

### КРИТЕРІЙ ОПТИМІЗАЦІЇ ФІЛЬТРА ДРОБОВОГО СТЕПЕНЯ ДЛЯ ЦИФРОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ СПЕКЛ-ЗОБРАЖЕНЬ

The criterion of fractional power filter optimization for digital speckle correlation is proposed. Its analysis is conducted and results of the criterion approval on real speckle images of studied composite material surface are shown.

**Keywords:** *digital speckle correlation, fractional power filter, composite material.*

Запропоновано критерій оптимізації фільтра дробового степеня для цифрової кореляції спекл-зображень, проведено його аналіз та наведено результати апробації на реальних спекл-зображеннях досліджуваної поверхні композитного матеріалу.

**Ключові слова:** *цифрова кореляція спекл-зображень, фільтр дробового степеня, композитний матеріал.*

У задачах оптичного кореляційного розпізнавання образів використовують лінійний просторовий фільтр дробового степеня (ФДС) [1–3]. Такий фільтр використовують також у цифровій кореляції спекл-зображень (ЦКСЗ) для визначення переміщень фрагментів поверхні за переміщенням крос-кореляційного піка [4–6]. Якщо на вхід цифрового спекл-корелятора вводять два спекл-зображення, що описуються просторовими розподілами інтенсивності  $i_1(x, y)$  та  $i_2(x, y)$ , то крос-кореляційний сигнал на виході цифрового корелятора описується виразом [4, 6]

$$C = F_d^{-1} \left\{ \frac{I_1^* I_2}{|I_1^* I_2|^{1-\alpha}} \right\}, \quad (1)$$

де  $I_1(u, v) = F_d[i_1(x, y)]$ ;  $I_2(u, v) = F_d[i_2(x, y)]$  – дискретні фур'є-образи спекл-зображень  $i_1(x, y)$  та  $i_2(x, y)$ ;  $F_d^{-1}$  – символ дискретного зворотного перетворення Фур'є.

Оскільки для побудови поля переміщень за допомогою ЦКСЗ вхідні зображення  $i_1$  та  $i_2$  розбивають на  $M \times N$  однакових квадратних фрагментів  $i_{1mn}$  та  $i_{2mn}$ , то, враховуючи (1), вираз для крос-кореляційного сигналу  $C_{mn}$  від кожної  $m, n$ -ї пари цих фрагментів з однаковою нумерацією має такий вигляд:

$$C_{mn} = F_d^{-1} \left\{ \frac{I_{1mn}^* I_{2mn}}{|I_{1mn}^* I_{2mn}|^{1-\alpha}} \right\}, \quad (2)$$

де  $m = 1, \dots, M$ ;  $n = 1, \dots, N$ .

Для  $\alpha = 1$  ФДС перетворюється на класичний узгоджений фільтр і вирази (1)–(2) стають стандартними кореляційними функціями. Зі зменшенням  $\alpha$  кореляційний пік вужчає, а його інтенсивність зростає; однак одночасно підсилюються високочастотні шуми, внаслідок чого відношення пік/шум підвищується незначно. Вибираючи  $\alpha = 0,5$ , отримують так званий чисто фазовий фільтр, який можна вважати оптимальним для багатьох випадків. Зокрема, саме такий фільтр використовували в методі цифрового вимірювання переміщення спеклів [4], який відрізнявся від класичного методу ЦКСЗ лише застосуванням чисто фазового фільтра. Однак за рахунок високого рівня високочастотних шумів положення піка неможливо визначити з належною точністю. Тому додатково після фільтрації застосовували алгоритм біпараболічної інтерполяції для підвищення точності визначення координат піка [4].

Дослідження реальних поверхонь конструкційних матеріалів методом ЦКСЗ з використанням ФДС свідчать, що параметр  $\alpha$  не завжди повинен бути рівним 0,5 для досягнення мінімальних випадкових і систематичних похибок їх переміщень і деформацій, що можна пояснити випадковими частотними варіаціями шумових компонент спекл-зображень, які залежать від мікроструктури оптично шорсткої поверхні, параметрів оптичної схеми, розмірів фрагментів спекл-зображень та умов проведення експерименту. Так, наприклад, в [7] формували поля лінійних переміщень поверхні реального зразка і за мінімальними значеннями випадкових і систематичних похибок переміщення кореляційного піка визначали параметр  $\alpha$ , який приймав різні значення в залежності від розмірності фрагментів. Зокрема, для фрагмента розмірністю  $17 \times 17$  пікселів  $\alpha = 0,10$ ,  $33 \times 33$  піксели –  $\alpha = 0,14$ ,  $65 \times 65$  пікселів –  $\alpha = 0,16$ . Такий підхід дає змогу з високою точністю визначити оптимальне значення параметра  $\alpha$ . Однак він вимагає використання прецизійних пристроїв точної механіки і є досить трудомістким. Інший підхід для оцінки оптимального значення параметра  $\alpha$  не потребує використання складної прецизійної техніки і базується на обчисленні відношення сигнал/шум (ВСШ) для кореляційного поля, отриманого в результаті взаємної кореляції двох фрагментів  $i_{1mn}$  та  $i_{2mn}$  [8]. Отримані експериментальні залежності ВСШ від  $\alpha$  свідчать, що запропонований критерій є недостатньо ефективним, оскільки для більшості проведених вимірювань ВСШ монотонно зростає зі зменшенням  $\alpha$  і оцінити оптимальне значення  $\alpha$  можна лише наближено і при цьому в досить широкому діапазоні  $0 \leq \alpha \leq 0,3$  [8].

Щоб підвищити вірогідність відтворення полів переміщень і деформацій поверхні методами цифрової кореляції спекл-зображень, запропоновано новий критерій визначення оптимального параметра  $\alpha$  і проаналізовано його ефективність на тестових комп'ютерних моделях спекл-зображень.

**Аналітичний опис критерію.** Критерій базується на оцінці відношення сигнал/шум, в якому за сигнал приймаємо максимум нормованої відносно шуму інтенсивності кореляційного піка вихідного кореляційного поля, отриманого в результаті взаємної кореляції двох фрагментів за формулою (1), а за шум – середнє квадратичне відхилення (с.к.в.) дискретних відліків інтенсивності оточуючого пік шуму, а також на врахуванні площі перерізу піка на рівні половини його висоти. При цьому спекл-зображення розглядаються як двовимірні випадкові однорідні поля у широкому сенсі [9]. Автокореляційні функції таких полів характеризуються наявністю глобального максимуму або центральної пелюстки найбільшої інтенсивності, яку називатимемо кореляційним піком. Під час реалізації процедури ЦКСЗ формування піка можна розглядати як результат автокореляції двох однакових фрагментів  $i_{1mn}(x, y)$  та  $i_{2mn}(x, y)$ , зміщених один відносно другого на деяку віддаль  $d_{mn}$ , тобто  $i_{1mn}(x, y) = i_{2mn}(x - d_{xmn}, y - d_{ymn})$ , де  $d_{mn} = \sqrt{d_{xmn}^2 + d_{ymn}^2}$ . В дійсності ж  $i_{1mn}(x, y) \neq i_{2mn}(x - d_{xmn}, y - d_{ymn})$  внаслідок деформацій поверхні, захоплення частин сусідніх фрагментів під час виділення в комп'ютері фрагмента  $i_{2mn}(x, y)$ , незначної зміни умов освітлення та наявності часових флуктуаційних шумів апаратури під час реєстрації спекл-зображень. Тому в результаті взаємної кореляції фрагментів  $i_{1mn}(x, y)$  та  $i_{2mn}(x, y)$  формується не автокореляційна, а крос-кореляційна функція. І хоча її кореляційний пік незначно зменшується та розширюється порівняно з піком автокореляційної функції, однак його форма залишається майже незмінною.

Врахування площі перерізу кореляційного піка базується на таких міркуваннях. Оскільки фрагменти спекл-зображень є двовимірними випадковими однорідними полями у широкому сенсі, то пік описується двовимірною симетричною і

монотонно спадною функцією, якщо максимум піка прийняти за початок координат. Тому ширину  $\Delta p$  піка на рівні, що відповідає половині його максимуму інтенсивності  $I_{\max}$ , можна вважати пропорційною до ширини  $\Delta w$  верхівки піка, яку будемо визначати, прив'язуючись, наприклад, до критерію Релея [10], тобто визначати  $\Delta w$  в околі піка за інтенсивностями, які не менші за  $0,81I_{\max}$  (рис. 1).

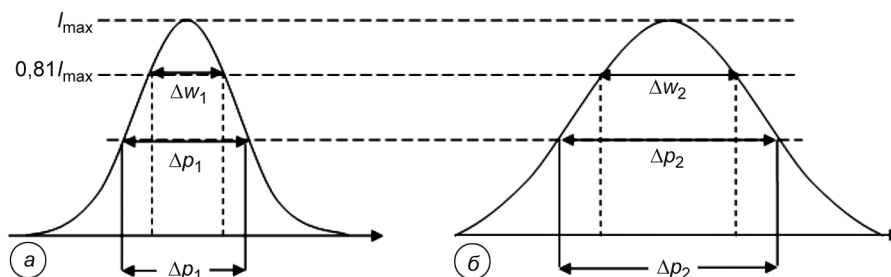


Рис. 1. Типові кореляційні функції однорідних випадкових полів: а – вузька кореляційна функція; б – широка кореляційна функція.

Ширину  $\Delta w$  можна розглядати як міру невизначеності положення максимуму кореляційного піка. Оскільки загальноприйнятою мірою невизначеності під час вимірювань є похибка [11], то зрозуміло, що чим меншою буде  $\Delta w$ , тим меншою буде похибка визначення положення піка. З певним наближенням можна вважати, що зменшення  $\Delta w$  пропорційне до зменшення  $\Delta p$ . Тому зі зменшенням  $\Delta p$  вказана похибка також зменшується (див. рис. 1). Керуючись вищенаведеними міркуваннями, а також враховуючи те, що площа перерізу піка на рівні половини його максимуму інтенсивності пропорційна  $(\Delta p)^2$ , запропонований критерій для  $m, n$ -го кореляційного поля подамо у вигляді такого аналітичного виразу:

$$\eta_{mn} = \frac{(I_{\max})_{mn} - (\overline{n_{kl}})_{mn}}{\sigma[(n_{kl})_{mn}]} \frac{1}{(\Delta p_{mn})^2} = \frac{\mu_{mn}}{(\Delta p_{mn})^2}. \quad (3)$$

Тут  $\mu_{mn} = \frac{(I_{\max})_{mn} - (\overline{n_{kl}})_{mn}}{\sigma[(n_{kl})_{mn}]}$  – ВСШ;  $(I_{\max})_{mn}$  – максимум інтенсивності  $m, n$ -го кореляційного піка;  $(n_{kl})_{mn}$  – інтенсивність  $k, l$ -го відліку шуму у  $m, n$ -му кореляційному полі, який враховують лише за умови  $(n_{kl})_{mn} \leq 0,5(I_{\max})_{mn}$ ;  $k = 1, \dots, K$ ;  $l = 1, \dots, L$ ;  $K \times L$  – розмірність фрагмента кореляційного поля;

$(\overline{n_{kl}})_{mn} = \left( \frac{\sum_{k,l} n_{kl}}{KL - j_{0,5} - 1} \right)_{mn}$  – середнє значення інтенсивностей відліків шуму, які відбирають за умови  $(n_{kl})_{mn} \leq 0,5(I_{\max})_{mn}$ ;  $j_{0,5}$  – кількість пікселів у кореляційному

полі, для яких  $(n_{kl})_{mn} > 0,5(I_{\max})_{mn}$ ;  $\sigma[(n_{kl})_{mn}] = \sqrt{\frac{\sum_{k,l} [(n_{kl})_{mn} - (\overline{n_{kl}})_{mn}]^2}{KL - j_{0,5} - 1}}$  – с.к.в. інтенсивності шуму у  $m, n$ -му кореляційному полі.

Для того, щоб у критерію (3) була така ж розмірність, як і у відношенні сигнал/шум  $\mu_{mn}$ , площу перерізу піка також слід пронормувати. Оскільки для  $\alpha = 1$  ФДС перетворюється на класичний узгоджений фільтр і ширина кореляційного піка у цьому випадку зазвичай є найбільшою, то пропонуємо нормувати площу перерізу піка для заданого  $\alpha$  відносно площі перерізу піка для  $\alpha=1$ , тобто під

площею перерізу  $(\Delta p_{mn})^2$  у формулі (3) слід розуміти таке відношення:

$$(\Delta p_{mn})^2 = \frac{(\Delta p_{mn})_{\alpha < 1}^2}{(\Delta p_{mn})_{\alpha = 1}^2}.$$

де  $(\Delta p_{mn})_{\alpha < 1}^2$  – площа перерізу піка для вибраного значення  $\alpha < 1$ ;  $(\Delta p_{mn})_{\alpha = 1}^2$  – площа перерізу для  $\alpha = 1$ .

Варто зауважити, що більш об'єктивним був би такий критерій, у якому замість ширини піка  $\Delta p$  була б ширина  $\Delta w$  верхівки піка, тобто

$$\eta'_{mn} = \frac{(I_{\max})_{mn} - (\overline{n_{kl}})_{mn}}{\sigma[(n_{kl})_{mn}]} \frac{1}{(\Delta w_{mn})^2} = \frac{\mu_{mn}}{(\Delta w_{mn})^2}.$$

Однак оскільки піки здебільшого є досить вузькими і їх площа займає всього декілька пікселів у кореляційному полі, то визначення  $\Delta w_{mn}$  із задовільною точністю неможливе без використання інтерполяційних алгоритмів, що в результаті робить процедуру оптимізації ФДС досить трудомісткою.

**Експериментальна верифікація критерію.** Для верифікації запропонованого критерію слід оцінити похибки вимірювання полів переміщень поверхні, використовуючи для цього метод ЦКСЗ з ФДС. Щоб оцінити такі похибки, необхідно експериментально реалізувати переміщення усїєї поверхні зразка без прикладання до нього навантажень, тобто лінійних переміщень твердого тіла поверхні. Відомі методики оцінки лінійних переміщень твердого тіла вимагають прецизійних засобів реалізації мікропереміщень, які є досить складними і унікальними [12]. Наявні засоби не давали змоги реалізувати мікропереміщення поверхні зразка з достатньою точністю, оскільки випадкові похибки їх позиціонування були сумірними з випадковими похибками переміщень спекл-зображень. Тому було вдосконалено запропонований нами спосіб оцінки похибок переміщення поверхні для визначення оптимального значення параметра  $\alpha$  ФДС, який описано в [13]. Вдосконалений спосіб базується на комп'ютерному моделюванні переміщень реальної поверхні на задану цілу кількість пікселів у заданому напрямку на основі лише одного зареєстрованого і записаного у пам'ять ПК цифрового спекл-зображення цієї поверхні. Для реалізації запропонованого способу в ПК вводять зареєстроване спекл-зображення вибраної ділянки поверхні зразка композиту і формують цифрове спекл-зображення з розмірністю  $L \times K$ .

Щоб змітувати переміщення поверхні у горизонтальному напрямі вздовж осі  $x$  на відстань  $\Delta l$ , кратну цілій кількості пікселів, розділяли отримане спекл-зображення на три частини: центральну з розмірністю  $L_x \times K$  пікселів і дві бічні з розмірностями  $\Delta l_1 \times K$  і  $\Delta l_2 \times K$ , як це показано на рис. 2, причому  $\Delta l = \Delta l_1 = \Delta l_2$ , а  $L = L_x + \Delta l_1 + \Delta l_2 = L_x + 2\Delta l$ . Тут використовували цифрове спекл-зображення ділянки поверхні одного із зразків однонаправлено-армованого скляними волокнами композитного матеріалу (матриця – смола ПН-15) з розмірністю  $L \times K = 640 \times 480$  пікселів. З отриманих частин формували два спекл-зображення, перше з яких (зображення 1) має розмірність  $(\Delta l_1 + L_x) \times K$  і відповідає початковій ділянці поверхні (рис. 3а), а друге (зображення 2) – розмірність  $(L_x + \Delta l_2) \times K$  і відповідає ділянці поверхні, зміщеної на  $\Delta l_2$  пікселів відносно початкової ділянки (рис. 3б). Відстань  $L_x$  розглядали як цілу кількість пікселів, що є спільними одночасно для двох виділених спекл-зображень. Цю відстань легко визначити, виходячи з умов проведення експерименту. Отримані два спекл-зображення (див. рис. 3) розбивали на  $M \times N$  квадратних фрагментів однакової розмірності ( $64 \times 64$  піксели), після чого для побудови поля імітованих векторних переміщень поверхні здійснювали кореляцію усіх пар фрагментів з однаковими номерами і формували прямокутну грат-

ку кореляційних піків. Усі наведені вище операції здійснювали, використовуючи спеціально розроблену програму в середовищі програмування Object Pascal (оболонка Delphi).

На основі побудованої ґратки кореляційних піків визначали переміщення  $d_{mn}$  для кожного  $m, n$ -го фрагмента зміщеного спекл-зображення з розмірністю  $(L_x + \Delta l_2) \times K$  (зображення 2). Середнє значення переміщення зображення 2 (рис. 3а) відносно зображення 1 (рис. 3б) визначали за формулою

$$\bar{d} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N d_{mn}}{MN}. \quad (4)$$

Для проведення комп'ютерного моделювання переміщення реальної поверхні за допомогою запропонованого способу задавали переміщення  $\Delta l = \Delta l_1 = \Delta l_2$ , що дорівнює чотирьом пікселам (див. рис. 3). Переміщення  $\bar{d}$  обчислювали для всіх значень параметра  $\alpha$  фільтра дробового степеня (ФДС) – від 0 до 1,0 з кроком 0,01. В результаті проведених обчислень отримали графічну залежність переміщення  $\bar{d}$  поверхні від параметра  $\alpha$ , яка наведена на рис. 4. Як показує наведена залежність, найбільш близьке до  $\Delta l$  значення переміщення  $\bar{d}$  отримуємо, якщо  $\alpha = 0,25$ . Це і є шукане оптимальне значення параметра  $\alpha$  ФДС. Однак більш коректною процедурою для визначення оптимального значення параметра  $\alpha$  слід вважати обчислення систематичних і випадкових похибок вимірювання переміщень реальних спекл-зображень поверхні і визначення на основі проведених обчислень вказаних похибок мінімальної сумарної похибки, яка досягається для певного значення параметра  $\alpha$ , і саме яка буде критерієм оптимальності цього параметра для вибраної ділянки поверхні зразка.

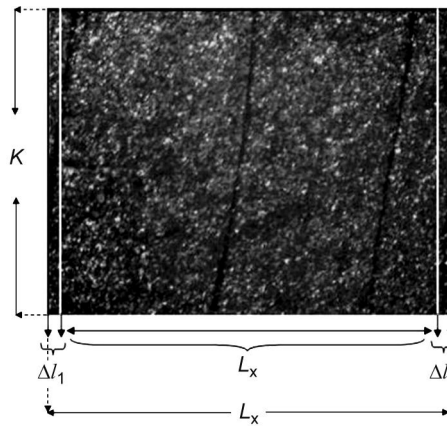


Рис. 2. Поділ спекл-зображення реальної поверхні однонаправлено-армованого ПКМ на три частини з розмірностями  $L_x \times K$ ,  $\Delta l_1 \times K$  і  $\Delta l_2 \times K$  для комп'ютерного моделювання переміщення ділянки поверхні вздовж осі  $x$  на цілу кількість пікселів.

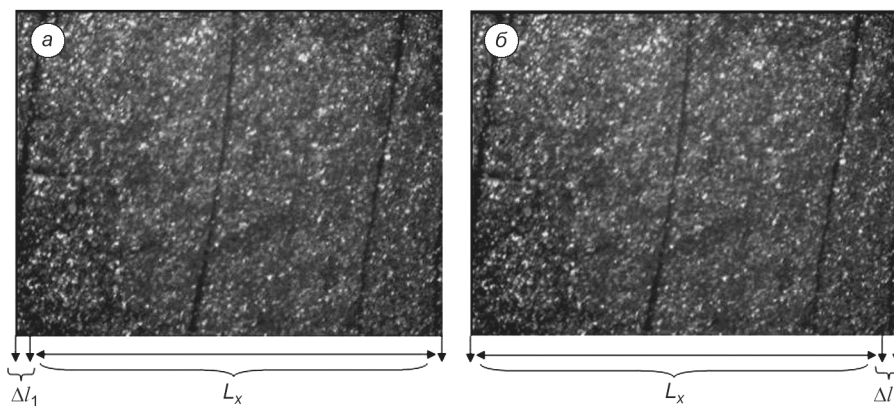


Рис. 3. Спекл-зображення ділянки однонаправлено-армованого ПКМ: а – зображення 1; б – зображення 2.

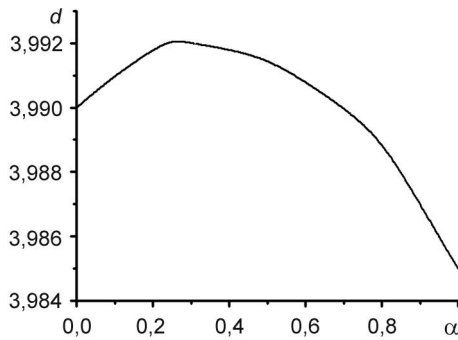


Рис. 4. Залежність переміщення  $\bar{d}$  від параметра  $\alpha$  фільтра дробового степеня для спекл-зображення ділянки поверхні ПКМ.

Тому, використовуючи отримані значення переміщення  $\bar{d}$ , а також задане переміщення  $\Delta l$  зображення 2 обчислювали абсолютну систематичну  $\theta$  та випадкову  $\sigma$  похибки переміщень поверхні для різних значень параметра  $\alpha$  фільтра дробового степеня за формулами:

$$\theta = \bar{d} - \Delta l, \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (d_{mn} - \bar{d})^2}{MN}}, \quad (6)$$

Тут випадкову похибку  $\sigma$  розглядаємо як с.к.в. переміщень усіх кореляційних піків у ґратці, нормовану на кількість цих піків.

Загальну похибку вимірювання  $\Delta d$  для заданого значення параметра  $\alpha$  за довірчої імовірності  $P_{до\bar{v}} = 0,95$  обчислюємо за відомою формулою для сумарної похибки, наведеною в [14], а саме:

$$\Delta_{0,95} = |\theta| + t_{0,9}\sigma,$$

де  $t_{0,9}$  – квантильний коефіцієнт за довірчої імовірності  $P_{до\bar{v}} = 0,9$ , який для будь-якого випадкового розподілу за  $P_{до\bar{v}} = 0,9$ , в тому числі і гауссівського, становить 1,6.

У нашому випадку сумарну похибку  $\Delta d$  подамо так:

$$\Delta d = |\theta| + 1,6\sigma. \quad (7)$$

Під час проведення комп'ютерного моделювання переміщення реальної поверхні за допомогою запропонованого способу отримували зображення 1 і 2 зразка однонаправлено-армованого ПКМ, після чого зображення 2 переміщали на відстань  $\Delta l = \Delta l_2 = 4$  пікселі відносно зображення 1 (див. рис. 3), причому розмірності цих зображень становили  $(640 - \Delta l) \times 480$  пікселів. Визначивши переміщення  $d_{mn}$ , усіх фрагментів зображення 2, обчислювали  $\bar{d}$ ,  $\theta$ ,  $\sigma$  і  $\Delta d$  за формулами (4)–(7) відповідно для різних значень параметра  $\alpha$  ФДС в межах  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Крок між сусідніми значеннями  $\alpha$  становив 0,01.

У таблиці наведені отримані за результатами проведеного експерименту значення  $\bar{d}$ ,  $\theta$ ,  $\sigma$  і  $\Delta d$  для різних значень  $\alpha$ .

**Значення абсолютних систематичної ( $\theta$ ), випадкової ( $\sigma$ ) та сумарної ( $\Delta d$ ) похибок вимірювання переміщення спекл-зображення ділянки поверхні зразка ПКМ (одиниця вимірювання – 1 піксел)**

$\alpha$	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35
$\theta \times 10^{-3}$ px	-10	-9,6	-9	-8,5	-8,2	-7,91	-8	-8,12
$\sigma \times 10^{-3}$ px	4,1	4,0	3,5	3,4	3	2,5	2,7	2,8
$\Delta d \times 10^{-3}$ px	14,1	13,6	12,5	11,9	11,2	10,41	10,7	10,92

$\alpha$	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75
$\theta \times 10^{-3}$ px	-8,2	8,3	-8,5	-8,8	-9,2	-9,5	-10	-10,4
$\sigma \times 10^{-3}$ px	2,8	2,9	3	3,1	3,3	3,5	3,7	4,0
$\Delta d \times 10^{-3}$ px	11	11,2	11,5	11,9	12,5	13	13,7	14,4

$\alpha$	0,8	0,85	0,9	0,95	1
$\theta \times 10^{-3}$ px	-11	-11,9	-13	-13,8	-15
$\sigma \times 10^{-3}$ px	4,5	4,6	4,8	5,0	5,1
$\Delta d \times 10^{-3}$ px	15,5	15,5	17,8	18,8	20,1

З таблиці видно, що сумарна похибка вимірювання переміщення спекл-зображення ділянки поверхні зразка ПКМ має найменше значення, якщо  $\Delta d_1 = 1 \times 10^{-2}$  px, що й відповідає оптимальному значенню параметра фільтра  $\alpha = 0,25$ . Отримана мінімальна сумарна похибка  $\Delta d$  відповідає мінімальним значенням як випадкової ( $\sigma_{1\min} = 2,5 \times 10^{-3}$  px), так і систематичної похибок ( $\theta_{1\min} = -7,9 \times 10^{-3}$  px).

Отже, запропонований спосіб дає можливість знайти оптимальне значення параметра ФДС  $\alpha$ , визначивши мінімальне значення сумарної похибки  $\Delta d$  переміщень спекл-зображення ділянки реальної поверхні досліджуваного зразка.

Щоб уникнути трудомісткої процедури визначення мінімальних похибок вимірювання переміщень спекл-зображення для визначення оптимального параметра  $\alpha$  ФДС, використовували запропонований критерій оптимізації. З цією метою

визначали середні значення цього параметра  $\eta = \frac{\sum_{m,n=1}^{M,N} \eta_{mn}}{MN}$  для кожного заданого

$\alpha$  і будували залежності  $\eta = \eta(\alpha)$ . На рис. 5 наведено таку залежність для спекл-зображення тієї самої ділянки поверхні зразка ПКМ. Як демонструє отримана залежність, максимальне значення параметра  $\eta$  досягається при тому ж самому значенні  $\alpha = 0,25$ .

Для порівняння на рис. 6. наведено залежність  $\mu = \frac{\sum_{m,n=1}^{M,N} \mu_{mn}}{MN}$  від  $\alpha$  для таких

самих фрагментів.

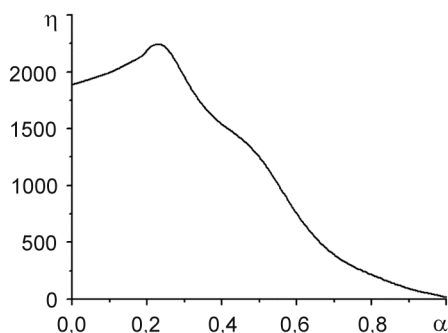


Рис. 5. Залежність  $\eta$  від параметра фільтра дробового степеня  $\alpha$  (для спекл-зображення ділянки поверхні хаотично-армованого ПКМ).

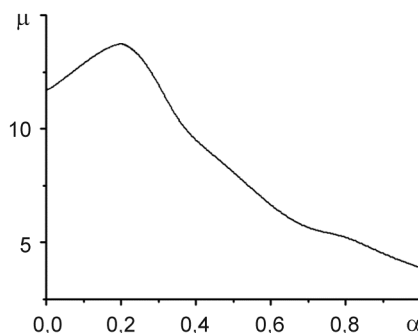


Рис. 6. Залежність  $\mu$  від параметра фільтра дробового степеня  $\alpha$  (для спекл-зображення ділянки поверхні хаотично-армованого ПКМ).

Як бачимо з цих графіків, знаходження оптимального значення  $\alpha$  у фільтрі дробового степеня для реальних спекл-зображень досліджуваної поверхні доцільніше проводити за допомогою критерію, який базується на використанні нормованої півширини кореляційного піка. Він дає можливість більш точно встановити оптимальний параметр  $\alpha$  для ФДС, при цьому зменшується невизначеність

у знаходженні максимуму положення піка, що дозволяє точніше визначити переміщення поверхні досліджуваних матеріалів.

### ВИСНОВКИ

Запропоновано новий критерій оптимізації фільтра дробового степеня, завдяки якому досягають мінімальних похибок полів переміщень поверхні, побудованих за допомогою методів ЦКСЗ. Проведено аналіз критерію та його апробацію на реальних спекл-зображеннях ділянок поверхонь хаотично армованих композитних матеріалів і виявлено його більш високу ефективність під час визначення оптимального значення параметра  $\alpha$  порівняно з традиційним критерієм, яким є ВСШ.

1. *Vijaya Kumar B. V. K., Hassebrook L.* Performance measures for correlation filters // *Appl. Opt.* – 1990. – **29**, № 20. – P. 2997–3006.
2. *Vijaya Kumar B. V. K.* Tutorial survey of composite filter designs for optical correlators // *Ibid.* – 1992. – **31**, № 23. – P. 4773–4801.
3. *Yao J., Chin L.* Power-adjusted fractional power radial harmonic filters for shift- and scale-invariant pattern recognition with improved noise robustness and discrimination // *Opt. Commun.* – 1999. – **162**, № 1. – P. 26–30.
4. *Digital speckle-displacement measurement using a complex spectrum method / D. J. Chen, F. P. Chiang, F. P. Tan, H. S. Don // Appl. Opt.* – 1993. – **32**, № 11. – P. 1839–1949.
5. *Sjödahl M.* Accuracy in electronic speckle photography // *Appl. Opt.* – 1997. – **36**, № 13. – P. 2875–2885.
6. *Fricke-Begemann T.* Optical Measurement of Deformation Fields and Surface Processes with Digital Speckle Correlation. // Thesis of the PhD dissertation. – University of Oldenburg, Physics Department, Applied Optics Group, 2002. – 167 p.
7. *Study of the deformation characteristics of window security film by digital image correlation techniques / W. Van Paeppegem, A. A. Shulev, I. R. Roussev et al. // Opt. Lasers Eng.* – 2009. – **47**. – P. 390–397.
8. *Максименко О. П., Муравський Л. І., Литвин М. О.* Вибір параметра інверсного фільтра для цифрового методу вимірювання зміщень спеклів // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – 2003. – Вип. 8. – С. 151–156.
9. *Гудмен Дж.* Статистическая оптика. – М.: Мир, 1988. – 528 с.
10. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 721 с.
11. *Орнатский П. П.* Теоретические основы информационно-измерительной техники. – К.: Виш. шк., 1983. – 455 с.
12. *Study of the deformation characteristics of window security film by digital image correlation techniques / W. Van Paeppegem, A. A. Shulev, I. R. Roussev, S. De Pauv et al. // Opt. Lasers Eng.* – 2009. – **47**, № 3–4. – P. 390–397.
13. *Голинський І. С., Муравський Л. І., Половинко Т. І.* Оптимізація методу визначення параметра фільтра дробового степеня у кореляційній функції для аналізу спекл-зображень // Теоретична електротехніка. – 2009. – С. 118–123.
14. *Новицький П. В., Зограф І. А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.