

УДК 535.44

О. В. Пригун¹, А. С. Лапчук¹, Г. А. Пашкевіч², Ю. О. Бородін¹

¹Інститут проблем реєстрації інформації НАН України

вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

²Інститут фізики НАН Біларусі

пр. Незалежності, 68, 220072 Мінск, Рэспубліка Біларусь

Експериментальні дослідження рівня зменшення спеклових шумів за допомогою двовимірної дифракційної ґратки залежно від її швидкості переміщення та кута нахилу

Досліджено ефективність зменшення когерентного лазерного спеклового шуму за допомогою рухомого двовимірного (2D) дифракційного оптичного елемента, що базується на бінарній псевдовипадковій послідовності Баркера. Отримано експериментальні дані залежності контрасту спеклів від довжини хвилі лазерного випромінювання, висоти профілю дифракційної структури, швидкості її переміщення, а також від кута нахилу між вектором напрямку руху і напрямком у 2D-структурі дифракційної ґратки. Отримано значення коефіцієнта зменшення спеклового шуму 14, 16 та 3 для довжин хвиль 632,8 нм, 532 нм і 405 нм відповідно. Отримані експериментальні дані підтверджують високу ефективність розробленого методу зменшення спеклових шумів.

Ключові слова: лазерний проектор, спекли, шум, зменшення спеклів, дифракційний оптичний елемент, код Баркера, експеримент, швидкість, напрямок, кут нахилу.

Вступ

У лазерних проєкційних освітлювальних системах спекл-структури є небажаним чинником, який істотно спотворює інформацію про досліджуваний об'єкт, стаючи, таким чином, оптичним спекловим шумом.

Рівень спеклових шумів на зображенні визначається контрастом спеклів

$$C = \sigma / \bar{I}, \quad (1)$$

де σ — стандартне відхилення розподілу інтенсивності від однорідно освітленого

екрану з причини спеклового шуму; \bar{I} — усереднене значення інтенсивності освітлення в зображенні.

Для оцінки ефективності методів зменшення спеклових шумів застосовують коефіцієнт ослаблення спеклів, що визначається як відношення контрасту спеклів до застосування методу C_0 до контрасту після застосування C :

$$k = C_0 / C . \quad (2)$$

Розвиток методів зниження спеклових шумів є однією з актуальних проблем розробки лазерних проекторів [2] і когерентних систем освітлення.

Відомі методи усунення спеклового шуму, що спрямовані на розмиття спекл-структур у певному проміжку часу шляхом зменшення когерентності випромінювання лазерного проектора.

У роботах [3–5] було обґрунтовано, що найбільш ефективним методом зменшення спеклового шуму є розміщення рухомого дифузора в оптичній системі проектора в площині, яка сполучена до площини екрану. В якості такого дифузора у цих роботах пропонується дифракційний оптичний елемент (ДОЕ), що має регулярну 2D-структуру, яка заснована на використанні коду Баркера. Цей метод використовує всю апертуру об'єктива для отримання максимальної кутової декореляції випромінювання. Час декореляції в методі з рухомим ДОЕ знаходиться в межах усередненого часу часової роздільної здатності пересічного ока людини. Там же показано, що для декореляції за всіма можливими кутами падіння, необхідне просте лінійне зміщення ДОЕ на довжину N періодів коду Баркера або M -послідовності. При цьому кут α нахилу ребер ДОЕ щодо напрямку його переміщення, який задовольняє умові

$$\operatorname{tg}(\alpha) = 1 / N , \quad (3)$$

є оптимальним для зменшення спеклових шумів.

Надалі в роботі [6] було проведено теоретичний аналіз та експериментальні дослідження застосування квазіспірального 2D ДОЕ, що обертається. В роботах [5, 7] було запропоновано оптичну схему лазерної освітлювальної системи, яка використовує 2D ДОЕ на основі бінарних псевдовипадкових послідовностей. Передбачено, що встановлений у середину цієї оптичної схеми ДОЕ лінійно-поступально рухається перпендикулярно напрямку лазерного випромінювання. В роботі [5] лише теоретично без експериментального підтвердження було обґрунтовано існування найбільш ефективних значень параметрів запропонованої схеми зменшення спеклових шумів і розраховані їхні значення для певного ДОЕ. У [7] при теоретично розрахованих оптимальних параметрах оптичної схеми був експериментально виміряний коефіцієнт ослаблення спеклового шуму k (2), що підтвердило ефективність запропонованого методу. Проте, у цьому експерименті була виміряна ефективність зменшення спеклових шумів лише при оптимальних за теорією [5–7] фіксованих значеннях параметрів, тобто при довжині хвилі лазерного джерела світла $\lambda = 532$ нм, кута нахилу ДОЕ $\alpha = 4^\circ$ та швидкості прямолінійного переміщення $V \sim 27$ мм/с.

Для досягнення стабільності ефекту зменшення спеклових шумів та оптимізації методу потрібно дослідити роботу запропонованої в [5–7] схеми у широкому діапазоні видимого випромінювання, швидкостей переміщення та кутів нахилу ДОЕ. Це надасть можливість перевірити достовірність отриманих раніше теоретичних розрахунків, оптимізувати параметри схеми, вибрати такий діапазон параметрів, за якими ефект зменшення спеклів буде стійким до малих відхилень швидкості й кута нахилу. При цьому бажано дослідити режим з мінімальною швидкістю переміщення ДОЕ. Це надасть можливість отримати ефективний надійний прилад.

Тому в даній роботі представлені результати ретельного вивчення впливу параметрів згаданої вище схеми з 2D ДОЕ на ефективність зменшення спеклового шуму в лазерній проекційній освітлювальній системі. Експериментально досліджувалася залежність коефіцієнта зниження спеклового шуму k від швидкості лінійно-поступового переміщення 2D дифракційної ґратки в межах від 0 до 4 мм/с, кута між напрямком руху ДОЕ та напрямком розташування дифракційних елементів ґратки в межах від 0° до $4,5^\circ$, довжини хвиль лазерного випромінювання, що знаходяться у широкому видимому діапазоні оптичного спектра від 400 до 650 нм; часу фотоекспозиції, тобто часу декореляції, висоти рельєфу бінарної структури ДОЕ.

Експериментальна установка

Оптична схема пристрою для дослідження методу зменшення спеклового шуму за допомогою рухомого 2D ДОЕ подана на рис. 1.

До складу оптичної схеми входять такі компоненти: 1 — лазер; 2, 3 — дволінзовий коліматор розширювач лазерного пучка; 4 — рухомий бінарний двовимірний дифракційний оптичний елемент (2D ДОЕ); 5 — проекційний об'єктив; 6 — екран з шорсткою поверхнею; 7 — фотокамера; 8 — вхідна діафрагма фотореєструючого пристрою; 9 — об'єктив фотоапарата; 10 — світлочутлива фотодіодна матриця.

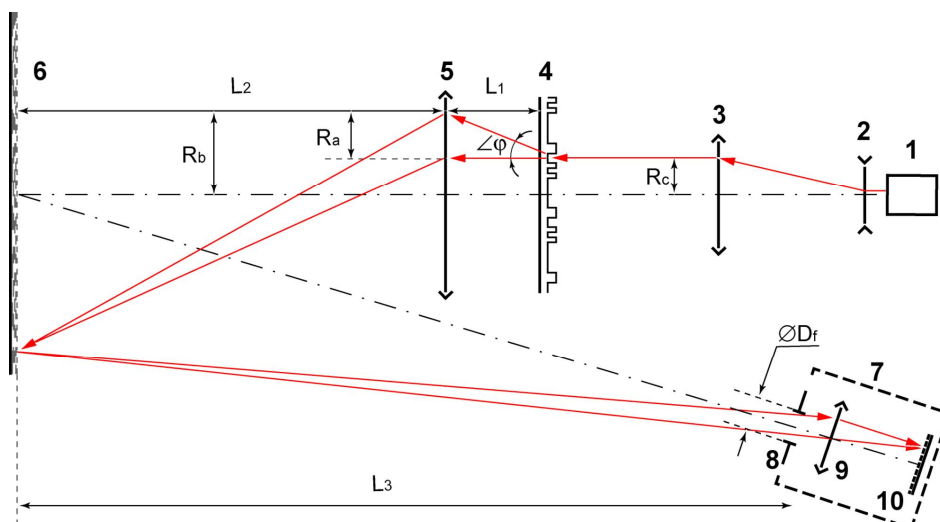


Рис. 1. Оптична схема пристрою для дослідження методу зменшення спеклового шуму

Дифракційний оптичний елемент оптичної схеми складається з фазової дифракційної ґратки (ДГ) 4 (рис. 1), яка розміщена на рухомій каретці, що рухаються перпендикулярно оптичній осі. Каретка має пристрій зміни кута нахилу дифракційної ґратки α відносно напрямку руху ДОЕ. Схематично рух ґратки показано на рис. 2.

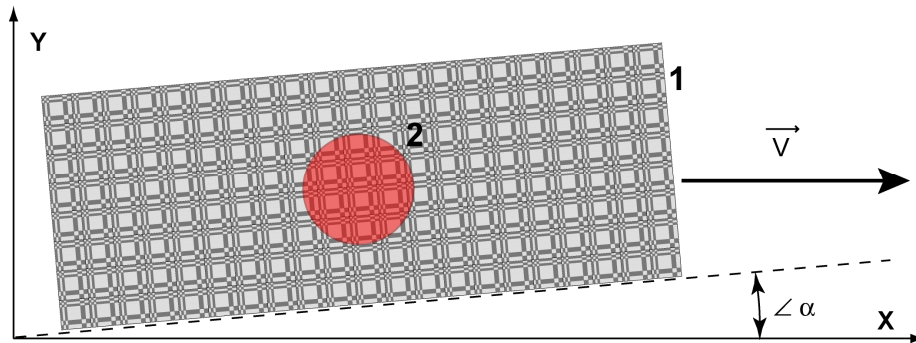


Рис. 2. Рух дифракційної ґратки 1 під кутом α відносно напрямку руху X зі швидкістю V . ґратка орієнтована перпендикулярно оптичній осі, вздовж якої розповсюджується лазерне випромінювання; 2 — лазерна пляма на поверхні ґратки

В установці можливо встановлювати швидкість переміщення каретки з ДОЕ у межах від 0,38 до 16 мм/с, а кут нахилу ДОЕ від 0° до 7° .

Для фотореєстрації був використаний фотоапарат «Nikon CoolPix P7000». Фотоапарат має світлочутливу ПЗЗ (CCD) матрицю розміром $7,49 \times 5,52$ мм (1/1,7"), що містить 9,98 мегапікселів. Для цього фотоапарату екранний розмір фотознімка у форматі RAW (NRW) становить 3648×2736 пкс, при роздільній здатності для друку 300 dpi. Фокальна відстань об'єктива складає 42,6 мм. До об'єктива фотоапарату додано набір зовнішніх діафрагм діаметром 1, 1,5 та 2 мм.

Шорстким екраном для червоного та зеленого лазерного випромінювання був використаний папір «Data Copy», який відповідає стандарту якості ISO 9001. Для уникнення або зменшення люмінесцентного відгуку для фіолетового лазерного випромінювання був застосований екран з матовою поверхнею з нанесеною пульверизатором нітроемаллю кольору «ivory-white». Треба зазначити, що вибір шорсткої поверхні із задовільним коефіцієнтом відбиття, який не люмінесцює під дією фіолетового лазерного випромінювання, залишається досі актуальним.

Щоб охопити видимий людським оком діапазон спектра було використано по чергово три джерела лазерного випромінювання з різною довжиною хвилі λ . Для червоного випромінювання 632,8 нм був застосований гелій-неоновий (He-Ne) газовий лазер ЛГН-207Б потужністю 1 мВт; для зеленого 532 ± 10 нм — напівпровідниковий лазер потужністю до 10 мВт; для фіолетового 405 ± 10 нм — напівпровідниковий лазер потужністю до 20 мВт.

Колімований і розширений лінзами 2 і 3 (рис. 1) лазерний промінь падає на ДОЕ. Після ДОЕ утворюється дифракційна картина, яка перекидається об'єктивом 5 на екран 6. ДОЕ розташований в оптичній системі проектора в площині, що спряжена до площини екрану. Розсіяне на шорсткій поверхні екрану лазерне світ-

ло утворює спеклову структуру на поверхні світлочутливої матриці 10 фотокамери 7. Фотокамера фіксує цю картину протягом часу експозиції фотозйомки.

Враховуючи викладене у роботах [4, 6], можна визначити необхідні умови та параметри оптичної схеми для дослідження методу зменшення спеклового шуму. Кут дифракційної розбіжності φ лазерного випромінювання, який виникає після ДОЕ і задає вхідну апертуру об'єктива 5, визначається як

$$\varphi \approx \lambda / T_0, \quad (4)$$

де T_0 — мінімальна довжина елемента дифракційної структури; λ — довжина хвилі лазерного проміння, що падає на ґратку. Таким чином, діаметр об'єктива 5 повинен бути більшим, ніж ширина лазерного пучка, тобто

$$D_5 > 2 * (L_1 * \tan(\varphi) + R_C), \quad (5)$$

де D_5 — діаметр об'єктива 5; L_1 — відстань між дифракційною ґраткою та об'єктивом 5; R_C — радіус колімованого лазерного пучка, що виходить після коліматора і падає на ДОЕ.

Узагальнюючи висновки, зроблені у роботах [4, 6], можна визначити базові вимоги до розташування елементів оптичної схеми (рис. 1) та до співвідношення параметрів цієї схеми:

$$L_3 > \frac{D_f * T_0 * N * L_2}{2 * L_1 * \lambda}, \quad (6)$$

де, окрім визначених вище параметрів, L_2 — відстань від об'єктива 5 до екрану 6; L_3 — відстань від екрану 6 до фотокамери 7; D_f — діаметр отвору вхідної діафрагми фотокамери; N — кількість найменших дифракційних елементів, що складають базову бінарну послідовність дифракційної ґратки ДОЕ.

Дифракційний оптичний елемент

Дифракційна ґратка ДОЕ має розмір 50×50 мм і виконана з обробленого фоторезисту Shipley, нанесеного на скляну пластину розміром 100×100×2 мм. Дифракційна структура ґратки створена методом фотолітографії.

Основа ДОЕ — це двовимірний фазовий дифракційний елемент. В основі дифракційної структури ДОЕ покладена одинична бінарна псевдовипадкова послідовність Баркера з N мінімальних дифракційних базових елементів T_0 . У нашому випадку у бінарному виразі ця послідовність має чисельний вигляд, або код «1010000001100».

Довжина такої послідовності з N мінімальних елементів визначається як:

$$T = T_0 * N. \quad (7)$$

Гратки, що досліджувалися, мають мінімальну довжину базового дифракційного елемента $T_0 = 6$ мкм, а їхня кількість $N = 13$. Таким чином, довжина одиначної послідовності Баркера $T = 78$ мкм. Для цієї ґратки за теорією [5–7] оптимальним кутом нахилу буде $\alpha = 4,4^\circ$.

Найменшою примітивною 2D-ґраткою у чисельному вияві є матриця розміром 13×13 базових елементів. Кожен рядок цієї матриці є результатом булевої операції XOR одиначної бінарної послідовності з кожним наступним у черзі елементом цієї ж послідовності. Таким чином, на площині 2D одиначна послідовність Баркера утворює найменшу примітивну комірку дифракційної ґратки, зсувом якої можна відтворити будь-який ДОЕ довільного розміру та форми.

В експерименті були задіяні дві дифракційні фазові ґратки з помітками Gr1 та Gr3. Ґратка Gr1 має висоту дифракційних елементів 0,45 мкм. Ґратка Gr3 має той же бінарний код, але висоту дифракційних елементів 0,43 мкм.

На рис. 3 представлено одержані за допомогою тунельного мікроскопу фізичні параметри, структура та будова ґратки Gr3.

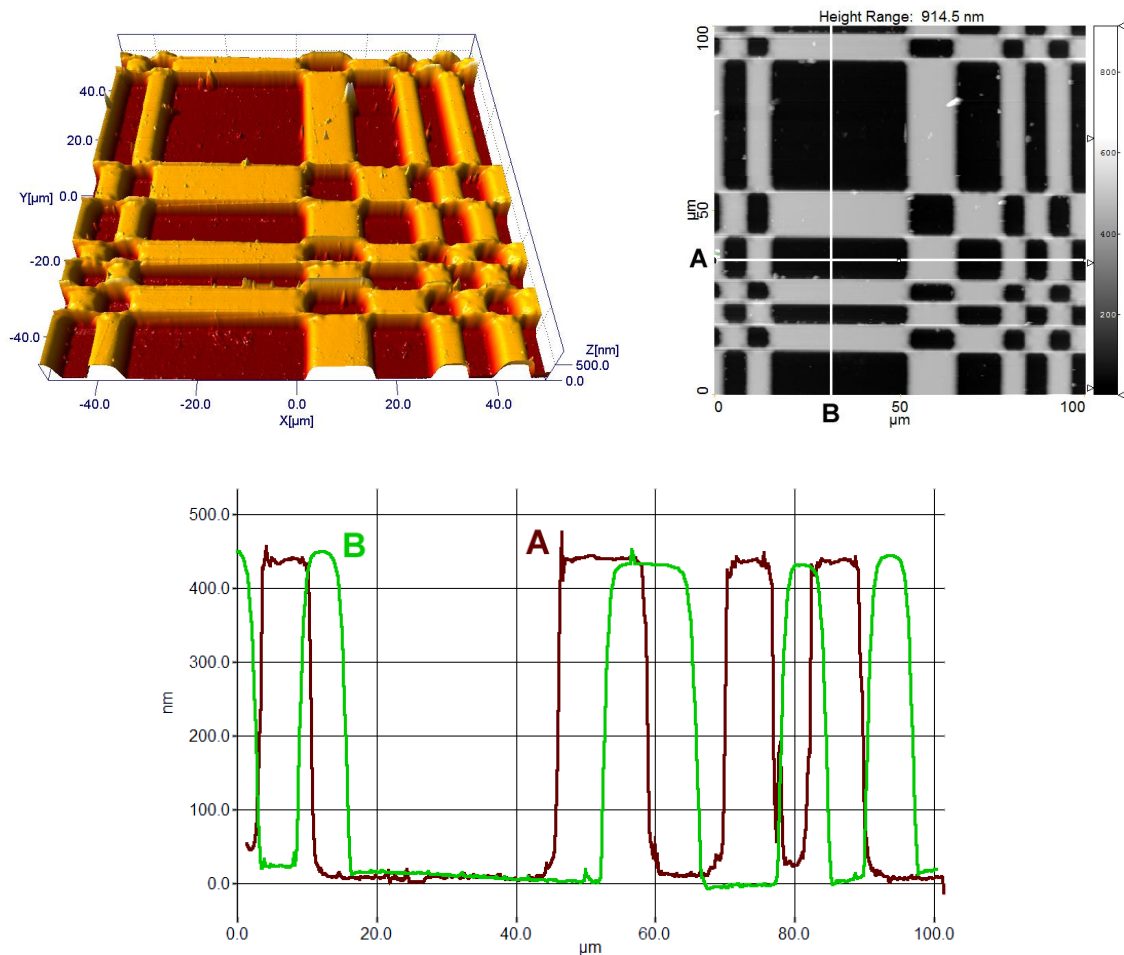


Рис. 3. Параметри дифракційної ґратки Gr3, отримані за допомогою тунельного мікроскопу: А — переріз поздовжнього профілю; В — переріз поперечного профілю

Експериментальні результати досліджень

Серії даних про коефіцієнти спеклового контрасту (1) були одержані залежно від довжини хвилі джерела освітлення λ , висоти рельєфу ґратки, швидкості переміщення ДООЕ V , кута нахилу дифракційної ґратки відносно напрямку свого руху α та часу експозиції фотозйомки τ .

Дослідження передбачало фотозйомку розподілу інтенсивності у лазерному пучку до та після застосування методу з визначеними параметрами. Отримані фотографії досліджувалися за допомогою програм аналізу та обробки графічних даних для персонального комп'ютера. Такі програми повинні мати можливість будувати гістограми виділених на фотографії аралів довільної форми, тобто дані про розподіл інтенсивності та усереднене значення інтенсивності в зображенні (рис. 4).

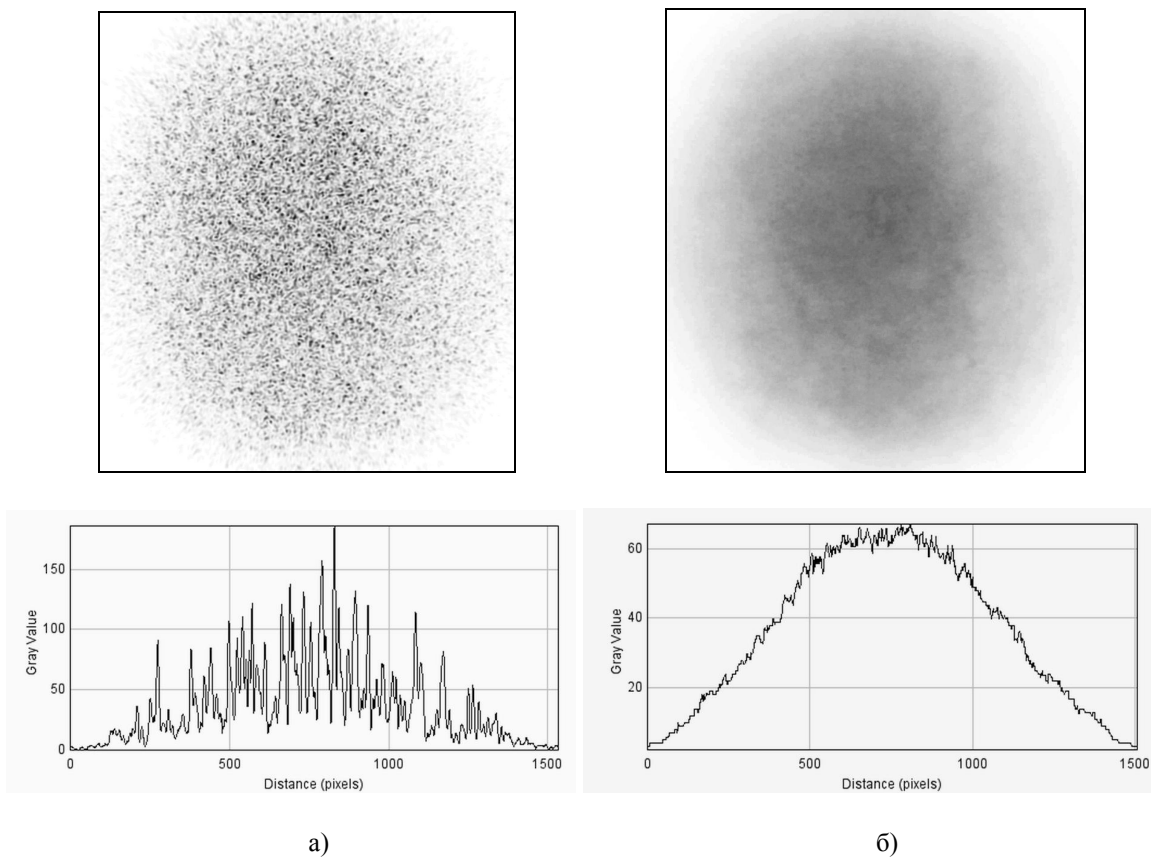


Рис. 4. Розподіл інтенсивності в зображенні лазерної плями на фотоматриці:

а) до застосування методу зменшення спеклів;

б) після застосування методу ґратка Gr3: $\lambda = 532$ нм, $V = 3,25$ мм/с, $\alpha = 4,4^\circ$, $\tau = 1,3$ с

Чисельні результати обробки фотографій зведені до таблиць. У табличних комірках табл. 1, 2 на перетині значень швидкості та кута нахилу знаходяться відповідні значення спеклового контрасту.

Таблиця 1. Залежність спеклового контрасту від швидкості та кута нахилу ґратки Gr1 для $\lambda = 632,8$ нм за час експозиції фотозйомки $\tau = 0,77$ с

V, мм/с	0°	0,5°	1°	1,5°	2,2°	4,4°
0,000	0,546	0,507	0,551	0,524	0,519	0,507
0,375	0,174	0,118	0,116	0,103	0,070	0,075
0,560	0,159	0,127	0,075	0,090	0,067	0,055
0,750	0,175	0,106	0,062	0,075	0,060	0,043
0,930	0,164	0,128	0,069	0,062	0,058	0,047
1,100	0,124	0,095	0,061	0,047	0,063	0,038
1,280	0,149	0,062	0,057	0,053	0,049	0,037
1,500	0,126	0,089	0,062	0,043	0,056	0,034
1,825	0,119	0,065	0,052	0,050	0,050	0,031
2,150	0,109	0,065	0,049	0,041	0,041	0,042
2,525	0,121	0,060	0,057	0,041	0,047	0,032
2,825	0,083	0,074	0,051	0,033	0,043	0,037
3,250	0,124	0,062	0,042	0,037	0,036	0,033
3,575	0,094	0,070	0,041	0,037	0,039	0,038
3,925	0,110	0,067	0,047	0,035	0,038	0,031

Щоб визначити вплив зміни висоти профілю ґратки була зроблена серія вимірювань для ґратки Gr3 (рис. 3) з висотою дифракційних елементів 0,43 мкм за тих же умов, що й у попередньому випадку. Результати зведено до табл. 2

Таблиця 2. Залежність спеклового контрасту від швидкості та кута нахилу ґратки Gr3 для $\lambda = 632,8$ нм за час експозиції фотозйомки $\tau = 0,77$ с

V, мм/с	0°	0,5°	1°	1,5°	2,2°	4°	4,4°
0,000	0,579	0,551	0,571	0,532	0,575	0,542	0,556
0,375	0,141	0,169	0,132	0,099	0,088	0,081	0,076
0,560	0,149	0,145	0,113	0,091	0,078	0,072	0,079
0,750	0,128	0,155	0,089	0,069	0,069	0,058	0,058
0,930	0,138	0,108	0,094	0,079	0,069	0,062	0,050
1,100	0,142	0,103	0,071	0,081	0,073	0,054	0,047
1,280	0,105	0,103	0,078	0,070	0,075	0,048	0,046
1,500	0,112	0,099	0,072	0,080	0,060	0,046	0,042
1,825	0,134	0,078	0,086	0,065	0,062	0,041	0,045
2,150	0,124	0,089	0,061	0,058	0,054	0,040	0,043
2,525	0,140	0,083	0,059	0,045	0,052	0,041	0,044
2,825	0,130	0,079	0,064	0,040	0,047	0,047	0,046
3,250	0,122	0,057	0,066	0,050	0,050	0,060	0,052
3,575	0,134	0,079	0,056	0,054	0,068	0,044	0,058
3,925	0,116	0,077	0,052	0,058	0,066	0,047	0,050

Дані, наведені у табл. 1, 2, отримані за таких умов: довжина хвилі джерела світла $\lambda = 632,8$ нм, час фотоекспозиції $\tau = 0,77$ с.

На рис. 5, 6 показані криві спеклового контрасту та коефіцієнта зменшення спеклових шумів, що отримані за таких умов: довжина хвилі джерела світла $\lambda = 532$ нм, ґратка — Gr3, час експозиції $\tau = 0,77$ с.

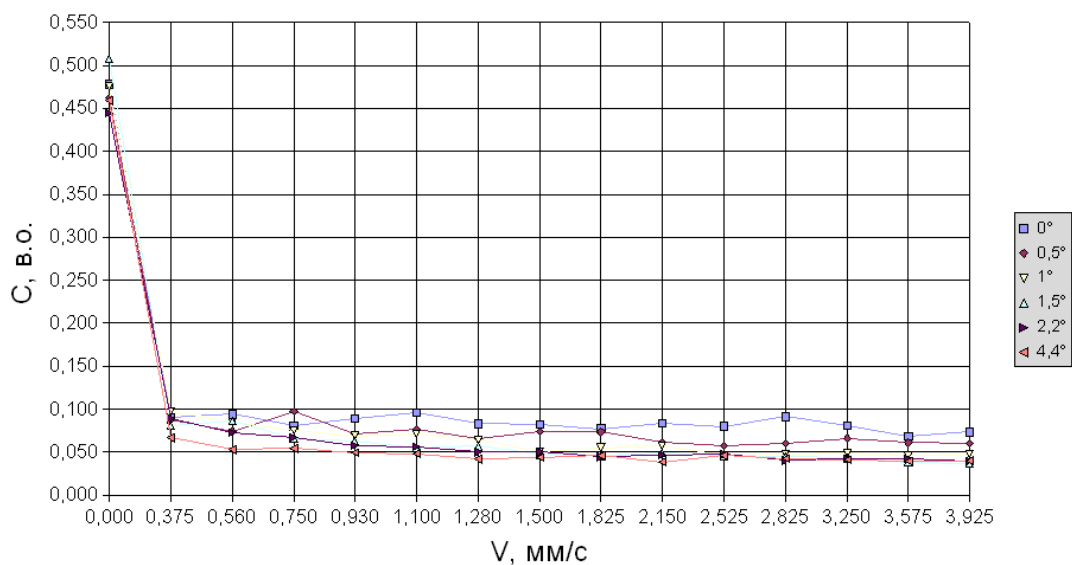


Рис. 5. Залежність спеклового контрасту від швидкості та кута нахилу ґратки Gr3

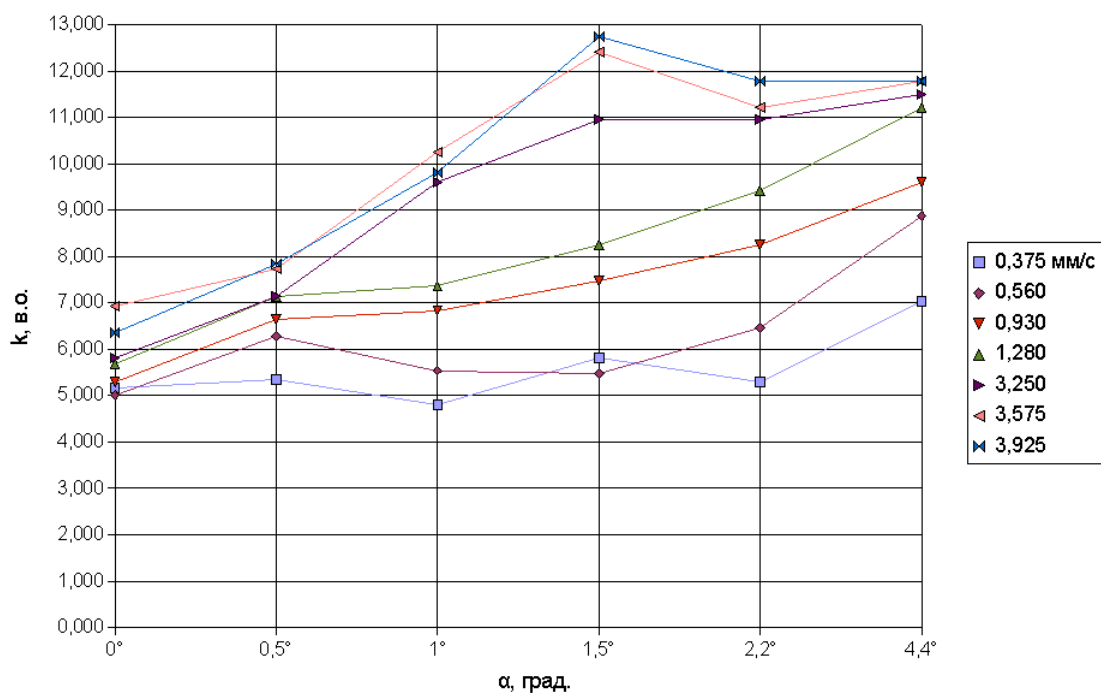


Рис. 6. Залежність коефіцієнта зменшення спеклових шумів k від кута нахилу α ґратки Gr3 при різних швидкостях ДОЕ

На рис. 7 показані криві спеклового контрасту отримані за таких умов: довжина хвилі джерела світла $\lambda = 405$ нм, ґратка – Gr3, час експозиції $\tau = 0,77$ с.

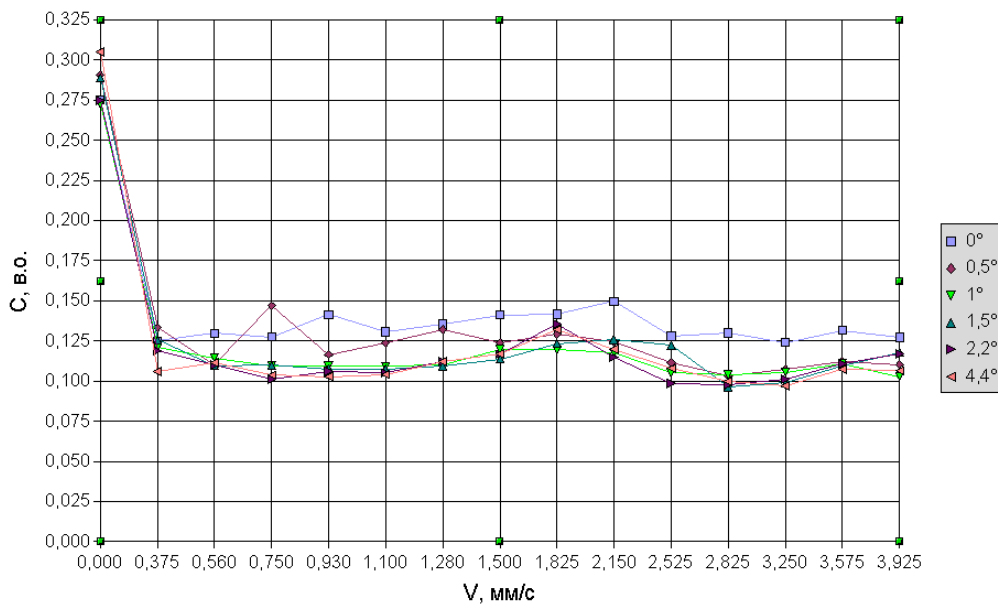


Рис. 7. Залежність спеклового контрасту від швидкості та кута нахилу ґратки Gr3

Аналіз експериментальних даних

Емпірично встановлено, що статистична відносна похибка складає для червоного світла $\pm 7\%$, для зеленого від -8% до $+12\%$, для фіолетового від -6% до $+9\%$.

Найкращий коефіцієнт ослаблення спеклів k спостерігається у зеленому та у червоному діапазонах спектра. У фіолетовому результат помітно гірший. Так, при використанні ґратки Gr3 та за часом фотоекспозиції $\tau = 0,77$ с для фіолетового випромінювання $k = 3$, для червоного випромінювання $k = 13$, для зеленого випромінювання $k = 14$. Це значно краще за результат, досягнутий у роботі [7] для зеленого випромінювання $k = 8,3$

Ефект зменшення спеклів спостерігається навіть у відсутності нахилу ґратки $\alpha = 0$, при швидкості лінійного переміщення ДОЕ $v = 0,375$ мм/с. У цьому випадку $k \approx 5$ для червоного і зеленого світла та $k \approx 2$ для фіолетового. Вже при швидкостях $0,56\text{--}0,75$ мм/с ефективність набуває найбільших значень. Після $V \sim 1$ мм/с подальше збільшення швидкості суттєво не змінює коефіцієнт зменшення спеклів k . У першому наближенні ця залежність k від швидкості переміщення V має вигляд функції

$$k = f(k_m * (1 - e^{-V})), \quad (8)$$

де k_m — порогове найбільше значення коефіцієнта ослаблення спеклового шуму для даного ДОЕ.

Збільшення кута нахилу ДОЕ до $0,5^\circ$ поліпшує ефективність зменшення спеклового шуму приблизно на $15\text{--}30\%$ залежно від довжини хвилі та швидкості. Максимальна ефективність нахилу ДОЕ спостерігається при $\alpha = 1,5^\circ$ для зеленого ви-

промінювання і досягає 100 % (рис. 6). При кутах α в межах 1° – 4° на швидкостях більших 2–3 мм/с ефект уповільнюється.

Помітні коливання на експериментальних кривих залежності спеклового контрасту від швидкості V та кута α (рис. 5, 7) можна частково пояснити, як суб'єктивною похибкою в обробці фотозображень, так і апаратними похибками. Апаратні похибки пов'язані, у першу чергу, з імовірною нерівномірністю профілю ДГ у межах усієї її протяжності. Така нерівномірність висоти профілю ґратки може іноді виникнути, коли для її виготовлення застосовано полив фоторезисту. Зрозуміло, що оскільки ДОЕ рухався, то за час кожної окремої фотозйомки лазерний промінь перетинав різні ділянки ДГ.

Для $\lambda = 632,8$ нм ґратка Gr1 з висотою дифракційних елементів 0,43 мкм має $k = 13$, а ґратка Gr3 з висотою профілю 0,45 мкм — 16. Таким чином, збільшення висоти профілю дифракційної ґратки на 0,02 мкм (4,7 %) дає 23 % збільшення коефіцієнта ослаблення спеклів для червоного світла.

Для $\lambda = 532$ нм збільшення часу фотоекспозиції на 169 % з 0,77 с до 1,3 с спричинило зростання лише на 7 % коефіцієнта ослаблення спеклів з $k = 14$ до $k = 16$ відповідно. Для $\lambda = 405$ нм помітного збільшення коефіцієнта ослаблення спеклів при цьому не спостерігалося і залишилося $k = 3$. Малі значення k для фіолетового лазера, вочевидь, обумовлені великою висотою рельєфу ґратки для цієї довжини хвилі світла. Таким чином, коефіцієнт k має обмежене значення з ростом часу фотоекспозиції. Час фотоекспозиції 0,77 с близький до часу фіксації інформації людським оком, який становить залежно від умов сприйняття — 0,25–0,65 с та більше.

Висновки

Результати експериментів з рухомим ДОЕ довели, що двовимірні дифракційні структури з розподілом елементів на основі бінарного коду Баркера є достатньо ефективним методом зменшення лазерного спеклового шуму у видимому діапазоні світла. Найбільше значення коефіцієнта зниження спеклового шуму для зеленого випромінювання $k = 14$.

Запропонована методика дозволяє вже при невеликих швидкостях лінійного руху ДОЕ отримувати помітний ефект зменшення спеклового шуму. Так, при швидкості біля 0,4 мм/с маємо коефіцієнт ослаблення спеклів $k \sim 5$ у діапазоні випромінювання 530–630 нм навіть при нульовому куті нахилу. Найбільші значення k досягаються вже при швидкості ~ 1 мм/с.

З нахилом ДГ ефект збільшується на 50–100 % залежно від довжини хвилі. Починаючи з 1° – $1,5^\circ$, подальше збільшення кута нахилу ґратки α при швидкостях більших за 2,5 мм/с суттєво не змінює ефект.

У червоному світлі метод чутливий до невеликої зміни висоти профілю ДГ. Це накладає певні вимоги до контролю рівномірності висоти дифракційних елементів на всій поверхні ДГ у процесі її виготовлення.

2. *Spatial* optical modulator (SOM): Samsung's light modulator for the next Zeneration laser display / S.K. Yun, J.H. Song, V. Yurlov [et al.] // Proc. Soc. Inf. Disp. — 2006, **29-1**. — P. 551–555.
3. *Full* speckle suppression in laser projectors using two Barker code-type optical diffractive elements / A.S. Lapchuk, A.A. Kryuchyn, V.V. Petrov [et al.] // J. Opt. Soc. Am. — 2013. — **A 30**, N 1. — P. 22–31.
4. *Optimal* speckle suppression in laser projectors using a single two-dimensional Barker code diffractive optical element / A.S. Lapchuk, A.A. Kryuchyn, V.V. Petrov [et al.] // J. Opt. Soc. Am. — 2013. — **A 30**, N 2. — P. 227–232.
5. *Optical* schemes for speckle suppression by Barker code diffractive optical elements / A. Lapchuk, A. Kryuchyn, V. Petrov [et al.] // J. Opt. Soc. Am. A. — 2013. — **A 30**, N 9. — P. 1760–1767.
6. *Experiment* evaluation of speckle suppression efficiency of 2D quasi-spiral DOE based on M-sequence DOE of length $N = 15$ / A.S. Lapchuk, G.A. Pashkevich, O.V. Prygun [et al.] // Appl. Opt. — 2015. — **54**, N 28. — P. E47–E54.
7. *Experimental* evaluation of speckle suppression efficiency using a moving 2D Barker code DOE / A.S. Lapchuk, O.V. Shyhovets, A.A. Kryuchyn [et al.] // J. Opt. Soc. Am. A. — 2013. — **30**, N 11. — P. 2253–2258.

Надійшла до редакції 03.09.2015