

УДК 616-079

РЕКОНСТРУКЦІЯ ТРИВИМІРНИХ СПЕКЛОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ БІОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ

Яницький Денис Тарасович

yanytskiydenys@gmail.com

Богомолів Микола Федорович

mfbogomolov@gmail.com

Кафедра біомедичної інженерії

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Анотація — У статті представлено новий підхід до реконструкції тривимірних зображень біологічних середовищ на основі аналізу спекл-структур, що виникають внаслідок інтерференції когерентного світла, розсіяного від шорстких поверхонь. Основну складність у формуванні точного тривимірного зображення становить саме інтерференційна природа спеклів, яка зумовлює появу випадкових розподілів інтенсивності без прямого зв'язку із рельєфом досліджуваної поверхні. Для подолання цього ефекту запропоновано спеціальний фільтр-обмежувач інтерференції, конструкція якого дозволяє зменшити кількість світлових променів, здатних інтерферувати, завдяки селекції напрямків поширення. Особливістю конструкції фільтра є поєднання геометричних параметрів і оптичних властивостей матеріалів, що забезпечують просторове сортування променів ще до їх потрапляння на детектор. Фільтр складається з системи отворів, заповнених матеріалом з високим коефіцієнтом заломлення, що пропускає світло лише в межах певного діапазону кутів. Детально описано принцип дії фільтра, розрахунки граничного кута пропуску променів, геометричні параметри конструкції та їх вплив на зменшення зони потенційного перетину когерентних хвиль. Залежно від особливостей досліджуваного об'єкта, фільтр може бути модифікований для роботи з різними діапазонами кутів падіння та оптичними конфігураціями. Розроблено концепцію оптичної системи. Метод відкриває нові можливості для формування тривимірних оптичних зображень зі зниженим рівнем інтерференційних спотворень. Потенційні сфери застосування включають біомедичну діагностику, зокрема візуалізацію тканин, а також матеріалознавство, оптичну мікроскопію та нанотехнології. Перспективними напрямками подальших досліджень є удосконалення конструкції фільтра, збільшення кількості доступних кутових проекцій, а також впровадження алгоритмів машинного навчання для підвищення якості реконструкції зображень.

Ключові слова: спекл-зображення, інтерференція когерентного світла, лазерна лабораторна діагностика, формені елементи крові, фільтрація сигналів, оптичні сенсори, оптична мікроскопія, тривимірна реконструкція.

I. ВСТУП

Спекл-зображення, що виникають внаслідок інтерференції когерентного світла, розсіяного шорсткою поверхнею, містять інформацію про мікроструктуру цієї поверхні [1]. Це дозволяє використовувати їх для аналізу поверхневих деформацій та переміщень матеріалів. Однак, безпосереднє перетворення спекл-зображень у тривимірну реконструкцію поверхні є складним завданням через випадковий характер спеклів та відсутність явного зв'язку між інтенсивністю спекл-зображення та топографією поверхні.

Головними причинами складності реконструкції зображення є: інтерференція когерентного світла: спекл-структура виникає через інтерференцію когерентного світла, що розсіюється на мікронерівностях, створюючи випадковий розподіл

інтенсивності, який не містить явної топографічної інформації[2]; множинне розсіювання, дифузне відбиття [2-4]: світло, взаємодіючи з шорсткою поверхнею, зазнає множинних розсіювань перед реєстрацією, що ускладнює визначення взаємного розташування точок; фазова неоднозначність: через випадковість спекл-структури [3] та згорткову природу детектора інформація про рельєф у фазі хвильового фронту втрачається, унеможливаючи точне визначення висоти поверхні; поляризаційні ефекти: відбиті промені змінюють поляризацію залежно від падіння та властивостей матеріалу, що ускладнює аналіз зображення; спекл-декореляція: зміна кута огляду чи переміщення поверхні змінює інтерференційний малюнок, викликаючи декореляцію спекл-зображень, що унеможливує стабільне 3D-моделювання.

Найбільшою завадою у отриманні об'ємного зображення є саме інтерференція [5] когерентного випромінювання адже, на відміну від інших факторів, її неможливо повністю подолати, оскільки сама природа когерентного випромінювання передбачає утворення спекл-структур, проте розробка особливого фільтру і методики оброблення отриманих сигналів дозволяє мінімізувати цей шум, відкриваючи потенціал для повністю нового методу діагностики.

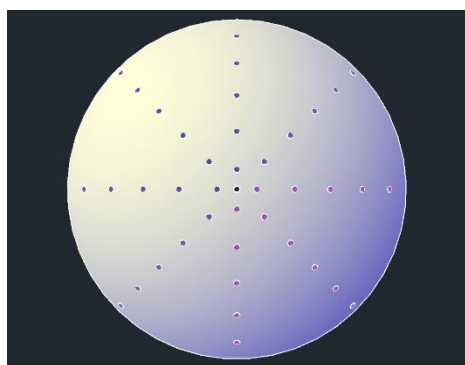
II. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є удосконалення методу подолання спотворення відбитого сигналу когерентного випромінювання.

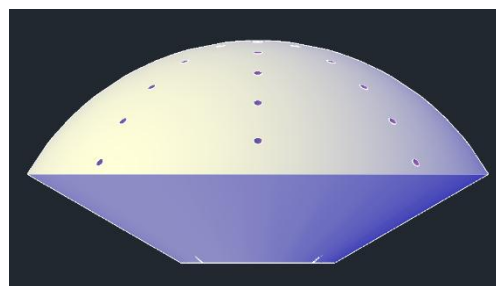
III. РОЗРОБКА ТА ПРИНЦИП РОБОТИ ФІЛЬТРУ-ОБМЕЖУВАЧА ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ

Явище інтерференції виникає тільки коли дві когерентні світлові хвилі накладаються одна на одну та інтенсивність змін сигналу від цього явища залежить від області та кута перетинання променів, тобто фільтр, який повинен мінімізувати це явище повинен впливати саме на ці два значення [6, 7].

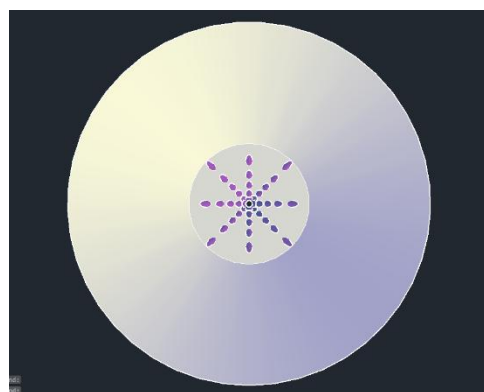
Нижче на Рис. 1 та Рис. 2 наведено концептуальне креслення та тривимірну модель такого фільтру.



А)

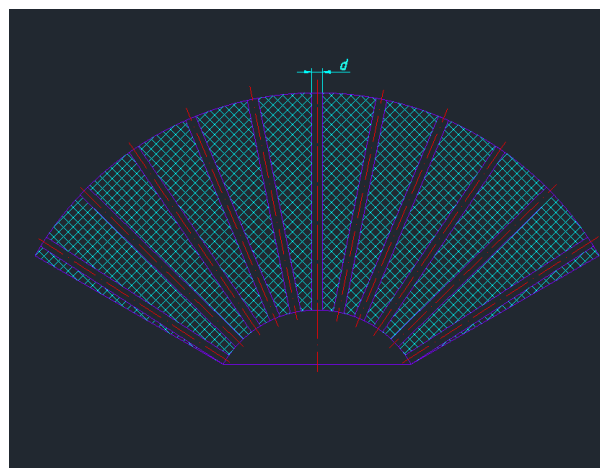


Б)

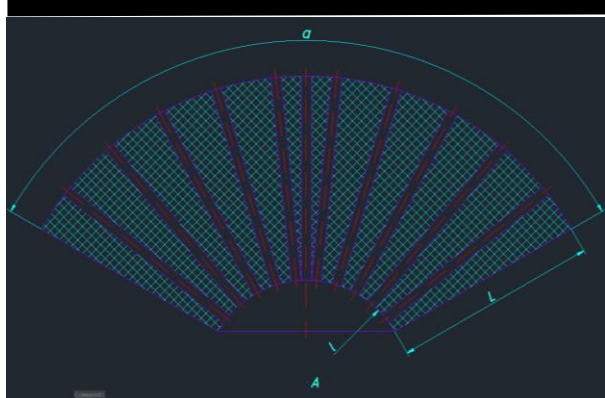


В)

Рисунок 1 — Тривимірна модель фільтру: А) – горизонтальна проєкція, Б) – фронтальна проєкція, В) – горизонтальна проєкція (вид знизу).



А)



Б)

Рисунок 2 — Креслення перерізів по діаметру фільтра та основні змінні для обчислень (переріз Б відхиляється від перерізу А на 45°).

α – кут захоплення фільтра,

A – фокус фільтра (точка надходження світлового сигналу),

L – довжина отворів фільтра,

d – діаметр отворів (та досліджуваної ділянки),

l – відстань від фокусу фільтра до його входів.

Даний фільтр повинен бути виконаним зі світлопоглинаючого матеріалу, а отвори повинні бути заповнені матеріалом з максимально великим коефіцієнтом заломлення, світло потраплятиме у отвори і через їх довгу циліндричну форму вони пропускають світло за умови що:

$$\theta < \frac{\arctg\left(\frac{d}{L}\right)}{n}, \quad (1)$$

де: θ – кут між падаючим світлом та напрямом отвору,

n – відношення коефіцієнту заломлення речовини всередині отвору до речовини, що знаходиться перед входом у отвори:

$$n = \frac{n_1}{n_2}, \quad (2)$$

де n_1 – коефіцієнт заломлення речовини в отворі,

n_2 – коефіцієнт заломлення речовини перед отвором.

Таким чином, цей фільтр поглинати всі промені які відхиляються більше ніж на кут з (1), а всі менші кути заломлюються та збільшуються у n (2) разів, що також впливає на ефективність інтерференції: коли два

світлові промені перетинаються під кутом, інтерференційна картина формується в області їхнього перекриття. Чим більший кут, тим менша площа перекриття, що може зменшити кількість променів, які ефективно інтерферують [8].

Також у ділянці між фокусом фільтра та входами отворів може відбуватись інтерференція променів, тому зменшення відстані l також позитивно впливатиме на роботу фільтра, адже це зменшуватиме площу у якій промені можуть перетинатися.

Через кожен отвір фільтра проходитиме лише мала частина від відбитого випромінювання, оскільки вони пропускають лише ту долю світла яка приблизно паралельна до отворів, через це для отримання більшої кількості сигналів під різними кутами фільтр можна рухати та обертати навколо свого фокусу або збільшити кут захоплення α і кількість отворів, це ускладнить обробку сигналу, проте підвищить точність отриманого зображення. Чим більше різних позицій та кутів з яких ми отримаємо проекції – тим чіткішим буде зображення.

IV. ОТРИМАННЯ І ОБРОБКА СИГНАЛУ

Після проходження крізь фільтр світло потраплятиме на оптичні сенсори і з кожного отвору буде отримуватись неповна проекція під різними кутами, що відповідають положенню отворів. Для цієї системи найкраще буде використовувати лазер з рівномірним розподілом потужності [9] (лазер з топ-хет профілем) для точніших результатів, також фільтр матиме похибку щодо того, наскільки паралельними до отворів будуть промені на виході, що може значно ускладнити отримання зображення не плоскій поверхні, аби зробити об'ємні зображення точнішими можна використовувати багатомодові лазери, або лазери з лінійним або хрестоподібним перерізом пучка [10], тому що у такому випадку лазер повинен рухатись або обертатись аби покривати всю досліджувану площу. Це буде точнішим методом, оскільки у такому випадку отримуваний сигнал буде

мати вигляд деформованої полоси або хресту, по яких краще видно об'єм, проте це також потребуватиме більше часу та складнішого алгоритму обробки аби отримати зображення всієї досліджуваної ділянки.

На Рис. 3 наведено структурну схему концептуальної установки.

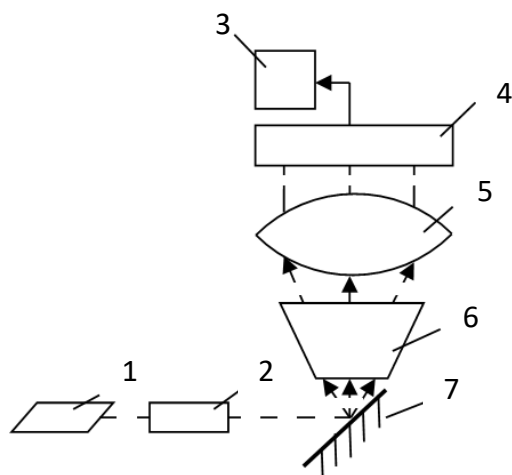


Рисунок 3 — Структурна схема установки для отримання об'ємного зображення: 1 – лазер, 2 – фільтр мод оболонки, 3 – апаратура обробки та реєстрації, 4 – фотоприймач, 5 – об'єктив, 6 – фільтр-обмежувач інтерференції, 7 – досліджуваний об'єкт.

Промінь з лазера 1 проходить крізь фільтр мод оболонки 2, і потрапляє на досліджувану поверхню 7, після відбиття і розсіювання від поверхні 7, частина відбитих у різні сторони променів потрапляє на фільтр-обмежувач інтерференції 6, з нього під зазначеними кутами промені проходять об'єктивом 5 і попадають на фотоприймач 4, сигнали з фотоприймача надходять у апаратуру обробки та реєстрації 3, де отримані проєкції за допомогою комп'ютерного алгоритму можна перетворити у об'ємне зображення.

V. ПЕРСПЕКТИВИ МЕТОДУ ОТРИМАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ МЕТОДОМ АНАЛІЗУ ВІДБИТОГО ВІД РЕЧОВИНИ КОГЕРЕНТНОГО ПРОМЕНЮ СВІТЛА

Запропонований метод отримання зображень шляхом аналізу когерентного випромінювання, відбитого від речовини,

має значний потенціал для розвитку оптичних діагностичних систем у різних галузях науки та техніки. Його основна перевага полягає у можливості високоточної реконструкції тривимірних зображень за допомогою спеціально розробленого фільтру, що зменшує вплив інтерференційних спотворень і випадкових фазових змін.

У біомедичних дослідженнях цей підхід може забезпечити новий рівень неінвазивної діагностики біологічних тканин. Використання когерентного світла дає змогу отримувати як поверхневі, так і підповерхневі зображення тканин, що особливо важливо для аналізу мікроструктури шкіри, слизових оболонок, судин та інших біологічних середовищ. Це відкриває можливості для раннього виявлення патологічних змін у тканинах, включаючи онкологічні та дегенеративні захворювання, а також для точного контролю за регенераційними процесами після хірургічних втручань.

Метод також має значний потенціал у матеріалознавстві, де його можна застосовувати для контролю мікроструктурних змін у матеріалах. Аналіз відбитого когерентного світла дозволяє оцінювати шорсткість поверхні, наявність мікротріщин, неоднорідностей або внутрішніх напружень у металах, полімерних та композитних матеріалах. Це може бути корисним у виробництві високотехнологічних компонентів, де критично важлива точність поверхневої обробки та механічні властивості матеріалів.

У галузі нанотехнологій та оптичної мікроскопії запропонований метод може стати основою для створення нових технологій візуалізації на нанометровому рівні. Завдяки можливості аналізу спекл-структур, що виникають під час взаємодії когерентного світла з нанорозмірними об'єктами, відкриваються перспективи розширення можливостей існуючих методів нанометрології, а також покращення роздільної здатності візуалізаційних систем.

Додатковим напрямом розвитку є удосконалення алгоритмів обробки

отриманих сигналів. Застосування методів штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж та машинного навчання, може значно підвищити точність реконструкції зображень, автоматизувати процеси корекції похибок та покращити якість аналізу структур складної геометрії.

Перспективним є також розширення можливостей методу шляхом комбінування його з іншими оптичними та спектральними методами дослідження. Використання різних довжин хвиль у поєднанні з аналізом відбитого когерентного випромінювання дозволить отримувати додаткову інформацію про хімічний склад об'єкта дослідження. Це може стати основою для розробки мультиспектральних методів діагностики, що поєднують високу роздільну здатність з можливістю молекулярного аналізу.

VI. ВИСНОВКИ

У ході роботи було досліджено проблему реконструкції об'ємного зображення на основі аналізу спекл-структур, які виникають внаслідок інтерференції когерентного світла. Проведено огляд існуючих методів, що використовуються для подолання спотворень інтерференції, зокрема методів цифрової голографії, кореляційного аналізу спекл-полів та різних підходів до обробки зображень. Основними недоліками існуючих підходів є складність точного визначення топографії поверхні через випадковість спекл-зображень, фазову неоднозначність, поляризаційні ефекти та декореляцію сигналів при зміні кута огляду.

Запропонований у роботі новий метод включає використання спеціально розробленого запобігаючого інтерференції фільтру, що мінімізує вплив випадкових фазових змін та поляризаційних ефектів. Основна відмінність цього рішення від існуючих методів полягає в застосуванні фільтра з високим коефіцієнтом поглинання світла, а також матеріалу з великим коефіцієнтом заломлення у його отворах. Це дозволяє відсіювати частини хвильового фронту, які можуть спричиняти значні спотворення під час реконструкції зображення, забезпечуючи більш точне та

стабільне отримання тривимірної інформації про досліджувану поверхню.

Запропонований метод дозволяє розв'язати задачу отримання високоточних об'ємних зображень навіть у складних умовах, де наявність інтерференції традиційно значно ускладнювала аналіз. Практична реалізація фільтру дає змогу використовувати цю технологію у сфері біомедичних досліджень, особливо для аналізу структури біологічних тканин. Запропонований підхід також може бути застосований у матеріалознавстві, мікроскопії високої роздільної здатності та при дослідженнях поверхонь у нанотехнологіях.

Перспективи подальших досліджень полягають у вдосконаленні конструкції фільтру та розробці адаптивних алгоритмів обробки отриманих зображень, які дозволять автоматично коригувати параметри фільтрації залежно від умов експерименту. Крім того, перспективним напрямком є розширення методики для аналізу внутрішньої структури тканин, що відкриває можливість для розробки нових неінвазивних методів медичної діагностики.

Фінансування. Дане дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Згода на публікацію. Усі пацієнти, що мають відношення до рукопису дали згоду на публікацію даної роботи.

ID та внесок авторів.

0009-0006-6521-145X (A, B, C, D) Denys Yanytskiy

0000-0002-4351-527X (E, F) Mykola Bogomolov

A – концепція роботи та дизайн; B – аналіз інформації; C – розробка моделі; D – написання статті; E – критичний огляд; F – остаточне схвалення статті.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. А.В. Бялонович, А.М. Майло, Г.Г. Писаренко. Аналіз зображень спекл-структур поверхні матеріалу в процесі накопичення пошкоджень за циклічного навантаження із застосуванням нейронних мереж // Проблеми міцності. – 2021. – № 6. – С. 87–92.
2. Лазерний спекл-контрастний аналіз для дослідження мікроциркуляції крові в судинах / О. В. Дуболазов, Є. Г. Махрова, Ю. О. Ушенко, Ю. Я. Томка // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Фізико-математичні науки». – 2020. – № 1. – С. 104–112.
3. Байкова А. Г., Богомолів М. Ф., Вовяно С. І., Боровський В. В. Порівняльний аналіз методів спекл-візуалізації та мікроскопії для дослідження зразків крові // Biomedical Engineering and Technology. – 2024. – Вип. 16(4).
4. Дуболазов О. В., Ушенко Ю. О., Томка Ю. Я. Аналіз оптичних і поляризаційно-кореляційних властивостей біологічних тканин // Журнал нано- та електронної фізики. – 2020. – Т. 12, № 4. – С. 04026-1–04026-7. URL: [https://doi.org/10.21272/jnep.12\(4\).04026](https://doi.org/10.21272/jnep.12(4).04026).
5. Інтерференція світла. Когерентність / Р. М. Мельник // Наукові записки НаУКМА. Фізико-математичні науки. – 2021. – Т. 3. – С. 45–52.
6. Баранов Д. Г., Краснок А., Шегай Т., Алу А., Чонг Ю. Д. Повні когерентні поглиначі: лінійне керування світлом за допомогою світла // *arXiv preprint*. 2017. № arXiv:1706.03694. doi: 10.48550/arXiv.1706.03694.
7. Бергтольд М., Стюарт К. молодший, Дуггар Н., Муховські А. Дж., Вассерман Д. Фільтр когерентного світла // *Optics Letters*. 2022. Т. 47, № 11. С. 2646–2649. doi: 10.1364/OL.447393.
8. Лумпєва Н. О. Оптика. Хвильова та квантова оптика: навч. посіб. Ч. 2. Суми: СумДУ, 2018. 104 с. URL: https://ezpf.elit.sumdu.edu.ua/wp-content/uploads/2018/01/Lumpieva-chast_2.pdf.
9. Ель-Хурі М., Кунерт Т., Войсіат Б., Ласагні А. Ф. Використання дифракційного фокусуючого формувача пучка для покращення лазерного структурування поверхонь // *Materials*. 2022. Т. 15, № 1. С. 175. URL: <https://doi.org/10.3390/ma15020591>.
10. В'яс Р., Сінгх С. Крос-поляризація лінійно поляризованих лазерних пучків Ерміта–Гаусса [Електронний ресурс] / Ріта В'яс, Сурендра Сінгх // *Journal of the Optical Society of America A*. — 2012. — Т. 29, № 4. —

С. 579–583. — Режим доступу: <https://opg.optica.org/josaa/abstract.cfm?uri=josaa-29-4-579>.

REFERENCES

1. A. V. Byalonovych, A. M. Mailo, and H. H. Pysarenko, “Analysis of speckle structure surface images during damage accumulation under cyclic loading using neural networks,” *Problems of Strength*, no. 6, pp. 87–92, 2021.
2. O. V. Dubolazov, Ye. H. Makhrova, Yu. O. Ushenko, and Yu. Ya. Tomka, “Laser speckle contrast analysis for the study of blood microcirculation in vessels,” *Bulletin of the National Technical University of Ukraine “KPI”. Series: Physical and Mathematical Sciences*, no. 1, pp. 104–112, 2020.
3. A. H. Baikova, M. F. Bogomolov, S. I. Vovianko, and V. V. Borovskiy, “Comparative analysis of speckle imaging and microscopy methods for blood sample studies,” *Biomedical Engineering and Technology*, vol. 16, no. 4, 2024.
4. O. V. Dubolazov, Yu. O. Ushenko, and Yu. Ya. Tomka, “Analysis of optical and polarization-correlation properties of biological tissues,” *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 12, no. 4, pp. 04026-1–04026-7, 2020. DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.12\(4\).04026](https://doi.org/10.21272/jnep.12(4).04026).
5. R. M. Melnyk, “Light interference. Coherence,” *Scientific Notes of NaUKMA. Physical and Mathematical Sciences*, vol. 3, pp. 45–52, 2021.
6. D. H. Baranov, A. Krasnok, T. Shegai, A. Alù, and Y. D. Chong, “Coherent perfect absorbers: Linear control of light with light,” *arXiv preprint*, no. arXiv:1706.03694, 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1706.03694.
7. M. Bergtold, C. Stewart Jr., N. Duggar, A. J. Muchowski, and D. Wasserman, “Coherent light filter,” *Optics Letters*, vol. 47, no. 11, pp. 2646–2649, 2022. DOI: 10.1364/OL.447393.
8. N. O. Lumpieva, *Optics. Wave and Quantum Optics: Study Guide. Part 2*, Sumy: Sumy State University, 2018, 104 p. [Online]. Available: https://ezpf.elit.sumdu.edu.ua/wp-content/uploads/2018/01/Lumpieva-chast_2.pdf
9. M. El-Khouri, T. Kunert, B. Voisiat, and A. F. Lasagni, “Use of diffractive focusing beam shaper to improve laser surface structuring,” *Materials*, vol. 15, no. 1, p. 175, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15020591>.
10. R. Vyas and S. Singh, “Cross-polarization of linearly polarized Hermite–Gaussian laser beams,” *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 29, no. 4, pp. 579–583, 2012. [Online]. Available: <https://opg.optica.org/josaa/abstract.cfm?uri=josaa-29-4-579>.

UDC 616-079

RECONSTRUCTION OF THREE-DIMENSIONAL SPECKLE IMAGES OF BIOLOGICAL MEDIA

Denys Yanytskiy

yanytskiydenys@gmail.com

Mykola Bogomolov

mfbogomolov@gmail.com

Department of Biomedical Engineering
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Abstract – This article presents a new approach to the reconstruction of three-dimensional images of biological media based on the analysis of speckle structures that arise due to the interference of coherent light scattered from rough surfaces. The main challenge in forming an accurate 3D image lies in the interference-based nature of speckles, which results in random intensity distributions with no direct correlation to the surface topography of the studied object. To overcome this effect, a specialized interference-limiting filter is proposed. Its design reduces the number of light rays capable of interfering by selectively controlling their propagation directions. A key feature of the filter is the combination of its geometric parameters and the optical properties of the materials used, which enables spatial sorting of the rays before they reach the detector. The filter consists of an array of apertures filled with high-refractive-index material that allows light to pass only within a specific angular range. The paper details the filter's operating principle, calculations for the critical transmission angle, and the influence of its geometric parameters on reducing the region of potential wavefront interference. Depending on the characteristics of the examined object, the filter can be modified to operate with different ranges of incidence angles and optical configurations. A conceptual optical system has been developed. The proposed method opens new possibilities for generating three-dimensional optical images with reduced levels of interference distortions. Potential applications include biomedical diagnostics—particularly tissue visualization—as well as materials science, optical microscopy, and nanotechnology. Promising directions for further research include improving the filter design, increasing the number of angular projections, and implementing machine learning algorithms to enhance image reconstruction quality.

Keywords: speckle images, interference of coherent light, laser laboratory diagnostics, formed elements of blood, signal filtering, optical sensors, optical microscopy, three-dimensional reconstruction.