

УДК 535.4

Р.Ю. Довгалюк

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

## ПОРІВНЯННЯ КРИТЕРІЇВ РІЗКОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В ЦИФРОВІЙ ГОЛОГРАФІЇ

Розглянуто спосіб реєстрації цифрових голограм та отримання зображення під час їх відновлення за методом кутового спектру. Наведені статистичні, градієнтні та спектральні критерії для визначення ступеню різкості зображення. Проведено дослідження можливості їх використання для оцінювання різкості зображень отриманих під час відновлення цифрових голограм та визначено середній час їх розрахунку.

**Ключові слова:** цифрова голографія, метод кутового спектру, позаосьова голографія, критерій різкості зображення, оператор Лапласа, градієнт Тененбаума, градієнт Бренера, нормалізована дисперсія інтенсивності.

### Вступ

Голографія використовується у широкому класі задач: вимірюванні деформацій, вібраційному аналізі, мікроскопії, тривимірній візуалізації та ін. [1–3]. До останнього часу подальше впровадження оптичної голографії обмежувалось складнощами, пов'язаними з використанням спеціальних плівок для запису голограм та необхідності витратних матеріалів для їх обробки. Розвиток технологій виробництва CMOS та CCD матриць разом зі збільшенням обчислювальної потужності комп'ютерних систем дали змогу записувати інтерференційну картину предметного та опорного променів без голографічних плівок та здійснювати чисельне відновлення голограми, тим самим усунувши ключові недоліки оптичної голографії.

Зазвичай, під час запису цифрової голограми відстань між об'єктом та фотоматрицею відома лише в певних межах через похибки встановлення оптичних елементів або через самостійне переміщення досліджуваного об'єкту, як це має місце, наприклад, при дослідженні біологічних зразків на зразок клітин або мікроорганізмів. Завдяки можливості розрахунку комплексної амплітуди оптичного поля на будь-якій відстані від фотоматриці по заданій інтерференційній картині, стає можливим отримання зображення з найкращою різкістю при умові наявності певного критерію, величина якого буде пропорційна мірі різкості зображення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для систем фотофіксації був запропонований ряд методів для визначення найкращої фокусної відстані використовуючи лише поточне зображення (пасивний автофокус) або використовуючи інформацію з додаткових джерел, наприклад, лазерного або ультразвукового далекоміра (активний автофокус). Під час використання пасивного автофокусування різкість поточного зображення визначається шляхом розрахунку величини певного критерію, функція якого

дорівнюватиме максимальному або мінімальному значенню для фокусної відстані з найчіткішим зображенням.

У ряді робіт [4–5] було проведено огляд деяких критеріїв різкості зображень для використання в світлопольній мікроскопії у прохідному світлі а також в цифровій голографії [6–9]. Використання когерентного випромінювання в цифрових голографічних системах обумовлює наявність явищ на зразок спеклів та дифракційних смуг, які відсутні у системах з некогерентним випромінюванням, що може накласти обмеження на можливість використання деяких критеріїв різкості зображень, які успішно використовуються у некогерентних системах.

**Мета статті.** Враховуючи вищенаведене, можна стверджувати, що є актуальним дослідження можливості застосування та швидкодії розрахунку відомих критеріїв різкості зображень у задачах цифрової голографії.

### Виклад основного матеріалу

#### Запис та відновлення цифрових голограм.

При накладанні предметного та опорного променів у площині голограми (поверхня фотоматриці) утворюється інтерференційна картина, інтенсивність якої дорівнює [2]:

$$I_H = |U_r + U_o|^2 = |U_r|^2 + |U_o|^2 + U_r^* U_o + U_r U_o^*, \quad (1)$$

де  $U_r$  та  $U_o$  – комплексні амплітуди опорного та предметного променів, відповідно;  $*$  – позначення комплексно-спряжених величин.

Випромінювання, яке не розсіялось об'єктом (нульовий порядок дифракції), характеризується першими двома доданками ( $|U_r|^2 + |U_o|^2$ ), в той час як  $U_r^* U_o$  та  $U_r U_o^*$  описують +1 та -1 дифракційні порядки, які представляють собою дійсне та уявне зображення об'єкта, відповідно.

Після реєстрації інтерференційної картини необхідно провести демодуляцію цифрової голограми

суть якої полягає у виокремленні +1 дифракційного порядку [2]. Якщо для запису голограми використовувалась позаосьова (off-axis) схема, у якій предметний та опорний промені падають на площину запису під різним кутом, виділення +1 порядку може бути виконане за допомогою фільтрації смуговим фільтром частотного спектру інтерференційної картини. У випадку використання осьової (in-line) схеми необхідно використовувати метод фазозсувної голографії в рамках якого виконується запис декількох інтерференційних картин з внесенням різного фазового зсуву в опорний промінь [10].

У оптичній голографії відновлення предметного хвильового поля виконується шляхом опромінення голографічної плівки, із записаною інтерференційною картиною, опорним променем. У цифровій формі дана дія виконується шляхом множення цифрової голограми  $I_H$  (інтерференційна картина) з комплексною амплітудою опорної хвилі  $U_r$  [11].

Якщо демодуляція цифрової голограми не виконувалась, комплексна амплітуда хвильового фронту в площині голограми під час відновлення буде дорівнювати [12]:

$$U_{z=0} = U_r I_H = U_r \left( |U_r|^2 + |U_o|^2 \right) + |U_r|^2 U_o + U_r^2 U_o^* \quad (2)$$

Подальше використання такого початкового хвильового фронту не дасть змоги визначити фазу оптичного поля розсіяного або відбитого об'єктом, а амплітудна складова буде містити завади у вигляді розфокусованого уявного зображення. Якщо дифракційний порядок  $U_r^* U_o$  був виокремлений за допомогою смугового фільтру у голограму  $I_{HF}$ , комплексна амплітуда відновленої голограми в початковій площині буде дорівнювати:

$$U_{z=0} = U_r I_{HF} = U_r (U_r^* U_o) = |U_r|^2 U_o \quad (3)$$

З формули (3) можна безпосередньо визначити амплітуду предметного хвильового фронту  $U_o$  в площині запису голограми [3]:

$$U_o = \frac{I_{HF} U_r}{|U_r|^2} \quad (4)$$

Для використання формули (4) необхідна відома комплексна амплітуда опорної хвилі  $U_r$ , визначення якої може бути виконане чисельним шляхом за допомогою рівняння плоскої хвилі. Використання саме плоских хвиль для цифрового відновлення голограм обумовлюється можливістю прийняття їх комплексної амплітуди рівною 1, при умові перпендикулярного падіння, як це має місце у осьовій голографії. Для визначення комплексної амплітуди плоскої хвилі, яка падає під кутом до площини голограми (позаосьова голографія), використовується формула:

$$U(x, y, z) = A e^{ik(x \sin \theta \cos \phi + y \sin \theta \sin \phi + z \cos \theta)} \quad (5)$$

де  $A$  – амплітуда;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – хвильове число;  $\theta$  та  $\phi$  – кути в сферичній системі координат, які описують напрям падіння хвилі.

Зрозуміло, що неоднорідність амплітуди реального опорного променя та різноманітні завади, що вносяться оптичними елементами, роблять неможливим точне визначення  $U_r$  використовуючи лише формули. Тим не менш, шляхом фотореєстрації розподілу інтенсивності виключно опорного променя можна визначити складову  $|U_r|^2$ , яка в подальшому буде використана у формулі (3).

Після визначення комплексної амплітуди об'єкта  $U_o$  в площині голограми можливо перейти до наступного кроку **відновлення цифрової голограми**, суть якого полягає у знаходженні комплексної амплітуди оптичного поля в кінцевій площині на деякій відстані від площини запису голограми. Взаємозв'язок між комплексними амплітудами оптичних полів у даних двох площинах може бути описаний рівнянням Гельмгольца [2]:

$$(\nabla^2 + k^2)U(x, y, z) = 0 \quad (6)$$

Для розв'язку рівняння Гельмгольца можуть використовуватись формули Кірхгофа та Релея-Зоммерфельда [2; 13]:

$$U(\xi, \eta, z) = \frac{1}{i\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x, y, 0) \frac{e^{ikr}}{r} K(\theta) dx dy; \quad (7)$$

$$r = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2},$$

де  $U(\xi, \eta, z)$  та  $U(x, y, 0)$  – комплексні амплітуди оптичного поля у кінцевій та початковій площинах на відстані  $z$ , відповідно;  $K(\theta)$  – коефіцієнт, який для формули Кірхгофа дорівнює  $\frac{\cos \theta + 1}{2}$ , а для першого та другого розв'язку Релея-Зоммерфельда –  $\cos(\theta)$  та 1, відповідно.

Дифракційний інтеграл (7) може бути представлений у вигляді лінійної згортки комплексної амплітуди  $U(x, y, 0)$  з функцією імпульсного відгуку  $h(x, y, z)$ . З появою алгоритмів швидкого перетворення Фур'є операція знаходження амплітуди  $U(x, y, 0)$  може бути ефективно виконана таким чином:

$$U(\xi, \eta, z) = \mathfrak{F}^{-1} \{ \mathfrak{F} \{ U(x, y, 0) \} \cdot H(u, v, z) \}, \quad (8)$$

де  $\mathfrak{F}$  і  $\mathfrak{F}^{-1}$  – пряме та обернене перетворення Фур'є;  $H(u, v, z)$  – передавальна функція;  $\cdot$  – операція поелементного множення.

Оскільки поелементний добуток двох Фур'є образів відповідає циклічній, а не лінійній згортці, масив дискретних значень  $U(x, y, 0)$  необхідно доповнити нулями до розміру  $(2N-1) \times (2M-1)$  таким чином, що [14]:

$$U'_0 = \begin{bmatrix} U_0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{(2N-1) \times (2M-1)} ;$$

$$H = \begin{bmatrix} H(u_1, v_1, z) & \cdots & H(u_1, v_{2M-1}, z) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H(u_{2N-1}, v_1, z) & \cdots & H(u_{2N-1}, v_{2M-1}, z) \end{bmatrix} ; \quad (9)$$

$$U_z = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} \{ U'_0 \} \cdot H \}.$$

Окрім доповнення нулями, необхідно також здійснити фільтрацію величин комплексної амплітуди  $U_0$  аподизаційним фільтром, після використання якого значення біля країв будуть поступово зменшуватись до нуля. В іншому випадку двовимірний сигнал матиме розриви на кінцях (крайові ефекти), що призведе до появи у частотному спектрі додаткових складових, які в подальшому зіпсують відновлене зображення.

Для отримання масиву  $U(\xi, \eta, z)$  після розрахунку формули (8) з доповненими матрицями необхідно з отриманого результату обрати елементи в межах  $[1, N]$  та  $[1, M]$  (лівий верхній квадрант).

В подальшому для відновлення цифрових голограм використовувався метод кутового спектру, в рамках якого передавальна функція приймається рівною [13]:

$$H(u, v, z) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \sqrt{u^2 + v^2} \geq \frac{1}{\lambda}; \\ e^{ikz\sqrt{1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2}}, & \text{в іншому разі.} \end{cases} \quad (10)$$

Визначивши комплексну амплітуду об'єкта на деякій відстані, можливо визначити розподіл інтенсивності та фази:

$$I(x, y) = |U_z(x, y)|^2 ;$$

$$\phi(x, y) = \arctan \left( \frac{\text{Im}(U_z(x, y))}{\text{Re}(U_z(x, y))} \right). \quad (11)$$

**Критерії різкості зображень.** Визначивши розподіл інтенсивності  $I(x, y)$  можливо застосувати одну з функцій розрахунку критерію різкості зображення, яка в подальшому дасть змогу прийняти рішення про необхідність зміни відстані розрахунку предметного поля. Критерії оцінювання різкості зображень можна віднести до декількох типів: різницеві або градієнтні, статистичні та спектральні.

Ідея градієнтних критеріїв полягає у припущенні того, що різке зображення містить найбільшу кількість ділянок з різкою зміною яскравості, наявність яких визначається за допомогою лінійних фільтрів, що являють собою дискретні апроксимації диференціальних операторів. У випадку цифрових голограм дане припущення може виявитись хибним, оскільки навіть нечітке відновлене зображення містить різкі контури через наявність дифракційних смуг обумовлених використанням когерентного випромінювання.

Градієнт Тененбаума (також відомий як Tenengrad) представляє собою суму результату згортки зображення з вертикальною та горизонтальною масками Собеля [4–5]:

$$S_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * I;$$

$$S_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * I; \quad (12)$$

$$K_{\text{Tenenbaum}} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (S_x^2(m, n) + S_y^2(m, n)).$$

Одночасне виявлення як горизонтальних так і вертикальних перепадів яскравості може також виконуватись за допомогою оператора Лапласа. Відповідний критерій різкості буде визначатись як [6]:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} * I; \quad (13)$$

$$K_{\text{Laplace}} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S(m, n).$$

В рамках модифікованого оператора Лапласа використовуються абсолютні значення других похідних за рахунок чого усувається можливість взаємного виключення величин других похідних через різницю знаків [4; 15]:

$$\nabla_M^2 I = \left| \frac{\delta^2 I}{\delta i^2} \right| + \left| \frac{\delta^2 I}{\delta j^2} \right|. \quad (14)$$

Для дискретних даних модифікований оператор Лапласа може обраховуватись шляхом згортки з наступними масками, а сам критерій різкості визначений як [15]:

$$S_x = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} * I;$$

$$S_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * I; \quad (15)$$

$$K_{\text{LaplaceMod}} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (|S_x(m, n)| + |S_y(m, n)|).$$

Градієнт Бренера визначається як різниця величин сусідніх пікселів зображення вздовж однієї з осей [4–5]:

$$K_{\text{Brenner}} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (I(m, n) - I(m + t, n))^2, \quad (16)$$

де  $t$  – величина кроку, зазвичай, приймається рівною 2.

За рахунок невикористання згортки градієнт Бренера має меншу обчислювальну складність ніж

градієнт Тененбаума чи критерії на основі оператора Лапласа.

Статистичні критерії базуються на статистичному аналізі розподілу яскравості зображення. Найпростіший з даних критеріїв дорівнює загальній яскравості усього зображення [9]:

$$K_{\text{Amplitude}} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I(m, n). \quad (17)$$

Величина даного критерію для найрізкішого зображення амплітудного об'єкту є мінімальною, а для фазового – максимальною.

Критерій контрасту визначається як [5]:

$$K_{\text{Contrast}} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (18)$$

де  $I_{\text{max}}$  та  $I_{\text{min}}$  – найбільше та найменше значення величини пікселя зображення.

Критерій нормалізованої дисперсії інтенсивності визначається наступним чином [4–6]:

$$K_{\text{Variance}} = \frac{1}{\bar{I}} \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (I(m, n) - \bar{I})^2, \quad (19)$$

де  $\bar{I}$  – середнє значення інтенсивності елементів зображення.

Як і у випадку критерію контрасту, використання нормалізованої дисперсії базується на припущенні, що чітке зображення має більший контраст, ніж нечітке.

Ентропія зображення дискретизованого по  $L$  рівням яскравості розраховується як [5; 7]:

$$K_{\text{Entropy}} = - \sum_{i=1}^L P_i \log_2 P_i, \quad (20)$$

де  $P$  – відносна частота появи (імовірність) пікселя з  $i$  рівнем яскравості.

Спектральні критерії різкості базуються на операціях з просторово-частотним спектром зображення. Критерій інтенсивності спектру розраховується на основі Фур'є-образу зображення об'єкта [6; 16]:

$$K_{\text{Spectral}} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \log(1 + \mathfrak{F}(I)). \quad (21)$$

Варто наголосити, що використання критерію інтенсивності спектру можливе тільки при умові відсутності у відновленому зображенні нульового порядку дифракції.

**Експериментальні результати.** Для перевірки можливості використання названих критеріїв була використана цифрова голограма прозорої пластини з крапками з діаметром 5 мкм, яка записувалась в позаосьовій схемі (рис. 1) з використанням твердотілого Nd:YAG лазера з  $\lambda=532$  нм. Для запису інтерференційних картин використовувалась матриця OmniVision OV5647 з роздільною здатністю  $2592 \times 1944$  пікселів з розміром  $1,4 \times 1,4$  мкм. Відстань між фотоматрицею та пластиною складала  $6 \pm 1$  см.

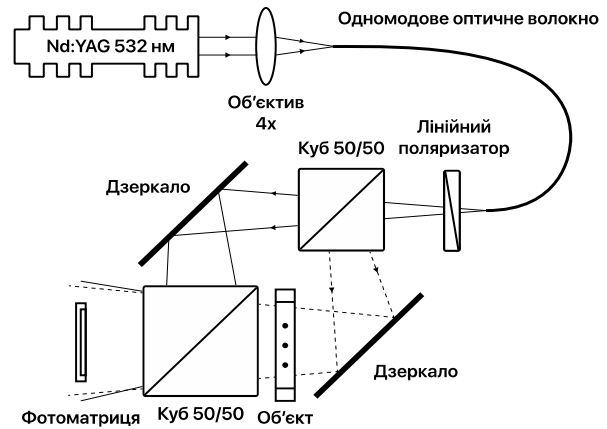


Рис. 1. Оптична схема макету

Після запису інтерференційної картини демодуляція голограми виконувалась шляхом виокремлення складової дійсного зображення смуговим фільтром з наступним множенням отриманої інтерференційної картини  $I_{\text{HF}}$  на комплексну амплітуду плоскої хвилі, визначеної за формулою (5), при чому кути падіння даної хвилі були обрані таким чином, щоб частотний спектр отриманого початкового предметного хвильового фронту  $U_0$  був відцентрованим.

Для подальшого числового моделювання розповсюдження початкового хвильового фронту  $U_0$  використовувались дискретні варіанти формул (9) та (10). Враховуючи, що для використовуваного сенсору умова  $\sqrt{u^2 + v^2} < 1/\lambda$  буде завжди виконуватись, дискретна передавальна функція методу кутового спектру буде дорівнювати:

$$H(m, n, z) = e^{ikz \sqrt{1 - \left(\lambda \left(n - \frac{N}{2}\right) \Delta u\right)^2 - \left(\lambda \left(m - \frac{M}{2}\right) \Delta v\right)^2}}; \quad (22)$$

$$\Delta u = \frac{1}{N \cdot \Delta_p};$$

$$\Delta v = \frac{1}{M \cdot \Delta_p},$$

де  $\Delta_p$  – розмір пікселя фотоматриці;  $\Delta u$  та  $\Delta v$  – вертикальна та горизонтальна різниця просторової частоти між сусідніми відліками.

Оскільки дискретні прямі за зворотні перетворення Фур'є у таких обчислювальних середовищах як Matlab чи Wolfram Mathematica використовують нецентровані Фур'є спектри, тобто такі, у яких нульова просторова частота відповідає елементу з індексом (1,1), а не  $(N/2, M/2)$ , отриману матрицю величин передавальної функції, обчисленої за формулою (22), необхідно привести до нецентрованого вигляду шляхом перестановки елементів 1 і 3 та 2 і 4 квадрантів. Дана операція виконується у названих середовищах за допомогою таких функцій як `fftshift` та `RotateRight`.

Розрахунок наведених критеріїв та відновлення цифрової голограми виконувалось у середовищі

Wolfram Mathematica комп'ютером з процесором Intel Core i7 6700K з частотою 4 ГГц та 16 Гб оперативної пам'яті. Для обрахунку критеріїв на основі градієнта Тененбаума (12) та операторів Лапласа (13; 15) використовувалась функція ListConvolve; для градієнта Бренера (16) – функція Differences; для обрахунку загальної яскравості (17) та підсумовування елементів в цілому – функція Total; для критерію контрасту (18) – Max та Min; для нормалізованої дисперсії (19) – Variance та Mean; для ентропії зображення (20) – ColorQuantize та ImageMeasurements, при чому інтенсивність зображення квантувалась по 256 рівням; для спектрального критерію (21) – Fourier та Log.

Визначення величин вказаних критеріїв здійснювалось для діапазону відстаней від 30 до 90 мм з кроком в 1 мм після чого отримані значення для кожного критерію були нормалізовані. Отримані графіки наведені на рис. 2–4.

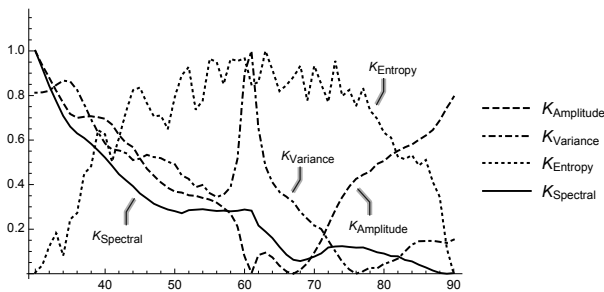


Рис. 2. Величини статистичних та спектрального критеріїв

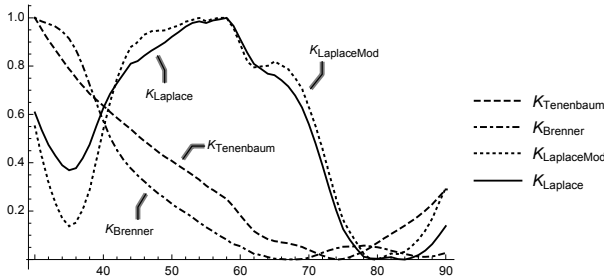


Рис. 3. Величини різницевих критеріїв

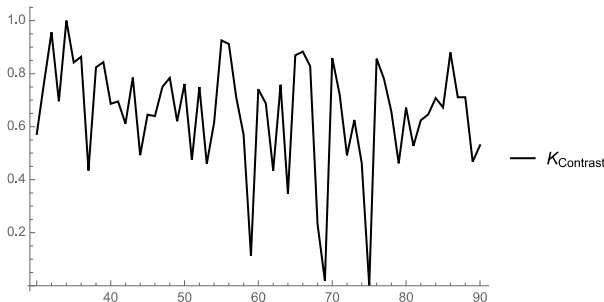


Рис. 4. Величина критерію контрасту

З отриманих даних можна стверджувати, що критерії градієнтів Бренера та Тененбаума а також критерій інтенсивності спектру не дали змогу визначити найкращу відстань відновлення голограми,

оскільки глобальний максимум їх функцій знаходився за межами вимірювань. Крім цього також виявився не ефективним критерій контрасту, функція якого продемонструвала наявність великої кількості максимумів та мінімумів. Величини функції інших критеріїв дозволили визначити такі оптимальні відстані: 67 мм (загальна яскравість), 61 мм (дисперсія яскравості), 63 мм (ентропія) та 58 мм (звичайний та модифікований оператори Лапласа). Після візуального порівняння зображень, отриманих під час відновлення голограми на відстані від 50 до 70 мм з кроком 1 мм, було встановлено, що найбільшу різкість має зображення, яке відновлювалось на відстані 61 мм (рис. 5).

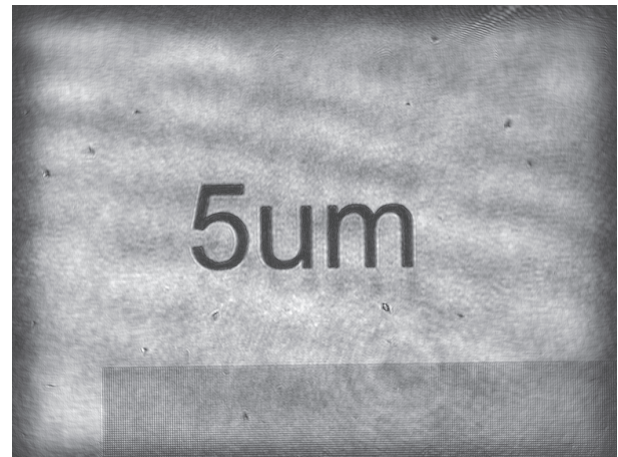


Рис. 5. Зображення відновленої голограми на оптимальній відстані

Під час обрахунку величин критеріїв різкості було також здійснене визначення середнього часу розрахунку кожного критерію для зображення з вказаною раніше роздільною здатністю. Отримані часові характеристики наведені у табл. 1.

Таблиця 1  
Середній час обчислення критеріїв різкості

Критерій	t, мс
Загальна яскравість	5,8
Контрастність	23,8
Градієнт Бренера	110,4
Нормалізована дисперсія інтенсивності	151,3
Оператор Лапласа	196,5
Градієнт Тененбаума	418,3
Модифікований оператор Лапласа	471,4
Інтенсивність спектру	546,1
Ентропія	965,2

Наведені дані свідчать, що час розрахунку критерію з найбільшою обчислювальною складністю є меншим за 1 с. Порівнюючи тривалість обрахунку вказаних критеріїв з часом відновлення голограми – 8,4 с, можна прийти до висновку, що у першу чергу

необхідно оптимізувати програмну реалізацію методу чисельного моделювання розповсюдження хвиль.

## Висновки

Розглянуто спосіб відновлення цифрових голограм а також відомі критерії оцінювання різкості зображень. Встановлено, що для задачі відновлення цифрових голограм найкращу точність визначення оптимальної відстані відновлення демонструє критерій нормалізованої дисперсії інтенсивності, який має просту програмну реалізацію та хорошу швидкодію.

## Список літератури

1. Myung K.K. *Interference techniques in digital holography* / K.K. Myung, Y. Lingfeng, J.M. Christopher // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. – Vol. 3. – No. 7. – 2006. – P. S518.
2. Picart P. *New Techniques in Digital Holography* / P. Picart. – John Wiley & Sons, 2015. – 302 p.
3. Poon T. *Digital Holography and Three-Dimensional Display* / T. Poon. – Springer US, 2006. – 430 p.
4. Osibote O.A. *Automated focusing in bright-field microscopy for tuberculosis detection* / O.A. Osibote, R. Dendere, S. Krishnan et al. // *Journal of microscopy*. – 2010. – No. 2. – P. 155-163.
5. Yazdanfar S. *Simple and robust image-based autofocusing for digital microscopy* / S. Yazdanfar, K.B. Kenny, K. Tasimi et al. // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16, No. 12. – P. 8670-8677.
6. Langehanenberg P. *Autofocusing in digital holographic phase contrast microscopy on pure phase objects for live cell imaging* / P. Langehanenberg, B. Kemper, D. Dirksen, G. Bally // *Applied Optics*. – 2008. – Vol. 47, No. 19. – P. 176-182.
7. Gillespie J. *The use of self-entropy as a focus measure in digital holography* / J. Gillespie, R.A. King // *Pattern Recognition Letters*. – 1989. – Vol. 9, No. 1. – P. 19-25.
8. Ilhan H.A. *Fast autofocusing in digital holography using scaled holograms* / H.A. Ilhan, M. Dogar, M. Ozcan // *Optics Communications*. – 2013. – Vol. 287. – P. 81-84.
9. *Focus plane detection criteria in digital holography microscopy by amplitude analysis* / F. Dubois, C. Schockaert, N. Callens, C. Yourassowsky // *Optics Express*. – 2006. – Vol. 14, No. 13. – P. 5895-5908.
10. Boaz J.J. *Geometric phase shifting digital holography* / J.J. Boaz, C.S. Narayanamurthy, T. Yatagai // *Optics Letters*. – Vol. 41, No. 11. – 2016. – P. 2648-2651.
11. Schnars U. *Digital recording and numerical reconstruction of holograms* / U. Schnars, W. P. Jüptner // *Measurement Science and Technology*. – 2002. – Vol. 13, No. 9. – P. 85.
12. Ayoub A. *Software Algorithm to Reconstruct 2D Images from Recorded 3D In-Line DHM Holograms* / A. Ayoub, P. Divós, S. Tóth, S. Tökés // *Proceedings of IEEE 2nd International Computer Engineering Conference*. – 2006. – P. 62.
13. Goodman J. W. *Introduction to Fourier Optics* / J.W. Goodman. – McGraw-Hill, 2005. – 491 p.
14. Shen F. *Fast-Fourier-transform based numerical integration method for the Rayleigh-Sommerfeld diffraction formula* / F. Shen, A. Wang // *Applied Optics*. – 2006. – Vol. 45, No. 6. – P. 1102-1110.
15. Nayar S.K. *Shape from focus* / S.K. Nayar, Y. Nakagawa // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 1994. – Vol. 16, No. 8. – P. 824-831.
16. Langehanenberg P. *Autofocusing in digital holographic microscopy* / P. Langehanenberg, G. Bally, K. Bjorn // *3D Research*. – 2011. – Vol. 2, No. 1. – P. 1-11.

Надійшла до редколегії 30.05.2017

**Рецензент:** канд. техн. наук проф. Г.Л. Лисенко, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

## СРАВНЕНИЕ КРИТЕРИЕВ РЕЗКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

Р.Ю. Довгалюк

Рассмотрен способ регистрации цифровых голограмм и получения изображения во время их восстановления за методом углового спектра. Приведены статистические, градиентные и спектральные критерии для определения степени резкости изображения. Проведено исследование возможности их использования для оценивания резкости изображений полученных во время восстановления цифровых голограмм и определено среднее время их расчета.

**Ключевые слова:** цифровая голография, метод углового спектра, внеосевая голография, критерий резкости изображения, оператор Лапласа, градиент Тененбаума, градиент Бренера, нормализованная дисперсия интенсивности.

## IMAGE SHARPNESS MEASURES COMPARISON FOR APPLICATION IN DIGITAL HOLOGRAPHY

R. Dovhaliuk

A way of digital holograms recording and image retrieval during their reconstruction using angular spectrum method is reviewed. Statistical, gradient and spectral image sharpness measures are described. The investigation of possibility of their usage for image sharpness determination obtained during digital hologram reconstruction is performed and average calculation time is determined.

**Keywords:** digital holography, angular spectrum method, off-axis holography, image sharpness measure, Laplace operator, Tenenbaum gradient, Brenner gradient, normalized intensity variance.