

УДК 535.4

Р. Ю. ДОВГАЛЮК

МЕТОД ІТЕРАЦІЙНОГО РОЗРАХУНКУ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ ФАЗОВИХ МАП ДЛЯ СИСТЕМ БАГАТОХВИЛЬОВОЇ ЦИФРОВОЇ ГОЛОГРАФІЇ

*Вінницький національний технічний університет,
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
E-mail: rostyslav.research@gmail.com*

Анотація. В роботі розглянуто шляхи використання аналогової та цифрової голографії у неруйнівному контролі. Представлено рішення задачі розширення вимірювального діапазону оптичної довжини шляху в системах багатохвильової голографії на основі використання запропонованого методу ітераційного розрахунку інтерференційних фазових мап. Проведено його моделювання для системи трьоххвильової цифрової голографії в середовищі MATLAB.

Ключові слова: цифрова голографія, інтерферограма, неруйнівний контроль, голографічне окреслення, метод двох довжин хвиль, двоххвильова голографічна інтерферометрія.

Аннотация. В работе рассмотрены способы использования аналоговой и цифровой голографии в неразрушающем контроле. Представлено решение задачи расширения измерительного диапазона оптической длины пути в системах многолучевой голографии на основе использования предложенного метода итерационного расчета интерференционных фазовых карт. Проведено его моделирование работы для системы трехлучевой цифровой голографии в среде MATLAB.

Ключевые слова: цифровая голография, интерферограмма, неразрушающий контроль, голографическое оконтуривание, метод двух длин волн, двухлучевая голографическая интерферометрия.

Abstract. In this paper a ways of an analog and digital holography usage in nondestructive testing are reviewed. The solution for optical path distance measurement range extension in multiple-wavelength holography systems is shown based on the presented method of interference phase maps iterative computation. A modeling of such method in the case of a three-wavelength digital holography system in MATLAB environment is carried out.

Keywords: digital holography, interferogram, non-destructive testing, holographic contouring, two-wavelength method, two-wavelength interferometry.

ВСТУП

Технологія голографії є важливою ланкою методів оптичної метрології. В той час, як класичні фотодетектори дозволяють вимірювати лише інтенсивність (амплітуду) оптичного поля, голографічні методи реєстрації оптичного випромінювання також дозволяють вимірювати фазу випромінювання [1]. Оскільки фаза є джерелом інформації про рельєф поверхні (для непрозорих об'єктів) або про розподіл величини показника заломлення (для прозорих об'єктів), здатність голографічних методів вимірювати фазу оптичного поля дозволяє використовувати їх у принципово нових методах вивчення об'єктів.

Голографічна інтерферометрія дозволяє визначати деформації поверхонь об'єктів із довільною шорсткістю у нанометровому діапазоні та вимірювати розподіл показника заломлення у прозорих речовинах [2]. Не дивлячись на значний вік у близько 40—50 років, дана технологія набула лише обмеженого використання у промисловості, причиною чому стали декілька факторів. Використання голографічних пластин на основі, наприклад, галогеніду срібла для реєстрації інтерференційної картини висуває суворі вимоги до вібраційної стійкості усієї оптичної схеми, адже зміщення навіть на 200—300

нім під час запису голограми повністю її зіпсує. Крім того, процес проявлення фотопластини вимагає витратних реактивів, а сама фотопластина у більшості випадків є одноразовою.

Розвиток обчислювальної техніки та цифрових фотоматриць створив можливості для розвитку нового типу голографії — цифрової голографічної інтерферометрії. Усуваючи необхідність у фотопластинах та хімічному процесі їх проявлення за рахунок чисельного моделювання інтерференції оптичних хвиль та реєстрації самої інтерференційної картини CMOS та CCD фотосенсорами, цифрова голографічна інтерферометрія відкриває нові можливості по використанню голографічних методів у неруйнівному контролі.

Отримання корисної інформації при використанні методів цифрової голографії базується на аналізі мап розподілу фази оптичного поля, яке було розсіяне досліджуванним об'єктом. Оскільки фаза електромагнітної хвилі є періодичною, стає неможливим однозначне визначення зміни довжини оптичного шляху більшої за довжину хвилі, що обумовлює потребу у використанні методів розгортки фази, які дозволяють отримати мапу абсолютних значень фази з мапи головних значень [3]. Проте, методи розгортки фази не завжди надають коректний результат у випадку наявності завад у фазових мапах або недостатній частоті дискретизації.

Оскільки найбільша висота профілю поверхні, яка може бути точно виміряна, прямопропорційна довжині хвилі випромінювання, один з методів розширення діапазону вимірювань систем цифрової голографічної інтерферометрії полягає у використанні джерел когерентного випромінювання інфрачервоного діапазону, наприклад, CO₂ лазерів з довжиною хвилі 10,6 мкм. Головний недолік такого підходу полягає у багатократному збільшенні вартості обладнання через необхідність використовувати спеціальну оптику та цифрову камеру, які підходять для використання у інфрачервоному діапазоні.

Альтернативне рішення стосовно розширення діапазону вимірювань полягає у використанні двохвильової голографії, яка дозволяє отримати інтерферограми, які еквівалентні таким, що були отримані з використанням випромінювання ближнього інфрачервоного діапазону з використанням лише довжин хвиль видимого діапазону [3].

В даній роботі представлено метод ітераційного розрахунку інтерференційних фазових мап для систем багатовхильової цифрової голографії, який дозволяє розраховувати фазові мапи з найбільш можливою еквівалентною довжиною хвилі.

МЕТОД ГОЛОГРАФІЧНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Використання голографічної інтерферометрії дає змогу отримати унікальну картину інтерференційних смуг, форма та щільність яких дає змогу охарактеризувати стан досліджуваного об'єкту, оскільки будь-який його дефект на зразок тріщин, порожнин та ін. під навантаженням спричинить появу локальної деформації на його поверхні, яка буде чітко проявлятися на інтерферограмі у вигляді нетипового розташування інтерференційних смуг у місці її знаходження. Таким чином, дефекти у об'єкті виявляються шляхом аналізу інтерференційної картини на предмет наявності локальних нетипових розподілів інтерференційних кіл. У класичній (аналоговій) голографічній інтерферометрії існують три способи отримання голографічних інтерферограм: метод двох експозицій, реального часу та усереднення в часі [2].

Дані методи об'єднують те, що досліджуваний об'єкт на певному етапі відтворення інтерферограми або запису голограми зазнає навантаження, яке дещо змінює його форму та, як наслідок, вносить зміни до оптичного шляху опорного та предметного променів, що в кінцевому результаті призводить до утворення інтерференційної картини. Таким чином, дефекти у об'єкті виявляються шляхом аналізу інтерференційної картини на предмет наявності локальних нетипових розподілів інтерференційних кіл.

На жаль, подібний спосіб виявлення дефектів на основі аналізу розподілу інтерференційних кіл є малоавтоматизованим, адже рішення стосовно наявності дефектів приймається людиною на основі візуального аналізу інтерференційної картини, а тому в даному випадку мова йде про якісний аналіз, у якому важливі не точні значення інтерференційної фази, а загальний вигляд інтерференційної картини. Навіть маючи оцифровану інтерферограму досить складно створити універсальний алгоритм аналізу, оскільки існує безліч варіантів загального впорядкування інтерференційних кіл та поєднання їх з такими, що утворились внаслідок наявності дефектів.

Окрім голографічних інтерференційних методів дослідження мікродеформацій також існує клас методів голографічної інтерферометрії для дослідження мікрорельєфу, які мають назву методів голографічного окреслення (англ. *holographic contouring*) [4].

Методи голографічного окреслення поверхні об'єкта дозволяють відобразити на його поверхні кола, які відповідають ділянкам з однаковою висотою відносно деякої опорної площини, або ж, іншими словами, отримати картину контурних ліній рельєфу поверхні. На відміну від методів виявлення деформацій, в даному випадку поверхня досліджуваного об'єкту не зазнає зміщення. Два стани розсіяного об'єктом поля, накладання яких дозволяє отримати інтерференційну картину, утворюються

шляхом зміни інших факторів, що впливають на оптичну довжину шляху, наприклад, довжини хвилі випромінювання. Серед методів отримання голографічних контурних інтерферограм виділяють: метод двох довжин хвиль, двох точок освітлення та двох показників заломлення.

Для даної роботи найбільший інтерес представляє метод двох довжин хвиль, тому розглянемо принцип його роботи. Суть методу двох довжин хвиль полягає у наступному [3, 5]. Як і у інших методах голографічної інтерферометрії опорна хвиля випромінювання інтерферує в площині голограми з іншою своєю частиною, яка була розсіяна досліджуваним об'єктом. Дві голограми записуються з довжинами хвиль λ_1 та λ_2 на одну і ту ж фотопластину або одночасно при використанні двох джерел випромінювання або ж послідовно за рахунок зміни довжини хвилі випромінювання лазера. Після проявлення, двоекспонована фотопластину опромінюється опорною хвилею лише з однією довжиною хвилі, наприклад, λ_2 , за рахунок чого утворюються два уявних зображення. Зображення записане за допомогою довжини хвилі λ_2 буде співпадати з поверхнею об'єкта, а інше — записане за допомогою λ_1 , але відновлене хвилею λ_2 , буде дещо деформованим. Через наявність осьового зміщення між двома зображеннями під час їх одночасного відновлення утвориться інтерференційна картина.

В результаті усі точки поверхні об'єкта, що мають однакову z -координату (висоту) будуть об'єднані свого роду контурною лінією за рахунок чого утвориться зображення поверхні з накладеними контурними лініями. Різниця висоти між сусідніми інтерференційними смугами буде дорівнювати [6]:

$$\Delta H = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2|\lambda_1 - \lambda_2|} = \frac{\Lambda}{2}, \quad (1)$$

де Λ — синтезована або еквівалентна довжина хвилі.

На рис. 1 наведений приклад вигляду об'єкта з накладеною картиною контурних ліній рельєфу поверхні, яка була отримана з використанням методу двох довжин хвиль [5].

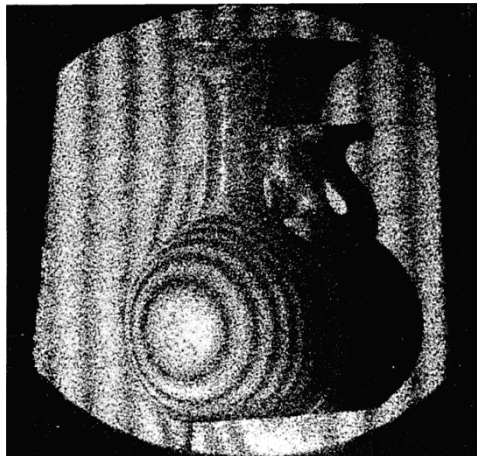


Рис. 1. Візуалізація контурних ліній рельєфу поверхні за методом двох довжин хвиль

Вимірювання великих деформацій за методами голографічної інтерферометрії часто призводить до отримання інтерферограм з великою щільністю кіл, які неможливо розрізнити. Використання джерел випромінювання із довгою довжиною хвилі, наприклад, інфрачервоного CO_2 лазера з $\lambda = 10.6$ мкм дозволило б розширити діапазон вимірюваних деформацій, проте, для інфрачервоного випромінювання довелося б замінити оптичні елементи на ті, матеріал яких є прозорим у інфрачервоному діапазоні, та замінити матеріал фотопластин.

Альтернативне рішення стосовно розширення діапазону вимірювань полягає у використанні двоххвильової голографії, яка дозволяє отримати інтерферограми, які еквівалентні таким, що були отримані з використанням випромінювання інфрачервоного діапазону з використанням лише довжин хвиль видимого діапазону. У *двоххвильовій голографічній інтерферометрії* на фотопластину записують дві інтерферограми за методом двох експозицій одного і того ж об'єкта, що зазнає однакової деформації, використовуючи два джерела випромінювання з різними довжинами хвиль. При відновленні предметних полів за допомогою просторової фільтрації усі непотрібні складові інтерференційної картини усуваються, залишаючи лише муаровий візерунок, який є ідентичним до інтерферограми, отриманої з використанням синтезованої або еквівалентної довжини хвилі, величина якої дорівнює [7]:

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}. \quad (2)$$

При використанні газових лазерів, наприклад, гелій-неонового або аргонного, можна отримати випромінювання на близьких довжинах хвиль з різницею близько 10 нм, що дасть змогу отримати інтерференційну картину на синтезованій довжині хвилі біля 20 мкм. З розвитком налаштовуваних напівпровідникових лазерів стає можливим отримання випромінювання на двох довжинах хвиль зі ще меншою різницею частоти, що дасть змогу отримувати інтерферограми зі ще більшою величиною синтезованої довжини хвилі.

До появи відеотрубок та напівпровідникових фоточутливих матриць для визначення приблизного розподілу інтерференційної фази на основі інтерферограм доводилось вручну підраховувати послідовність інтерференційних кіл, що ще більше ускладнювало використання голографічної інтерферометрії у виробництві. З появою CCD/CMOS сенсорів та розвитком цифрової голографії з'явилась можливість обчислювальним шляхом реконструювати предметні хвилі та на їх основі отримати інтерференційну картину. Крім цього, у випадку цифрової голографії інтерференційна картина (амплітудна складова) не потрібна, адже розподіл фази оптичного поля може бути прямо визначений з цифрових голограм.

МЕТОД ДВО- ТА БАГАТОХВИЛЬОВОЇ ЦИФРОВОЇ ГОЛОГРАФІЧНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Розглянутий раніше спосіб отримання інтерферограми за методом двох довжин хвиль у цифровій голографічній інтерферометрії реалізується наступним чином. Дві цифрові голограми записуються із використанням двох довжин хвиль. За допомогою чисельного моделювання предметне оптичне поле відновлюється з використанням саме тієї довжини хвилі, з використанням якої і відбувався запис даної голограми. За рахунок цього вдається уникнути деформацій поля, спричиненого відновленням з використанням не тієї довжини хвилі, як це має місце у класичній голографічній інтерферометрії, у якій обидві голограми реконструюються із використанням однієї і тієї ж довжини хвилі.

Дві цифрові голограми додаються, що дає змогу отримати цифровий еквівалент двоекспозиційної голограми. Після цього відбувається чисельна реконструкція результуючого поля з якого в подальшому обраховується розподіл інтенсивності, який є еквівалентом інтерференційної картини. Проте, як зазначалось раніше, для визначення інтерференційної фази у випадку цифрової інтерферометрії не потрібна амплітуда інтерференційної картини. Замість цього можна визначити розподіл фази оптичного поля кожної голограми, взявши до уваги, що цифрова голограма являє собою масив комплексних чисел, використовуючи рівність [6]:

$$\begin{aligned} \varphi_1(x, y) &= \arctan \frac{\text{Im}\{U_1(x, y)\}}{\text{Re}\{U_1(x, y)\}}, \\ \varphi_2(x, y) &= \arctan \frac{\text{Im}\{U_2(x, y)\}}{\text{Re}\{U_2(x, y)\}}, \\ \varphi &\in [-\pi; \pi]. \end{aligned} \quad (3)$$

В результаті інтерференційна фаза буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \begin{cases} \varphi_1 - \varphi_2 + 2\pi & \text{якщо } \varphi_1 - \varphi_2 < 0 \\ \varphi_1 - \varphi_2 & \text{якщо } \varphi_1 - \varphi_2 \geq 0 \end{cases}, \\ \lambda_{\varphi_1} &< \lambda_{\varphi_2}, \\ \Delta\varphi &\in [0; 2\pi]. \end{aligned} \quad (4)$$

Як і у класичній двоххвильовій голографії, отримана фазова мапа є еквівалентом фазової мапи голограми, що була записана із синтезованою довжиною хвилі Λ , а різниця фази у 2π дорівнює різниці висоти у Δh , яка визначається за формулою (1).

При наявності будь-яких значних нерівностей на досліджуваній поверхні вимірювання фазових мап значно ускладнюється, оскільки для отримання достовірних результатів величина синтезованої довжини хвилі Λ повинна бути вдвічі більшою за найбільшу висоту профілю — відстань між лінією виступів профілю і лінією впадин профілю в межах базової довжини, так як випромінювання двічі проходить один і той же шлях під час падіння та відбиття від поверхні.

У [8] наведено результати вимірювання профілю поверхні резистора за допомогою багатохвильової цифрової голографічної інтерферометрії. Використання лазерів з можливістю

корегувати довжину хвилі випромінювання дозволило отримати 7 голограм і в подальшому розрахувати розподіл інтерференційної фази для 3 синтезованих довжин хвиль (рис. 2) на базі яких був отриманий профіль поверхні резистора.

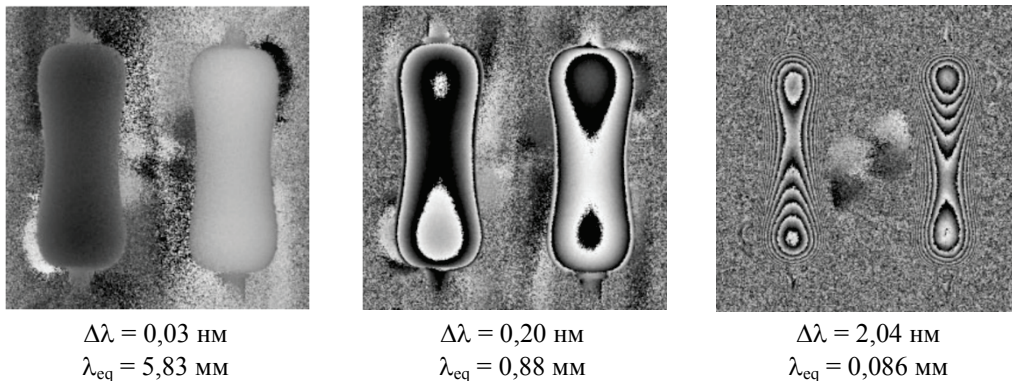


Рис. 2. Розподіл інтерференційної фази для різних еквівалентних довжин хвиль

Розрахунок цифрової голограми на синтезованій довжині хвилі потребує наявності двох початкових голограм, які були записані в абсолютно однакових умовах з відмінністю лише у довжині хвилі предметного поля. Зрозуміло, що отримати дві голограми можна або послідовним шляхом, за якого довжина хвилі випромінювання джерела змінюється між фотофіксацією інтерференційної картини, або паралельним, коли одночасно використовуються два джерела випромінювання та деякий спосіб спектрального розділення інтерференційних картин. Перевага одночасної реєстрації декількох голограм, безумовно, полягає у тому, що будь-які вібрації, зміни оптичного шляху через зміну швидкості потоку повітря чи інші фактори, вплив яких складно передбачити, однаково відображаються у обох голограмах. Крім цього, дослідження рухомих об'єктів, наприклад, мікроорганізмів, також можливе лише за умови одночасної реєстрації голограм.

Для одночасної реєстрації декількох голограм на різних довжинах хвиль використовуються схеми позаосьового запису з наступною фільтрацією Фур'є спектру [9]; стекові матриці, у яких спектральне розділення базується на залежності глибини проникнення фотонів у кремній [10]; CCD/CMOS матриці з фільтром Баєра [11]; дихроїдні призми з трьома фотоматрицями (3CCD) [12].

МЕТОД ІТЕРАЦІЙНОГО РОЗРАХУНКУ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ ФАЗОВИХ МАП ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЙОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Як зазначалось у попередніх розділах, метод двоххвильової голографічної інтерферометрії дозволяє отримати синтезовану інтерферограму, розподіл інтерференційних смуг на якій відповідає довжині хвилі, величина якої обернено пропорційна різниці величин двох початкових довжин хвиль – формула (2). Наведена у роботі [11] система, що використовує гелій-кадмієвий лазер, дозволяє одночасно реєструвати три початкові інтерференційні картини на довжинах хвилі $\lambda_R = 636,0 \text{ нм}$, $\lambda_G = 537,8 \text{ нм}$, $\lambda_B = 441,6 \text{ нм}$, що дозволить на їх основі розрахувати три синтезованих інтерферограми на таких довжинах хвиль:

$$\Lambda_{RG} = \frac{636.0 \cdot 537.8 \cdot 10^{-18}}{(636.0 - 537.8) \cdot 10^{-9}} = 3.483 \text{ мкм},$$

$$\Lambda_{GB} = \frac{537.8 \cdot 441.6 \cdot 10^{-18}}{(537.8 - 441.6) \cdot 10^{-9}} = 2.468 \text{ мкм},$$

$$\Lambda_{RB} = \frac{636.0 \cdot 441.6 \cdot 10^{-18}}{(636.0 - 441.6) \cdot 10^{-9}} = 1.444 \text{ мкм}.$$

Як бачимо, використання методу двоххвильової голографічної інтерферометрії у контексті даної системи дозволяє збільшити максимальну оптичну довжину шляху, що може бути однозначно вимірною, за умови відсутності завад, з $636 / 2 = 318 \text{ нм}$ до $3483 / 2 = 1741,5 \text{ нм}$.

При вимірюванні профілю поверхні з найбільшою висотою, яка перевищує 1.74 мкм на фазовій мапі з'являється розриви. Для подальшого розширення діапазону вимірювань фази автором пропонується

наступний метод розрахунку фазових мап з розширеним діапазоном. Для систем з реєстрацією трьох голограм метод складатиметься з такої послідовності дій:

1. Отримання мап головної фази з трьох початкових голограм за допомогою формули (3). У отриманих фазових мапах $\varphi \in [-\pi; \pi]$, однак для спрощення реалізації алгоритму величина фази у всіх точках буде збільшена на π , після чого $\varphi \in [0; 2\pi]$.

2. Розрахунок мап інтерференційної фази за формулою (4) використовуючи початкові фазові мапи, отримані після попереднього кроку. Для розробленої системи еквівалентні довжини хвиль таких фазових мап будуть дорівнювати $\Lambda_{RG} = 3,483$ мкм, $\Lambda_{GB} = 2,468$ мкм та $\Lambda_{RB} = 1,444$ мкм.

3. З отриманих трьох синтезованих фазових мап обираються дві, різниця довжин хвиль яких є найменшою, так як саме їх інтерференційна фаза буде мати найбільшу еквівалентну довжину хвилі. Для згаданої системи такими синтезованими фазовими мапами будуть Λ_{RG} та Λ_{GB} з $\varphi \in [0; 2\pi]$.

4. Обрахування останньої синтезованої фазової мапи з найбільшою еквівалентною довжиною хвилі за формулою (4) на основі якої стане можливим розрахунок профілю поверхні при умові, що дана мапа не буде містити розривів. Для згаданої системи остання синтезована фазова мапа буде мати еквівалентну довжину хвилі рівну:

$$\Lambda_{RG_GB} = \frac{3.483 \cdot 2.468 \cdot 10^{-12}}{(3.483 - 2.468) \cdot 10^{-6}} = 8.469 \text{ мкм} .$$

Як бачимо, використання запропонованого методу ітераційного розрахунку інтерференційних фазових мап у контексті трьоххвильової системи цифрової голографії дозволило збільшити найбільшу допустиму висоту профілю поверхні досліджуваних об'єктів з 0,318 мкм (у режимі однохвильової голографії) та 1,74 мкм (у режимі двоххвильової голографії) до 4,234 мкм.

Представлений метод може використовуватись і у системах багатохвильової голографії з кількістю хвиль більшою за три, що є досить актуальним для систем оснащених налаштовуваними напівпровідниковими чи барвниковими лазерами та монохромними камерами. Блок-схема запропонованого методу ітераційного розрахунку інтерференційних фазових мап наведена на рис. 3.

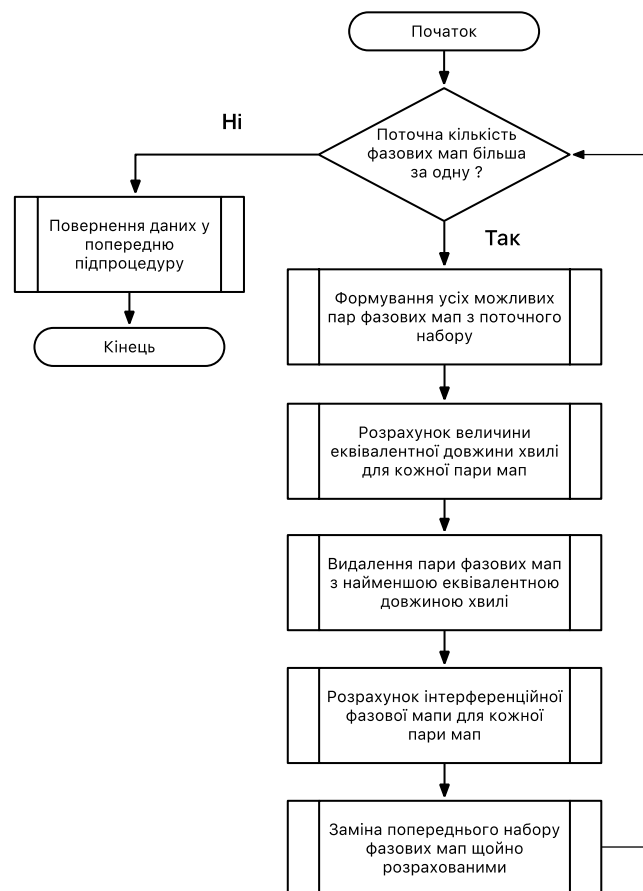


Рис. 3. Блок-схема методу ітераційного розрахунку інтерференційних фазових мап

За рахунок влаштованої векторизації базових операцій на зразок додавання чи множення середовище MATLAB дозволяє спростити реалізацію алгоритмів для роботи з великорозмірними масивами, а наявність широкого переліку влаштованих функцій для типових операцій на зразок сортування дозволяє зменшити ризик виникнення помилок під час написання програмного забезпечення. Через наведені переваги для реалізації та моделювання роботи запропонованого методу було обране програмне середовище MATLAB.

Для моделювання процесу зміни фази оптичного випромінювання внаслідок його розсіювання поверхнею досліджуваного об'єкту використаємо наступні відомі математичні залежності:

$$\begin{aligned} \varphi &= kx + \omega t + \varphi_0, \\ k &= \frac{2\pi}{\lambda}, \\ U &= Ae^{i\varphi}, \end{aligned} \quad (5)$$

де φ та φ_0 — поточна та початкова величина фази плоскої хвилі; k — хвильове число; x — відстань відносно певної опорної площини; U — комплексна амплітуда плоскої хвилі.

На рис. 4 наведений профіль довільної поверхні а також площина A , відносно якої буде розраховуватись оптична довжина шляху плоскої хвилі.

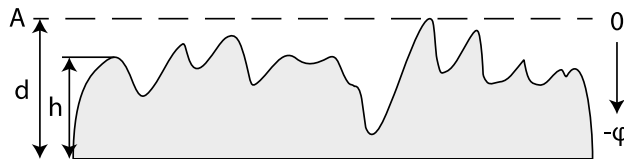


Рис. 4. Позначення точок поверхні для розрахунку величини фази падаючої хвилі

Для спрощення моделювання прийемо, $t = 0$, $\varphi_0 = 0$ а також те, що площина A співпадає з найвищою точкою профілю поверхні, а падаюча плоска хвиля дзеркально відбивається у зворотному напрямку в кожній точці поверхні. Таким чином, величина фази плоскої хвилі у площині A після відбиття від поверхні об'єкта буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} \varphi &= -2kd + 2kh, \\ \varphi &= 2k(h - d), \\ \varphi &= \frac{4\pi}{\lambda}(h - d). \end{aligned} \quad (6)$$

Використовуючи рівняння (6) для обчислення величини абсолютної фази для заданої довжини хвилі та точки поверхні, а також прийнявши амплітуду A рівною 1, можливо знайти масив значень комплексної амплітуди, який буде являти собою аналог відновленої чисельним шляхом цифрової голограми. В подальшому за допомогою функції MATLAB — `angle`, яка використовує формулу (3), отримується масив головних значень фази для кожної початкової довжини хвилі. Програмна реалізація даного способу отримання початкових фазових мап була винесена у окрему функцію — `phaseMap`.

Оскільки мікрорельєф поверхні має досить невпорядковану та непередбачувану структуру, для генерації тестової поверхні для подальшого моделювання розробленого методу був використаний шум Перліна. Шум Перліна досить часто використовується у дво- та тривимірній графіці для процедурної генерації як текстур так і каркасу самих моделей через привабливий зовнішній вигляд отриманих розподілів, що обумовлюється наявністю як низько- так і височастотних складових у вихідному наборі значень. Для задач даної роботи використовувалась реалізація алгоритму генерації двовимірного шуму Перліна для MATLAB опублікована в [13]. Згенерована поверхня, яка використовувалась у подальшому моделюванні, наведена на рис. 5. Розподіл висот початкового рельєфу знаходився в діапазоні $[0; 1]$, що дозволяло змінювати максимальну висоту профілю шляхом множення на необхідне значення. Роздільна здатність мапи рельєфу дорівнювала 993 на 993 елементи, а висота профілю поверхні — 20 мкм.

Для реалізації запропонованого методу була створена окрема функція для середовища MATLAB, єдиним вхідним аргументом якої був `cell`-масив, кожним елементом якого є інший `cell`-масив з двох елементів — у першому знаходилась величина довжини хвилі, на якій була отримана цифрова голограма, а в другому — відповідна фазова мапа. За допомогою функції MATLAB — `nchoosek` одержувались усі можливі пари фазових мап та розраховувалась еквівалентна довжина хвилі інтерференційної фазової мапи λ_{eq} , яка може бути в подальшому обрахована з даної пари мап. Далі отриманий масив пар

сортувався за допомогою функції `sort` згідно до величини еквівалентної довжини хвилі, після чого пара з найменшою λ_{eq} видаляється з масиву. На наступному етапі для усіх залишених пар фазових мап безпосередньо розраховуються інтерференційні фазові мапи, які заміщують собою попередні початкові фазові мапи. За допомогою циклу `while` наведені кроки ітераційно виконуються доки не залишиться лише одна фазова мапа, яка і повертається у вихідному аргументі розробленої функції.

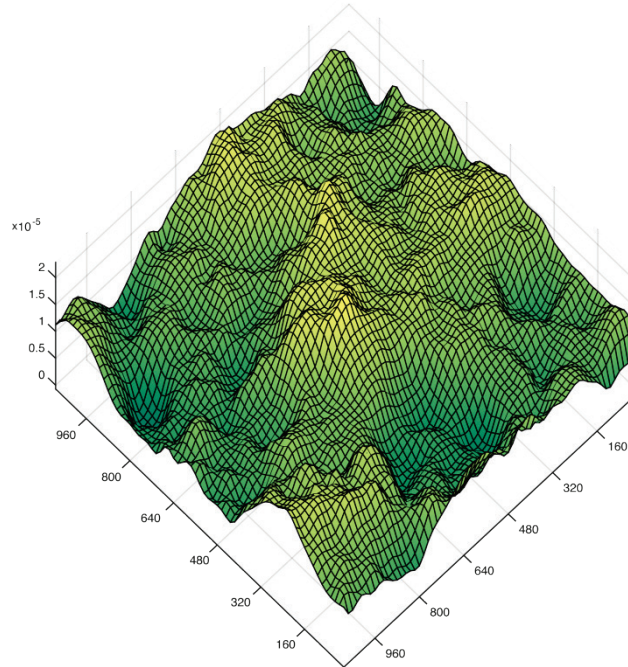


Рис. 5. Згенерований випадковим чином профіль поверхні, який в подальшому використовувався під час моделювання

Для моделювання роботи розробленої програмної реалізації методу ітераційного розрахунку інтерференційних фазових мап були створені три початкові фазові мапи для довжин хвиль 670, 532 та 445 нм за допомогою функції `phaseMap` для згенерованого раніше профілю поверхні. На рис. 6 наведені графіки значень головної фази для кожної довжини хвилі, які були отримані шляхом взяття центрального рядку із кожної двовимірної фазової мапи.

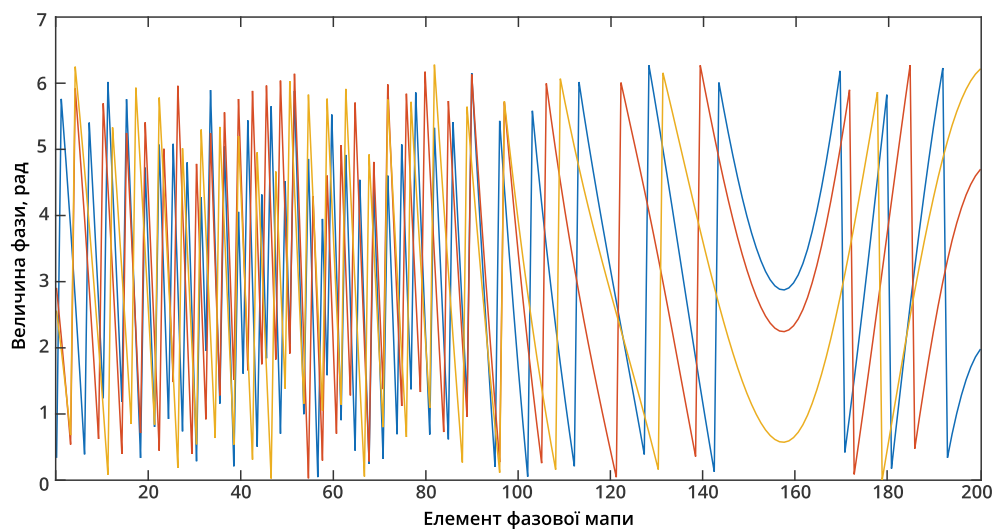


Рис. 6. Фрагмент перерізу початкових фазових мап для трьох довжин хвиль

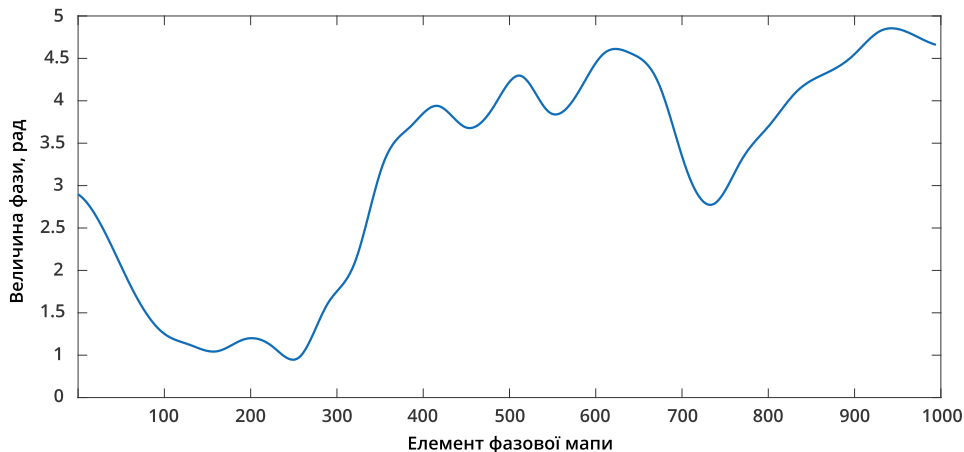


Рис. 7. Переріз фазової мапи, отриманої після останньої ітерації розробленого методу

Як бачимо з наведеного рисунку, у мапах головної фази наявна велика кількість розривів, що обумовлюється досить малою довжиною хвилі у порівнянні з найбільшою висотою профілю поверхні. Після виконання першої ітерації розробленого методу були отримані дві інтерференційні фазові мапи з $\Lambda_{RG} = 2,582$ мкм та $\Lambda_{GB} = 2,721$ мкм. Після другої та завершальної ітерації розробленого методу була отримана остання фазова мапа з еквівалентною довжиною хвилі 50,83 мкм (рис. 7).

Завдяки тому, що еквівалентна довжина хвилі останньої фазової мапи дорівнює 50,83 мкм, у ній повністю відсутні розриви, за рахунок чого можливо обчислити профіль поверхні за допомогою формули:

$$h = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi. \quad (7)$$

Таким чином, проведене моделювання запропонованого методу ітераційного розрахунку інтерференційних фазових мап підтвердило очікувані результати для системи трьоххвильової цифрової голографії.

ВИСНОВКИ

1. Один з напрямків розширення функціональних можливостей систем багатохвильової цифрової голографії полягає у збільшенні найбільшої оптичної довжини шляху, яка може бути виміряна без появи розривів на фазовій мапі.

2. Дістав подальшого розвитку метод двоххвильової голографічної інтерферометрії, який було адаптовано для систем з кількістю довжин хвиль більшою за дві шляхом створення методу ітераційного розрахунку інтерференційних фазових мап, що дозволило збільшити величину максимального профілю поверхні, яка може бути безпомилково виміряна системами багатохвильової голографічної інтерферометрії.

3. Наведено особливості реалізації запропонованого методу в середовищі MATLAB та проведено його моделювання для системи трьоххвильової голографії. Результати моделювання свідчать про те, що використання даного методу дозволило збільшити найбільшу висоту профілю з 0,335 мкм (у режимі однохвильової голографії) та 1.36 мкм (у режимі двоххвильової голографії) до 25,419 мкм.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Schnars U. Digital Holography and Wavefront Sensing: Principles, Techniques and Applications / U. Schnars, C. Falldorf, J. Watson, W. Juptner. — Springer, 2014. — 226 p.
2. Голографические неразрушающие исследования: Пер. с англ. / Пер. В. А. Егоров, В. А. Карасев : под ред. В. А. Карасева. — М. : Машиностроение, 1979. — 448 с.
3. Schnars U. Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques / U. Schnars, W. Juptner. — Springer, 2005. — 164 p.
4. Thomas Kreis Handbook of Holographic Interferometry – Optical and Digital Methods / Thomas Kreis. — Wiley-VCH, 2004. — 554 p.
5. Friesem A. A. Fringe formation in two-wavelength contour holography / A. A. Friesem, U. Levy // Applied Optics. — 1976. — Vol. 15, No. 12. — P. 3009—3020.
6. Schnars U. Digital recording and numerical reconstruction of holograms / U. Schnars, W. Juptner //

- Measurement Science and Technology. — 2002. — Vol. 13, No. 9. — P. 85—101.
7. Wyant J. C. Testing Aspherics Using Two-Wavelength Holography / J. C. Wyant // *Applied Optics*. — 1971. — Vol. 10, Issue 9. — P. 2113—2118.
 8. Wolfgang O. Absolute shape control of microcomponents using digital holography and multiwavelength contouring / O. Wolfgang, S. Soenke, B. Torsten, J. Werner // *Proceedings of SPIE: Metrology-based Control for Micro-Manufacturing*. — 2001. — Vol. 4275. — P. 71—84.
 9. Kuhn J. Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy with a single hologram acquisition / J. Kuhn, T. Colomb, F. Montf, Y. Emery, E. CuChe, P. Marquet, C. Depeursinge // *Optics Express*. — 2007. — Vol. 15(12). — P. 7231—7242.
 10. Pascal P. High-resolution digital two-color holographic metrology / P. Pascal, M. Denis, D. Jean-Michel // *Optics Letters*. — 2008. — Vol. 33(3). — P. 276—278.
 11. Yamaguchi I. Phase-shifting color digital holography / I. Yamaguchi, T. Matsumura, J. Kato // *Optics Letters*. — 2002. — Vol. 27(13). — P. 1108—1110.
 12. Three-CCD camera [Електронний ресурс]. — Режим доступу : https://en.wikipedia.org/wiki/ThreeCCD_camera. — Назва з екрану. — Дата звернення: 18.05.2016.
 13. 2D and 3D Perlin Noise in MATLAB [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://www.semifluid.com/2012/12/05/2d-and-3d-perlin-noise-in-matlab/>. — Назва з екрану. — Дата звернення: 18.05.2016.

SPUSOK LITERATURU

1. Schnars U. *Digital Holography and Wavefront Sensing: Principles, Techniques and Applications* / U. Schnars, C. Falldorf, J. Watson, W. Juptner. — Springer, 2014. — 226 p.
2. *Holographic nondestructive research: Transl. from Eng.* / Transl. by V. A. Egorov, V. A. Karasev: Ed. by V. A. Karasev. — M. : Mashinostroenie, 1979. — 448 p.
3. Schnars U. *Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques* / U. Schnars, W. Juptner. — Springer, 2005. — 164 p.
4. Thomas Kreis *Handbook of Holographic Interferometry — Optical and Digital Methods* / Thomas Kreis. — Wiley-VCH, 2004. — 554 p.
5. Friesem A. A. Fringe formation in two-wavelength contour holography / A. A. Friesem, U. Levy // *Applied Optics*. — 1976. — Vol. 15, No. 12. — P. 3009—3020.
6. Schnars U. Digital recording and numerical reconstruction of holograms / U. Schnars, W. Juptner // *Measurement Science and Technology*. — 2002. — Vol. 13, No. 9. — P. 85—101.
7. Wyant J. C. Testing Aspherics Using Two-Wavelength Holography / J. C. Wyant // *Applied Optics*. — 1971. — Vol. 10, Issue 9. — P. 2113—2118.
8. Wolfgang O. Absolute shape control of microcomponents using digital holography and multiwavelength contouring / O. Wolfgang, S. Soenke, B. Torsten, J. Werner // *Proceedings of SPIE: Metrology-based Control for Micro-Manufacturing*. — 2001. — Vol. 4275. — P. 71—84.
9. Kuhn J. Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy with a single hologram acquisition / J. Ku, Y. Emery, E. CuChe, P. Marquet, C. Depeursinge // *Optics Express*. — 2007. — Vol. 15(12). — P. 7231—7242.
10. Pascal P. High-resolution digital two-color holographic metrology / P. Pascal, M. Denis, D. Jean-Michel // *Optics Letters*. — 2008. — Vol. 33(3). — P. 276—278.
11. Yamaguchi I. Phase-shifting color digital holography / I. Yamaguchi, T. Matsumura, J. Kato // *Optics Letters*. — 2002. — Vol. 27(13). — P. 1108—1110.
12. Three-CCD camera [Electronic resource]. — Access: https://en.wikipedia.org/wiki/ThreeCCD_camera. — Title is from screen. — Date of access: 18.05.2016.
13. 2D and 3D Perlin Noise in MATLAB [Electronic resource]. — Access: <http://www.semifluid.com/2012/12/05/2d-and-3d-perlin-noise-in-matlab/>. — Title is from screen. — Date of access: 18.05.2016.

Надійшла до редакції 8.09.2016 р.

ДОВГАЛЮК РОСТИСЛАВ ЮРІЙОВИЧ — аспірант кафедри лазерної та оптико-електронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, E-mail: rostyslav.research@gmail.com