DOI 10.31891/2307-5732-2023-323-4-59-64
УДК 004.932

БОРОВИЦЬКИЙ ВОЛОДИМИР
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0000-0001-6816-0391
e-mail: vborovytsky@yahoo.com
ГУДЗЬ ОЛЕКСІЙ
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0000-0002-8517-6675
e-mail: alexevgood@gmail.com

МЕТОД ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОНТРАСТУ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ГАРМОНІЧНОЇ ПРОСТОРОВОЇ МОДУЛЯЦІЇ ОСВІТЛЕННЯ

У роботі запропонований метод визначення контрасту гармонічної просторової модуляції освітлення, який можна використовувати для отримання тривимірних цифрових зображень у оптичній мікроскопії та оптико-електронних системах з проекцією освітлення на об'єкти спостереження. Цей метод забезпечує знаходження контрасту, постійної складової та поточної фази гармонійної просторової модуляції освітлення при довільних значеннях її фазових кутів шляхом вирішення системи лінійних рівнянь. Перевагою запропоновано методу є можливість застосування з економічними пристроями, які формують гармонійну просторову модуляцію освітлення та можуть встановлюватися на більшості оптичних мікроскопів та інших оптико-електронних системах для отримання тривимірних цифрових зображень.

Ключові слова: цифрова обробка зображень, тривимірне цифрове зображення, просторова модуляція освітлення, цифрова демодуляція.

BOROVYTSKY VOLODYMYR, HUDZ OLEKSII
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

TECHNIQUE FOR CONTRAST DETERMINATION IN CASE OF HARMONIC SPATIAL MODULATION OF ILLUMINATION

The paper proposes a method for calculation of the contrast, bias and current phase of harmonic spatial modulation of illumination, which can be used for three-dimensional digital image capture in optical microscopy and other optical-electronic systems. This technique is based on analytical solution of the system of linear equations and allows the calculation of the contrast of harmonic spatial modulation with any values of phase angles. The input data for demodulation is three spatial signals after harmonic modulation with different initial phases as a stack of digital images with harmonic spatial modulation. This data makes it possible to compose the three-dimensional images by the selection of the maximal values of the contrast in three-dimensional space. The paper contains the analytical solution of the system with three linear equations that helps to identify the principal parameters of harmonic spatial modulation, including its average value and contrast. As a result, the expression for contrast calculation is present in an analytical form. This expression is valid for any modulation phase angles that do not coincide. The proposed technique allows calculation of the contrast for each signal value without any approximation. As a result, the accurate contrast value can be obtained and used for automatic restoration of three-dimensional images. The advantage of the proposed method is that it can be implemented with economical units that form harmonic spatial modulation of illumination. These units may be installed on most optical microscopes and other electro-optical systems for automatic capture of the three-dimensional images. As a result, the proposed technique significantly reduces the price of transforming economical optical instruments into automatic electro-optical systems for three-dimensional digital image capture.

Keywords: digital image processing, three-dimensional digital image, spatial modulation of illumination, digital demodulation.

Постановка проблеми

Однією з важливих переваг сучасної оптичної мікроскопії є можливість автоматичного отримання тривимірних зображень з субмікронною роздільною здатністю у різних оптичних діапазонах [1–3]. Одним з перспективних методів отримання автоматичного отримання тривимірних зображень є методи, які використовують просторову модуляцію освітлення (ПМО) [4–10]. Сутність таких методів полягає у тому, що у площині предмета оптичного мікроскопа чи іншої оптико-електронної системи формується зображення періодичної або неперіодичної структури. Параметри цього зображення, яке накладається на об'єкт спостереження, змінюються в залежності від тривимірної форми об'єкта. У результаті цього вимірювання та обробки значень цих параметрів можливо автоматично розрахувати тривимірну форму об'єкта спостереження. У результаті цього максимальний контраст освітлення буде лише у тих областях об'єкта спостереження, які знаходяться дуже близько до площини предмета оптичної системи мікроскопа. Найбільш розповсюдженою є гармонійна ПМО, а параметрами, що дозволяють відновити тривимірну форму є фаза та контраст модуляції. Методи вимірювання фази ПМО достатньо повно розглянути у роботах, які присвячені обробці інтерференційних сигналів [11]. Але методи визначення контрасту ПМО розглянуті недостатньо повно, у більшості випадків застосовуються або численні методи розрахунку контрасту, або аналітичні методи для окремих частинних випадків [4–10, 15–18].

Аналіз останніх джерел

Методи отримання тривимірних зображень можна умовно поділити на дві групи – пасивні методи та активні методи. Пасивні методи не використовують жодного додаткового активного освітлення для реконструкції тривимірного об'єкта. Типовим прикладом застосування такого методу є оптико-електронна

система, яка фіксує зображення принаймні з двох різних ракурсів за допомогою цифрових камер та аналізує пару чи групу зображень, щоб знайти відповідні однакові точки для обчислення 3D координат на основі тріангуляції [12]. Цей метод є простим, оскільки використовуються лише декілька цифрових камер, і в той же час може бути настільки ж швидким, наскільки камера може знімати зображення. Залежно від виявлення відповідних пар із різних зображень точність вимірювання цього методу змінюється залежно від об'єкта, що підлягає вимірюванню, і може бути дуже низькою, якщо об'єкт не має насиченої текстури поверхні [4–10]. Крім того, такою технікою важко досягти просторової роздільної здатності пікселя камери через використання різних методів кореляції зображення для визначення стерео-відповідності [12]. Цей метод не може застосовуватися у оптичній мікроскопії з великою роздільною здатністю, коли об'єктив мікроскопа повинен мати максимальну цифрову апертуру, а об'єкт спостереження знаходиться на відстані 0.05 – 0.5 мм від цього об'єктиву [12].

Активні методи отримання тривимірних зображень, використовують додаткове освітлення об'єкта для визначення його тривимірної форми [1]. Поширеним активним методом є багатопроменева оптична локація [1, 13]. Сутність цього метода полягає у використанні сенсорів time-of-flight (TOF), які випромінюють імпульси променів та реєструють час проходження променів від сенсору до об'єкта та від об'єкта до сенсору [13]. Такий оптичний локатор може бути дуже компактним і тому він застосовується в мобільних пристроях [1, 13]. Однак, досяжна роздільна здатність за глибиною в таких пристроях зазвичай невисока і становить 75–375 мм при діагональному полі зору 87 кутових градусів та відстані до об'єкта 1000–5000 мм [14].

Метод структурованого освітлення використовує спеціальний освітлювальний пристрій для формування у просторі об'єкта структурованих візерунків проекційним, інтерференційним, голографічним методами або шляхом багатофункціональної кількісної фазової модуляції [1–10]. Найпоширеніші методи з нанесенням на об'єкт дослідження двовимірних візерунків зображені на рисунку 1 [1, 4–10].

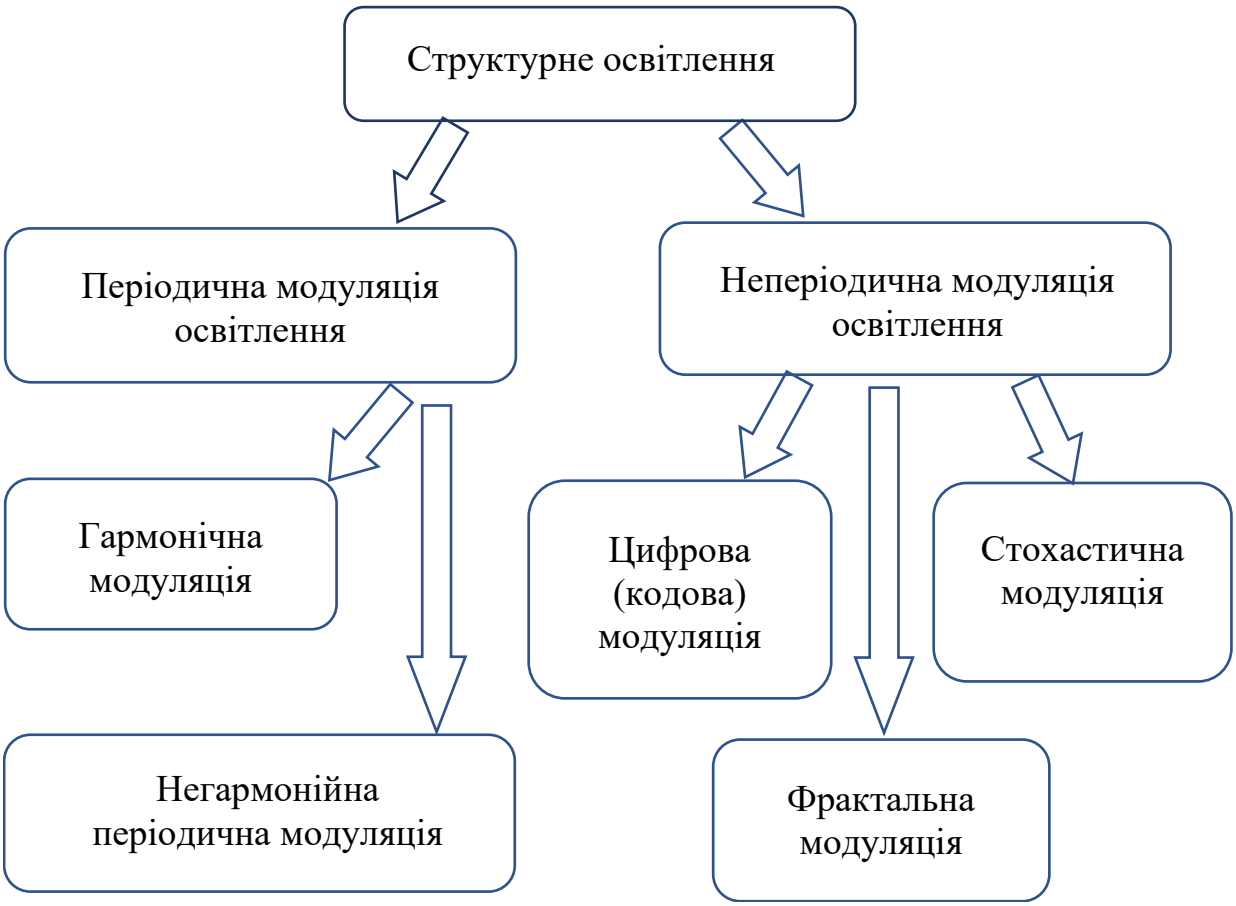

Рис. 1. Типові варіанти структурованого освітлення для отримання 3D цифрових зображень

Найбільшу просторову роздільну здатність у тривимірному просторі забезпечують методи з використанням гармонічної ПМО [1,7]:

- у певній площині у просторі предмета формується гармонічна просторова модуляція освітлення, зображення цієї площини реєструється за допомогою цифрової камери;
- максимальний контраст ПМО буде в тих зонах об'єкт, які розташовані біля площини ПМО, а в інших зонах контраст буде меншим або відсутнім;
- якщо переміщувати площину ПМО відносно об'єкта, або об'єкт відносно цієї площини, то

можна обчислити області максимального контрасту у тривимірному просторі і тим самим отримати інформацію про тривимірну форму об'єкта.

Якщо просторова частота гармонічної ПМО буде великою, то такий метод забезпечує дуже велику роздільну здатність вздовж оптичної осі, яка наближається до роздільної здатності лазерних конфокальних мікроскопів [7]. Але застосування гармонічної ПМО вимагає реєстрації декількох цифрових зображень з різною фазою ПМО та виконання цифрової демодуляції з метою отримання контрасту гармонійної ПМО для кожного пікселя зображення. Ця демодуляція виконується за допомогою численних методів, бо аналітичне рішення задачі демодуляції отримано лише для частинних випадків, коли фази ПМО відрізняться на кути 60, 90 або 120 градусів. Відсутність узагальненого рішення задачі цифрової демодуляції ускладнює широке впровадження автоматичних оптико-електронних систем для автоматичного отримання тривимірних зображень з великою роздільною здатністю.

Метою роботи є розробка узагальненого математичного апарату демодуляції для розрахунку контрасту ПМО при довільних значеннях фазових кутів з метою отримання тривимірних цифрових зображень.

Виклад основного матеріалу

Рішення задачі демодуляції в загальній формі

Розглянемо одновимірну гармонійну ПМО вздовж осі x, яка має певні постійні складову, амплітуду, просторову частоту та початкову фазу і описується дійсною функцією cos(). Для знаходження контрасту ПМО опишемо одновимірну ПМО як тригонометричну функцію:

$$\begin{aligned} U(x) &= U_O + \Delta U \cdot \cos\left(2\pi \cdot \nu_x \cdot x + \varphi_0\right) = \\ &= U_O + \left(\Delta U \cdot \cos\left(2\pi \cdot \nu_x \cdot x\right)\right) \cdot \cos\left(\varphi_0\right) - \left(\Delta U \cdot \sin\left(2\pi \cdot \nu_x \cdot x\right)\right) \cdot \sin\left(\varphi_0\right) = \\ &= U_O + a \cdot \cos\left(\varphi_0\right) - b \cdot \sin\left(\varphi_0\right) \end{aligned} \quad (1)$$

де U(x) – функція, що описує одновимірний гармонійний сигнал; ΔU – контраст ПМО, який несе інформацію про тривимірну форму об'єкта; ν_X – просторова частота ПМО; U_O – постійна або фонова складова; x – лінійна координата; φ_O – початкова фаза ПМО; a, b – складові гармонічного сигналу: $a = \Delta U \cdot \cos\left(2\pi \cdot \nu_x \cdot x\right), b = \Delta U \cdot \sin\left(2\pi \cdot \nu_x \cdot x\right).$

Вираз (1) дозволяє записати формулу для визначення контрасту ПМО:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \sqrt{a^2 + b^2} = \\ &= \sqrt{\Delta U^2 \cdot \cos^2\left(2\pi \cdot \nu_x \cdot x\right) + \Delta U^2 \cdot \sin^2\left(2\pi \cdot \nu_x \cdot x\right)} = \\ &= \sqrt{\Delta U^2 \cdot \left[\cos^2\left(2\pi \cdot \nu_x \cdot x\right) + \sin^2\left(2\pi \cdot \nu_x \cdot x\right)\right]} = \sqrt{\Delta U^2} \end{aligned} \quad (2)$$

Але при обчислені контрасту ПМО (2) виникає одна проблема: відоме одне значення U(x), але треба знайти три величини – U_O, a та b. Для того, щоб їх визначити треба мати три цифрових зображення з ПМО, які мають різні фази ПМО. Тоді можна для кожного пікселя тривимірного цифрового зображення знайти складові a, b та обчислити контраст ПМО. Іншими словами треба скласти лінійну систему трьох рівнянь, знайти її корені (U_O, a, b) та обчислити контраст ΔU. Для спрощення математичних виразів будемо використовувати фазові кути ПМО відносно фазового кута першого цифрового зображення з ПМО:

$$\begin{cases} U_1(x) = U_O + a \cdot \cos\left(\varphi_1\right) - b \cdot \sin\left(\varphi_1\right) \\ U_2(x) = U_O + a \cdot \cos\left(\varphi_2\right) - b \cdot \sin\left(\varphi_2\right) \\ U_3(x) = U_O + a \cdot \cos\left(\varphi_3\right) - b \cdot \sin\left(\varphi_3\right) \end{cases} \quad (3)$$

де $U_1(x)$, $U_2(x)$, $U_3(x)$ – амплітуда трьох цифрових зображень з ПМО, які мають фазові кути ПМО, які вибираються таким чином ($\varphi_1 = 0$, φ_2, φ_3) у точці x, відповідно.

Систему трьох лінійних рівнянь (3) можна переписати у матричній формі:

$$\begin{vmatrix} U_1(x) \\ U_2(x) \\ U_3(x) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos(\varphi_2) & -\sin(\varphi_2) \\ 1 & \cos(\varphi_3) & -\sin(\varphi_3) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} U_0 \\ \Delta U \cdot \cos(2\pi \cdot \nu_x \cdot x) \\ \Delta U \cdot \sin(2\pi \cdot \nu_x \cdot x) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{vmatrix} = M \cdot \begin{vmatrix} U_0 \\ a \\ b \end{vmatrix} \quad (4)$$

Для знаходження рішення треба обчислити зворотну матрицю M^{-1} (4):

$$\begin{vmatrix} U_0 \\ a \\ b \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos(\varphi_2) & -\sin(\varphi_2) \\ 1 & \cos(\varphi_3) & -\sin(\varphi_3) \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} U_1(x) \\ U_2(x) \\ U_3(x) \end{vmatrix} = M^{-1} \cdot \begin{vmatrix} U_1(x) \\ U_2(x) \\ U_3(x) \end{vmatrix} = M^{-1} \cdot \begin{vmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{vmatrix} \quad (5)$$

де M^{-1} – зворотна матриця, яка залежить від фазових кутів φ_2, φ_3:

$$M^{-1} = M^{-1}\left(\varphi_2, \varphi_3\right) = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos(\varphi_2) & -\sin(\varphi_2) \\ 1 & \cos(\varphi_3) & -\sin(\varphi_3) \end{vmatrix}^{-1} = \frac{1}{D} \cdot \begin{vmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & m_{2,3} \\ m_{3,1} & m_{3,2} & m_{3,3} \end{vmatrix}$$

$m_{X,Y}$ – коефіцієнти зворотної матриці M^{-1}, які можуть бути обчислені у аналітичному вигляді:

$$m_{1,1} = \cos(\varphi_3)\cdot\sin(\varphi_2) - \cos(\varphi_2)\cdot\sin(\varphi_3) = \sin(\varphi_2 - \varphi_3) \qquad m_{1,2} = \sin(\varphi_3) \qquad m_{1,3} = -\sin(\varphi_2)$$

$$m_{2,1} = \sin(\varphi_3) - \sin(\varphi_2) \qquad m_{2,2} = -\sin(\varphi_3) \qquad m_{2,3} = \sin(\varphi_2)$$

$$m_{1,3} = \cos(\varphi_3) - \cos(\varphi_2) \qquad m_{2,3} = 1 - \cos(\varphi_3) \qquad m_{3,3} = \cos(\varphi_2) - 1$$

D – визначник зворотної матриці M^{-1}, який залежить від фазових кутів φ_2, φ_3, він повинен відрізнятися від нуля тільки, що має місце при виконанні умов $\varphi_2 \neq 0$, $\varphi_2 \neq 0$, $\varphi_2 \neq \varphi_3$.

$$D = D(\varphi_2, \varphi_3) = \sin(\varphi_3) - \sin(\varphi_2) - \cos(\varphi_2)\cdot\sin(\varphi_3) + \cos(\varphi_3)\cdot\sin(\varphi_2) =$$
$$= \sin(\varphi_3) - \sin(\varphi_2) + \sin(\varphi_2 - \varphi_3)$$

Виконаємо зворотну матрицю M^{-1} (5) та для обчислення значень U_O , a та b (4):

$$M^{-1} = M^{-1}(\varphi_2, \varphi_3) = \frac{\begin{vmatrix} \sin(\varphi_2 - \varphi_3) & \sin(\varphi_3) & -\sin(\varphi_2) \\ \sin(\varphi_3) - \sin(\varphi_2) & -\sin(\varphi_3) & \sin(\varphi_2) \\ \cos(\varphi_3) - \cos(\varphi_2) & 1 - \cos(\varphi_3) & \cos(\varphi_2) - 1 \end{vmatrix}}{\sin(\varphi_3) - \sin(\varphi_2) + \sin(\varphi_2 - \varphi_3)} \tag{6}$$

$$U_0 = \frac{U_1\cdot\sin(\varphi_2 - \varphi_3) + U_2\cdot\sin(\varphi_3) - U_3\cdot\sin(\varphi_2)}{\sin(\varphi_3) - \sin(\varphi_2) + \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}$$

$$a = \frac{U_1\cdot(\sin(\varphi_3) - \sin(\varphi_2)) - U_2\cdot\sin(\varphi_3) + U_3\cdot\sin(\varphi_2)}{\sin(\varphi_3) - \sin(\varphi_2) + \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}$$

$$b = \frac{U_1\cdot(\cos(\varphi_3) - \cos(\varphi_2)) + U_2\cdot(1 - \cos(\varphi_3)) + U_3\cdot(\cos(\varphi_2) - 1)}{\sin(\varphi_3) - \sin(\varphi_2) + \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}$$

Тепер можна записати вираз для обчислення контрасту в аналітичному вигляді (6):

$$\Delta U = 2\cdot\sqrt{a^2 + b^2} = \frac{2}{|M|}\cdot\sqrt{A^2 + B^2} \tag{7}$$

$$A^2 + B^2 = \{U_1\cdot[\sin(\varphi_3) - \sin(\varphi_2)] - U_2\cdot\sin(\varphi_3) + U_3\cdot\sin(\varphi_2)\}^2 +$$
$$+\{U_1\cdot[\cos(\varphi_3) - \cos(\varphi_2)] + U_2\cdot[1 - \cos(\varphi_3)] + U_3\cdot[\cos(\varphi_2) - 1]\}^2 =$$
$$= U_1^2\cdot\{[\sin(\varphi_3) - \sin(\varphi_2)]^2 + [\cos(\varphi_3) - \cos(\varphi_2)]^2\} +$$
$$+U_2^2\cdot\{[-\sin(\varphi_3)]^2 + [1 - \cos(\varphi_3)]^2\} + U_3^2\cdot\{[\sin(\varphi_2)]^2 + [\cos(\varphi_2) - 1]^2\} +$$
$$+2\cdot U_1\cdot U_2\cdot\{[\sin(\varphi_3) - \sin(\varphi_2)]\cdot[-\sin(\varphi_3)] + [\cos(\varphi_3) - \cos(\varphi_2)]\cdot[1 - \cos(\varphi_3)]\} +$$
$$+2\cdot U_2\cdot U_3\cdot\{[-\sin(\varphi_3)]\cdot\sin(\varphi_2) + [1 - \cos(\varphi_3)]\cdot[\cos(\varphi_2) - 1]\} +$$
$$+2\cdot U_1\cdot U_3\cdot\{[\sin(\varphi_3) - \sin(\varphi_2)]\cdot\sin(\varphi_2) + [\cos(\varphi_3) - \cos(\varphi_2)]\cdot[\cos(\varphi_2) - 1]\} =$$
$$= 2\cdot U_1^2\cdot[1 - \cos(\varphi_3 - \varphi_2)] + 2\cdot U_2^2\cdot[1 - \cos(\varphi_3)] + 2\cdot U_3^2\cdot[1 - \cos(\varphi_2)] +$$
$$2\cdot U_1\cdot U_2\cdot\{\cos(\varphi_3 - \varphi_2) + \cos(\varphi_3) - \cos(\varphi_2) - 1\} +$$
$$+2\cdot U_2\cdot U_3\cdot\{-\cos(\varphi_3 - \varphi_2) + \cos(\varphi_3) + \cos(\varphi_2) - 1\} +$$
$$+2\cdot U_1\cdot U_3\cdot\{\cos(\varphi_3 - \varphi_2) - \cos(\varphi_3) + \cos(\varphi_2) - 1\}$$

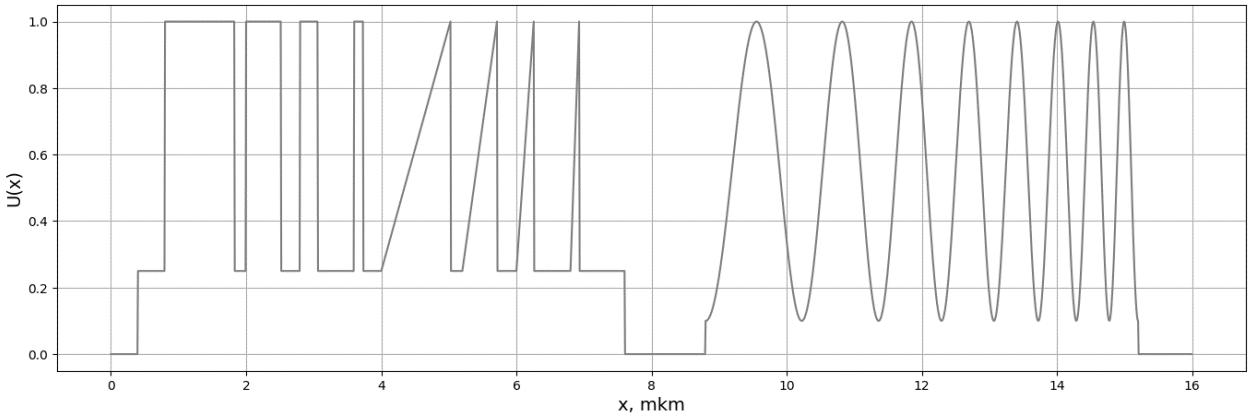

Рис. 2. Вхідний тестовий сигнал

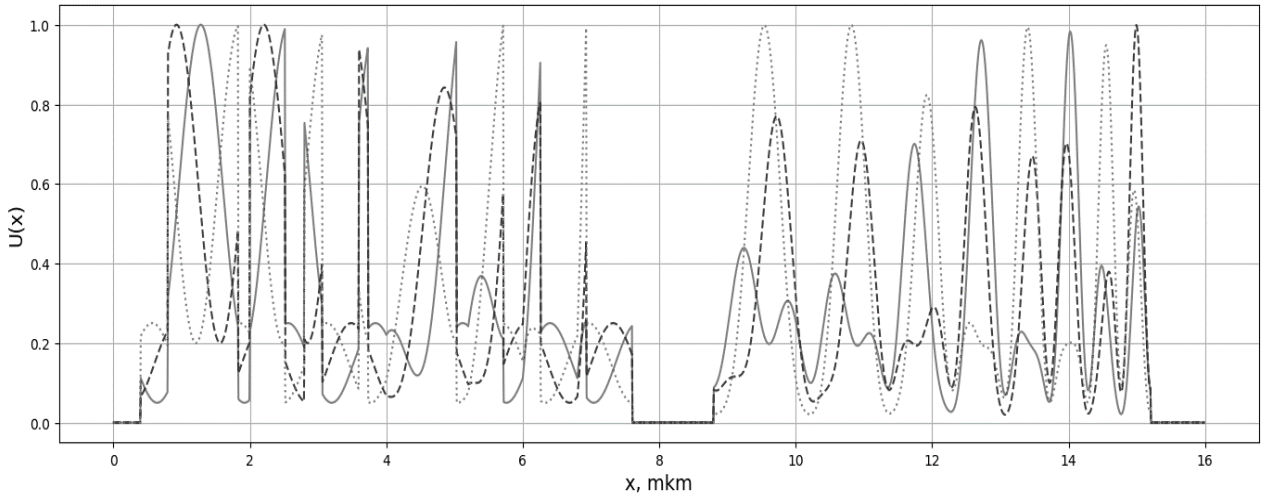

Рис. 3. Вхідний тестовий сигнал після модуляції:
$U_1 = U_1(x)$ – суцільна лінія, $U_2 = U_2(x)$ – штрихова лінія, $U_3 = U_3(x)$ – точкова лінія

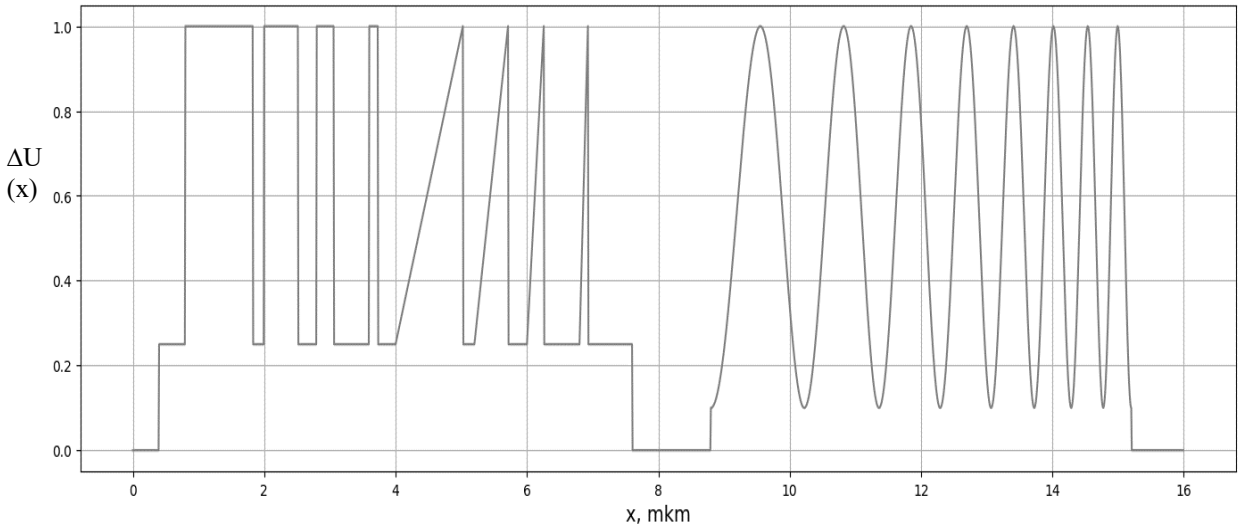

Рис. 4. Результат запропонованого метода демодуляції

Запропонований математичний апарат (1)–(7) дозволяє обчислити постійну складову, контраст та значення поточного фазового кута ПМО в аналітичному вигляді:

$$U_0 = \frac{\left[U_1 \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi_3) + U_2 \cdot \sin(\varphi_3) - U_3 \cdot \sin(\varphi_2)\right]}{\sin(\varphi_3) - \sin(\varphi_2) + \sin(\varphi_2 - \varphi_3)} \tag{8}$$

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\left|\sin(\varphi_3) - \sin(\varphi_2) + \sin(\varphi_2 - \varphi_3)\right|} \cdot$$

$$\cdot \Big(U_1^2 \cdot \left[1 - \cos(\varphi_3 - \varphi_2)\right] + U_2^2 \cdot \left[1 - \cos(\varphi_3)\right] + U_3^2 \cdot \left[1 - \cos(\varphi_2)\right] +$$

$$+ U_1 \cdot U_2 \cdot \left[\cos(\varphi_3 - \varphi_2) + \cos(\varphi_3) - \cos(\varphi_2) - 1\right] +$$

$$+ U_2 \cdot U_3 \cdot \left[-\cos(\varphi_3 - \varphi_2) + \cos(\varphi_3) + \cos(\varphi_2) - 1\right] +$$

$$+ U_1 \cdot U_3 \cdot \left[\cos(\varphi_3 - \varphi_2) - \cos(\varphi_3) + \cos(\varphi_2) - 1\right] \Big)^{0.5}$$

$$\alpha = \mathrm{a\,tan}\left(\frac{b}{a}\right) = \mathrm{a\,tan}\left(\frac{U_1 \cdot \left[\cos(\varphi_3) - \cos(\varphi_2)\right] + U_2 \cdot \left[1 - \cos(\varphi_3)\right] + U_3 \cdot \left[\cos(\varphi_2) - 1\right]}{U_1 \cdot \left[\sin(\varphi_3) - \sin(\varphi_2)\right] - U_2 \cdot \sin(\varphi_3) + U_3 \cdot \sin(\varphi_2)}\right)$$

де atan() – функція обчислення арктангенсу; α – поточний фазовий кут ПМО.

Проілюструємо застосування запропонованого математичного апарату цифрової демодуляції (1)–(8). На рис. 1 зображено графік тестового вхідного сигналу, які містить складові різного типу – прямокутні імпульси, трикутні імпульси та гармонійний сигнал з змінною просторовою частотою. На рис. 2 показані графіки сигналів, які тримані після гармонійної модуляції вхідного сигналу з фазовими кутами 0, 100 та 200 градусів, відповідно. Звернемо увагу на те, що для цих фазових кутів не наводяться розв'язку задачі цифрової демодуляції у відомих джерелах [4–10, 15–18]. Запропонований метод (1)–(8) дозволяє вирішити цю задачу – отримати розподіл контрасту модуляції по трьом модульованим сигналам (рисунок 2).

Результат демодуляції у вигляді графіку розподілу контрасту як функції від просторової координати x наведений на рисунку 4. Звернемо увагу на те, що результат демодуляції повністю співпадають з вхідними тестовим сигналом складної форми (рисунки 2, 4). Таке співпадіння зумовлене тим, що запропонований метод демодуляції базується на точному рішенні системи лінійних рівнянь (4)–(5) без застосування різних апроксимацій та наближень, які часто використовуються у відомих методах цифрових методах розв'язання задачі демодуляції.

Висновки

Науковою новизною роботи є запропонований метод вирішення задачі цифрової демодуляції, який дозволив отримати аналітичні вирази для обчислення контрасту, постійної складової та значення поточного фазового кута при використанні гармонічної ПМО з довільними фазовими кутами при отриманні тривимірних цифрових зображень. Практичною цінністю цього метода є можливість його застосування з економічними пристроями ПМО на більшості оптичних мікроскопів чи інших оптико-електронних приладах без придбання комерційного програмного забезпечення. Подальшим напрямком досліджень може бути вибір конструкції економічних пристроїв, які формують гармонічну ПМО, дослідження процесу отримання тривимірних цифрових зображень при різних режимах спостереження зразків та оцінювання просторової роздільної здатності оптико-електронних систем для отримання тривимірних цифрових зображень.

References

1. Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: A review. Optics and Lasers in Engineering, vol. 106, p. 119-131, July 2018.

2. Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. Advances in Optics and Photonics, vol. 3, p. 128-160, 2011.

3. Borovytsky V. Digital optical microscope as a sampled imaging system: mathematical description, camera selection and focusing. SPIE Proc. 8486, 0D.1 - 0D.12 (2012).

4. Banishev A., Bhowmick M., Wang J. Optical Interferometry. InTech, 2017. 260 p.

5. Wilson T., Sheppard C.J.R. Theory and Practice of Scanning Optical Microscopy, Academic Press, London, 1984.

6. Trusiak Maciej. Fringe analysis: single-shot or two-frames? Quantitative phase imaging answers. Optics Express, Optical Society American, vol. 29(12), p. 18192-18211, 2021.

7. Weigel A. Resolution in the ApoTome and the confocal laser scanning microscope: comparison. Journal of Biomedical Optics, vol. 14(1), 014022, 2009.

8. Mazhar A. Structured illumination enhances resolution and contrast in thick tissue fluorescence imaging. Journal of Biomedical Optics, vol. 15(1), 010506, 2010.

9. Neil M.A.A., Juskaitis R., Wilson T. Method of obtaining optical sectioning using structured light in a conventional microscope. Optics Letters, vol. 22, p. 1905-1907, 1997.

10. Bian Z., Guo C., Jiang S. Autofocusing technologies for whole slide imaging and automated microscopy. Journal Biophotonics. vol. 13, 202000227, 2020.

11. Муравський Л. І., Половинко Т. І. Метод трикрокової інтерферометрії з довільними зсувами фаз опорного променя. Відбір і обробка інформації 41, 49-54, 2014.

12. Lazaros N., Sirakoulis G. C., Gasteratos A. Review of stereo vision algorithms: From software to hardware, International Journal of Optomechatronics, 2 (4), 435–462, 2008.

13. Hansard M., Lee S., Choi O., Horaud R. P. Time-of-Flight Cameras, Springer-Verlag London, 2013.

14. Texas Instruments (2015). OPT8241 3D Time-of-Flight Sensor. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opt8241.pdf?ts=1685223189030&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FOPT8241

15. Patent № US 2008 0069467 USA, Int. cl. G02B 21/00. Methods and devices for images processing with higher harmonics of an illumination grating / Schafer L., Schuster D.; assignee: Carl Zeiss Imaging Solutions Jena GmbH, Jena, Germany. Appl. № 11/ 900 532; filed Sep. 12, 2007; issued Mar. 20, 2008.

16. Patent № US 2009 0147354 A1 USA, Int. cl. G02B 21/00, G02B 21/06. Projection device for patterned illumination and microscopy / John D.Arbuckle; assignee: Quorum technologies inc. Appl. № 12/ 255 607; filed Oct. 21, 2008; issued Jun. 11, 2009.

17. Patent № US 2009 0147354 A1 USA, Int. cl. G02B 21/00, G02B 21/06. Structured illumination device and structured illumination microscope device / Hiroaki Nakayama, Yumiko Ouchi; assignee: Nikon corporation. Appl. № 14/ 996 717; filed Jan. 15, 2016; issued Feb. 20, 2018.

18. Patent № US 6 819 415 B2 USA, Int. cl. G01B 9/00, G01B 11/24, G01C 3/08, H01J 3/14, G06K 9/36. Assembly for increasing the depth discrimination of an optical imaging system / Gerstner V., Hecht F., Lange R., Bloos H.; assignee: Carl Zeiss Jena GmbH, Jena, Germany. Appl. № 10/ 089 878; filed Aug. 4, 2001; issued Nov. 16, 2004.