

# Метод та система багатохвильової цифрової голографії для вимірювання фазових мап та мікрорельєфу поверхні об'єктів

ст. гр. ЛОТ-14мн Довгалюк Р. Ю.

Керівник: к.т.н., доц. Заболотна Н. І.

У більшості методів оптичної метрології, які використовують класичні фотодетектори, безпосередньо вимірюється лише амплітуда розсіяного оптичного поля.

Для повноцінної характеристики досліджуваного об'єкта необхідно також вимірювати і фазу оптичного поля.

Технологія голографії дозволяє записувати повну інформацію про хвильовий фронт, включаючи фазу і амплітуду.

Голографічна інтерферометрія є єдиним методом, що дозволяє визначати деформації поверхонь об'єктів із довільною шорсткістю у нанометровому діапазоні та вимірювати розподіл показника заломлення у прозорих речовинах.

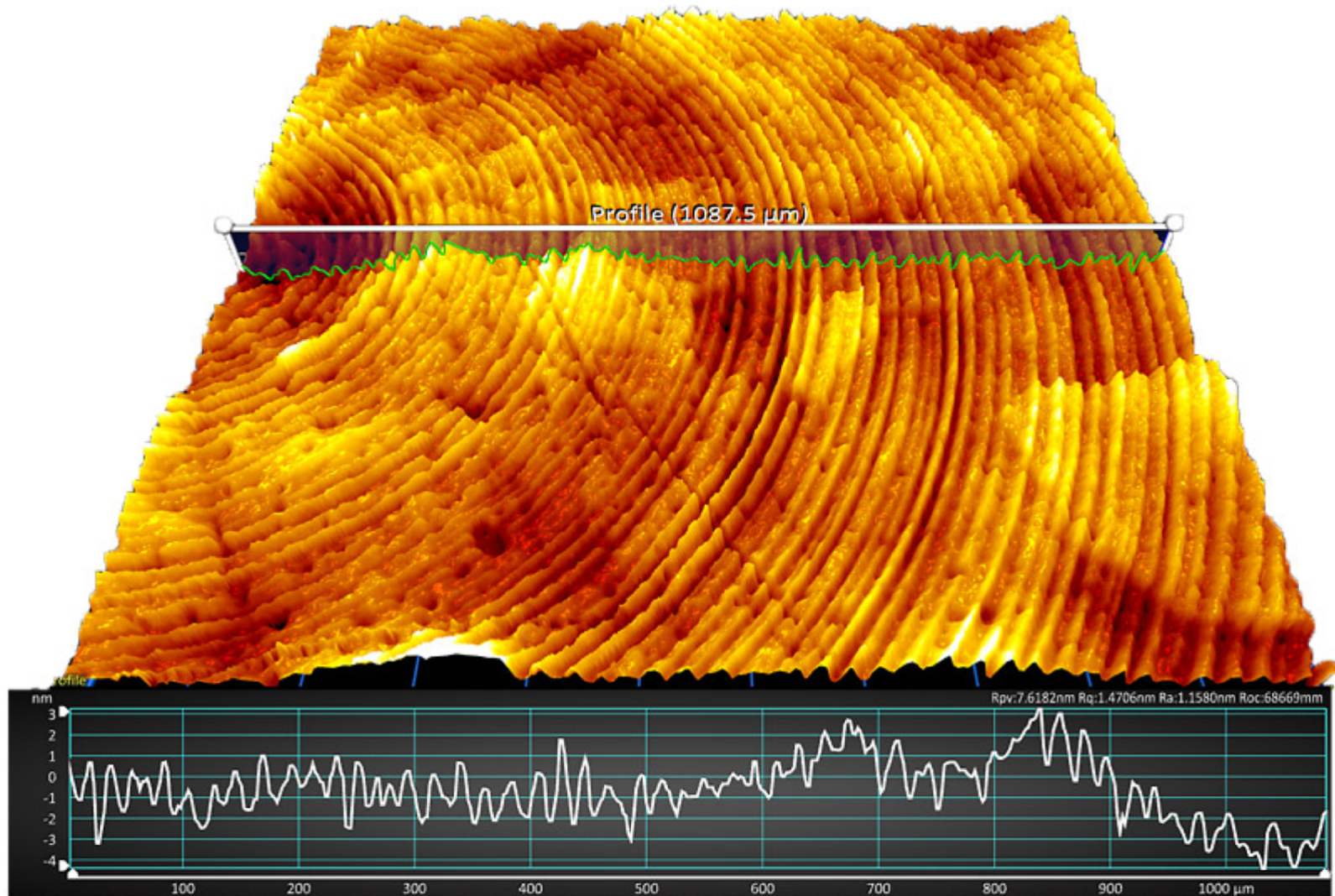
Використання методів голографічної інтерферометрії у неруйнівному контролі до останнього часу стримувалось складнощами роботи з голографічними фотопластинами.

Розвиток обчислювальної техніки та CMOS/CCD матриць привів до появи цифрової голографії — напрямку голографії, у якому не використовуються фотопластини, а саме відновлення оптичного поля здійснюється чисельним шляхом.

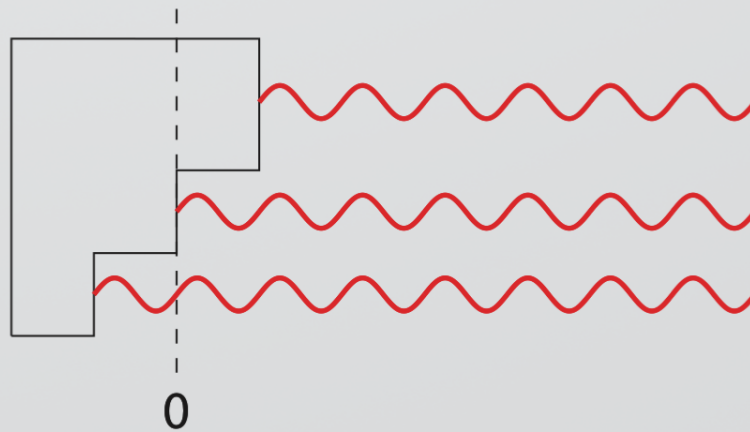
Цифрова голографія використовується для контролю високоточних металургійних виробів на зразок лопаток газотурбінних двигунів, дослідження мікрочасток у задачах мікроскопії та вимірювання швидкості рідин та газів у задачах велосиметрії.

Для вимірювання нерівностей (шорсткості) обробленої поверхні деталей був створений окремий клас безконтактних оптичних профілометрів.

## Приклад вимірювань профілю поверхні за допомогою голографічних профілометрів

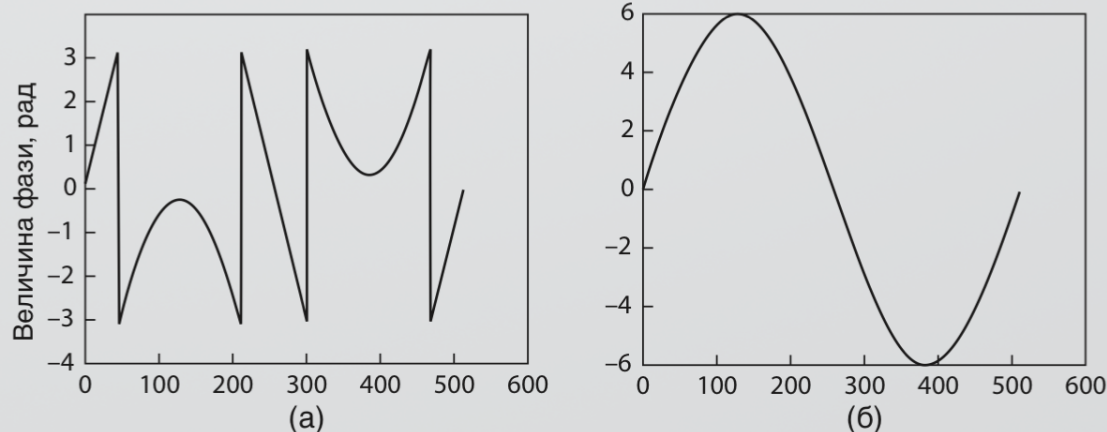


Отримання корисної інформації при використанні методів цифрової голографії базується на аналізі мап розподілу фази оптичного поля.



Оскільки фаза електромагнітної хвилі є періодичною, стає неможливим однозначне визначення зміни оптичної довжини шляху більшої за довжину хвилі.

Для отримання мапи абсолютних значень фази (б) з мапи головних значень (а) використовуються методи розгортки фази.



Дані методи не завжди надають коректний результат у випадку наявності завад у фазових мапах або недостатній частоті дискретизації.

В результаті, є актуальним створення методів та систем з розширеним діапазоном вимірювання оптичної довжини шляху випромінювання для усунення необхідності використовувати алгоритми розгортки фази.

Розширення функціональних можливостей систем багатохвильової цифрової голографії

за рахунок збільшення найбільшої оптичної довжини шляху, яка може бути виміряна без появи розривів на фазовій мапі

шляхом розробки нового методу ітераційного розрахунку інтерференційних фазових мап.

**Об'єктом дослідження** є методи та системи цифрової голографії для неруйнівного контролю.

**Предметом дослідження** є метод та система багатохвильової голографічної інтерферометрії для вимірювання профілю (мікрорельєфу) поверхні досліджуваних об'єктів.

У класичній двохвильовій 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:

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$$

Для визначення інтерференційної фази у випадку цифрової інтерферометрії не потрібна амплітуда інтерференційної картини. Замість цього можна безпосередньо визначити розподіл фази оптичного поля кожної голограми.

$$\phi_n(x, y) = \arctan \left( \frac{\operatorname{Im}\{U_n(x, y)\}}{\operatorname{Re}\{U_n(x, y)\}} \right)$$

$$\phi \in [-\pi; \pi]$$

Величина інтерференційної фази буде дорівнювати:

$$\Delta\phi = \begin{cases} \phi_1 - \phi_2 + 2\pi, & \text{якщо } \phi_1 - \phi_2 < 0 \\ \phi_1 - \phi_2, & \text{якщо } \phi_1 - \phi_2 \geq 0 \end{cases}$$

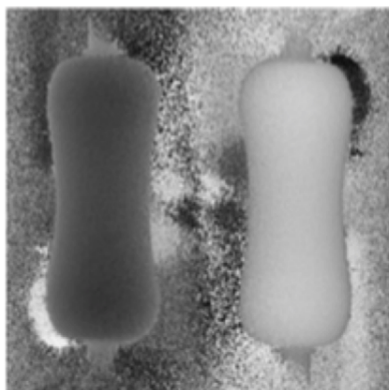
$$\Delta\phi \in [0; 2\pi]$$

Як і у класичній двохвильовій голографії, отримана фазова мапа є еквівалентом фазової мапи голограми, що була записана із синтезованою довжиною хвилі  $\Lambda$ .

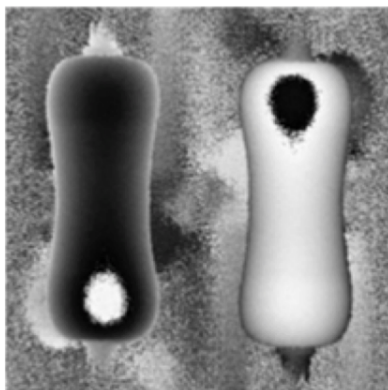
Отримане значення інтерференційної фази є відомим по модулю  $2\pi$  радіан.

Абсолютне ж значення фази, яке і використовується у неруйнівному контролі, наприклад, для створення мапи висот рельєфу, лежить в набагато більшому діапазоні.

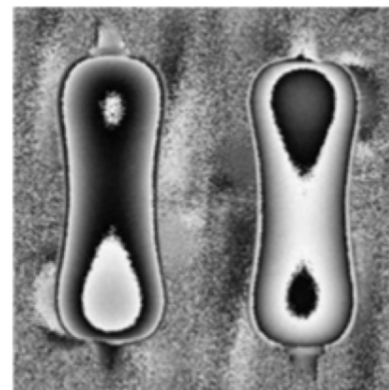
Фазові мапи, отримані за допомогою цифрової двохвильової голографічної інтерферометрії



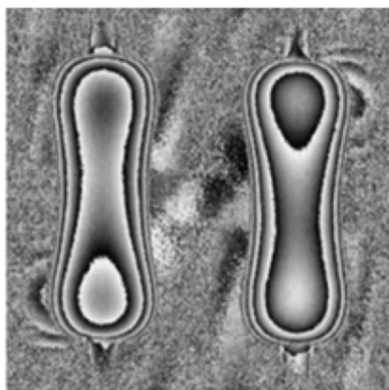
$$\Delta\lambda = 0.03 \text{ нм}$$
$$\Lambda_{eq} = 5.83 \text{ мм}$$



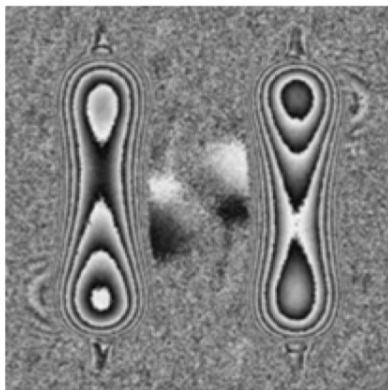
$$\Delta\lambda = 0.08 \text{ нм}$$
$$\Lambda_{eq} = 2.19 \text{ мм}$$



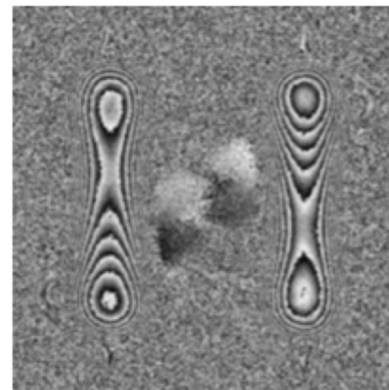
$$\Delta\lambda = 0.20 \text{ нм}$$
$$\Lambda_{eq} = 0.88 \text{ мм}$$



$$\Delta\lambda = 0.49 \text{ нм}$$
$$\Lambda_{eq} = 0.36 \text{ мм}$$



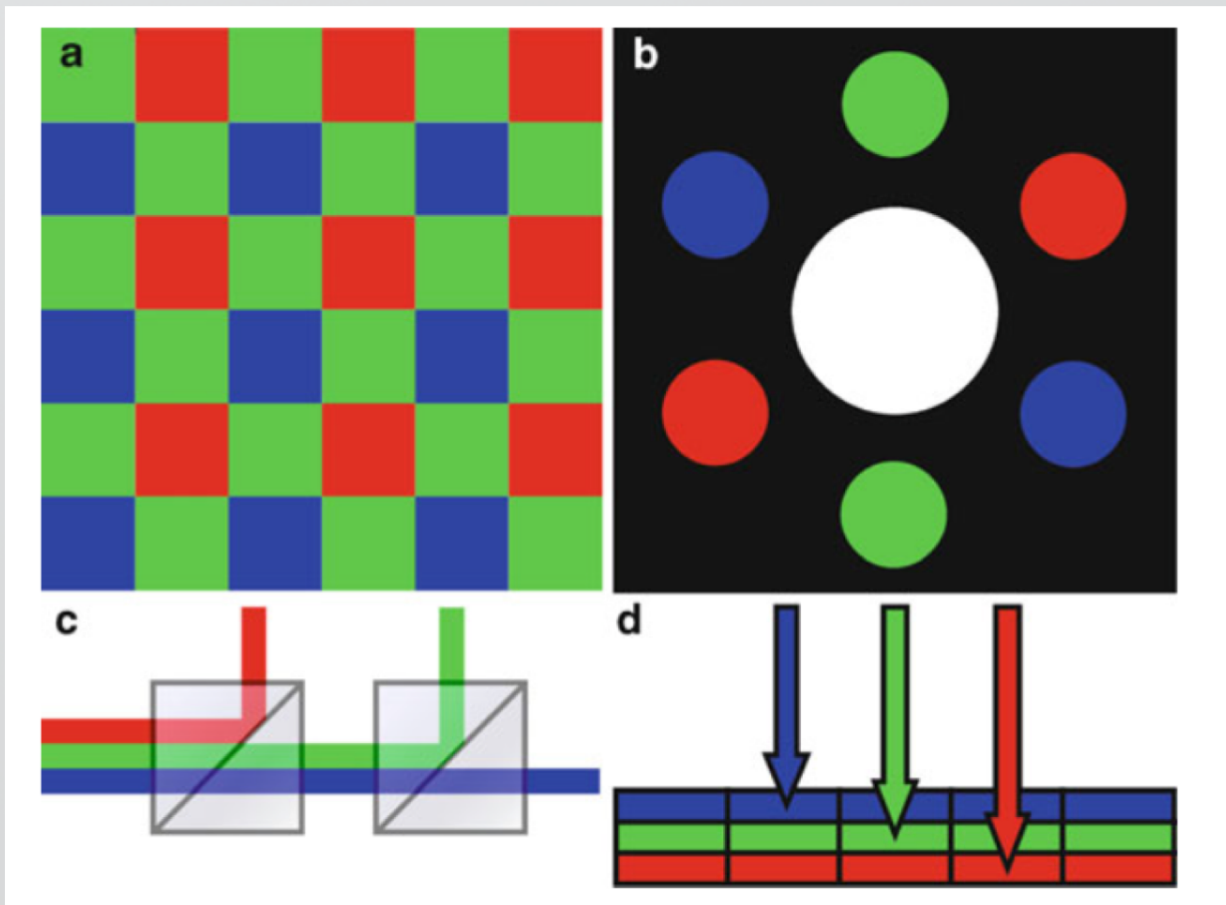
$$\Delta\lambda = 1.02 \text{ нм}$$
$$\Lambda_{eq} = 0.17 \text{ мм}$$



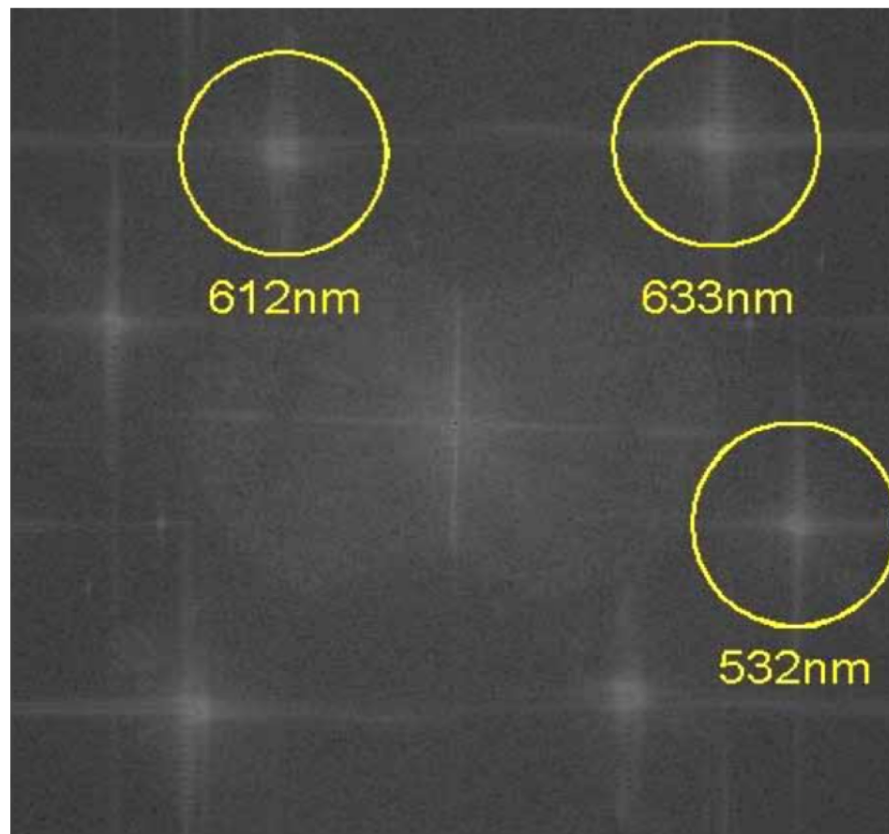
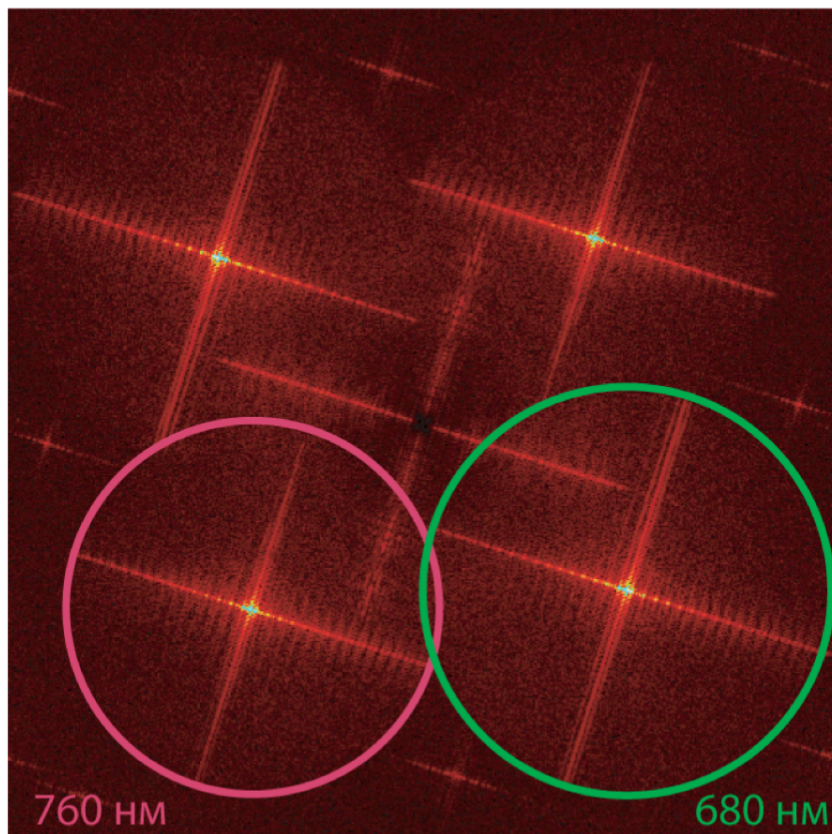
$$\Delta\lambda = 2.04 \text{ нм}$$
$$\Lambda_{eq} = 0.086 \text{ мм}$$

Для використання методу двохвильової цифрової голографії необхідно дві цифрові голограми одного і того ж об'єкта, які були отримані в однакових умовах за винятком довжини хвилі.

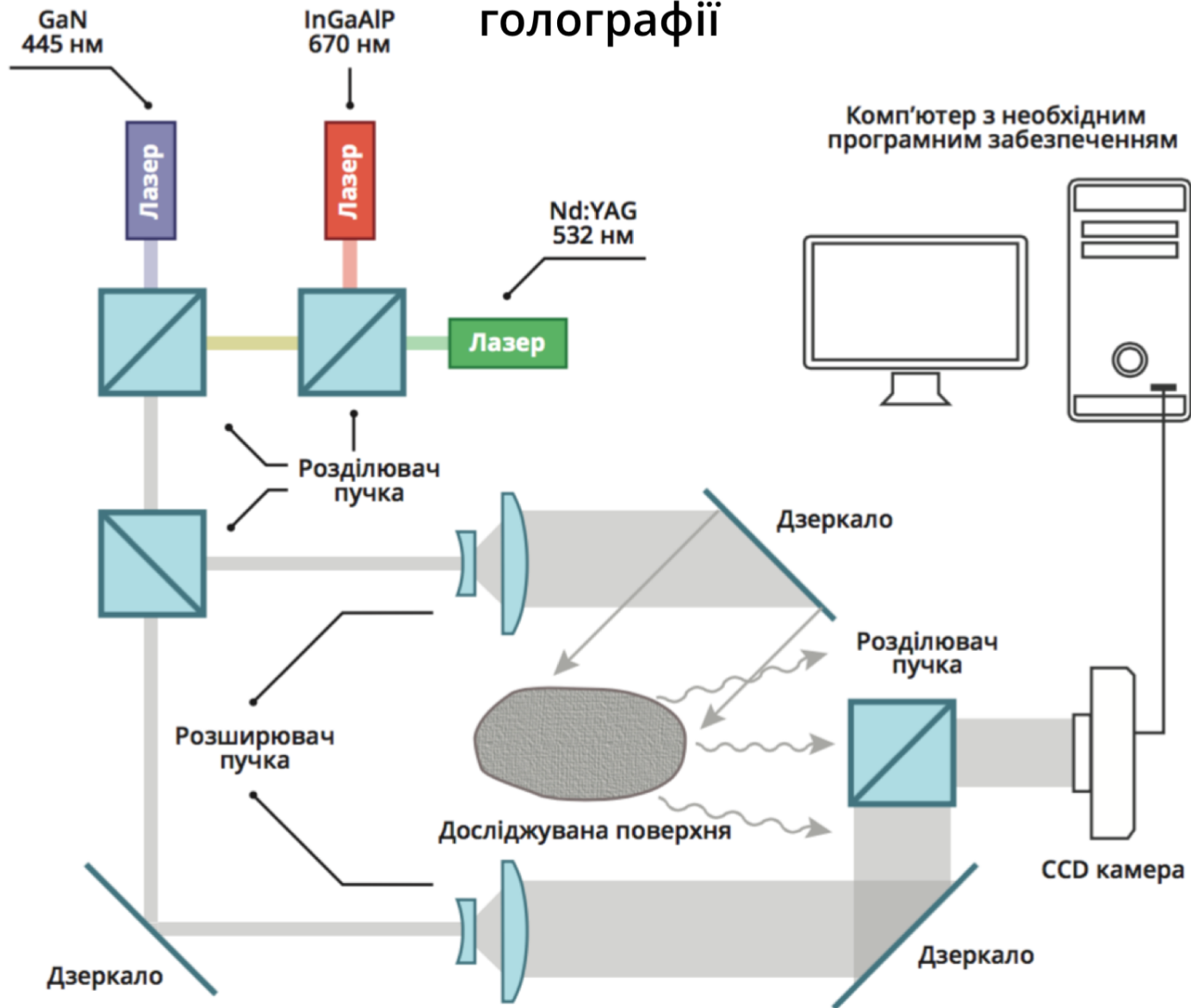
## Шляхи одночасного отримання трьох цифрових голограм

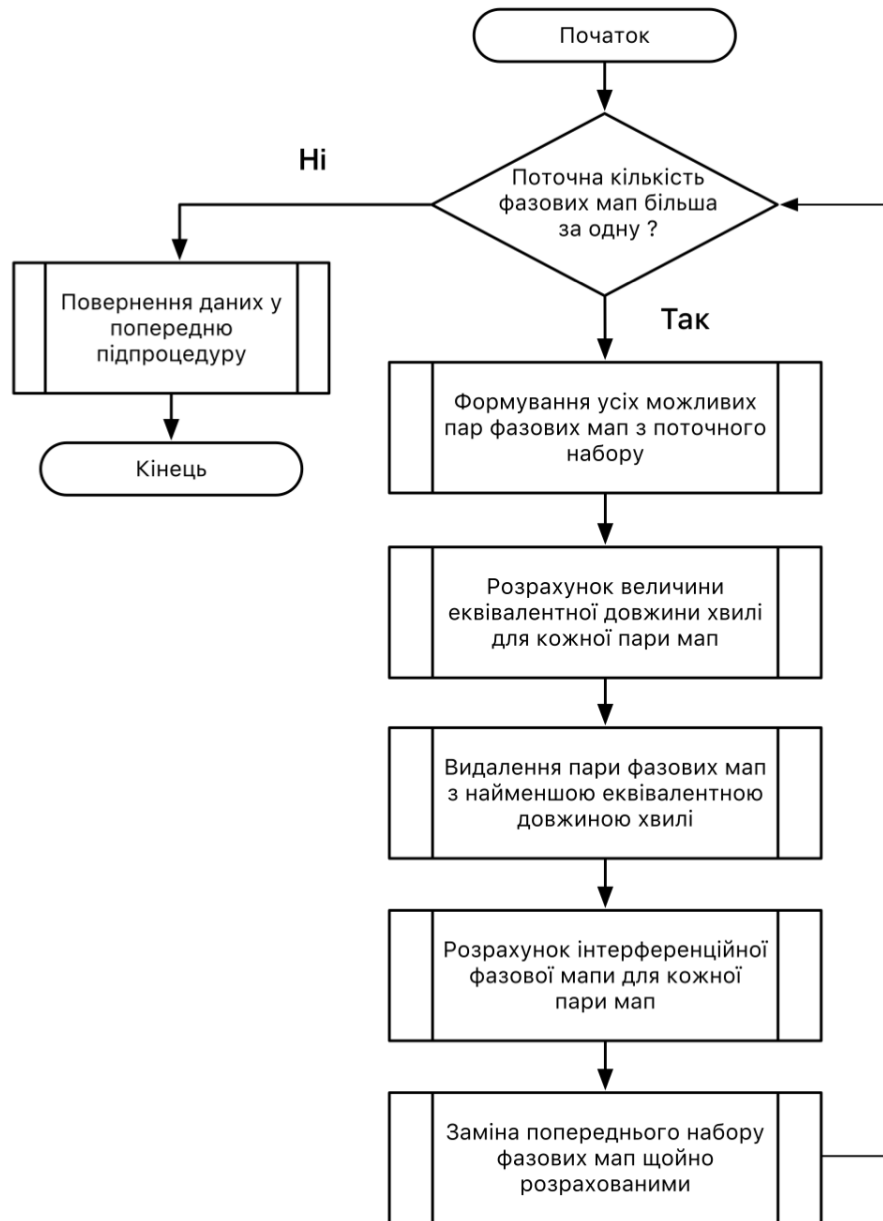


## Метод кутового мультиплексування



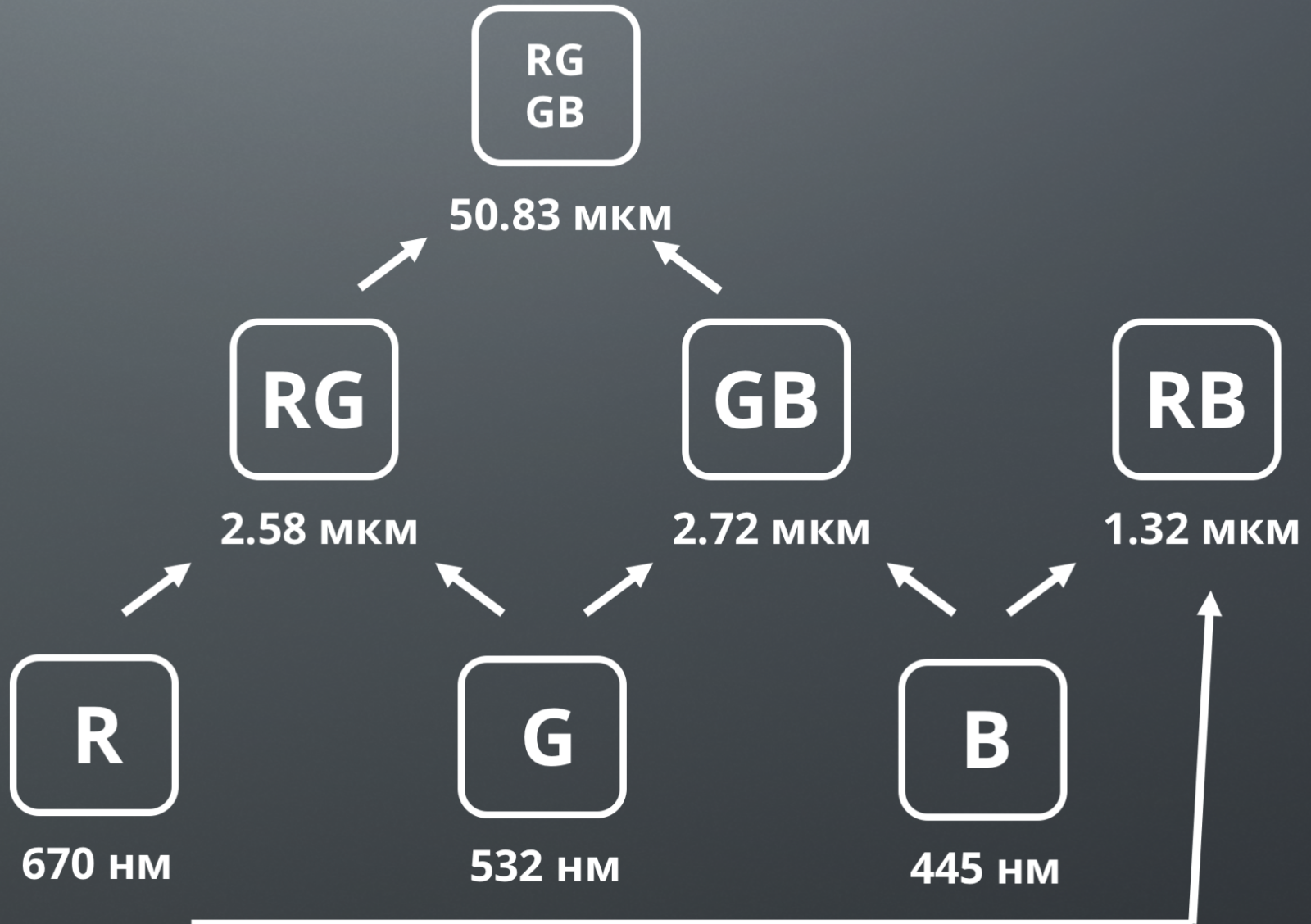
## Структура розробленої системи трьоххвильової цифрової голографії





Метод ітераційного розрахунку інтерференційних фазових мап

Приклад послідовності роботи методу для розробленої системи

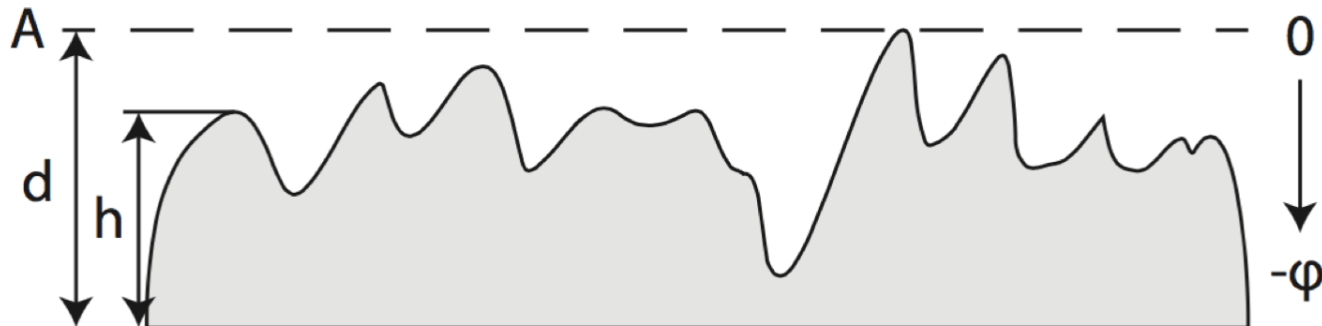


Основні математичні залежності, використані  
під час моделювання

$$\phi = kx + \omega t + \phi_0$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$U = Ae^{i\phi}$$



$$\phi = -2kd + 2kh$$

$$\phi = 2k(h - d)$$

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} (h - d)$$

$$h = \frac{\lambda}{4\pi} \phi$$

## MATLAB функція для генерації початкових фазових мап

```
function [ wrapped_phase_map ] = phaseMap( wavelength, surface_profile, distance)

true_phase_map = 4 * pi / wavelength * (surface_profile - distance);
A = 1;
complex_amplitude = A * exp(1i * true_phase_map);
wrapped_phase_map = angle(complex_amplitude);
wrapped_phase_map = wrapped_phase_map + pi;

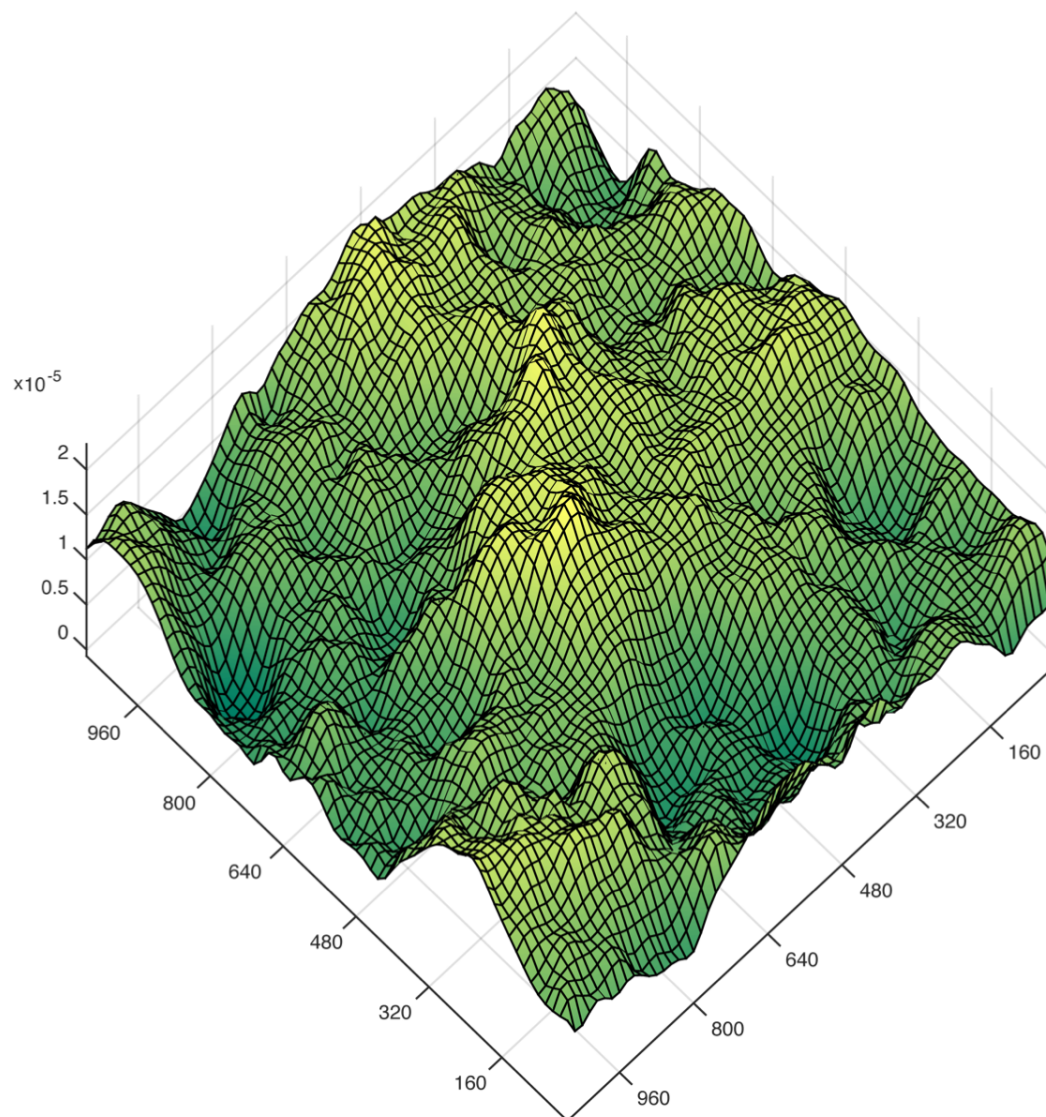
end
```

## Особливості реалізації алгоритму ітераційного розрахунку інтерференційних фазових мап в MATLAB

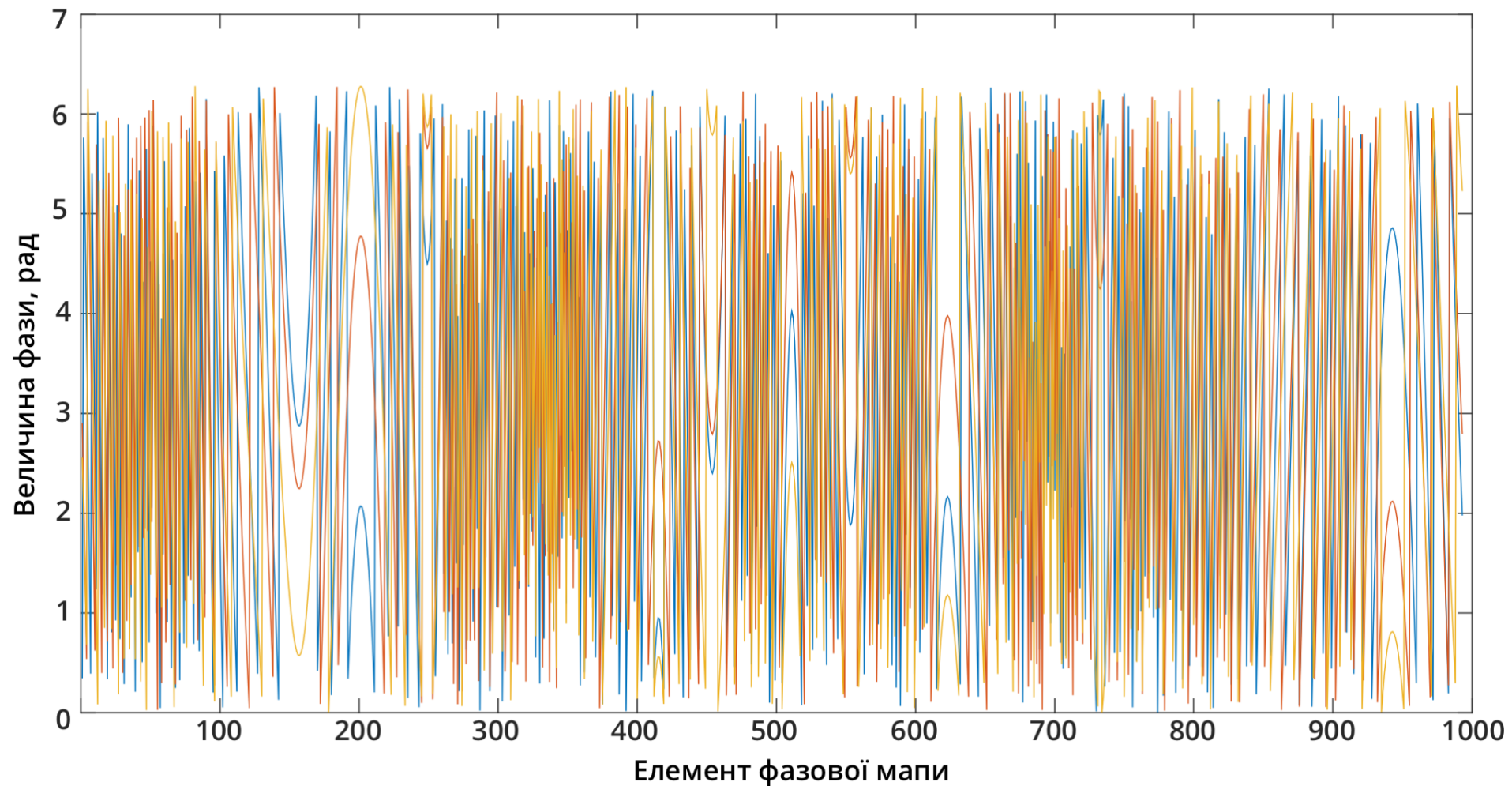
Для спрощення реалізації були використані такі функції MATLAB: `nchoosek` — для отримання усіх можливих пар фазових мап із поточної множини.

`sort` — для сортування фазових мап залежно від величини їх довжини хвилі.

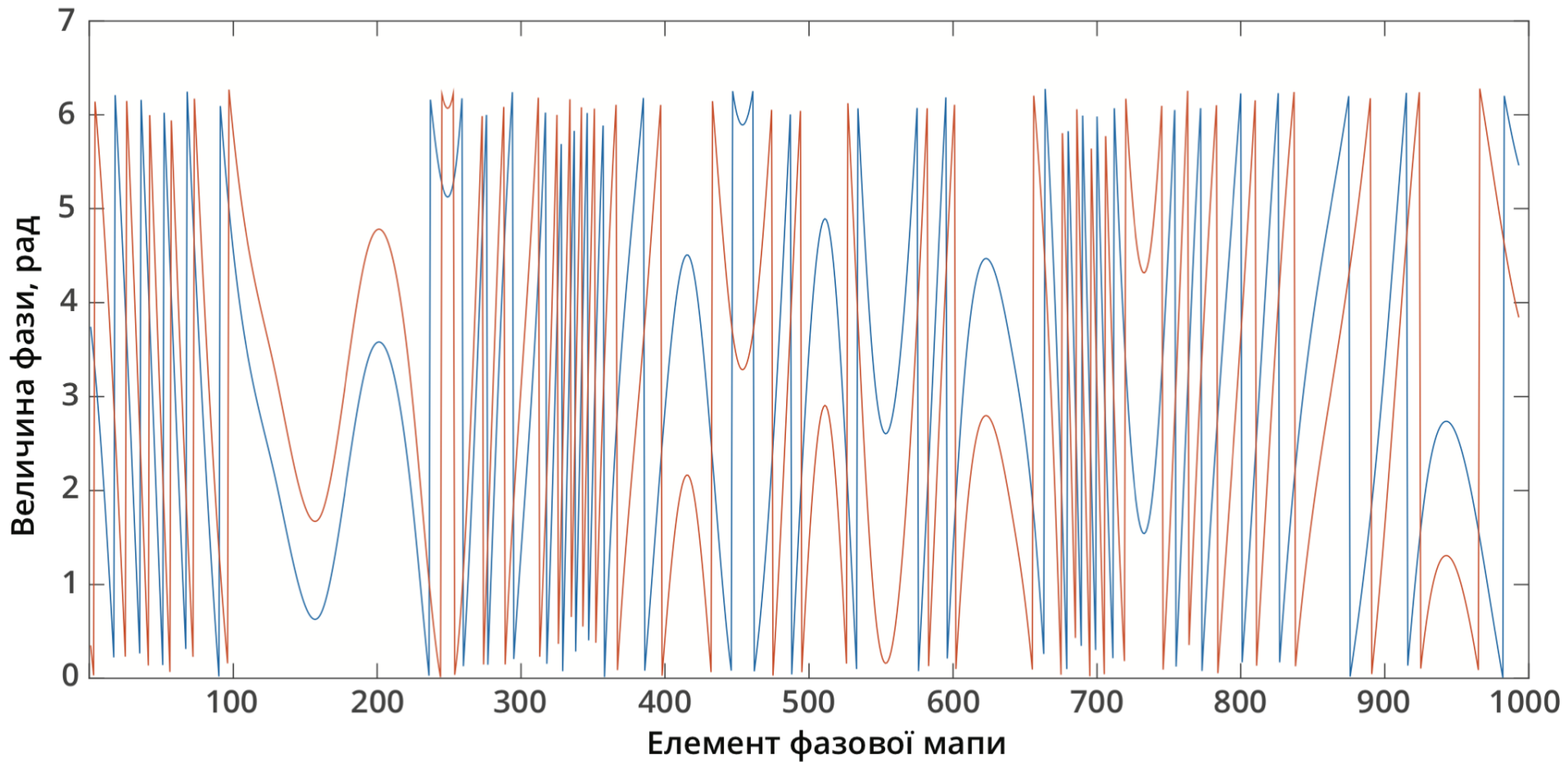
## Профіль тестової поверхні (22 мкм)



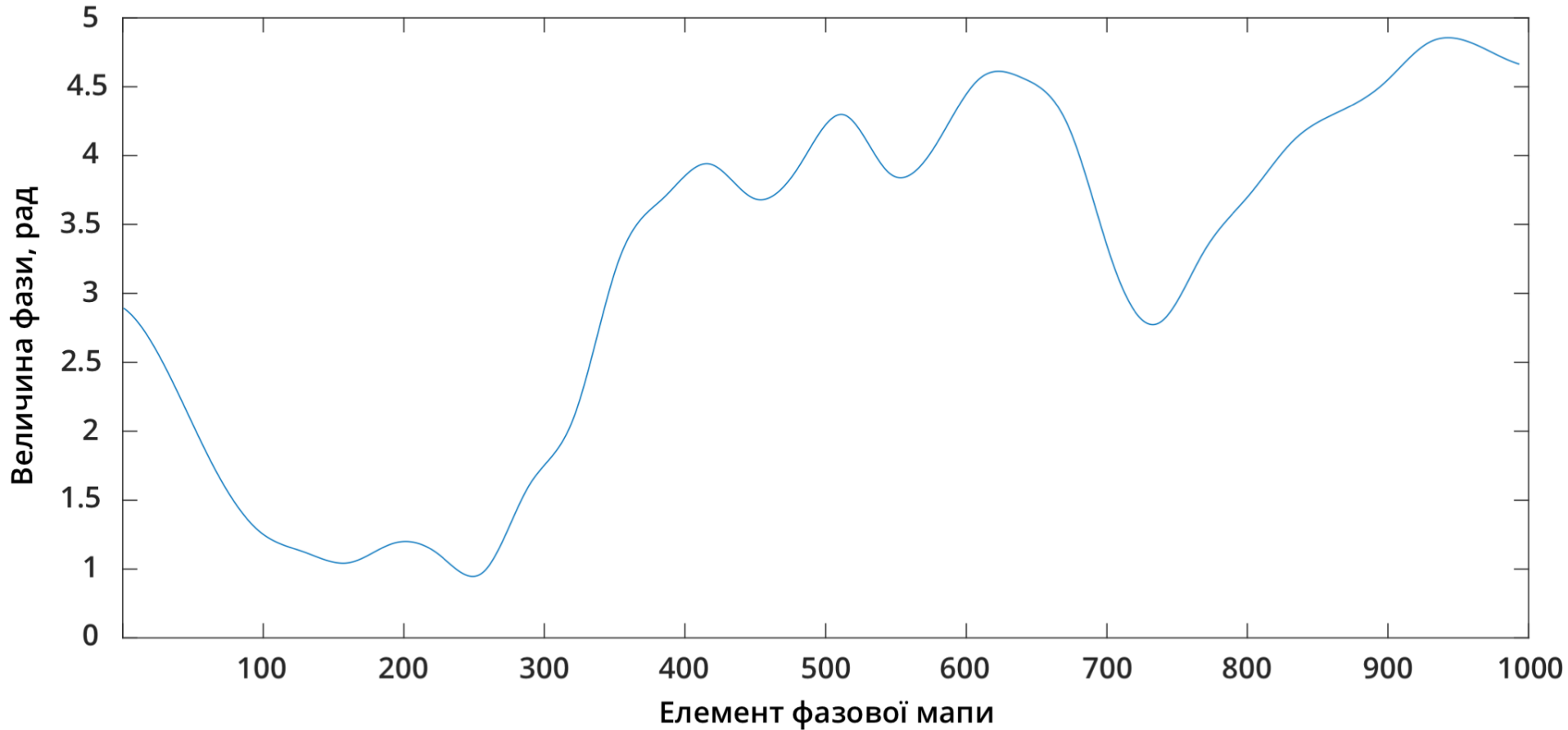
## Переріз фазових мап початкових голограм (R, G, B)



## Переріз фазових мап після 1 ітерації (RG, GB)



## Переріз фазової мапи після 2 ітерації (RG\_GB)



## Метод ітераційного розрахунку інтерференційних фазових мап

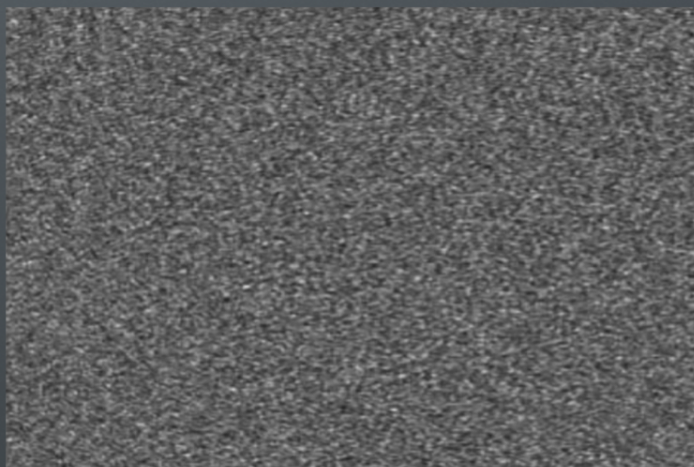
Використання запропонованого методу ітераційного розрахунку інтерференційних фазових мап у контексті розробленої трихвильової системи цифрової голографії дозволило збільшити найбільшу допустиму висоту профілю поверхні досліджуваних об'єктів з 0.335 мкм (у режимі однохвильової голографії) та 1.36 мкм (у режимі двохвильової голографії) до 25.419 мкм.

Розроблений метод можна використовувати також і для систем багатохвильової голографії з кількістю хвиль більшою за три.

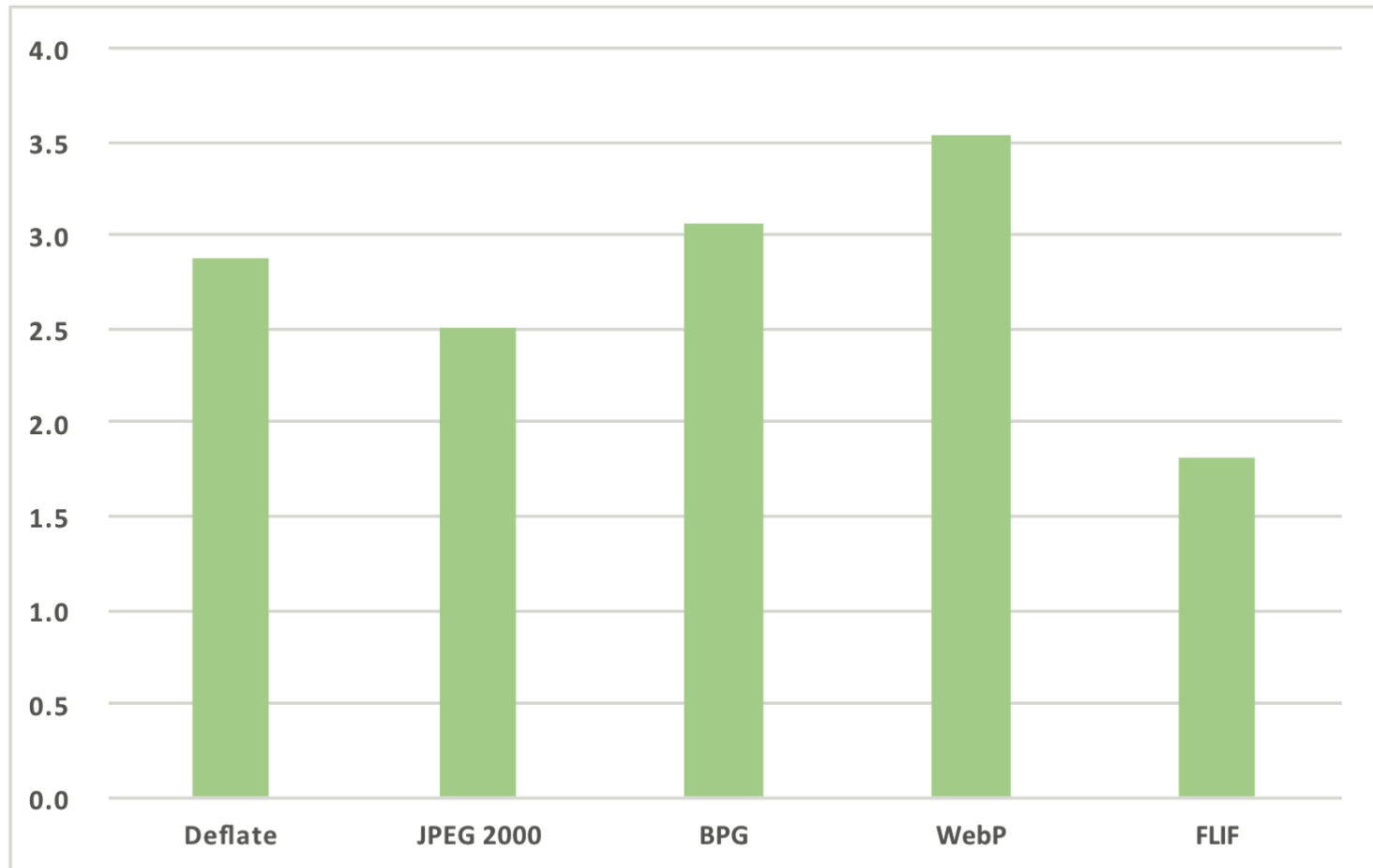
Під час роботи з цифровими голограмами може виникнути необхідність у їх перерахунку з початкової інтерференційної картини.

Через високі вимоги до просторової роздільної здатності реєструючих фотоматриць, розмір неущільнених інтерференційних картини складатиме десятки МБайт пам'яті.

Для ущільнення інтерференційних картин можуть використовуватись лише алгоритми без втрат інформації.



Інтерференційна картина з роздільною здатністю 4240 x 2824 (12 МП).



Серед розглянутих алгоритмів найефективнішим виявився FLIF (1.82 Мбайт).

## Наукова новизна одержаних результатів

- Вперше розроблено метод ітераційного розрахунку інтерференційних фазових мап, що дозволило збільшити величину максимального профілю поверхні, яка може бути безпомилково виміряна системами багатохвильової голографічної інтерферометрії.
- Дістав подальшого розвитку метод двохвильової голографічної інтерферометрії, що дозволило адаптувати його для використання у системах багатохвильової голографії.

## Практичне значення одержаних результатів

1. Розглянуто шляхи використання голографії у неруйнівному контролі, наведено переваги та недоліки типових систем багатохвильової цифрової голографії.
2. Запропоновано структуру системи цифрової голографії, яка дозволяє одночасно реєструвати 3 цифрових голограми, записаних на різних довжинах хвиль.
3. Створено лістинги програмних скриптів для обрахунку цифрових інтерферограм за допомогою методу ітераційного розрахунку інтерференційних фазових мап.
4. Проведено чисельне моделювання методу багатохвильової цифрової голографічної інтерферометрії та розробленого методу ітераційного розрахунку інтерференційних фазових мап.
5. Проведено оцінювання ефективності ущільнення інтерференційних картин сучасними алгоритмами ущільнення зображень без втрат інформації.

**Дякую за увагу**