаотичний візерунок.

Що стосується зображень, які відтворюють $S_{\dots} = 12,5\%$ сірого, то за алгоритмом Флойда–Стейнберга дістаємо хаотичний растровий візерунок (рис.5а), природу якого підтверджує модулююча функція (рис.6а – 6б, графік 1).

Алгоритм Сієрри $S_{\text{вид.}} = 12,5\%$ сірого відтворює періодичними діагональними візерунками (рис.5б), модулююча функція (рис.6а – 6б, графік 2) вказує на дві характерних частоти розташування елементів у стовпцях та три – у рядках зображення.

Структура, генерована за алгоритмом Баркеса, містить чіткі регулярні, навіть орнаментальні, візерунки, які складаються з періодичних вертикальних смуг і ланцюжків (рис.5в). У кожному рядку та стовпці зображення растрові елементи розташовані з певною частотою, значення якої можна вказати точно за розрахованим спектром. У даному випадку виділяються кілька основних частот: $\nu = 0,5$, $\nu = 0,33$, $\nu = 0,25$, $\nu = 0,16$. Перша з них домінує при розміщенні елементів у стовпцях зображення, друга – у рядках (рис.5а–5б, графік 3).



**Рис. 3. Фрагменти растрових полів $S_{\text{вид.}} = 50\%$, отриманих за алгоритмами:
1 – Флойда–Стейнберга; 2 – Сієрри; 3 – Баркеса**

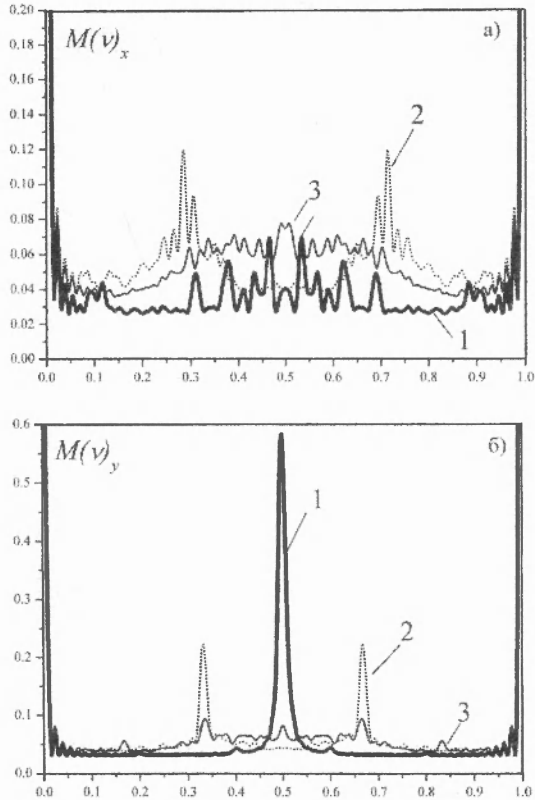


Рис. 4. Модуюча функція, яка описує растрову структуру, отриману за алгоритмами:
1 – Флойда–Стейнберга; 2 – Сіерри; 3 – Баркеса
(а – по горизонталі; б – по вертикалі)

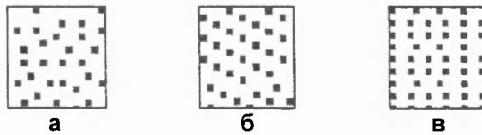


Рис. 5. Фрагменти растрових полів $S_{...} = 12,5\%$ отриманих за алгоритмами:
а – Флойда–Стейнберга; б – Сіерри; в – Баркеса

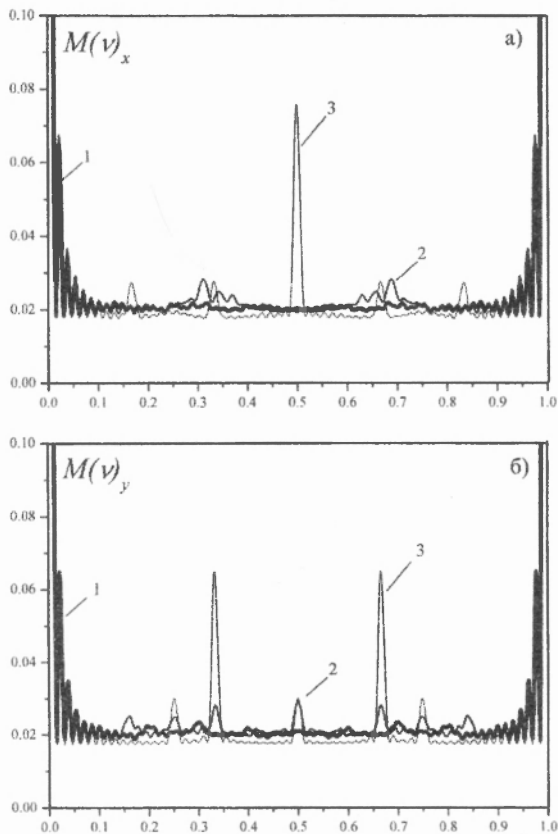


Рис. 6. Модулююча функція, яка описує растрову структуру, отриману за алгоритмами:
1 – Флойда–Стейнберга; 2 – Сієрри; 3 – Баркеса
(а – по горизонталі; б – по вертикалі)

Як бачимо, за алгоритмами поширення похибки можна отримати і чисто випадкову, і регулярну, і псевдовипадкову структури в межах однієї градаційної шкали. Причому одна і та ж сіра ділянка може бути відтворена періодичним чи випадковим візерунком, залежно від обраного алгоритму. Тому для детального вивчення дискретних зображень такого типу доцільно застосовувати метод спектрального аналізу, який, хоч і потребує склад-

них розрахунків, але дозволяє адекватно і точно дослідити природу структури та визначити її характерні особливості.

Запропонований метод можна узагальнити у випадку розрахунку двовимірних вінерівських спектрів, за якими можливо визначити характерні просторові частоти в довільному напрямі растрової структури.

1. Барановський І. В., Яхимович Ю. П. Поліграфічна переробка образотворчої інформації: Навч. посібник. Київ–Львів, 1988.
2. Запоточний В., Дослідження муароутворення в флексографічному друці з фотополімерних форм // Комп'ютерні технології друкарства: Зб. наук. праць. Львів: УАД, 2001.
3. Стефанишина Н., Шовгенюк М., Сучасні технології цифрового растровання зображень // Комп'ютерні технології друкарства: Зб. наук. праць. Львів: УАД, 2001.
4. Стефанишина Н., Шовгенюк М., Дудяк В. Частотно-градаційні характеристики цифрового растровання за принципом поширення похибки // Наукові записки. Львів: УАД, 2002. Вип. 5. С. 96–103.
5. Шовгенюк М.В., Крохмальський Т.С., Козловський М.П. Дослідження властивостей бінарних фазових елементів для голографічних систем розпізнавання образів: Препринт ІСМР–99–28U, 1999. 44 с.
6. Burkes V., Presentation of the Burkes error filter for use in preparing continuous-tone images for presentation on bi-level devices. 1988.
7. Floyd R. W., Steinberg L. An Adaptive Algorithm for Spatial Greyscale // Proc. SID, vol. 17/2. – pp. 75 – 77, 1976.
8. Sierra F. LIB17 (Developer's Den) of the CIS Graphics Support Forum as the files.
9. Ulichney R., A review of halftoning techniques <http://www.crl.research.digital.com/who/people/ulichney/bio.htm>.

Стаття надійшла до редколегії 15.01.2002