

УДК 004.93:[778.38:535.417]

**ЦИФРОВА ГОЛОГРАФІЧНА ІНТЕРФЕРОМЕТРІЯ ДЛЯ
ЧИСЕЛЬНОГО ФОКУСУВАННЯ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ
МІКРООБ'ЄКТІВ**

Каряка Н.В.

e-mail: nadiia.kariaka@nure.ua

Науковий керівник – к. ф.-м. н., доц. Коваленко О.М.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. Фізики
м. Харків, Україна

This work is devoted to the study of digital holographic interferometry as a method for non-contact examination of micro-objects. The text discusses the physical principles of holography, which are based on the superposition of reference and object light waves. It describes the process of recording an interference pattern using electronic matrices and its subsequent processing in a software environment. The main stages of the work are highlighted: from the formation of a laser beam to the acquisition of a digital hologram. Particular attention is paid to the possibility of numerical focusing, which allows the object to be studied at different distances after recording. The role of digital methods in restoring the three-dimensional structure of microscopic elements is considered. The promising use of artificial intelligence to improve image quality and reduce noise is also mentioned. Finally, the main technical difficulties are highlighted, such as the sensitivity of the system to vibrations and the high demand for computing resources.

Сучасний розвиток оптичних технологій значно розширив можливості дослідження мікроскопічних об'єктів у природничих та технічних науках. У багатьох галузях, зокрема біофізиці, матеріалознавстві та мікроелектроніці, швидкими темпами зростає потреба у методах, які дозволяють отримувати детальну інформацію про структуру та властивості мікрооб'єктів без механічного втручання у досліджувану систему. Такі вимоги зумовлюють активний розвиток безконтактних оптичних методів дослідження. Одним із перспективних напрямів є цифрова голографічна інтерферометрія, яка поєднує принцип інтерференції світлових хвиль із сучасними алгоритмами цифрової обробки зображень.

Голографічні методи дослідження ґрунтуються на реєстрації інтерференційної картини, що виникає внаслідок взаємодії опорної та об'єктної світлових хвиль. У результаті такого накладання формується інтерференційна структура, яка містить інформацію не лише про інтенсивність світлового випромінювання, а й про фазу хвильового фронту. Саме наявність фазової інформації дозволяє відтворити просторову структуру досліджуваного об'єкта та провести детальний аналіз його геометричних параметрів [1]. Основи такого підходу були закладені у роботах фізика Денніса Габора, який запропонував концепцію запису повної

інформації про світлове поле, що стало фундаментом розвитку голографії та інтерферометричних методів вимірювання.

Існує декілька підходів до реалізації голографічних досліджень. У класичній голографії інтерференційна картина реєструється на фоточутливих матеріалах, після чого для відновлення зображення використовується оптична система [2]. Проте з розвитком цифрових фотодетекторів та обчислювальної техніки виникла можливість переходу до цифрової голографії. У цьому випадку інтерференційна картина реєструється електронними матрицями, а реконструкція зображення виконується за допомогою чисельних алгоритмів у програмному середовищі. Такий підхід значно спрощує експериментальні дослідження та підвищує гнучкість обробки даних. Як показують сучасні дослідження, використання методів цифрової обробки сигналів дозволяє відновлювати просторову структуру об'єкта з високою точністю та аналізувати параметри світлового поля у реальному часі [3].

Однією з важливих особливостей цифрової голографії є можливість чисельного фокусування. На відміну від традиційних оптичних систем, де положення площини фокусування визначається геометрією оптичної схеми, у цифровій голографії фокус може змінюватися вже після запису голограми. Це досягається шляхом використання алгоритмів моделювання дифракційного поширення світлових хвиль, які дозволяють реконструювати зображення об'єкта на різних відстанях від площини реєстрації [1]. Завдяки цьому стає можливим аналіз тривимірної структури об'єктів та дослідження мікроскопічних елементів, розташованих у різних площинах простору.

Процес дослідження об'єктів методом цифрової голографічної інтерферометрії включає кілька послідовних етапів. На початковому етапі формується когерентне лазерне випромінювання, після чого світловий промінь розділяється на опорну та об'єктну хвилі. Об'єктна хвиля взаємодіє з досліджуванним мікрооб'єктом, унаслідок чого змінюються її амплітуда та фаза. Далі відбувається накладання опорної та об'єктної хвиль, що призводить до формування інтерференційної картини. Отримане зображення реєструється цифровою матрицею та зберігається у вигляді цифрової голограми. Подальша обробка виконується чисельними методами, що дозволяють реконструювати амплітуду і фазу світлового поля та відновити просторову структуру досліджуваного об'єкта.

Важливим напрямом розвитку цифрової голографії є інтеграція алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання. Використання моделей за допомогою нейромереж дозволяє покращити якість реконструкції голограм, оптимізувати процес відновлення фазової інформації та зменшити вплив шумів і оптичних спотворень. Такі підходи відкривають нові можливості для автоматичного аналізу мікроструктур, що є особливо актуальним у медичній діагностиці, клітинній біології та нанотехнологіях [3].

Разом із тим, використання цифрової голографічної інтерферометрії супроводжується низкою викликів та технічних обмежень. Однією з основних проблем є висока чутливість методу до механічних вібрацій та нестабільності оптичної системи, що може призводити до появи шумів у зареєстрованих голограмах. Крім того, значні обчислювальні ресурси необхідні для виконання чисельної реконструкції зображень, особливо при обробці великих масивів експериментальних даних. Додатковою складністю є необхідність точного калібрування оптичної системи та правильного вибору параметрів алгоритмів реконструкції, що впливає на точність відновлення фазової інформації.

Таким чином, цифрова голографічна інтерферометрія є ефективним інструментом дослідження мікрооб'єктів, який поєднує фізичні принципи інтерференції світла з сучасними методами цифрової обробки інформації. Метод забезпечує можливість отримання детальних тривимірних зображень мікроструктур та аналізу їхніх фізичних властивостей. Незважаючи на існуючі технічні обмеження, подальший розвиток цифрових сенсорів, алгоритмів реконструкції та методів штучного інтелекту сприятиме розширенню практичного застосування цифрової голографії у мікроскопії, біофізиці, матеріалознавстві та медичній діагностиці.

Список використаних джерел:

1. Liu Z., Qiu P., Zhang Y. Automatic Focusing of Off-Axis Digital Holographic Microscopy by Combining the Discrete Cosine Transform Sparse Dictionary with the Edge Preservation Index // Optics. 2025. Vol. 6, №2. art. 17. DOI: 10.3390/opt6020017.
2. Kovalenko E. N., Yunakova O. N., Yunakov N. N. Exciton absorption spectrum of K_2CuCl_3 thin films // Low Temp. Phys. 2025. №51. P.506–508 DOI: 10.1063/10.0036246.
3. Ушенко О. Г., Горський М., Дуболазов О., Ушенко Ю., Солтис І., Мікірін І. 3D цифрова голографічна поляриметрія дифузних оптично анізотропних полів об'єктів біологічних тканин. // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції з оптико-електронних інформаційних технологій "ФОТОНІКА – ODS 2025" 23 -24 квітня 2025 р. Вінниця, 2025.