

УДК 681.723.3

**С. М. Довгалець, к.т.н, доц.; В. В. Томків, студ.; О. В. Гончарук, асп.;  
О. О. Мочульська, студ.**

## **ДИСТАНЦІЙНЕ ВИМІРЮВАННЯ РЕЛЬЄФУ ПОВЕРХНІ**

*Проаналізовано можливість використання градієнтних волокон для побудови тривимірних мікроскопів для віддаленого огляду. Запропоновано структуру мікроскопа, схему корекції фазових викривлень, що виникають у волокні. Проведено метрологічне дослідження можливостей приладу, а саме: залежність розміру поверхні, що досліджується, від параметрів системи.*

*Ключові слова:* мікроскоп, волоконно-оптичний, градієнтне волокно.

### **Вступ**

При побудові та експлуатації технічних систем поряд із традиційним вимірювальним обладнанням використовуються різні засоби візуального контролю. Такий контроль може здійснюватися за допомогою відеокамер, ендоскопів та мікроскопів. Для вивчення мікротріщин, мікродеформацій, гладкості поверхонь використовують мікроскопи.

Потрібною характеристикою мікроскопа інколи може стати можливість віддаленого огляду досліджуваного зразка. Іншою необхідною властивістю мікроскопа часто може стати можливість отримувати об'ємне зображення дослідного зразка, щоб робити висновки про його стан.

### **Існуючі досягнення в даній області**

Можливість віддаленого контролю надають металографічні мікроскопи та відеомікроскопи. Останні досить поширені як засоби контролю стану оптоволоконна. Наявність щупів у цих мікроскопах дозволяє застосовувати їх для дослідження важкодоступних об'єктів [1]. Неможливість отримання тривимірного зображення є суттєвим недоліком таких мікроскопів. Існують також інші типи мікроскопів, які дозволяють зняти 3D-зображення об'єктів. Вони працюють за принципом лазерного конфокального сканування мікрооб'єктів. Цей процес може тривати декілька годин [2]. Значно швидше працюють прилади побудовані за принципом SDCM (конфокальна мікроскопія обертового диску). У мікроскопах такого типу використовують обертовий диск з тисячами отворів [3]. Більш об'ємне і чітке зображення отримують за допомогою скануючої двофотонної або багатофотонної мікроскопії. Недоліком цього класу мікроскопів є неможливість їхнього застосування для віддаленого огляду.

Існуючі на сьогодні мікроскопи дають можливість або отримувати тривимірне зображення, або здійснювати віддалені дослідження, але поєднання цих двох властивостей не зустрічається.

### **Мета роботи**

Мета цієї роботи – розробка мікроскопа, який дозволить отримувати тривимірні зображення об'єктів дослідження, що знаходяться у важкодоступних місцях.

### **Теоретична частина**

Провівши аналіз технологій, що можна застосувати при побудові пристроїв для віддаленого контролю, а також методів отримання тривимірних зображень, для побудови пристрою було вирішено застосовувати волоконну оптику в поєднанні з методом цифрової голографії. Такий підхід дозволив би створити пристрій з високими метрологічними характеристиками і можливістю роботи у важкодоступних місцях.

Пропонується схема пристрою з використанням одиночного багатомодового волокна як засобу передавання зображення від об'єкта дослідження до реєстратора (рис. 1).

Промені, випромінювані лазером, збуджують у хвилеводі моди, що поширюються вздовж осі хвилеводу. На протилежному боці волокна промені відбиваються від досліджуваного об'єкта, що спричиняє формування фазового портрету відповідної поверхні. Відбившись, промені розповсюджуються у зворотному напрямку в тому ж хвилеводі. Сукупність усіх променів, що потрапили у хвилевод містить інформацію про кожну точку рельєфу поверхні. Пройшовши етап корекції фазових викривлень, оптична інформація про поверхню, що досліджується, фіксується цифровою відеокамерою завдяки явищу інтерференції, яке має місце між відбитим та опорним променями.

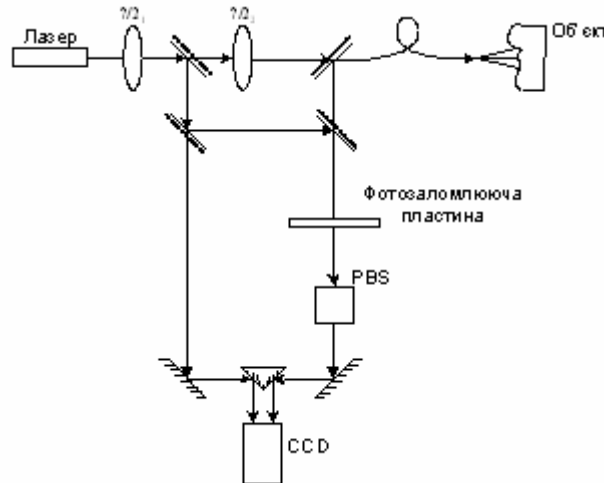


Рис. 1. Схема пристрою, що дозволяє отримувати тривимірні зображення

При поширенні у хвилеводі промені збуджують моди з індексами  $i$  та  $j$  і фазовою швидкістю  $\omega$ , кожній з яких відповідає постійна розповсюдження  $h_{ij}$ . За рахунок того, що у кожній моді своя постійна розповсюдження, відбувається диференційний набіг фаз для кожної з них, що в свою чергу вносить певні викривлення у фазовий фронт. Оптимальним з багатомодових волокон для використання в цьому випадку є волокно з градієнтним ступенем заломлення, оскільки у нього середнє квадратичне відхилення набігу фаз для кожної моди менший ніж у інших багатомодових волокон [4]. Тому для описуваного пристрою застосовуватиметься волокно з градієнтним ступенем заломлення.

Для корекції фазових викривлень, що мають місце при поширенні променів у оптоволокну, використовується схема корекції фазових викривлень, детально описана Г. Джеффри [5]. Принцип цього методу базується на властивостях фотозаломлюючих пластин із полімерних матеріалів при подачі на них різнополяризованих опорних і деформованих хвиль.

Після компенсації всіх деформацій фазовий фронт подається на об'єктив відеокамери, куди також спрямовується опорна хвиля. Таким чином відбувається запис цифрової голограми. На об'єктиві відеокамери процес можна описати так [6]:

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= |O(x, y) + R(x, y)|^2 = (O(x, y) + R(x, y))(O(x, y) + R(x, y))^* = \\
 &= R(x, y)R^*(x, y) + O(x, y)O^*(x, y) + O(x, y)R^*(x, y) + R(x, y)O^*(x, y),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де  $O(x, y) = o(x, y) \exp(i\varphi_O(x, y))$  – комплексна амплітуда хвилі, відбитої від об'єкта, з дійсною амплітудою  $o$  і фазою  $\varphi_O$ , а  $R(x, y) = r(x, y) \exp(i\varphi_R(x, y))$  – комплексна амплітуда опорної хвилі з дійсною амплітудою  $r$  і фазою  $\varphi_R$  [6].

Інтенсивність в кожній точці камери обчислюється як:

$$h(x, y) = h_0 + \beta\tau I(x, y),
 \tag{2}$$

де  $\beta$  – константа,  $\tau$  – час витримки, а  $h_0$  – інтенсивність неосвітленої камери, якою можна знехтувати.

За допомогою математичних методів отримана голограма відтворюється, і з неї

отримується рельєф досліджуваного об'єкта. Розглянемо цей процес детальніше.

Дифракцію хвилі описує такий інтеграл:

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) R(x, y) \frac{\exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho)}{\rho} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \theta \right) dx dy, \quad (3)$$

де  $\rho = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d^2}$  – відстань між точками в площині голограми і в площині реконструкції, а  $h(x, y)$  – голографічна функція. Опорна хвиля  $R(x, y)$  описується просто дійсною амплітудою  $R = r + i0 = r$ .

Дифракційна картина розраховується на відстані  $d$  позаду об'єктива камери, це означає, що відтворюється комплексна амплітуда в площині дійсного зображення.

Вираз (3) є основою для цифрового відтворення голограм. Через те що відтворена хвильова матриця  $\Gamma(\xi, \eta)$  є комплексною функцією, можуть бути визначені інтенсивність і фаза.

Для  $x$  та  $y$ , так само, як і для  $\xi$  та  $\eta$  значень, які є малими в порівнянні з  $d$  – відстанню між площиною відтворення голограми та площиною запису, вираз для  $\rho$  замінимо першим членом розкладу в ряд Тейлора:

$$\rho = d + \frac{(\xi - x)^2}{2d} + \frac{(\eta - y)^2}{2d} - \frac{1}{8} \frac{[(\xi - x)^2 - (\eta - y)^2]}{d^3} + \dots \approx d + \frac{(\xi - x)^2}{2d} + \frac{(\eta - y)^2}{2d}. \quad (4)$$

Замінивши множник у виразі (3) на  $d$ , отримаємо таку формулу:

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda d} \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} d) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) R(x, y) \exp(-i \frac{\pi}{\lambda d} ((\xi - x)^2 + (\eta - y)^2)) dx dy. \quad (5)$$

Якщо винести множники в показнику степеня експоненти за інтеграл, вираз набуде вигляду:

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda d} \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} d) \exp[-i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)] \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) R(x, y) \exp[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)] \times \exp[i \frac{2\pi}{\lambda d} (x\xi + y\eta)] dx dy. \quad (6)$$

Це рівняння у випадку дійсного зображення робить можливим відтворення хвильового фронту в площині за голограмою. Фаза, а отже і інформація про рельєф, отримується таким чином:

$$\varphi(\xi, \eta) = \arctan \frac{\text{Im}[\Gamma(\xi, \eta)]}{\text{Re}[\Gamma(\xi, \eta)]}. \quad (7)$$

Для проведення розрахунків засобами ЕОМ вводиться дискретне перетворення. Введемо такі заміни:

$$\nu = \frac{\xi}{\lambda d}; \mu = \frac{\eta}{\lambda d}. \quad (8)$$

Тоді (6) прийме вигляд:

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda d} \exp[-i\pi\lambda d(\nu^2 + \mu^2)] \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) R(x, y) \exp[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)] \times \exp[i2\pi(x\nu + y\mu)] dx dy. \quad (9)$$

Значення  $\exp(-i2\pi/\lambda d)$  опускається, бо воно впливає лише на загальну фазу. Це значення не змінює інтенсивності і фази інтерференції цифрової голограми.

Порівнюючи (9) і перетворення Фур'є, бачимо, що це є зворотним перетворенням Фур'є для  $h(x, y) R(x, y) \exp[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)]$ , помноженим на сферичний фазовий фактор:

$$\Gamma(v, \mu) = \frac{i}{\lambda d} \exp[-i\lambda d(v^2 + \mu^2)] \zeta^{-1} \left\langle h(x, y) R(x, y) \exp[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)] \right\rangle. \quad (10)$$

Функція  $\Gamma$  розраховується, якщо  $h(x, y)$  збережена в матриці  $N \times N$ , з кроком  $\Delta x$  та  $\Delta y$  вздовж координат.  $\Delta x$  і  $\Delta y$  – відстань між двома сусідніми пікселями на камері в горизонтальному і вертикальному напрямках. Використовуючи дискретні значення, інтеграл (9) запишемо у вигляді сум:

$$\Gamma(m, n) = \frac{i}{\lambda d} \exp[-i\pi\lambda d(m^2 \Delta v^2 + n^2 \Delta \mu^2)] \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} h(k, l) R(k, l) \exp[-i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)] \times \exp[i2\pi(k\Delta x m \Delta v + l\Delta y n \Delta \mu)]. \quad (11)$$

Відповідно до теорії перетворення Фур'є існує така залежність між  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  та  $\Delta v$ ,  $\Delta \mu$ :

$$\Delta v = \frac{1}{N\Delta x}, \quad \Delta \mu = \frac{1}{N\Delta y}, \quad (12)$$

тоді

$$\Delta \xi = \frac{\lambda d}{N\Delta x}, \quad \Delta \eta = \frac{\lambda d}{N\Delta y}. \quad (13)$$

Враховуючи (12) та (13), (11) запишемо як:

$$\Gamma(m, n) = \frac{i}{\lambda d} \exp[-i\pi\lambda d(\frac{m^2}{N^2 \Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2 \Delta y^2})] \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} h(k, l) R(k, l) \exp[-i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)] \times \exp[i2\pi(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N})]. \quad (14)$$

Формула (14) – дискретне перетворення для відтворення цифрової голограми і подальшого отримання рельєфу поверхні.

Далі розглянемо залежність діаметра поверхні, яка може досліджуватися, від параметрів хвилеводу, що використовується. Кількість мод, що можуть розповсюджуватися в градієнтному волокні, визначається за формулою  $M=V^2/4$ , де  $V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ . Для того

щоб коректно сприймати рельєф, різниця фаз у двох сусідніх точках прийнятого зображення не повинна перевищувати  $\lambda/2$ . Тому  $\Delta x$  – відстань між двома точками, яку повинен фіксувати пристрій визначається залежно від досліджуваного об'єкта. Діаметр поверхні, що спостерігається, обчислюється за формулою:

$$d = 2 \sqrt{\frac{\pi a^2 (n_1^2 - n_2^2) \Delta x^2}{\lambda^2 (1 + 2\Delta x + \Delta x^2)}}. \quad (15)$$

Враховуючи, що нормована частота залежить від інших параметрів, маємо:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (16)$$

перетворимо формулу (15), ввівши в неї значення нормованої частоти (16). Розрахункова формула для діаметра досліджуваної поверхні градієнтним волокном визначиться таким чином:

$$d = 2\Delta x V \sqrt{\frac{1}{\pi(4 + 8\Delta x + 4\Delta x^2)}}. \quad (17)$$

Для порівняння запишемо формулу для розрахунку діаметра вимірюваної поверхні, що може передаватись у волокні зі ступінчастим показником заломлення. Враховуючи, що для

цього типу волокна кількість мод, які розповсюджуються в ньому, рівна  $M=V^2/2$  [7], запишемо формулу для розрахунку діаметру вимірюваної поверхні як:

$$d = 2\Delta x V \sqrt{\frac{1}{\pi(2 + 4\Delta x + 2\Delta x^2)}} \quad (18)$$

Проведемо розрахунки з використанням формул (17) та (18), щоб отримати числові дані щодо можливостей по передаванню зображення двома типами волокон: градієнтним та волокном зі ступінчастим показником заломлення. На рисунку 2 зображені графіки залежності діаметру вимірюваної поверхні від точності вимірювань  $dx$  та нормованої частоти  $V$  хвилеводу, що використовується. З графіків видно, що волокно зі ступінчастим показником заломлення дає дещо кращі результати для передавання зображень, діаметр вимірюваної поверхні більший у волокна зі ступінчастим показником заломлення, ніж у градієнтного волокна з такими ж показниками. Але ця різниця незначима, і перевага надається градієнтному волокну за рахунок його кращих характеристик в області зменшення набігу фаз між різними модами [5].

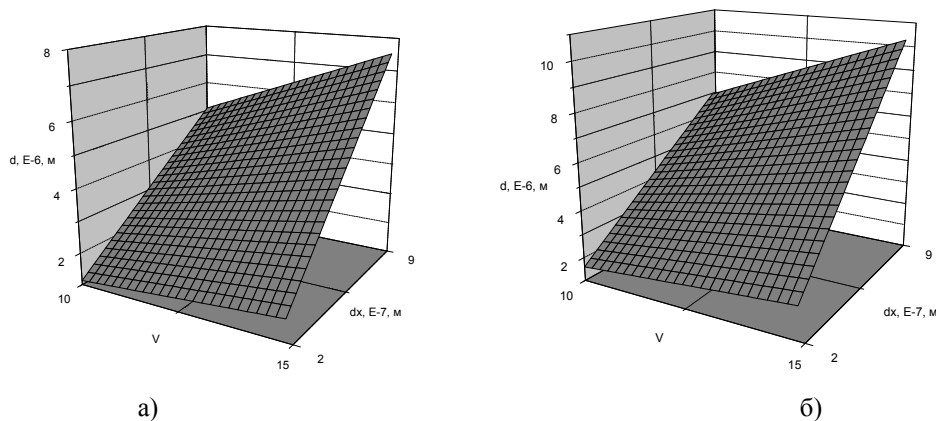


Рис. 2. Залежність досліджуваного діаметру від нормованої частоти для: а) градієнтних волокон; б) волокон зі ступінчастим коефіцієнтом заломлення

### Висновки

Таким чином, у результаті дослідження ми дійшли висновків, що при застосуванні описаної моделі можна створити пристрій, який дозволить отримувати тривимірні зображення для діагностики важкодоступних місць. Наявність у пристрої оптоволоконного хвилеводу дозволить застосовувати його в різних галузях. Навіть на фоні сильного радіоактивного випромінювання на зображення, що передається, завади не наводитимуться. Оскільки зображення оброблятиметься і відобразатиметься за допомогою ЕОМ, існує можливість запису і майбутнього повторного перегляду вигляду об'єкта дослідження. Діаметр оптичного волокна дуже малих розмірів, і це дозволяє йому потрапляти для дослідження в місця з тонкими щілинами та отворами. Задавши потрібну відстань між сусідніми точками досліджуваного об'єкта, можна довільно змінювати параметри пристрою, щоб він задовольняв необхідні вимоги.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Семенов А. С. Визуальный контроль качества оптических трактов СКС, <http://abn.ru> – 20.08.2004.
2. Minsky M. Memoir on inventing the confocal scanning microscope // Scanning. – 1988. – Vol.10. – P.128 – 138.
3. Nakano A. Spinning-disk confocal microscopy – a cutting-edge tool for imaging of membrane traffic // Cell. Struct. Funct. – 2002. – Vol. 27, №5. – P.349 – 355.
4. Довгалець С. М., Томків В.В., Ігнатенко О. Г. Використання багатомодових оптичних хвилеводів для передавання тривимірних зображень // ІНТЕРНЕТ – ОСВІТА – НАУКА – 2006, п'ята міжнародна конференція ІОН-2006, збірник матеріалів конференції, том 2. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006.–420с.
5. Jeffrey G. Winiarz and Ghebremichael F. Dynamic correction of a distorted image using a photorefractive

polymeric composite // OSA – 2004. – Vol. 12, No. 11.

6. Ulf Schnars, Werner P O Juptner, Digital recording and numerical reconstruction of holograms // Measurement science and technology. – 2002. – No. 13.

7. Андрушко Л. М., Гроднев И. И., Панфилов И. П. Волоконно-оптические линии связи: учебное пособие для вузов – М.: Радио и связь, 1985. – 136 с.

*Довгалець Сергій Михайлович* – декан факультету автоматички і комп'ютерних систем управління;

*Томків Віталій Володимирович* – студент;

*Гончарук Олександр Васильович* – аспірант;

*Мочульська Олена Олександрівна* – студент.

Кафедра автоматички та інформаційно-вимірювальної техніки, Вінницький національний технічний університет