

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки  
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікро- та наноелектроніки  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Борисов О. В.  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка \_\_\_\_\_  
(код і назва)

на тему: Амплітудно-фазові голограми, створені методами оптичної скануючої голографії та розпізнанням за стисненням \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Виконав (-ла): студент 6 курсу, групи ДП-61м \_\_\_\_\_  
(шифр групи)

Сельоткін Владислав Олегович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник

академік, проф., д.т.н. Якименко Юрій Іванович \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., доц., к.т.н. Орлов А.Т. \_\_\_\_\_

Консультант з інформаційних питань ст. викл., к.т.н. Діденко Ю.В. \_\_\_\_\_

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2018 року

## РЕФЕРАТ

Роботу викладено на 73 сторінках, вона містить 4 розділи, 30 ілюстрацій, 23 таблиці і 31 джерело в переліку посилань.

**Актуальність теми.** Метод оптичної скануючої голографії вимагає багато часу для сканування, що є перешкодою для застосування у системах вимірювання у режимі реального часу. Потреба у розробці алгоритмів для збільшення швидкості методу оптичної скануючої голографії зумовили вибір теми роботи та підтверджує її актуальність.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка алгоритму для підвищення швидкості отримання голограм методом оптичної скануючої голографії. Для досягнення зазначеної мети поставлено та вирішено такі задачі:

- 1) Розробити макет установки отримання амплітудно-фазових голограм.
- 2) Розробити алгоритм збільшення швидкості роботи методу розпізнання за стисненням.
- 3) Розробити метод поєднання оптичної скануючої голографії та розпізнання за стисненням для отримання амплітудно-фазових голограм.

*Об'єктом дослідження* є амплітудно-фазові голограми.

*Предмет роботи* є час вимірювання методом оптичної скануючої голографії та розпізнання за стисненням.

*Наукова новизна отриманих результатів* полягає у розробленому методі вимірювання голограм для зменшення кількості вимірювань, а також модернізація методу розпізнання за стисненням.

*Апробація результатів дослідження.* Результати пройшли апробацію на конференції «Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2018» (15-19 квітня 2018, м. Орландо, США) та конференції «Image Processing and Image Understanding» (7-9 лютого 2018, м. Чеджу, Республіка Корея).

ГОЛОГРАФІЯ, ОПТИЧНА СКАНУЮЧА ГОЛОГРАФІЯ, РОЗПІЗНАННЯ ЗА СТИСНЕННЯМ, ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ, ОДНОПІКСЕЛЬНЕ ВИМІРЮВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ, ПРИЛАДИ МОДУЛЯЦІЇ СВІТЛА.

## ABSTRACT

The work presented on 73 pages consists of 4 parts, 30 figures, 23 tables and 31 sources in the list of references.

**Relevance.** Optical scanning holography is time-consuming, so it is impossible to use this method in real-time systems. The need to develop algorithms to decrease the holograms acquisition time by optical scanning holography confirms its relevance.

**Research purpose and tasks.** The purpose of this work is to develop algorithm for quality enhancement and decreasing hologram acquisition time using optical scanning holography. To achieve this goal such tasks were set and solved:

- 1) Develop a set-up for complex hologram acquisition.
- 2) Develop an algorithm for increasing the speed of the compressive sensing.
- 3) Develop a method to combine optical scanning holography and compressive sensing to obtain complex holograms.

*The object of the study* is complex holograms.

*The subject of the work* is acquisition time of the optical scanning holography.

*Scientific novelty of the obtained results* consists in the developed method for holograms acquisition in order to reduce the number of measurements, as well as improving of the compressive sensing.

*Approbation of the research results.* The results were presented in the conference “Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2018” (April 15-19, 2018, Orlando, USA) and the conference "Image Processing and Image Understanding" (February 7-9, 2018, Jeju, Republic of Korea).

HOLOGRAPHY, OPTICAL SCANNING HOLOGRAPHY, COMPRESSIVE SENSING, IMAGE PROCESSING, SINGLE-PIXEL IMAGING, SPARTIAL LIGHT MODULATOR

## ЗМІСТ

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І<br>ТЕРМІНІВ .....                          | 6  |
| 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОПТИЧНОЇ СКАНУЮЧОЇ ГОЛОГРАФІЇ .....                                             | 9  |
| 1.1 Принципи голографії .....                                                                        | 9  |
| 1.2 Осьова та позаосьова голографія.....                                                             | 13 |
| 1.3 Цифрова голографія .....                                                                         | 15 |
| 1.4 Оптична скануюча голографія .....                                                                | 19 |
| 1.5 Висновки до розділу .....                                                                        | 24 |
| 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗПІЗНАННЯ ЗА СТИСНЕННЯМ.....                                                  | 25 |
| 2.1 Традиційний метод розпізнання за стисненням .....                                                | 25 |
| 2.2 Застосування методу розпізнання за стисненням.....                                               | 29 |
| 2.3 Двоетапний процес вимірювання .....                                                              | 32 |
| 2.4 Висновки до розділу .....                                                                        | 36 |
| 3. РЕЗУЛЬТАТИ ОТРИМАНІ МЕТОДАМИ ОПТИЧНОЇ СКАНУЮЧОЇ<br>МІКРОСКОПІЇ ТА РОЗПІЗНАННЯ ЗА СТИСНЕННЯМ ..... | 37 |
| 3.1 Результати оптичної скануючої голографії.....                                                    | 37 |
| 3.2 Результати методу розпізнання за стисненням .....                                                | 41 |
| 3.3 Комбінація оптичної скануючої голографії та розпізнання за стисненням..                          | 49 |
| 3.4 Висновки до розділу .....                                                                        | 54 |
| 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ .....                                                                    | 56 |
| 4.1. Опис ідеї проекту .....                                                                         | 56 |
| 4.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....                                                           | 57 |
| 4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....                                       | 58 |
| 4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту .....                                                    | 63 |
| 4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....                                         | 64 |
| 4.6 Висновки до розділу .....                                                                        | 66 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                        | 67 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....                                                                               | 69 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

3D – three dimensional (тривимірний)

MPT – магніто-резонансна томографія

ФПМ – функція передачі модуляції

CS – Compressive Sensing (розпізнання за стисненням)

DMD – Digital micromirror device (цифровий мікро-дзеркальний прилад)

FZP – Fresnel zone plate (зонна пластинка Френеля)

GI – Gini index (індекс Gini)

OSH – Optical scanning holography (оптична скануюча голографія)

PSNR – Peak Signal to Noise Ration (співвідношення пікового сигналу до шуму)

SD – Standard deviation (середньоквадратичне відхилення)

TDFZP – time-dependent Fresnel zone plate зонна пластинка Френеля залежна від часу)

## ВСТУП

Найпоширенішим способом отримання тривимірної (3D) інформації з реальної картини є використання декількох камер. Якщо цей метод підходить для видимого спектру світла, його важче реалізувати в нетрадиційних спектральних діапазонах, таких як ультрафіолетовий або інфрачервоний, оскільки вартість камер значно вища, ніж у видимій області.

Голографія являє собою техніку, яка дозволяє отримувати тривимірну інформацію, записуючи інтерференції хвиль. Звичайна голографія дуже чутлива до вібрації та зовнішнього світла, але оптична скануюча голографія (Optical Scanning Holography – OSH) – це метод цифрової голографії. Це унікальна техніка, за допомогою якої 3D-інформація сцени записується в реальному часі та за допомогою оптичного сканування об'єкту. Окрім цього, вимірювання в оптичній скануючій голографії базується на сенсорі з одним пікселем, немає необхідності використовувати камеру високої роздільної здатності. Оскільки метод оптичної скануючої голографії базується на растровому скануванні, так само як і інші методи сканування, він вимагає достатньо часу. А також при скануванні великих об'єктів розмір інформації, яку потрібно зберігати, значний, оскільки вимірюється дійсна та уявна частини голограми.

Одним з рішень, для покращення методу OSH є розпізнання за стисненням. Це новітня техніка, яка була розроблена для відновлення об'ємних за інформацією сигналів з невеликої кількості вимірювань. Цей метод ґрунтується на тому, що сигнал для відновлення є розрідженим, і ефективність відновлення залежить від рівня розрідженості. Проте в практичному випадку рівень розрідженості зображення для відновлення невідомий, і тоді важко оцінити кількість вимірювань, необхідних для відтворення зображення із задовільною якістю.

Дана робота присвячена поєднанню оптичної скануючої голографії та розпізнання за стисненням. Оскільки обидва методи базуються на вимірюванні

однопиксельним сенсором, ці методи можна об'єднати разом. Поєднуючи оптичну сканування голографію та розпізнання за стисненням, ми пропонуємо подолати обмеження OSH, такі як великий обсяг зберігання даних та часові затрати. Декілька спроб були зроблені для покращення методу оптичної скануючої голографії, проте в більшості вони представляють методи засновані на обробці зображень.

## 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОПТИЧНОЇ СКАНУЮЧОЇ ГОЛОГРАФІЇ

### 1.1 Принципи голографії

Фотографія – це запис інформації про 3D об'єкт у плоскому вигляді. Записується лише інтенсивність світла, тобто лише частина світла пропорційна амплітуді. В результаті частина інформації втрачається, а саме фазова інформація.

Голографія – це методика для запису оптичної інформації, винайдена Деннісом Габором у 1948 році. Перевагою голографії над фотографією є здатність записувати повну інформацію про відбите об'єктом світло, амплітуду та фазу хвилі. Використання голографії для зберігання оптичної 3D інформації є одним з найважливіших аспектів з наукової точки зору. Голографія є важливим інструментом для наукових та інженерних досліджень. Все більша кількість біологів, хіміків, кристалографів та інших вчених використовують голографію у своїх дослідженнях. За допомогою традиційної голографії можна безпосередньо отримувати голограми реальних об'єктів, проте умови запису повинні бути дуже стабільними. Необхідна темна кімната, ізольована від вібрацій. Крім того дані можуть бути пошкоджені шумом через некогерентність лазеру [1].

Голографія – це запис у дво- або тривимірному середовищі інтерференційної картини, яка утворюється, коли точкове джерело світла (опорний промінь) фіксованої довжини хвилі накладається на світло тієї ж фіксованої довжини хвилі, що надходить від предмета (предметного променя).

Звичайне світло складається з безлічі хвиль різної довжини, жодна з яких не знаходиться у нерухомому взаємозв'язку фази між собою протягом певного періоду часу. Звичайне світло має погану часову узгодженість. В такому випадку спостерігати інтерференційну картину неможливо, що є найважливішим для застосування в голографії. Таким чином, необхідно використовуються лазери для отримання когерентних світлових пучків.

Голографія здійснюється за допомогою двох когерентних хвиль: одна хвиля поширюється від предмета і несе інформацію про предмет (амплітуда, фаза)



– це предметна хвиля. Друга хвиля є опорною і призначена для створення інтерференційної картини. Предметна і опорна хвилі утворюються з однієї хвилі шляхом розділення на дві частини [2].

Принципи голографії можна пояснити використовуючи точковий об'єкт, оскільки будь-який об'єкт можна розглядати як набір точок. На рис.1.1 зображено схему запису голограми точкового об'єкту. Розглянемо випадок запису голограми на відстані  $z_0$  від записуючої плівки. Паралельний пучок світла розділяється на дві хвилі які рекомбінують за допомогою двох дзеркал (M1 та M2) та двох дільників променю (BS1 та BS2). Згідно теорії дифракції Френеля предметна хвиля на відстані  $z_0$  отримана дифракцією плоскої хвилі на апертурі - це сферична хвиля (1.1).

$$\begin{aligned}\psi_o(x, y; x_0, y_0, z_0) &= \delta(x - x_0, y - y_0) * h(x, y; z_0) = \\ &= \exp(-jk_0 z_0) \frac{jk_0}{2\pi z_0} \exp\left\{\frac{jk_0(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2\pi z_0}\right\}\end{aligned}\quad (1.1)$$

де  $x, y$  – просторові координати;

$x_0, y_0$  – координати джерела світла;

$k_0$  – хвильове число.

Хвильове рівняння для опорної плоскої хвилі в експоненціальній формі:

$$\psi_r = a \exp(-jk_0 z_0) \quad (1.2)$$

де  $a$  – амплітуда плоскої хвилі.

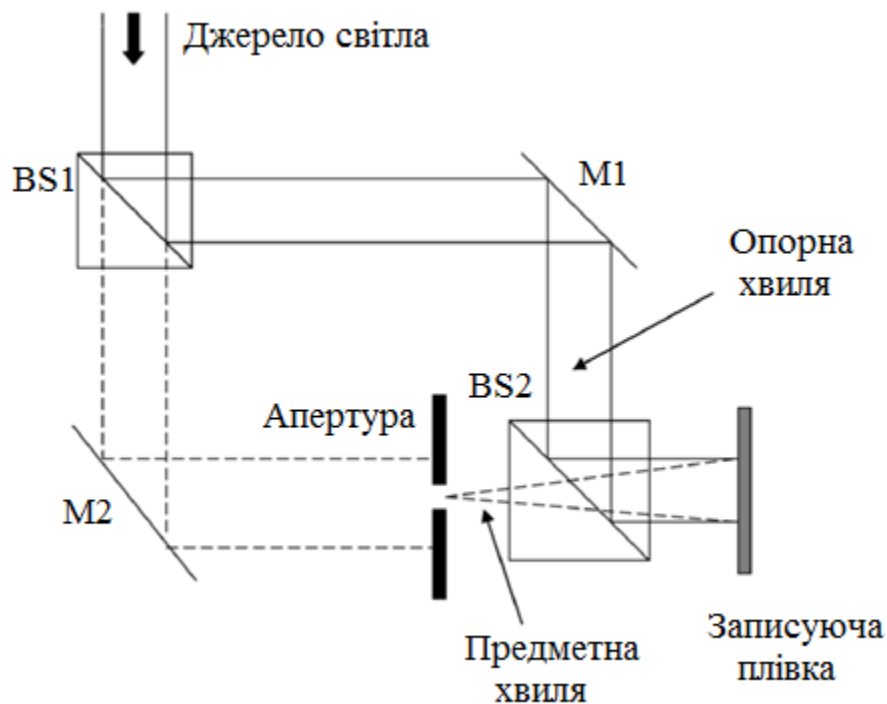


Рисунок 1.1 – Схема голографічного запису точкового об'єкту

Записуюча плівка записує інтерференцію предметної хвилі та опорної хвилі. Розподіл інтенсивності (1.3), що записується на плівці є сума інтенсивностей плоскої (1.2) та сферичної хвилі (1.1).

$$\begin{aligned}
 i(x, y) &\sim \|\psi_r + \psi_o\|^2 = \left| a + \frac{jk_0}{2\pi z_0} \exp \left[ -\frac{jk_0(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2z_0} \right] \right|^2 = \\
 &= A + B \sin \left( \frac{k_0}{2z_0} \left[ (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right] \right) = FZP(x - x_0, y - y_0)
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

$$\text{де } A = a^2 + \left( \frac{k_0}{2\pi z_0} \right)^2 ;$$

$$B = \frac{k_0}{\pi z_0} ;$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} .$$

Рівняння (1.3) називається синусоїдальною зонною пластинкою Френеля (Fresnel zone plate – FZP), що є голограмою точкового об'єкту. Центр зонної пластинки знаходиться в координатах  $(x_0, y_0)$ . Якщо  $x_0 = y_0 = 0$  у рівнянні (1.3), на відстані  $z_0$  від плівки, ми отримаємо рівняння зонної пластинки Френеля (1.4) та її зображення на рис 1.2 [3].

$$i(x, y) \sim \|\psi_r + \psi_o\|^2 = \left| a + \frac{jk_0}{2\pi z_0} \exp\left[-\frac{jk_0(x^2 + y^2)}{2z_0}\right] \right|^2 =$$

$$= A + B \sin\left(\frac{k_0}{2z_0}(x^2 + y^2)\right) = FZP(x, y; z_0) \quad (1.4)$$



Рисунок 1.2 – Зонна пластинка Френеля

Просторова швидкість зміни фази зонної пластинки вздовж напрямку  $x$  становить:

$$f_{local} = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dx} \left( \frac{k_0}{2z_0} x^2 \right) = \frac{x}{\lambda_0 z_0} \quad (1.5)$$

Рівняння (1.5) описує локальну частоту кілець зонної пластинки, яка лінійно збільшується з просторовою координатою  $x$ . Чим далі вона віддалена від центру

зонної пластинки, тим вище частота. Отже, для фіксованої точки (локальної) на голограмі, ми можемо вивести інформацію про глибину,  $z_0$ , знайшовши локальну частоту для заданої довжини світла  $\lambda_0$ . Інформація про глибину кодується в межах фази зонної пластинки.

Якщо предметна хвиля зміщується у нове місце, то центр зонної пластинки відповідно здвигається. Отже, ми бачимо, що зонна пластинка містить повну 3D інформацію про точкове джерело. Центр зони, визначає повздовжнє розташування точкового об'єкта, а зміна частоти кілець визначає глибину розташування об'єкту. Довільний 3D об'єкт можна представити як набір точок, і тому можна стверджувати, що у нас є набір зонних пластин, кожна з яких несе повздовжнє розташування, а також інформацію про глибину кожної окремої точки об'єкта [4].

## 1.2 Осьова та позаосьова голографія

Осьова голографія вимагає використання опорної хвилі, вісь якої співпадає з віссю предметної хвилі, тобто координати центру двох хвиль повинні бути однаковими. Незважаючи на те, що ця методика може записувати повну тривимірну інформацію про об'єкт, вона містить недоліки, такі як подвійне зображення та компоненту нульового порядку. Крім реального зображення, подвійне зображення і компонента нульового порядку також буде відновлено в тій самій точці рис.1.3 (а, б).

Метод позаосьової голографії був розроблений Е. Лейтом та Ю. Упатнієксом, щоб відокремити подвійне зображення від реального зображення. Для позаосьового запису голограм необхідно, щоб опорна хвиля була відхилена на деякий кут від опорної хвилі. Ситуація показана на рис. 1.3 (в, г), де промінь опорної хвилі падає під кутом на записуючу плівку [5,6].

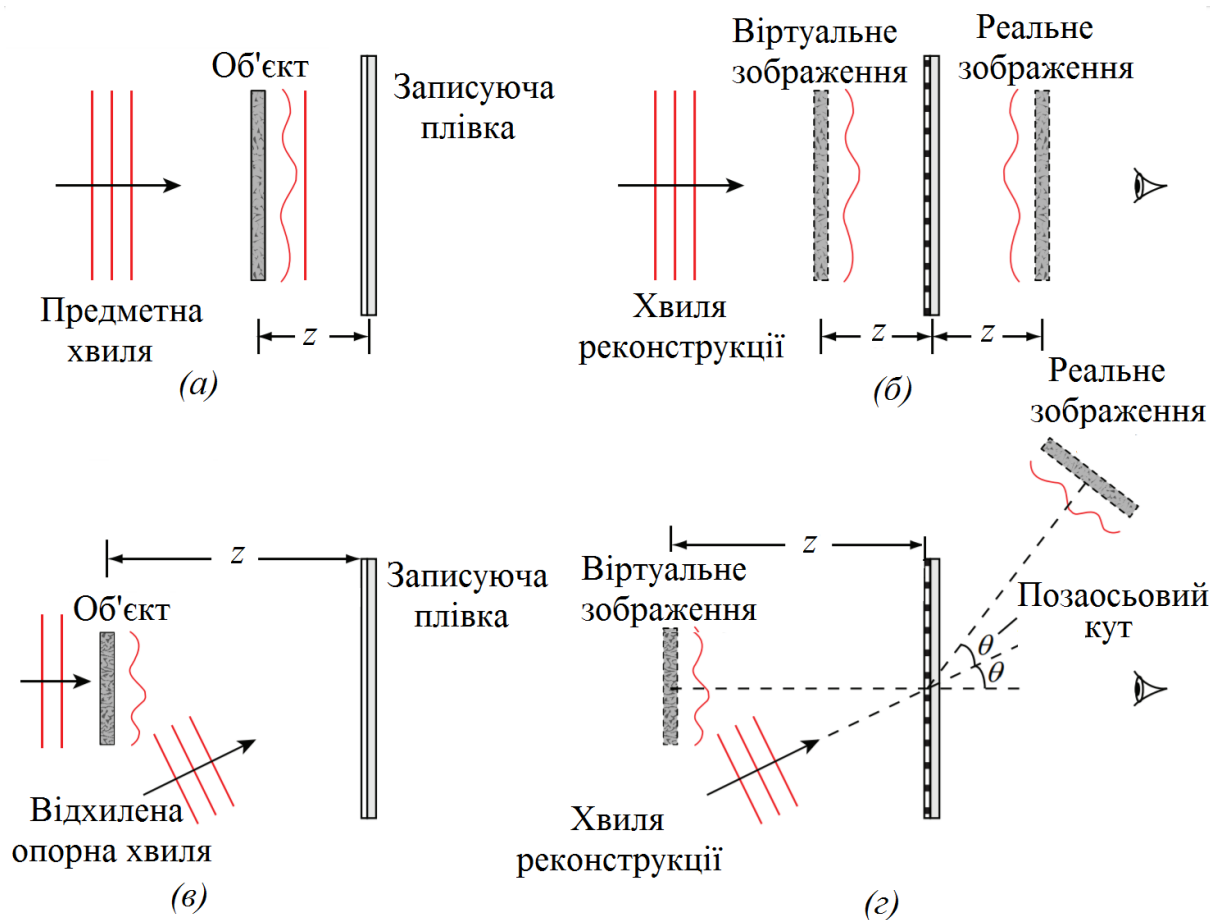


Рисунок 1.3 – Запис та реконструкція осьової (а, б) та позаосьової голограми (в, г)

При реконструкції голограм, записаних методом осьової голографії майже неможливо візуально розділити складові реконструйованого зображення рис. 1.4(а). Проте, у випадку реконструкції позаосьової голограми рис.1.4(б), три реконструйованих промені поширюються вздовж різних напрямків, а якщо кут запису достатньо великий, віртуальне зображення можна переглядати без будь-яких перешкод від променю нульового порядку та реального зображення.

Хоча позаосьова голографія вирішує недоліки подвійного зображення, проте вона створює додаткові вимоги до більшої роздільності здатності приладів, які використовуються для реконструкції голограм, а також до ступеня когерентності випромінювання, що використовується для формування голографічного поля [7].

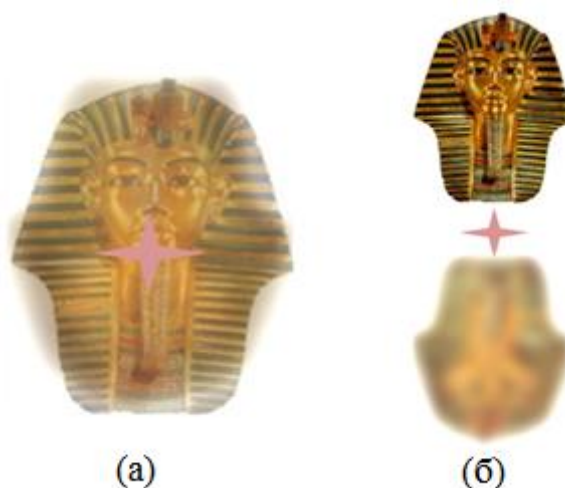


Рисунок 1.4 – Порівняння реконструкції а) – осьової голограми б) – позаосьової голограми

Завдяки використанню позаосьової схеми оптична голографія позбавилась обмежень, що виникли в перших роботах по електронній та рентгенівській голографії. Переваги позаосьового методу голографії дали можливість застосовувати голографію для будь-яких прозорих або відбиваючих об'єктів [5].

### 1.3 Цифрова голографія

З розвитком комп'ютерних технологій та технік отримання зображення стало можливим замінити частину оптичного процесу електронним. В цифровій голографії, інтерференційні картини записуються камерою та зображення відновлюється з використанням програмного забезпечення. Завдяки цьому можна отримати декілька переваг, а саме: отримувати зображення швидше, можливість записувати амплітудну та фазову інформацію та використовувати техніки обробки комплексних даних. Велика кількість технік була розроблена з використанням переваг цифрової голографії, такі як можливість відновлювати

зображення у будь-якій площині, передавати отриману комплексну інформацію та навіть створити голограми з флуоресцентних інтерференційних картин.

Предметом цифрової голографії є аналіз, синтез та моделювання хвильових полів використовуючи обчислювану техніку. При вимірюванні та обробці цифрових голограм, як і фізичних голограм, голограми представляють собою не зображення самого об'єкту, а зображення перетворення Фур'є функції розсіяння об'єкту. Цифрові голограми ефективно використовуються для фільтрації зображень.

За допомогою використання цифрової голографії можливо розділити функції запису, збереження та відображення інформації. На кожному з таких етапів можлива обробка даних, яка дає змогу виключити похибки, що виникають та отримати після відновлення голограму високої якості.

Процес отримання цифрової голограми включає, як правило, наступні етапи:

- 1) Введення до комп'ютеру голографічної інформації;
- 2) Розрахунок амплітудного та фазового спектру зображення за допомогою алгоритмів інтегральних перетворень;
- 3) Виконання додаткових процедур, в залежності від вибраного методу відображення цифрової голограми;
- 4) Відображення голограми на комп'ютері, за допомогою модулятора частоти чи фази або відправка на друк.

Найпростішим видом голограми є бінарна або двійкова голограма. Це цифрова голограма, кожен елемент якої може бути або білим, або чорним, тобто приймає лише одне з двох значень, які відповідають нулю або одиниці [8].

Сучасній цифровій голографії більше 20 років. Деякі області, в яких використовується цифрова голографія в поєднанні з сучасними фототехнологіями, демонструє її великий потенціал для нових застосувань у технічних науках:

— реалізація складних принципів освітлення, візуалізації та реконструкції для посилення роздільної здатності голографічних зображень та зменшення вимог до пропускну здатності голографічних сенсорів;

– поєднання цифрової голографічної мікроскопії та голографічною 3D-мікроманіпуляцією на основі просторового модулятора світла для мінімально-інвазивного дослідження живих клітин і тканин;

– оцінка функції просторової когерентності, яка вимірюється за допомогою самореференційної інтерферометрії з метою зменшення ступеня когерентності світла, необхідної для голографічного зберігання, і отримання просторової та спектральної інформації про об'єкти;

– застосування сучасних джерел світла, таких як надточні лазери та частотні гребінці для точного визначення глибини зображення та 3D-реконструкції об'єктів та сцен;

– оцінка світлових полів, що передаються або відбиті від сильно розсіяних або прихованих об'єктів;

– забезпечення голографічних установок технологією дистанційного доступу та порівняльного контролю.

Оптична реконструкція цифрових голограм досі дуже обмежена, через технологічні обмеження пристроїв просторової модуляції світла.

Дифракція на відстані  $z$  опорної хвилі  $R$  на апертурі  $H$  може бути описана інтегралом Френеля-Кірхгофа (1.6).

$$U(u, v) = \frac{j}{\lambda} \iint H(x, y) R(x, y) \frac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\rho}}{\rho} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\Theta) \right) dx dy \quad (1.6)$$

де  $\rho = \sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2 + z^2}$ ;

$(x, y)$  та  $(u, v)$  локальні координати площини апертури та площини реконструкції.

Якщо опорна хвиля це плоска хвиля, можна вважати, що  $R(x, y) = 1$ .

Для цифрової реконструкції голограм важливо використовувати цю формулу у ефективний спосіб для розрахунку в реальному часі. Існує різні



підходи, які можуть бути застосовані для розрахунку реконструкції голограм на заданій відстані реконструкції.

Перший підхід полягає у використанні наближення Френеля. Якщо відстань реконструкції набагато більша області сканування, можна вважати, що  $\cos(\Theta) \approx 1$ , записати  $\rho = z + \frac{(u-x)^2}{2z} + \frac{(v-y)^2}{2z}$  та прийняти, що  $\mu = \frac{u}{\lambda z}$  та  $\nu = \frac{v}{\lambda z}$ . Підставивши у рівняння отримаємо рівняння Френеля (1.7).

$$U(\mu, \nu) = \frac{j}{\lambda z} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\rho} e^{-j\pi\lambda z(\mu^2 + \nu^2)} \iint H(x, y) e^{-j\frac{\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2)} e^{2j\pi(\mu x + \nu y)} dx dy$$

$$U(\mu, \nu) \sim IFFT \left[ H(x, y) e^{-j\frac{\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2)} \right] \quad (1.7)$$

де  $IFFT$  – це зворотнє швидке перетворення Фур'є.

Рівняння (1.7) широко застосовується в цифровій голографії, оскільки обчислення можуть бути виконані з використанням однієї операції перетворення Фур'є. Слід зауважити, що у числовій реконструкції розмір пікселів у площині зображення та площині голограми різний. Вони співвідносяться як  $p_{im} = \frac{\lambda z}{N p_{holo}}$ , де  $N$  – це кількість пікселів вздовж вибраної осі.

Другий підхід полягає у розгляді рівняння (1.6) як згортки. Його можна переписати:

$$U(\mu, \nu) = H * g = IFFT[FFT(H) \times FFT(g)] \quad (1.8)$$

$$\text{де } g(x-u, y-v, z) = \frac{j}{\lambda} \frac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2 + z^2}}}{\sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2 + z^2}}$$

У цьому випадку розмір пікселю залишається незмінним. Загально прийнято, що найбільш точна формула методу згортки це підхід кутового спектру. Цей підхід більш підходить для використання на коротких відстанях [7].

Зображення результатів числової реконструкції двома основними методами показані на рис. 1.5.

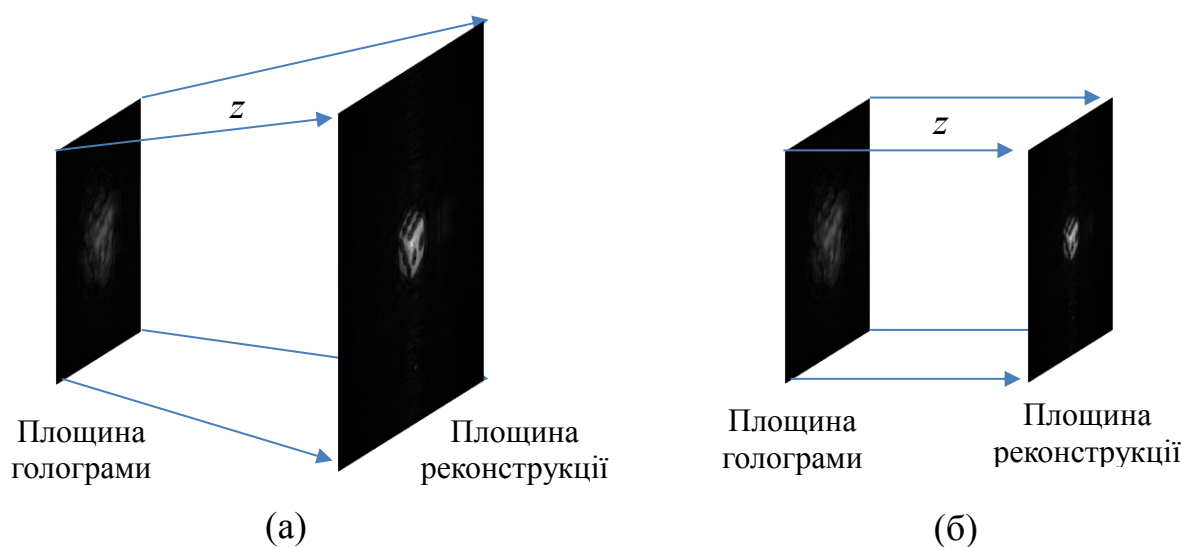


Рисунок 1.5 – Чисельна реконструкція цифрової голограми методом Френеля (а) та методом кутового спектру (б)

Для наших досліджень ми зазвичай використовували формулу Френеля, крім тих випадків, коли відстань реконструкції була невелика.

#### 1.4 Оптична скануюча голографія

Оптична скануюча голографія – це вид цифрової голографії, в якому інформація про об'єкт записується за допомогою двовимірного оптичного сканування. Вона використовується у скануючій голографічній мікроскопії, 3D телебаченні та криптографії [9]. Важливою характеристикою оптичної скануючої

голографії є той факт, що усі вимірювання здійснюється з використанням однопиксельного сенсору. Тому він може бути легко використаний для голографічних вимірювань в нетрадиційному спектральному діапазоні з експериментальними датчиками.

Оптична скануюча голографія основана на двох принципах: активному оптичному скануванні та оптичному гетеродинуванні.

За допомогою оптичного гетеродинування вимірюється фазова інформація. Принцип дії оптичного гетеродинування заснований на модуляції частоти одного з двох променів. За допомогою лазера, пари дільників променю та двох дзеркал створюються два когерентних паралельних промені, які модульовані з різною частотою  $\omega$  та  $\omega + \Omega$  відповідно, так що  $\omega \gg \Omega$ . Тобто необхідно змінити частоту плоскої хвилі на  $\Omega$ . Предметна та опорна хвилі поєднуються за допомогою дільника променю та проектується на досліджуваний об'єкт з використанням X-Y сканеру [10].

Два когерентних промені модульовані з різною частотою утворюють інтерференційну картини, яка представляє собою зонну пластинку Френеля залежну від частоти (Time-dependent Fresnel zone plate – TDFZP). Розглянемо зонну пластинку Френеля залежну від частоти, утворену між плоскою хвилею  $\psi_r$  модульованою на частоті  $\omega + \Omega$  і сферичною хвилею  $\psi_o$  модульованою на частоті  $\omega$  (1.9). Зонна пластинка Френеля залежна від частоти, використовується для сканування вздовж цілого об'єкту у системі оптичної голографії.

$$\begin{aligned}
 TDFZP(x, y, z) &= |\psi_r + \psi_o| = \left| A e^{j(\omega + \Omega)t} + B \frac{jk_0}{2\pi z} e^{\left[ \frac{jk_0(x^2 + y^2)}{2\pi z} \right]} e^{j\omega t} \right| = \\
 &= A^2 + C^2 + 2AC \sin \left[ \frac{k_0}{2z} (x^2 + y^2) - \Omega t \right]
 \end{aligned} \tag{1.9}$$

де  $A$  та  $B$  – константи, що представляють амплітуду двох хвиль;

$$C = Bk_0 / 2\pi z.$$

На рис. 1.6 показана типова система оптичної скануючої голографії. Когерентний паралельний пучок світла створюється за допомогою лазера. Промінь розділяється на два предметний та опорний промені. Кожна з хвиль модульована на різній частоті з використання електро-оптичного модулятора фази. Як було показано вище, два таких промені створюють зонну пластинку Френеля залежну від часу. Створена інтерференційна картина проектується за допомогою оптичного сканера X-Y для сканування досліджуваного об'єкту, заданого прозорістю  $\Gamma_0(x, y)$ . Світло, що пройшло крізь об'єкт, потім збирається фотоприймачем. У випадку, коли об'єктом є точкове джерело з розподілом  $I_{obj}(x, y, z) = \delta(x - x_{obj}, y - y_{obj})$  загальна інтенсивність матиме вигляд (1.10) [11].

$$i_{photo}(x, y, z) = TDFZP(x, y, z) * \delta(x - x_{obj}, y - y_{obj}) \quad (1.10)$$

де \* – оператор згортки.

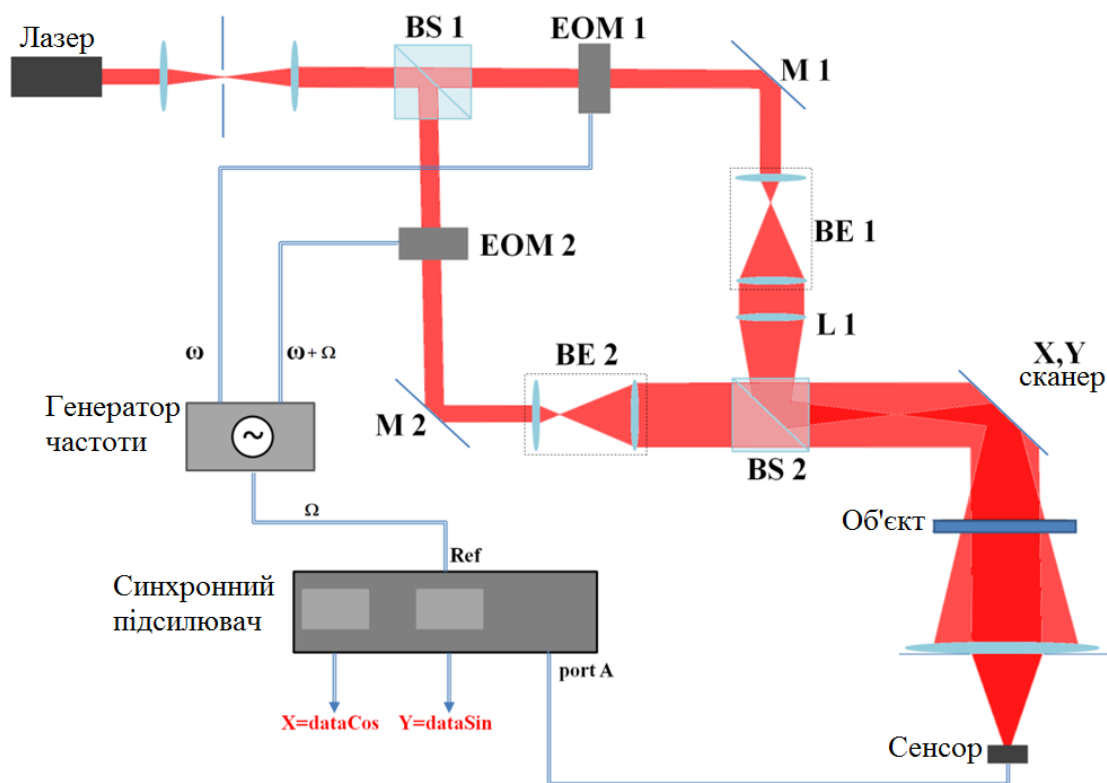


Рисунок 1.6 – Схема оптичної скануючої голографії

Потім сигнал обробляється синхронним підсилювачем для демодуляції. На першому етапі постійна складова струму видаляється за допомогою фільтру верхніх частот, а сигнал розділяється на дві частини, який кожна з яких підсилюється. Потім сигнал множиться на  $\sin(\Omega t)$  на одному шляху, а  $\cos(\Omega t)$  у другому (1.11).

$$\begin{aligned}
 i_{\cos} &\sim \frac{k_0}{2\pi z} \cos\left(\frac{k_0}{2z} \left[(x - x_{obj})^2 + (y - y_{obj})^2\right] - 2\Omega t\right) - \\
 &\quad - \frac{k_0}{2\pi z} \cos\left(\frac{k_0}{2z} \left[(x - x_{obj})^2 + (y - y_{obj})^2\right]\right) \\
 i_{\sin} &\sim \frac{k_0}{2\pi z} \sin\left(\frac{k_0}{2z} \left[(x - x_{obj})^2 + (y - y_{obj})^2\right] - 2\Omega t\right) - \\
 &\quad - \frac{k_0}{2\pi z} \sin\left(\frac{k_0}{2z} \left[(x - x_{obj})^2 + (y - y_{obj})^2\right]\right)
 \end{aligned} \tag{1.11}$$

Нарешті, кожен з сигналів фільтрується за допомогою фільтру низьких частот, щоб видалити складову з частотою  $2\Omega$  [12]. Таким чином, залишиться лише друга складова кожного з сигналів  $i_{\cos}$  та  $i_{\sin}$ .

Для тривимірного об'єкту, в результаті сканування отримаємо два сигнали, дійсну  $H_{\cos}(x, y)$  та уявну  $H_{\sin}(x, y)$  частини голограм, які в результаті інтегрування описують внесок всіх точок об'єкту до голограми (1.12).

$$\begin{aligned}
 H_{\cos}(x, y) &\sim \int \frac{k_0}{2\pi z} \cos\left(\frac{k_0}{2z} \left[(x - x_{obj})^2 + (y - y_{obj})^2\right]\right) * I_{obj}(x, y, z) dz \\
 H_{\sin}(x, y) &\sim \int \frac{k_0}{2\pi z} \sin\left(\frac{k_0}{2z} \left[(x - x_{obj})^2 + (y - y_{obj})^2\right]\right) * I_{obj}(x, y, z) dz
 \end{aligned} \tag{1.12}$$

Два сигнали, наведені в рівнянні (1.12) є відповідно реальною та уявною частинами комплексного голографічного розподілу. Таким чином двовимірне сканування об'єкту дає змогу отримати інформацію про амплітуду та фазу.

Для моделювання методу оптичної скануючої голографії необхідно використовувати функцію передачі модуляції (ФПМ). Вона описує відношення кінцевого сигналу до вихідного сигналу (1.13).

$$OTF_{\Omega}(k_x, k_y; z) = F\{i_{\Omega}(x, y; z)\} / F\{\Gamma_0(x, y; z)\}^2 \quad (1.13)$$

Використовуючи функцію передачі модуляції можна записати дійну та уявну частини голограми, які несуть тривимірну інформацію про об'єкт. А також ці сигнали можна в подальшому використовувати для чисельної реконструкції голограм. (1.14).

$$\begin{aligned} H_{real}(x, y) &= \text{Re} \left[ \int F^{-1} \{ F \{ \Gamma_0(x, y; z) \}^2 \} OTF_{\Omega}(k_x, k_y; z) dz \right] \\ H_{imag}(x, y) &= \text{Im} \left[ \int F^{-1} \{ F \{ \Gamma_0(x, y; z) \}^2 \} OTF_{\Omega}(k_x, k_y; z) dz \right] \end{aligned} \quad (1.14)$$

$$\text{де } OTF_{\Omega}(k_x, k_y; z) = \exp \left[ -j \frac{z}{2k_0} (k_x^2 + k_y^2) \right].$$

Для подальшого розгляду припустимо, що маємо плоский об'єкт на відстані  $z_0$ , тобто  $|\Gamma_0(x, y; z)|^2 = I(x, y) \delta(z - z_0)$ , де  $I(x, y)$  – це планарний розподіл інтенсивності. Для плоского об'єкту, інтегруючи рівняння (1.13) по  $z$ , можна знайти дійсну та уявну частини голограми (1.15).

$$\begin{aligned} H_{real}(x, y) &= \text{Re} \left[ F^{-1} \{ F \{ I(x, y) \} OTF_{\Omega}(k_x, k_y; z_0) \} \right] \\ H_{imag}(x, y) &= \text{Im} \left[ F^{-1} \{ F \{ I(x, y) \} OTF_{\Omega}(k_x, k_y; z_0) \} \right] \end{aligned} \quad (1.15)$$

Для того, щоб отримати амплітудно-фазову голограму, необхідно додати дійну на уявну частини голограми (1.16).

$$H_{complex}(x, y) = H_{real}(x, y) + jH_{imag}(x, y) \quad (1.16)$$

Для числової реконструкції голограми, просто необхідно знайти згортку отриманої комплексної голограми з функцією передачі модуляції (1.17) [13].

$$i_{rec}(x, y) = F^{-1} \{ F \{ H_{complex}(x, y) \} * OTF_{\Omega}(k_x, k_y; z_0) \} \quad (1.17)$$

### 1.5 Висновки до розділу

У звичайній голографії інтерференція фіксується камерою, і тому лише інформація про амплітуду може бути записана. Потім необхідно прийняти неіснуючу конфігурацію, щоб відновлений об'єкт був просторово відокремлений від компоненти 0-го порядку та подвійного зображення, яке з'явиться в площині реконструкції. За допомогою оптичної скануючої голографії записується повна комплексна інформація, і тому об'єкт може бути отриманий навіть за допомогою конфігурації на осі. Таким чином, оптична скануюча голографія є альтернативою техніці фазового зсуву для захоплення складних голограм.

Голографія – це техніка, яка дозволяє вимірювати тривимірну інформацію записуючи інтенсивність інтерференційної картини. Традиційна голографія дуже чутлива до вібрацій та зовнішнього світла, проте оптична скануюча голографія – це техніка заснована на оптичному гетеродинуванні, яка дає змогу значно знизити вплив зовнішніх факторів. Крім того, оскільки OSH заснована на вимірюванні з використанням точкового сенсору, відсутня необхідність у камерах з високою роздільною здатністю. Проте недоліком даного методу є процес сканування, оскільки вимагає часу.

## 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗПІЗНАННЯ ЗА СТИСНЕННЯМ

### 2.1 Традиційний метод розпізнання за стисненням

Дискретизація – це фундаментальний спосіб представити та відновити неперервний сигнал у сфері обробки сигналів. Згідно теореми відліків Віттакера – Найквіста – Котельникова – Шеннона, сигнал з максимально представленою частотою  $\omega$  можна відновити без втрат при його дискретизації з частотою  $2\omega$ . Наприклад, якщо маємо неперервний сигнал ідеально обмежений по частоті до  $\omega$ , то його можна відновити шляхом дискретизації сигналу на частоті Найквіста, яка у два рази більша за  $\omega$ .

Числові та оптичні методи знаходяться в активному дослідженні для отримання амплітудно-фазових голограм. Один з факторів, що обмежує практичне використання голограм це величезні об'єми даних, які необхідно зберігати. Тому це дуже актуально стискати інформацію в ефективний спосіб без втрат [14].

Існує декілька різних методів вимірювання зображень з використанням точкового сенсору. Найбільш очевидний спосіб – це використовувати скануючі системи основані на вимірюванні інформації піксель за пікселем [15, 16]. Проте існує метод, що не потребує сканування об'єкту – це метод розпізнання за стисненням (Compressive Sensing – CS), ця техніка була нещодавно розроблена. Також проблема стискання інформації може бути вирішена за допомогою розпізнання за стисненням. Цей метод викликає дуже великий інтерес, оскільки з його допомогою можливо відновити об'ємний за розміром інформації сигнал з невеликої кількості вимірювань. Він базується на припущенні, що сигнал може бути представлений у розрідженому вигляді, тобто існує базис у якому сигнал може бути представлений лише декількома ненульовими коефіцієнтами [17, 18]. Якщо ця умова розрідження виконана, то сигнал може бути точно відновлений навіть якщо частота дискретизації нижче частоти Найквіста.



Існує велика кількість методів використання CS, для різних систем обробки зображень та відео. Деякі методи CS приймаються для роботи в режимі реального часу. Постійне зростання та розвиток у сфері застосування CS спрямоване на зменшення складності пристроїв, прискорення процедури придбання та передачі та зменшення енергоспоживання. Найпростіша система для отримання зображень методом CS складається з безпосередньо вимірюваного об'єкту, двох лінз ( $L_1$  та  $L_2$ ), дільника променю ( $BS1$ ), просторового модулятора світла, наприклад проектор на рідких кристалах чи цифровий мікро-дзеркальний прилад (DMD) та сенсору [19, 20].

Рідкі кристали це променезаломлючий матеріал. Без будь-якого зсуву молекули вирівняні відносно напрямку заданого на етапі виробництва. При прикладені напруги зсуву, молекули ведуть себе як диполі вирівнюючи свій напрям у напрямку електричного поля. Існує велика кількість різноманітних структур на рідких кристалах. Тривалість відповіді залежить від структури, проте порядок величин приблизно декілька сотень мікросекунд. Просторові модулятори світла на рідких кристалах в основному працюють на прозорості, проте оскільки транзистори які приводять систему до руху не прозорі, такі прилади мають обмежену активну область і завжди необхідно шукати компроміс між розміром пікселю та роздільною здатністю.

Цифрові мікродзеркальні прилади – це масив мікродзеркал, які можуть повертатися на кут  $+\alpha$  або  $-\alpha$ . Дві позиції відповідають стану «включено», коли світло відбивається у системи та стану «виключено», коли світло відбивається не в систему. Проблеми полягають у часі переключення стану, споживання енергії на поворот дзеркала та надійності елементів, оскільки деформація може виникнути внаслідок високих температур чи великого часу роботи. Перевагами DMD є велика швидкість роботи та високий коефіцієнт відбивання. Проте, оскільки модуляція може бути лише у двох позиціях такі прилади більш придатні для відображення бінарної інформації [21]. Схема для вимірювання зображень з використанням DMD представлена на рис 2.1.

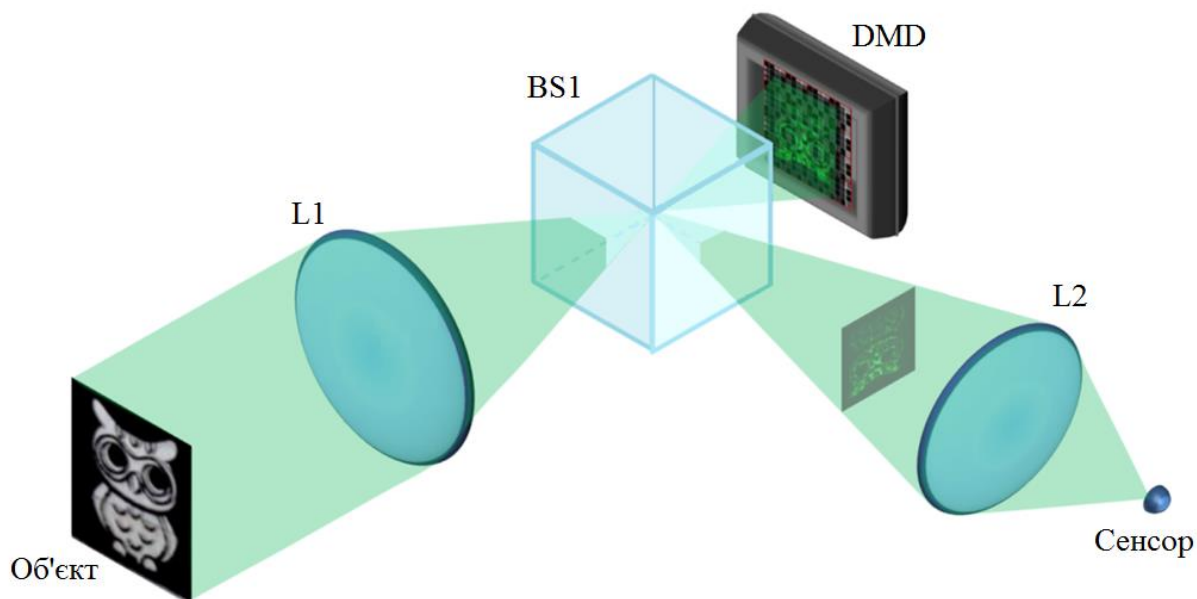


Рисунок 2.1 – Схема отримання зображень за допомогою розпізнання за стисненням

Принцип CS полягає в тому, щоб відновити сигнал припускаючи, що він є розрідженим, тобто існує таке представлення сигналу, в якому він представлений лише декількома ненульовими коефіцієнтами. Розглянемо сигнал  $x = \{x_i\}_{1 \leq i \leq N}$ , який має  $N$  коефіцієнтів. Для вимірювання цього сигналу здійснюється  $M$  вимірювань  $y = \{y_m\}_{1 \leq m \leq M}$  з використанням набору вимірювального оператора  $A = \{A_m\}_{1 \leq m \leq M}$ , таким чином, що  $y_m = A_m x$  (рис.2.2).

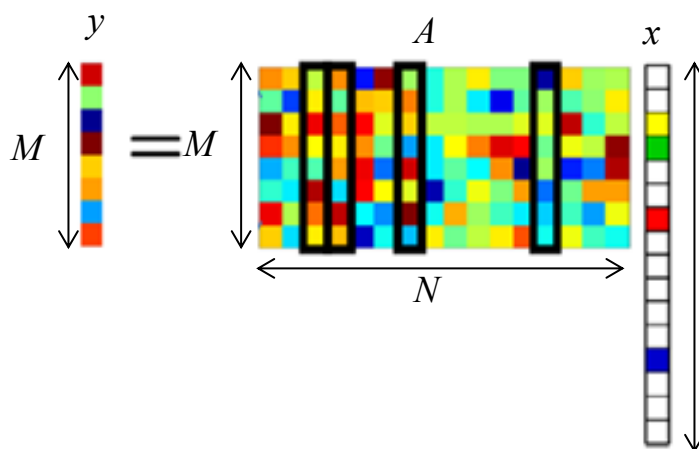


Рисунок 2.2 – Структура матриць, які використовуються у розпізнанні за стисненням

Для практичного застосування, доступність достатньо швидкого алгоритмів для реконструкції є дуже важливим фактором. В загальному випадку розв'язок рівняння  $y = Ax$  має безліч розв'язків, проте оскільки ми робимо припущення, що наш сигнал розріджений, то можна додати додаткову умови використовуючи норми. У загальному випадку  $l_p$  норма може бути розрахована достатньо просто (2.1).

$$\|x\|_{l_p} = \left( \sum_{i=1}^N |x_i|^p \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (2.1)$$

де  $x$  – вектор сигнал;

$N$  – розмір вектор.

Перший метод, який спадає на думку це мінімізація норми  $l_0$  (2.2)

$$\min \|x\|_0 \text{ за умови } y = Ax, \quad (2.2)$$

Основою алгоритму є пошук найрозрідженого вектору який задовольняє умови  $y = Ax$ . Проте, мінімізація норми  $l_0$  є складною задачею в загальному виді. Інший відомий та добре досліджений метод полягає у мінімізації норми  $l_1$ , який визначається рівнянням (2.3) [22]:

$$\min \|x\|_1 \text{ за умови } y = Ax, \quad (2.3)$$

Проте розпізнання за стисненням не сфокусовано лише на алгоритмі відновлення, перше завдання, яке постає – це розробка матриці  $A$ . Також слід зауважити, що матриця повинна бути ідеально розроблена для будь-яких сигналів

$x$ , оскільки процес вимірювання не адаптивний. Тобто вимірювана величина  $y_i$  не залежить від попередніх вимірювань  $y_1 - y_{i-1}$ .

Відкритою проблемою є побудова явних матриць, які можливо оптимальні в системах розпізнання за стисненням. Деякі методи такі як, метод розріджених наближень та теорії кодування дають гарні результати реконструкції, проте результати є далекими від ідеальних. Прорив було досягнуто шляхом використання випадкових матриць – це відкриття можна розглядати як народження розпізнання за стисненням. Прості приклади – це Гаусові матриці, записи яких складаються з незалежних випадкових величин, що слідує за стандартним нормальним розподілом та матрицями Бернуллі, записи яких є незалежними випадковими величинами з однаковою вірогідністю значень  $+1$  та  $-1$ .

Розпізнання за стисненням має ще один важливий аспект, а саме, стабільність алгоритмів реконструкції. Це означає, що помилка реконструкції залишається під контролем, коли вектори не точно розріджені і коли вимірювання були проведені з невеликою похибкою [14].

## 2.2 Застосування методу розпізнання за стисненням

Велика кількість проблем можуть бути розв'язані методом розпізнання за стисненням. Сфери застосування різноманітні: технологія (однопіксельна камера, магнітно-резонансна томографія, радар), наука (теорія відліків, розріджене наближення, корекція помилок, статистика та машинне навчання) [23].

Технології розпізнання за стисненням використовується в пристрої під назвою однопіксельна камера рис.2.3. Ідея полягає в тому, щоб апаратно зв'язати реальне зображення з незалежними випадковою матрицею та вимірювати їх кореляції за допомогою одного пікселю. Достатньо виміряти лише невелику

кількість подібних кореляцій, щоб реконструювати зображення за допомогою нечисленних методів відновлення.

Для цілей цієї експозиції зображення представлені сірими значеннями пікселів, зібраних у векторі  $z \in R^N$ , де  $N = N_1 N_2$  та  $N_1, N_2$  позначають ширину та висоту зображення в пікселях. Зображення зазвичай розріджені у канонічному піксельному представленні, але вони часто бувають розрідженими після відповідного перетворення, наприклад, Вейвлет-перетворення або дискретного косинусного перетворення.

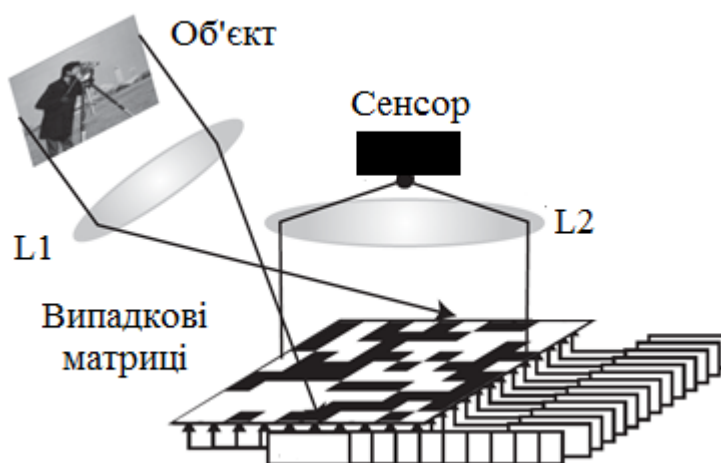


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення однопіксельної камери

Основним компонентом однопіксельної камери є DMD, що складається з великої кількості маленьких дзеркал, які можна вмикати або вимикати окремо. Світло від зображення відбивається, а лінза об'єднує всі відбиті промені на одному сенсорі - одиничний піксель камери. Залежно від того, ввімкнене чи вимкнене дзеркало, воно впливає або не впливає на інтенсивність світла, вимірюваної на сенсорі. Таким чином, реалізується множення вихідного сигналу  $x$  з випадковою матрицею  $A$ , значення якої в свою чергу відповідають включеним чи виключеним мікродзеркалам. У цьому випадку вимірювання проводяться послідовно, і оскільки цей процес може зайняти багато часу, важливо використовувати лише декілька вимірювань.

Хоча однопиксельна камера є більш концептом, ніж новою тенденцією дизайну камери, цілком імовірно, що подібні прилади будуть використовуватися для різних задач отримання зображень. Зокрема, для певних довжин хвиль за межами видимого спектра неможливо або принаймні дуже дорого побудувати чіпи з мільйонами сенсорних пікселів на площі лише декілька квадратних міліметрів. У такому контексті очікується, що потенціал технології, що базується на розпізнанні за стисненням, дійсно окупиться [24].

Розпізнання за стисненням також застосовується у медицині, наприклад магніто-резонансна томографія (МРТ) рис.2.4, електроенцефалографія, електрокардіографія та інші. Зниження часу впливу шкідливих хвиль на пацієнтів є основною мотивацією для використання CS у МРТ. Ступінь зменшення кількості вимірювань залежить від роздільної здатності необхідного зображення, проте все одно кількість вимірювань зменшується.



Рисунок 2.4 – Порівняння стандартного вимірювання та розпізнання за стисненням

Також було досліджено якість реконструкції різноманітних сигналів електроенцефалограм за допомогою розпізнання за стисненням. За допомогою цього алгоритму можна досягти найбільшої якості у порівнянні з іншими алгоритмами, проте складність вимірювання висока.

Застосування розпізнання за стисненням у радіолокації широко вивчається у літературі. Наприклад, було запропоновано використовувати CS у надширосмуговій комунікації. Розпізнання за стисненням використовується для зменшення частоти передачі сигналу з аналогово-цифрового перетворювача. У цьому випадку можна використовувати перетворювач простішої конструкції [25].

### 2.3 Двоетапний процес вимірювання

Одним з важливих критеріїв, який вимагається для CS, є визначення кількості вимірювань, які слід вибрати, щоб реконструювати сигнал у задовільній якості. Ми визначаємо процент вимірювань як співвідношення між загальною кількістю пікселів у зображенні та кількістю вимірювань, які використовуються для її реконструкції. Однією з проблем, пов'язаних із застосуванням одного піксельного зображення на основі CS, є визначення мінімальної кількості вимірювань, необхідних для відтворення зображення [12].

Для вирішення цієї проблеми ми пропонуємо підхід для відновлення зображень у два етапи: попереднє вимірювання з низьким процентом вимірювань та остаточна реконструкція з кількістю вимірювань, визначена з попереднього етапу. Щоб визначити кількість вимірювань, необхідних для змістовного відтворення сигналу, нам потрібно визначити критерії для оцінки остаточної кількості вимірювань. У нашому дослідженні ми перевірили два критерії, рівень розрідженості сигналу та середньоквадратичне відхилення (Standard deviation - SD).

Сигнал називається розрідженим, коли більшість його компонент рівна нулю. Більшість реальних сигналів можуть бути наближені за допомогою розріджених сигналів, часто після правильної зміни базису. Це пояснює чому техніки для тискання інформації такі як JPEG, MPEG чи MP3 працюють так добре на практиці. Наприклад, в основі методу JPEG є те що, зображення, в

дискретному базисі косинусів чи вейвлет коефіцієнтів, розріджене. Стискання полягає в тому, що тільки найбільші коефіцієнти зберігаються, інші коефіцієнти прирівнюються нулю.

При вимірюванні та зберіганні інформації, з додатковими знаннями про те, що сигнал є розрідженим, традиційний підхід з кількістю вимірювань рівною довжині сигналу, це витрата ресурсів. Спочатку значні зусилля присвячені вимірюванню всіх елементів сигналу, а потім більшість коефіцієнтів відкидається при стисканні. Замість цього, можливо одразу виміряти стиснуту версію сигналу "безпосередньо" за допомогою значно меншої кількості вимірюваних даних, ніж довжина сигналу, що використовує розрідженість або здатність до стиснення сигналу. Це і становить основну мету стискання.

Слід підкреслити, що головна складність полягає в розташуванні ненульових коефіцієнтів вектору  $x$ , які не відомі заздалегідь. Якби вони були відомі, можна було би просто перетворити матрицю  $A$  у стовпець, базуючись на координатах ненульових коефіцієнтів. Отримана система лінійних рівнянь перетворюється на перевизначену систему і її можна розв'язати. Не знаючи позицій ненульових коефіцієнтів реконструйованого вектору, вводиться деяка нелінійність, оскільки  $S$ -розріджених векторів (ті, що мають не більше  $S$  ненульових коефіцієнтів) утворюють нелінійну множину. Крім того, додавання двох  $s$ -розріджених векторів дає  $2S$ -розріджений вектор в цілому. Таким чином, будь-який успішний метод реконструкції обов'язково буде нелінійним.

Також очевидним є той факт, що кількість ненульових коефіцієнтів менше ніж довжина сигналу, в іншому випадку стиснення буде неможливим. Отже, можна стверджувати, що необхідний процент вимірювань (кількість вимірювань) повинен бути пропорційний кількості вагомих коефіцієнтів, а не довжині сигналу.

Кількісна оцінка рівня розрідженості сигналу може бути проведена за допомогою Gini індексу (GI). Існує велика кількість різних показників для кількісного визначення рівня розрідженості зображення. Серед них ми обрали



Gini індекс, оскільки було показано, що він є одним з найбільш послідовних, і було продемонстровано декілька прикладів використання Gini індексу [26].

Важливою перевагою GI є те, що він нормується у діапазоні від 0 до 1 для будь-якого сигналу. Він приймає значення 0, коли сигнал зовсім не розріджений, а значення 1, коли весь сигнал може бути представлений лише одним коефіцієнтом. Крім цього, на відміну від інших норм вимірювань, значення GI не залежить від розміру вектору, тим самим дає змогу порівнювати розрідженість векторів різної довжини. Як наслідок, він ідеально підходить для порівняння розрідженості сигналів у різних базисах представлень.

Для розрахунку GI візьмемо вектор  $f' = [f(1), \dots, f(N)]$  з елементами сортованими у порядку збільшення таким чином, що для  $f_{[k]}$  для  $k = 1, 2, \dots, N$ , де  $|f_{[1]}| \leq |f_{[2]}|, \dots, \leq |f_{[N]}|$ , тоді отримаємо рівняння (2.4).

$$GI(f') = 1 - 2 \sum_{k=1}^N \frac{|f_{[k]}|}{\|f'\|_1} \left( \frac{N - k + 0,5}{N} \right), \quad (2.4)$$

де  $\|f'\|_1$  це  $l_1$  норма  $f'$ .

Обмеження використання розрідженості полягають у тому, що наше зображення відновлене на попередньому етапі, має низьку роздільну здатність. Ось чому оцінка не є точною. Ми помітили, що GI був дуже чутливим до шуму, викликаного відсутністю інформації про початкову реконструкцію. Ми використовували середньоквадратичне відхилення як альтернативний критерій. Інтуїтивно зрозуміло, що однорідна область, тобто область з низьким значенням середньоквадратичного відхилення, може бути представлений лише кількома коефіцієнтами.

Ми пропонуємо використовувати цей показник для кількісного визначення рівня розрідженості відновленого зображення з низькою роздільною здатністю з

невеликої кількості вимірів. Потім, рівень розрідженості  $S$  може бути використаний для оцінки того, скільки додаткових вимірювань слід виконати для відтворення остаточного зображення.

Для того, щоб розв'язати рівняння (2.1) і реконструювати сигнал з високою ймовірністю, якщо у сигналі присутні  $S$  ненульових коефіцієнтів з  $n$ , мінімальна кількість вимірювань  $m$  може бути визначена як:

$$S \leq \frac{m}{\log\left(\frac{n}{m}\right)} \quad (2.5)$$

Розв'язуючи це рівняння, ми можемо з'ясувати, яка мінімальна кількість вимірювань потрібна для реконструкції зображення:

$$m \geq e^{-k \cdot W\left(\frac{n}{S}\right)} \quad (2.6)$$

де  $W$  - функція Ламберта;

$k$  - малий параметр.

Ми додали параметр  $k$  у рівняння (2.6) для того, щоб змінити нахил функції. Оскільки він сильно впливає на оцінку кінцевої кількості вимірювань.

GI представляє рівень розрідженості сигналу. Він доходить до 100%, якщо сигнал повністю розріджений, і до 0%, якщо сигнал не розріджений взагалі. Тоді число ненульового коефіцієнта  $S$  може бути виведене з GI, як показано нижче:

$$S = (1 - GI)n \quad (2.7)$$

$$P \geq e^{-k \cdot W\left(\frac{1}{1-GI}\right)} \quad (2.8)$$

де  $P = \frac{m}{n} \times 100\%$  – необхідний відсоток вимірювань у кожному блоці.

За допомогою рівняння (2.4) та (2.8), ми можемо обчислити GI і вивести оцінюваний відсоток, необхідний для реконструкції кожного блоку [27].

## 2.4 Висновки до розділу

Розпізнавання за стисненням – це новітня техніка, яка була розроблена для відновлення великого сигналу з невеликих кількості вимірювань. Метод спирається на припущення, що сигнал для відновлення є розрідженим і ефективність реконструкції залежить від рівня розрідженості. Проте в практичному випадку заздалегідь зображення для відновлення невідоме, і тоді важко оціни кількість вимірювань, необхідних конкретно для цього зображення.

Ми розглянули стратегію, в якій зображення відновлюється методом розпізнавання за стисненням у два етапи. Перший крок з невеликою кількістю вимірювань, щоб оцінити кількість необхідних даних, а другий для остаточної реконструкції.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ОТРИМАНІ МЕТОДАМИ ОПТИЧНОЇ СКАНУЮЧОЇ МІКРОСКОПІЇ ТА РОЗПІЗНАННЯ ЗА СТИСНЕННЯМ

#### 3.1 Результати оптичної скануючої голографії

На першому етапі нашого дослідження було виготовлено макет для оптичної скануючої голографії. Схема макету була представлена раніше на рис. 1.6. В якості джерела світла був використаний лазер з довжиною хвилі 532 нм та модулятор фази з частотою модуляції  $\Omega = 8$  кГц. Вихідний сигнал з точкового сенсору був підключений до синхронного підсилювача SR830. Вимірювання проводились за допомогою багатофункціонального приладу вводу/виводу інформації USB-6343, до входу якого були підключені виходи синхронного підсилювача. Сканування проводилось за допомогою скануючої системи для променів з великим діаметром GVS112. В якості сенсору було використано кремнієвий фотодіод FDS 10x10. Весь процес вимірювання контролювався програмним забезпеченням, розробленим у програмному середовищі Matlab.

Спочатку була протестована робота схеми у режимі на просвіт з бінарною маскою, що представляла форму літери «К» розмірами  $0,6 \times 0,6$  см рис.3.1. Реальні та уявні частини голограми, отримані скануванням, представлені на рис.3.2.



Рисунок 3.1 – Бінарна маска з зображення сови

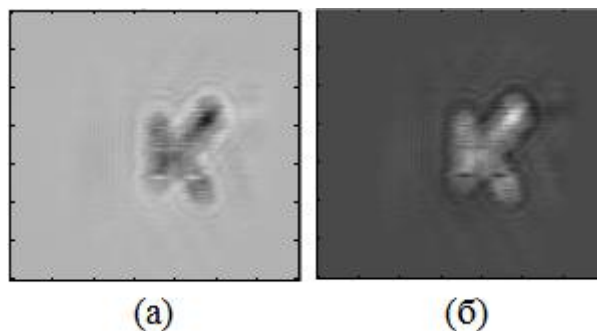


Рисунок 3.2 – Дійсна (а) та уявна (б) частина голограми отримані за допомогою методом оптичної скануючої голографії

Реконструкція проводилась за методом Френеля. Для реалізації цього методу спочатку необхідно розрахувати розмір пікселю. Було виміряно ширину та довжину діапазону сканування та поділено на кількість вимірювань по кожному напрямку сканування. Використовуючи розмір пікселю та кількість вимірювань генерується функція передачі модуляції. Для реконструкції голограми необхідно застосувати зворотнє перетворення Фур'є функції, яка є добутком отриманої дійсної та уявної частин голограми та функції передачі модуляції. На реконструкції можна чітко розпізнати літеру «К» рис.3.3. Розмір отриманого зображення складав  $300 \times 300$  пікселів.



Рисунок 3.3 – Реконструкція голограми, отриманої методом оптичної скануючої голографії

Другим об'єктом для сканування була обрана бінарна маска рис.3.4, оскільки вона має декілька малих деталей за допомогою яких можна проконтролювати якість реконструкції голограми. Розмір бінарної маски складав  $1 \times 1$  см. Реальні та уявні частини голограми, отримані скануванням, представлені на рис.3.4 з отриманим результатом чисельного реконструкції. Реконструкція проводилась за стандартним методом, описаним вище. На реконструкції можна побачити деякі деталі, що свідчить про високу якість реконструкції голограми.

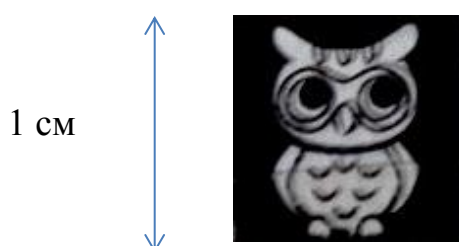


Рисунок 3.4 – Бінарна маска з зображення сови

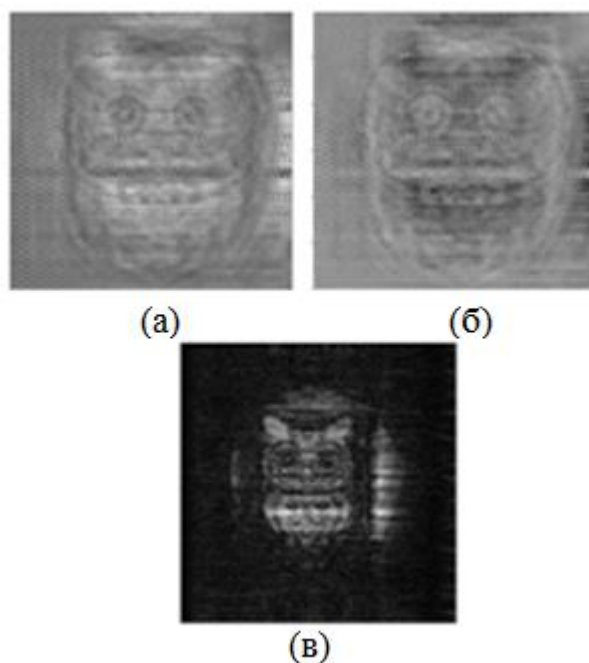


Рисунок 3.5 – Дійсна (а) та уявна (б) частина голограми отримані за допомогою методу розпізнання за стисненням та реконструкція (в)

Також ми провели вимірювання голограм у режимі відбивання, скануючи реально існуючий об'єкт. Ми обрали в якості об'єкту верхню частину гвинта, оскільки він гарно відбиває світло та має невеликі розміри рис.3.6.



Рисунок 3.6 – Досліджувана частина гвинта

На рис.3.7 зображена дійсна та уявна частини голограми гвинта та її реконструкція в якій можна чітко виділити гвинт.

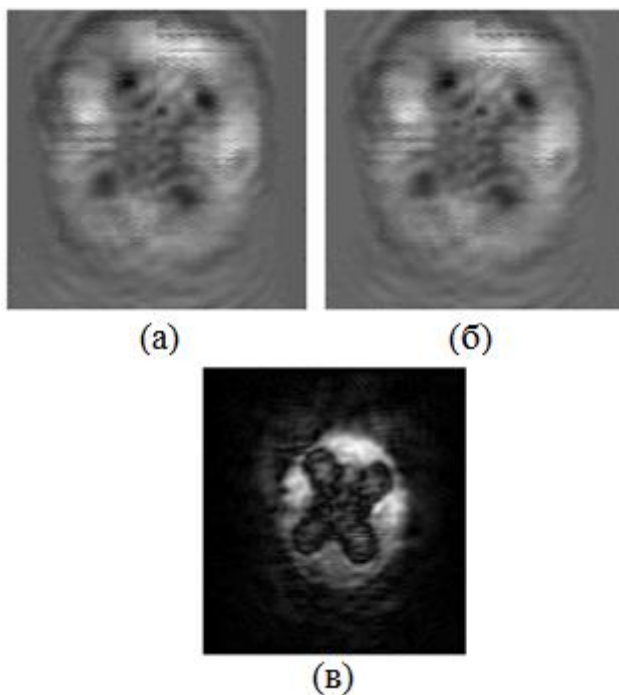


Рисунок 3.7 – Дійсна (а) та уявна (б) частина голограми гвинта отримані за допомогою методу розпізнання за стисненням та реконструкція голограми (в).

Використовуючи метод оптичної скануючої голографії можна отримати якісні голограми. Вплив вібрації та зовнішнього світла на якість голограм значно менший ніж у випадку традиційної голографії. Оскільки відома повна комплексна

інформація, то чисельна реконструкція може бути виконана у конфігурації на осі, вільною від подвійного зображення та компоненти нульового порядку. Головний недолік полягає у використанні скануючого методу, який вимагає часу.

### 3.2 Результати методу розпізнання за стисненням

У цьому розділі ми представляємо нашу техніку для прискорення процесу вимірювання з використанням розпізнання за стисненням та блочної стратегії. Зображення можна поділити на кілька областей: однорідні, де кількість деталей мінімальна та деякі області з більш детальною інформацією. У однорідних областях немає конкретної інформації, яка необхідна для обробки зображень та збору даних рис.3.7 (а). Тому ці ділянки можуть бути реконструйовані з дуже невеликої кількості вимірювань. З іншого боку, необхідно робити додаткові вимірювання, щоб відновити області зображення, що представляють багато деталей.

Першим кроком нашого запропонованого методу є реконструкція зображення за допомогою звичайного алгоритму розпізнання за стисненням із дуже низької вибірки. Потім зображення поділяється на кілька блоків, як показано на рис. 3.7(б). За допомогою блоків можна знайти однорідні області на зображенні та локально визначити кількість вимірювань, необхідних для відновлення блоку. У цих областях не потрібно використовувати велику кількість вимірювань для реконструкції зображення за допомогою CS. Для розрахунку необхідної кількості вимірювань використовувалось рівняння (2.8).



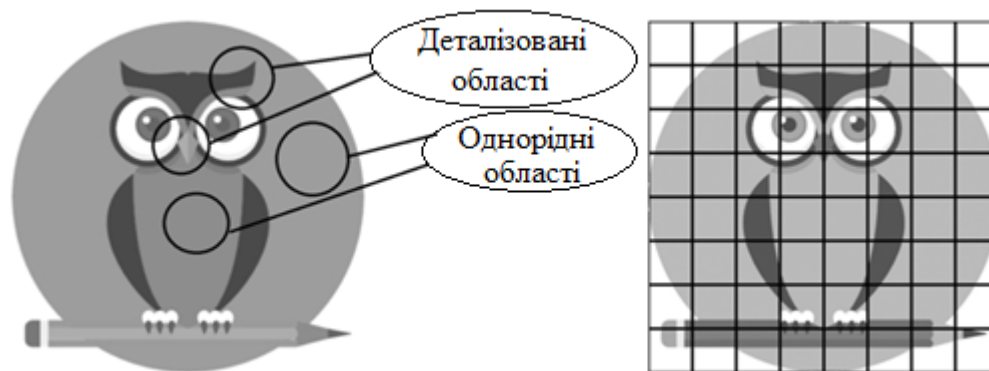


Рисунок 3.8 – Зображення поділене на блоки

Щоб визначити, чи є регіон однорідним, в кожному блоці обчислюється середньоквадратичне відхилення або розрідженість. Оскільки значення стандартного відхилення лежать у тому самому діапазоні, що і GI, ми можемо використати рівняння (2.6) для середньоквадратичне відхилення.

За допомогою цієї стратегії блоків ми можемо визначити локальний відсоток вимірювань, необхідний у кожному блоці, і таким чином уникати непотрібних вимірювань. Реалізація нашого методу була розглянута за допомогою моделювання. Ми задали постійним пікове співвідношення сигналу до шуму (Peak Signal to Noise Ratio – PSNR) між оригінальним та реконструйованим зображенням та поступово збільшували кількість вимірювань, доки не досягли заданого PSNR. Для реконструкції однорідних областей досить низька кількість вимірювань була достатньою, а для реконструкції областей, у яких містяться деталі, необхідно було би робити більше вимірювань. Приклад показано на рис. 3.9 (а). у випадку поділу зображення на  $32 \times 32$  блоки. А також, ми розраховували GI та стандартне відхилення для кожного блоку, як показано на рис. 3.9 (б, в), і перевірили, що локальні значення, задані даними коефіцієнтами, добре співвідносяться з кількістю вимірювань. Тоді ми побачили, що оптимальну кількість вимірювань можна визначити локально в кожному блоці шляхом оцінки розрідженості та стандартного відхилення.

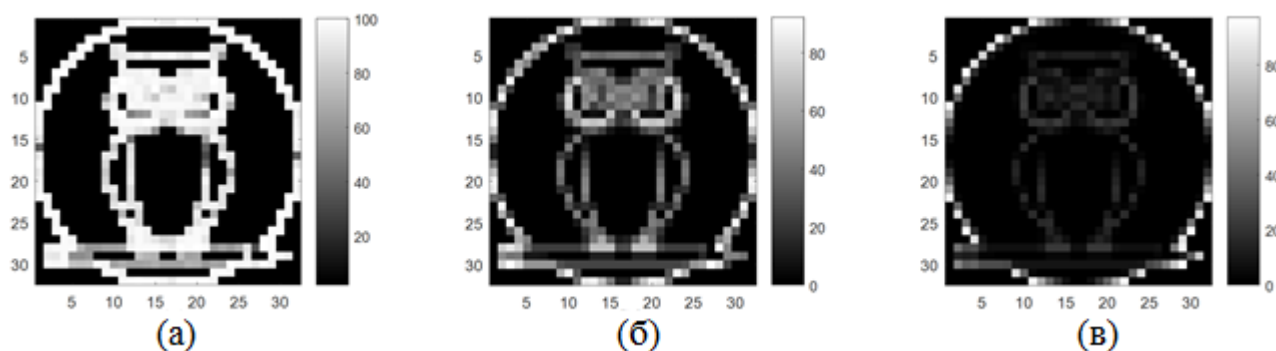


Рисунок 3.9 – Порівняння необхідної відносної кількості вимірювань використовуючи SD та GI в кожному блоці: а – необхідний процент в кожному блоці; б – SD в кожному блоці; в – GI в кожному блоці

Для демонстрації доцільності нашого методу ми провели симуляцію з різним числом блоків. Для кожного блоку кількість вимірювань збільшувалась поступово, доки PSNR не досягне певної межі. На рис.3.10 представлені результати, отримані з зображенням пінгвінів розміром  $128 \times 128$  пікселів. Ми встановили межу PSNR 30 дБ і перевірили результати реконструкції з різною кількістю блоків. За допомогою одного блоку кількість вимірювань, необхідна для досягнення 30 дБ, становила 60% від повної кількості вимірювань рис. 3.10 (д). У випадку використання декількох блоків мінімальна кількість вимірювань для досягнення 30 дБ, 48% у випадку поділу на  $8 \times 8$  блоків та 24% у випадку  $32 \times 32$  блоків. Слід зауважити, що глобальний PSNR не точно 30 дБ на рис. 3.10 (в) та (г), оскільки обмеження 30 дБ було встановлено для охоплення в кожному блоці локально.

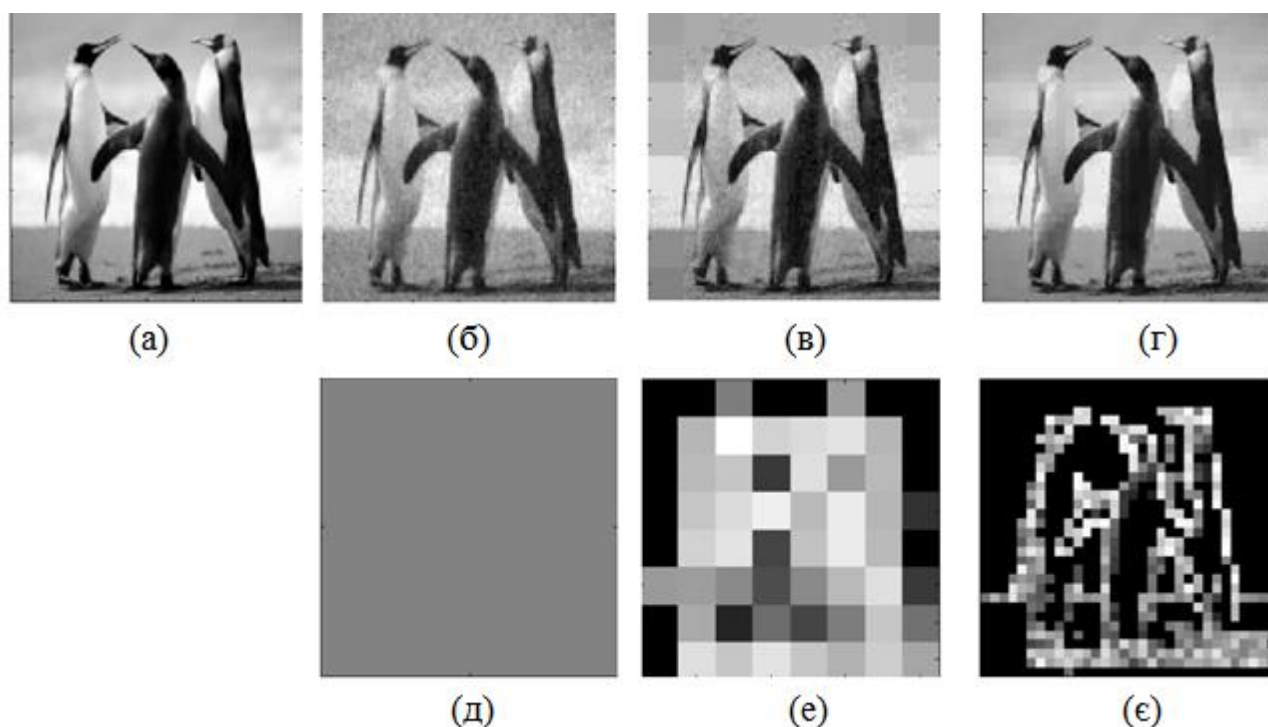


Рисунок 3.10 – Зображення пінгвінів (а) було реконструйовано з 1 блоком (б),  $8 \times 8$  блоками (в) та  $16 \times 16$  блоками (г). Локальний процент вимірювань, використовуваний для реконструкції кожного блоку, показаних на (д) - (е) - (є) і відповідає зображенням (б) - (в) - (г). Чорне значення вказує на процент вимірювань, близький до 0%, тоді як значення білого відповідає майже 100%.

Коли використовується один блок, однорідна область, як правило, має деякий шум. Розбиваючи зображення на відповідну кількість блоків, вимірювання можуть бути зосереджені на надзвичайно докладній області. Ми побачили, що стратегія блоків дозволяє суттєво зменшити кількість вимірювань, необхідних для реконструкції зображення, якщо потрібна частота дискретизації оцінена локально.

Запропонований метод був протестований з різною кількістю блоків та різними зображеннями. Для зображення сови була складена таблиця 3.1. Використовуючи цю таблицю можна порівняти традиційний метод розпізнання за стисненням та запропоновану блочну стратегію. В якості відносного параметру для оцінки кількості вимірювань було використано процент здійснених

вимірювань, відносно кількості вимірювань необхідних для реконструкції зображення з оригінальною якістю.

Таблиця 3.1 – Порівняння результатів роботи методу розпізнання за стисненням та модифікованого методу

| Метод розпізнання за стисненням |                              |         | Блочна стратегія |            |                              |         |
|---------------------------------|------------------------------|---------|------------------|------------|------------------------------|---------|
| Процент, %                      | Кількість вимірювань, $10^5$ | PSNR    | Кількість блоків | Процент, % | Кількість вимірювань, $10^5$ | PSNR    |
| 20                              | 0.5243                       | 22.9004 | 2                | 20         | 0.5243                       | 22.8551 |
| 40                              | 1.0486                       | 24.9314 |                  | 40         | 1.0486                       | 24.9656 |
| 60                              | 1.5729                       | 25.3672 |                  | 60         | 1.5729                       | 25.3294 |
| 80                              | 2.0972                       | 30.9049 |                  | 80         | 2.0972                       | 30.8774 |
| 100                             | 2.6214                       | 33.4942 |                  | 100        | 2.6214                       | 33.5043 |
| 20                              | 0.5243                       | 22.0933 | 4                | 20         | 0.5243                       | 22.0536 |
| 40                              | 1.0486                       | 26.8169 |                  | 40         | 1.0486                       | 26.7963 |
| 60                              | 1.5729                       | 28.6812 |                  | 60         | 1.5729                       | 28.6774 |
| 80                              | 2.0972                       | 33.0118 |                  | 80         | 2.0972                       | 33.0118 |
| 100                             | 2.6214                       | 35.0949 |                  | 100        | 2.6214                       | 35.0929 |
| 20                              | 0.5243                       | 22.1475 | 8                | 20         | 0.5243                       | 22.2429 |
| 40                              | 1.0486                       | 26.6737 |                  | 40         | 0.8520                       | 26.7820 |
| 60                              | 1.5729                       | 30.1999 |                  | 60         | 1.2780                       | 30.1694 |
| 80                              | 2.0972                       | 33.9112 |                  | 80         | 1.7039                       | 33.8034 |
| 100                             | 2.6214                       | 36.6662 |                  | 100        | 2.1299                       | 36.6598 |
| 20                              | 0.5243                       | 22.1995 | 16               | 20         | 0.5243                       | 22.1671 |
| 40                              | 1.0486                       | 26.7688 |                  | 40         | 0.5734                       | 26.7540 |
| 60                              | 1.5729                       | 30.1996 |                  | 60         | 0.8602                       | 30.0280 |
| 80                              | 2.0972                       | 34.2051 |                  | 80         | 1.1469                       | 33.6482 |
| 100                             | 2.6214                       | 37.7685 |                  | 100        | 1.4336                       | 36.3624 |

В якості прикладу ми приводимо результати для зображення сови розміром  $512 \times 512$  пікселів та пінгвінів розміром  $128 \times 128$  пікселів. Була використана різна кількість блоків для того, щоб знайти найкращу комбінацію розміру зображення та кількості блоків. Ми порівняли результати використовуючи кожного разу PSNR цілого зображення як функцію від кількості вимірювань використаних в реконструкції. Результати зображені на рис. 3.11 та рис. 3.12.

Можна бачити, що оптимальна кількість блоків залежить від роздільної здатності. Якщо використовуються лише кілька великих блоків, кожен з них включатиме як однорідну, так і детальну область, і загальні результати будуть подібними до того, коли використовується один блок. З іншого боку, коли зображення поділяється на багато маленьких блоків, ми схильні до випадку, коли кожен піксель вимірюється індивідуально. Необхідно знайти компроміс, забезпечити, щоб розмір блоків підходив до розмірів зображення. Кожен блок повинен бути достатньо малим, щоб покрита область могла бути локалізована в деталізованій області або в однорідній області, але достатньо великою, щоб забезпечити достатню кількість пікселів, щоб метод розпізнання за стисненням міг бути корисними для зменшення кількості необхідних вимірювань.

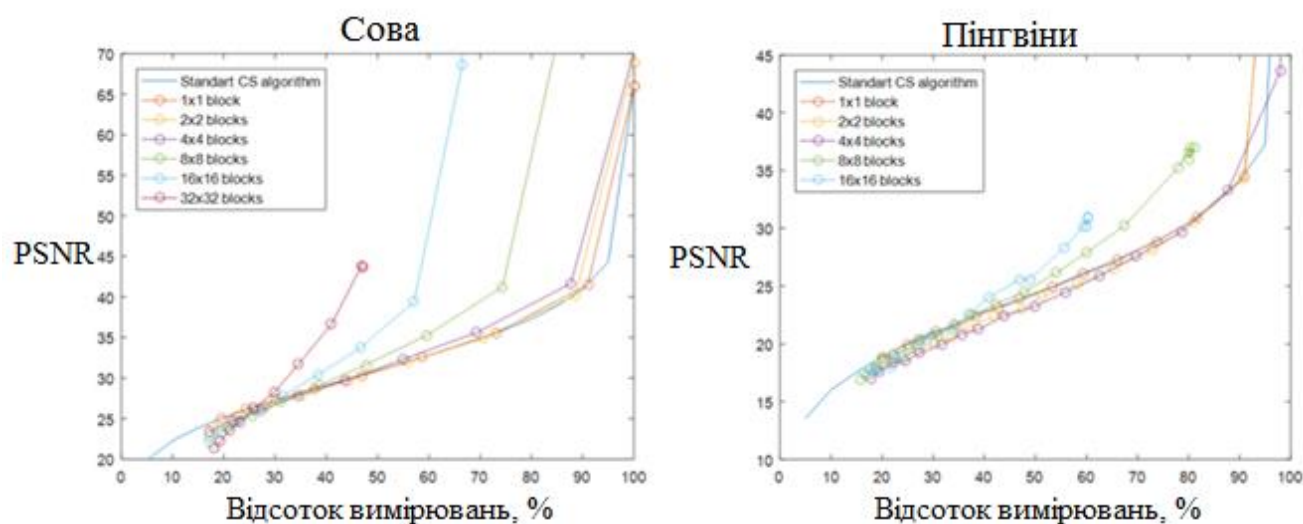


Рисунок 3.11 – Порівняння PSNR для відновлених зображень з різною кількістю блоків використовуючи GI: а) Сова; б) Пінгвіни

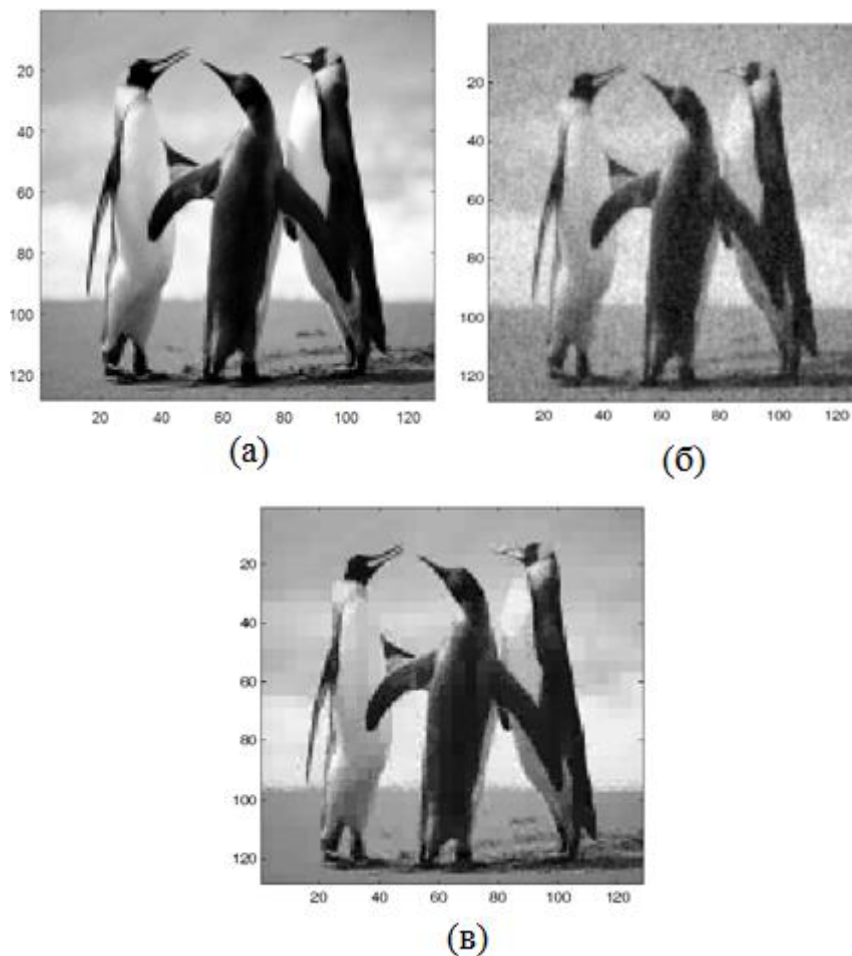


Рисунок 3.12 – Результати реконструкції зображення Пінгвінів: а) вихідне зображення; б) відновлене зображення без блочного методу; с) відновлене зображення за використання 32x32 блоків

Ми пропонуємо використовувати замість одного точкового сенсору масив сенсорів та масив лінз рис.3.13. Кожна з лінз проектує інтенсивність світла окремого блоку на відповідний сенсор. Такий підхід допоможе використовувати запропонований блочний алгоритм більш ефективно.

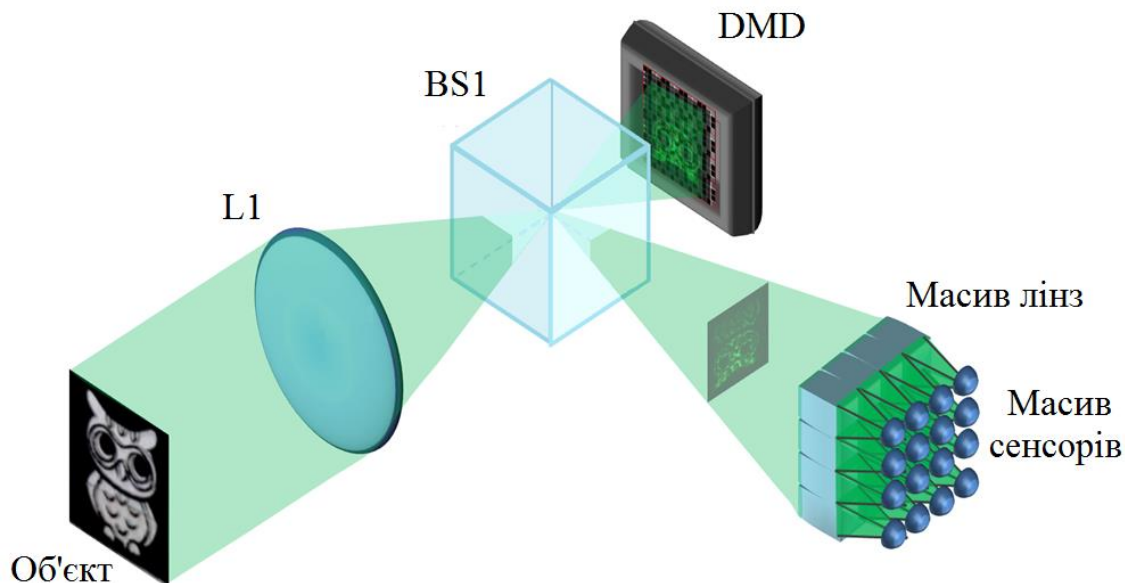


Рисунок 3.13 – Схема отримання зображень за допомогою розпізнання за стисненням та блочного алгоритму

На наступному кроці нашого дослідження було вирішено протестувати систему зображену на рис.3.13 на реальному об'єкті. Ми побудували вимірювальну схему та використали у якості об'єкту бінарну маску сови рис.3.3. Розміри отриманого зображення обмежені, оскільки в якості модулятора світла використовувався LCoS-проектор, а активна область обмежена і має невелику площу.

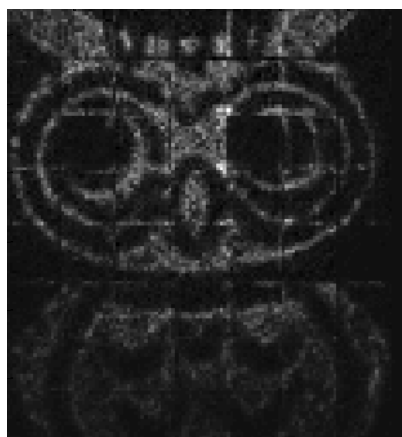


Рисунок 3.14 – Результати методу розпізнання за стисненням

Отримане зображення за допомогою блочної стратегії має недоліки по краю кожного блоку, оскільки реконструкція відбувається у кожному блоці локально і не враховує значень сусідніх блоків. Вирішення цієї проблеми повинне бути досліджене у подальшому.

### 3.3 Комбінація оптичної скануючої голографії та розпізнання за стисненням

Покращення методу оптичної скануючої голографії є актуальним питанням в наш час [28, 29]. Останніми роками спостерігається все більша зацікавленість у поєднанні OSH та розпізнання за стисненням, але у роботах по цій темі представлені лише дані моделювання, а вплив алгоритму розпізнання за стисненням на процес вимірювання ще не визначено [30, 31]. Проте спосіб поєднання у нашому запропонованому методі відрізняється, оскільки ми не намагаємось замінити сканування, а лише поєднати два методи та зробити процес двостадійним.

Перший крок нашого методу полягає в тому, щоб зробити традиційне вимірювання методом оптичної скануючої голографії з невеликою кількістю вимірювань. Наступним кроком є реконструкція складної голограми. Для того, щоб отримати реконструкцію, необхідно створити функцію передачі модуляції (ФПМ). Для нашого експерименту ми використовували ФПМ, як показано нижче:

$$OTF = \frac{\exp\left(\frac{jk}{2z}(x^2 + y^2)\right)}{j\lambda z} \quad (3.1)$$

За допомогою чисельної реконструкції ми можемо визначити відстань до об'єкта. Реконструюючи об'єкт на різних відстанях, можливо візуально визначити, коли об'єкт знаходиться у фокусі і отримати відстань до об'єкту.



На наступному кроці необхідно створити нову ФПМ, щоб відповідати роздільній здатності зображення отриманого методом розпізнання за стисненням, оскільки розмір зображень, отриманих методами оптичної скануючої голографії і CS не однакова. Далі зображення одного і того ж об'єкта отримується шляхом розпізнання за стисненням на однаковій відстані з методом оптичної скануючої голографії. Нарешті, голограма об'єкта може бути отримана, застосовуючи ФПМ на відстані отриманій попередньо. Основні етапи запропонованого методу наведені на рис. 3.15.

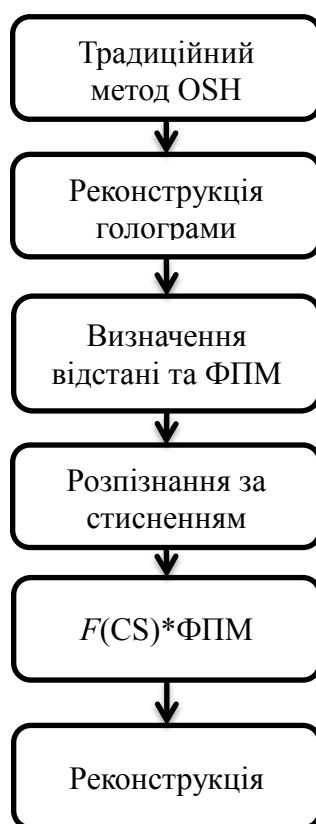


Рисунок 3.15 – Структурна схема алгоритму поєднання оптичної скануючої голографії та розпізнання за стисненням

Схематична ілюстрація запропонованої установки для поєднання методів розпізнання за стисненням та оптичної скануючої голографії представлена на рис. 3.16. Вона базується на установці, представлений на рис. 1.6. Основна відмінність полягає в тому, що DMD додано для відображення бінарної матриці  $A$ . Оскільки для оптичної скануючої голографії розмір залежної від часу зонної пластинки

Френеля повинен бути невеликий, а для розпізнання за стисненням розмір променю повинен покривати весь об'єкт в цілому. Для того щоб змінити розмір променю біло додано додаткову лінзу L6. Лінза з фокусною відстанню 250 мм і 25 мм були використані для вимірювання методами оптичної скануючої голографії та розпізнанням за стисненням відповідно.

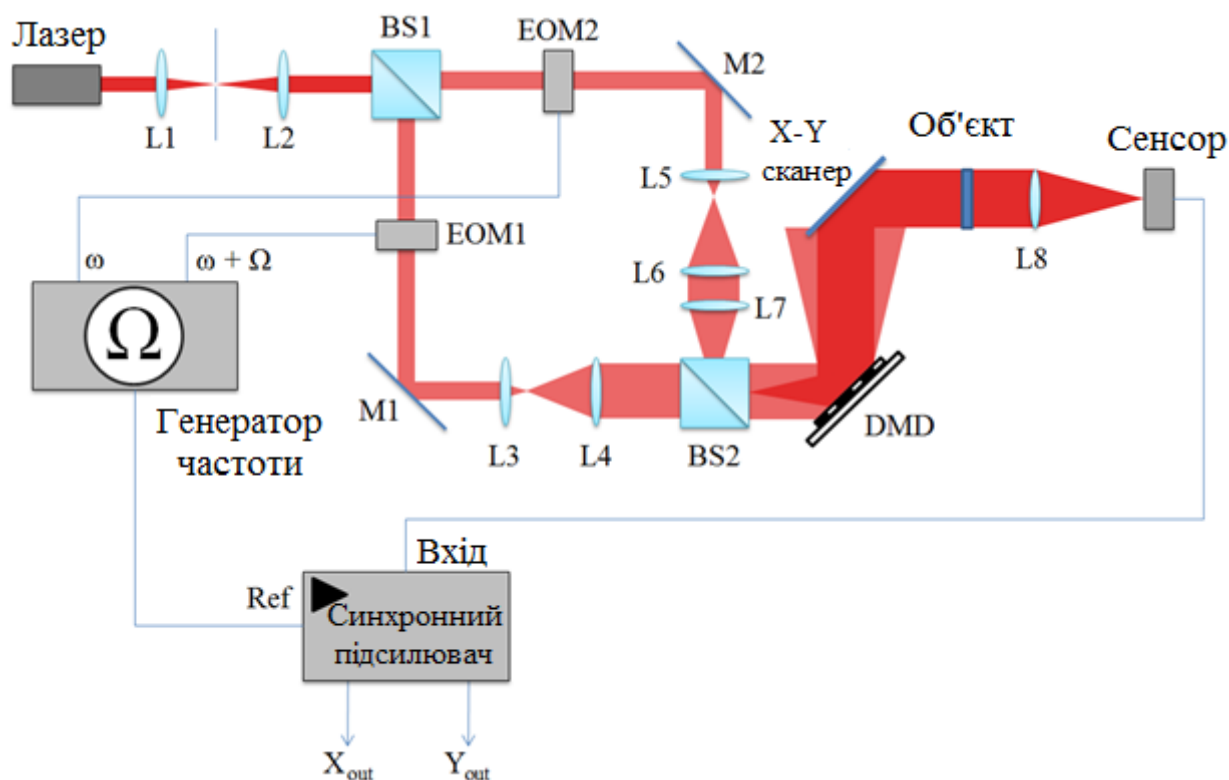


Рисунок 3.16 – Розроблена схема оптичної скануючої голографії та розпізнання за стисненням

Ми перевірили запропонований нами метод з двійковою маскою літери К рис.3.1. На рис. 3.17 показані результати, отримані методами оптичної скануючої голографії та розпізнання за стисненням. Обладнання та його налаштування таке ж саме, яке ми використовували у традиційній оптичній скануючій голографії. Для вимірювання методом розпізнання за стисненням було згенеровано набір матриць  $A$ . Для відображення набору бінарних матриць  $A$  використовувався модуль V-7001 з чіпом DMD DLP7000. Дійсна та уявна частини голограми були отримані шляхом стандартного методу оптичної скануючої голографії. Роздільна

здатність отриманих частин голограм складала 32x32 пікселів. Зображення методом розпізнання за стисненням отримано з роздільною здатністю 256x256 пікселів та з процентом вимірювання 20% від загальної кількості вимірювань ( $N = 256 \cdot 256 = 65536$ ).

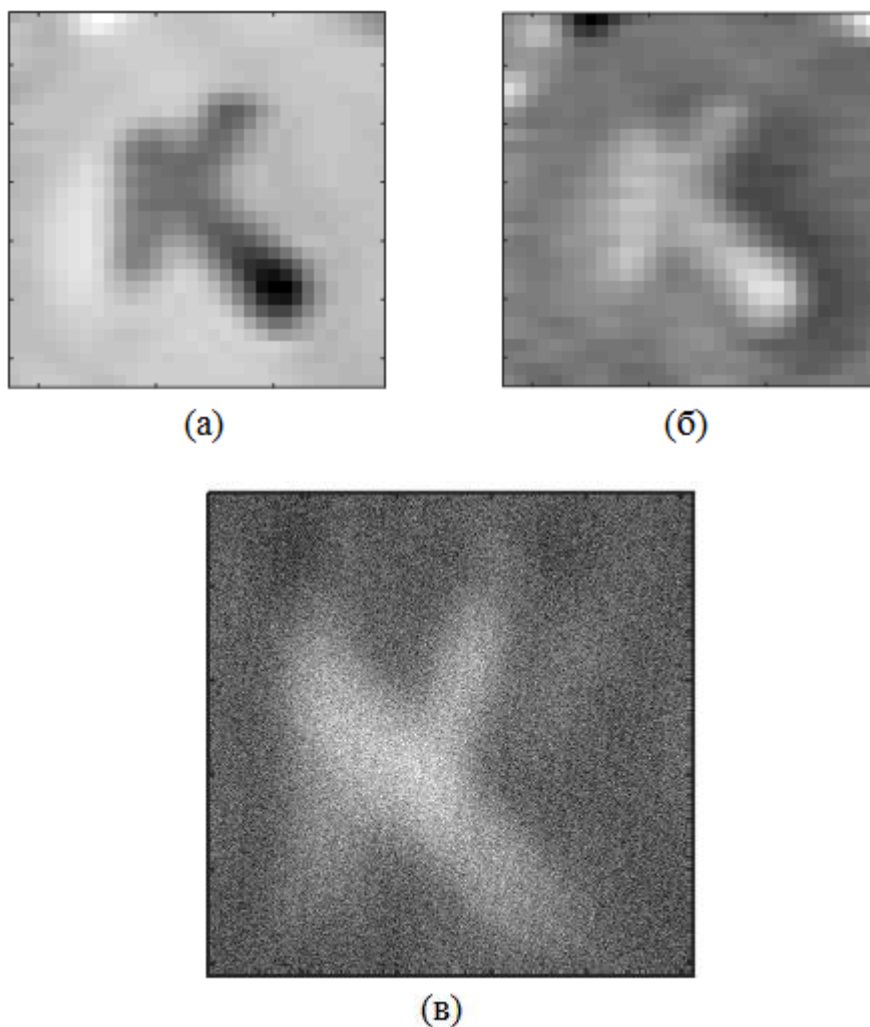


Рисунок 3.17 – Дійсна (а) та уявна (б) частини голограми отриманих з низькою роздільною здатністю та зображення отримане методом розпізнання за стисненням (в)

Використовуючи дійсну та уявну частини голограми, амплітудно-фазова голограма була реконструйована на відстані 100 мм рис.3.18. Як і в п.3.1 для реконструкції використовувався метод Френеля.

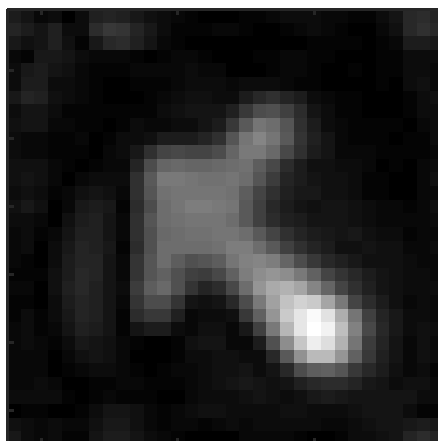


Рисунок 3.18 – Реконструкція голограми, отриманої методом OSH

Для реконструкції голограми з зображення CS, було використано згенеровану ФПМ на відстані 100 мм до даних отриманих методом розпізнання за стисненням та отримали дійсну та уявну частини голограми. В результаті, було здійснено чисельну реконструкцію голограми з зображення CS, як показано на рис. 3.19.

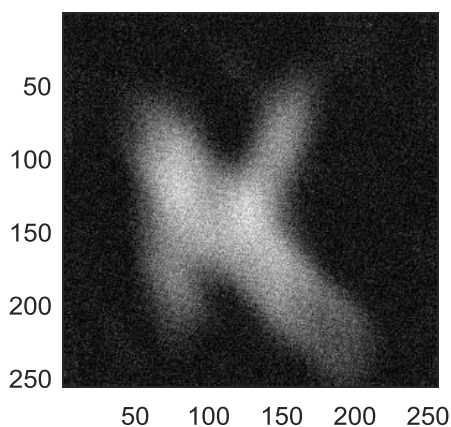


Рисунок 3.19 – Результати реконструкції голограми, отримані за запропонованим методом

Для того, щоб довести якість реконструкції голограми ми розрахували кореляцію між голограмою, отриманою запропонованим методом при різному значенні відсотку вимірювань та голограмою, отриманою за допомогою звичайного методу. Ми обчислили співвідношення між оригінальними та

реконструйованими зображеннями з різними розмірами (32x32, 64x64, 128x128 пікселі). Ми провели вимірювання, які відповідають від 5% до 30% від загальної кількості вимірів (рис.3.20).

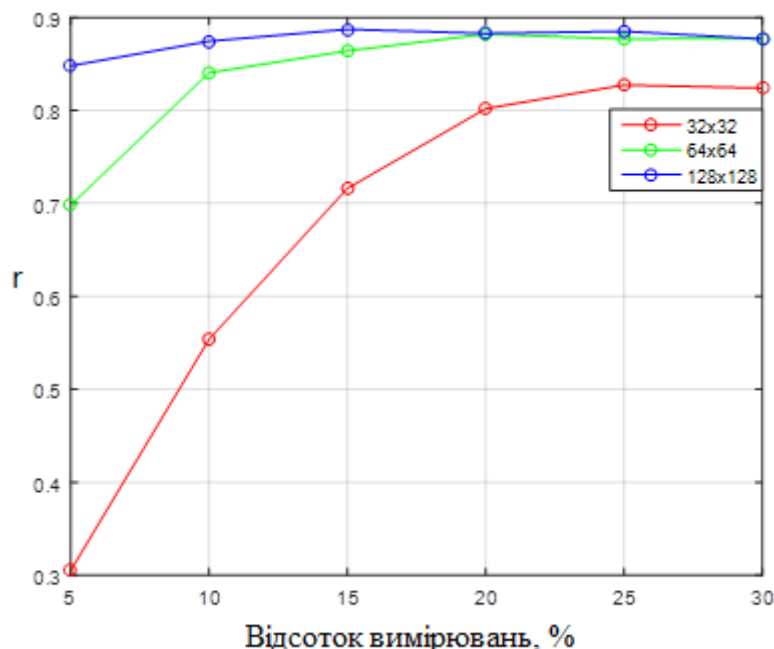


Рисунок 3.20 – Співвідношення між початковим зображенням та реконструкцією для різного дозволу

Очевидно, що чим більша кількість вимірювань, тим краща реконструкція голограми, яку ми отримуємо, і чим більший розмір зображення CS, тим кращу якість ми отримаємо.

### 3.4 Висновки до розділу

1. Ми продемонстрували успішну реалізацію системи вимірювання голограм методом оптичної скануючої голографії. Ця техніка є менш чутливою до вібрацій і може бути використана при зовнішньому освітленні. Головним недоліком є час вимірювання. Оскільки 2D сканування, ця техніка не підходить для вимірювання у реальному часі.

2. Ми представили техніку, яка дозволяє зменшити кількість вимірювань, визначаючи, яка частина зображення буде відновлена з меншою кількістю вимірювань. Алгоритм заснований на використанні коефіцієнта розрідженості сигналу та стандартного відхилення дає змогу знизити кількість вимірювань, проте ступінь зменшення залежить від кожного зображення та його розрідженості. Чим більше розрідженість зображення, тим менше вимірювань необхідно. Кількість вимірювань була локально вибрана для визначення оптимальної кількості вимірювань. Ми помітили, що наш метод дає помітне зменшення кількості вимірювань для зображень в яких є великі однорідні області, проте для неоднорідних зображень вплив є незначним.

3. Ми продемонстрували, що наш запропонований метод, що базується на поєднанні оптичної скануючої голографії та розпізнання за стисненням, дозволяє отримати голограму з меншою кількістю вимірювань, ніж звичайний метод OSH. Оскільки обидва методи базуються на вимірюванні з одиничними пікселем, їх можна використовувати у різних спектрах, навіть з експериментальними сенсорами у не традиційних діапазонах. За допомогою цього методу можна помітно зменшити кількість вимірювань. Ми сподіваємось, що ця робота сприятиме розвитку швидких методів вимірювання голограм. Застосування цього алгоритму для отримання голограм з 3D-об'єкту слід вивчити пізніше. Потрібно визначити, відстань до кожної частини об'єкту, для того, щоб зробити набір ФПМ і застосувати їх до різних частин зображення отриманого методом розпізнання за стисненням.

## 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

### 4.1. Опис ідеї проекту

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

| Зміст ідеї                                                                                                                   | Напрямки застосування                 | Вигоди для користувача                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|
| Поеднання оптичної скануючої голографії та розпізнання за стисненням для підвищення якості та швидкості вимірювання голограм | 1. Системи візуалізації 3D інформації | Підвищення швидкості та якості зображень. |
|                                                                                                                              | 2. Обробка зображень                  | Зменшення об'єму збереженої інформації    |

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

| № п/п | Техніко-економічні характеристики ідеї  | (потенційні) товари/концепції конкурентів |             |             |             | W (слабка сторона) | N (нейтральна сторона) | S (сильна сторона) |
|-------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|------------------------|--------------------|
|       |                                         | Мій проект                                | Конкурент 1 | Конкурент 2 | Конкурент 3 |                    |                        |                    |
| 1.    | Складність системи                      | Висока                                    | Середня     | Низька      | Середня     | +                  |                        |                    |
| 2.    | Наявність експериментальних результатів | +                                         | +           | -           | +           |                    | +                      |                    |
| 3.    | Висока якість голограм                  | +                                         | +           | -           | -           |                    |                        | +                  |
| 4.    | Одностадійність процесу                 | -                                         | +           | -           | +           | +                  |                        |                    |
| 5.    | Ергономічність                          | -                                         | -           | -           | -           |                    | +                      |                    |
| 6.    | Швидкість                               | +                                         | -           | +           | +           |                    | +                      |                    |
| 8.    | Транспортабельність                     | -                                         | -           | -           | -           |                    | +                      |                    |

Продовження таблиці 4.2

|     |               |                                                              |                                                              |                                                              |                                                              |  |   |  |
|-----|---------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--|---|--|
| 9.  | Екологічності | Екологіч<br>но                                               | Екологіч<br>но                                               | Екологіч<br>но                                               | Екологічн<br>о                                               |  | + |  |
| 10. | Безпеки       | Безпечно<br>за умови<br>дотриман<br>ня<br>техніки<br>безпеки | Безпечно<br>за умови<br>дотриман<br>ня<br>техніки<br>безпеки | Безпечно<br>за умови<br>дотриман<br>ня<br>техніки<br>безпеки | Безпечно<br>за умови<br>дотриман<br>ня<br>техніки<br>безпеки |  | + |  |

Конкурент 1: Метод "Compressive optical scanning holography"

Конкурент 2: Метод "Compressive sensing OSH"

Конкурент 3: Метод "Subsampled scanning holographic imaging"

#### 4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

| № п/п                                                                                                                  | Ідея проекту                  | Технології її реалізації                        | Наявність технологій | Доступність технологій          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| 1.                                                                                                                     | Модуляція фази променю        | Високоточний модулятор фази на ніобаті літію    | Наявна               | Доступно                        |
|                                                                                                                        |                               | Високоточний модулятор фази на рідких кристалах | Наявна               | Доступно, проте вартість велика |
| 2.                                                                                                                     | Технологія проекція зображень | Проектор на рідких кристалах                    | Наявна               | Доступно                        |
|                                                                                                                        |                               | Проектор на мікродзеркалах                      | Наявна               | Доступно                        |
| Обрана технологія реалізації ідеї проекту: високоточний модулятор фази на ніобаті літію та проектор на мікродзеркалах. |                               |                                                 |                      |                                 |



## 4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

| № п/п | Показники стану ринку (найменування)                     | Характеристика    |
|-------|----------------------------------------------------------|-------------------|
| 1     | Кількість головних гравців, од                           | 3                 |
| 2     | Загальний обсяг продаж, грн/ум.од                        | 150000 грн/ум.од. |
| 3     | Динаміка ринку (якісна оцінка)                           | Зростає           |
| 4     | Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень) | Немає             |
| 5     | Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації      | Немає             |
| 6     | Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %  | 150%              |

Ринок є привабливим для входження.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

| № п/п | Потреба, що формує ринок                                         | Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)                                  | Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів | Вимоги споживачів до товару                     |
|-------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|       | Підвищення швидкості та якості отримання голографічних зображень | Компанії та лабораторії, що займаються розвитком голографії та 3D зображень | -                                                                 | Товар повинен покращувати технологію голографії |

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

| № п/п | Фактор                          | Зміст загрози                                                                  | Можлива реакція компанії                            |
|-------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1.    | Наявність кваліфікованих кадрів | Для налаштування та підтримання роботи продукту потрібна кваліфікована персона | Пошук персоналу з навичками та знаннями у цій сфері |
| 2.    | Велика вартість продукту        | Для реалізації продукту необхідна велика кількість недешевого обладнання       | Знаходження інвесторів для придбання обладнання     |

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

| № п/п | Фактор                         | Зміст можливості                                                       | Можлива реакція компанії                                          |
|-------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1.    | Поява нових технологій         | Розробка нових методів та продуктів, які покращують методи виробництва | Покращення характеристик товару                                   |
| 2.    | Різне зростання попиту         | Кількість клієнтів компанії різко збільшилось                          | Збільшувати обсяги виробництва                                    |
| 3.    | Погіршення позицій конкурентів | Попит на товари конкурентів знижився                                   | Покращення характеристик товару та збільшення обсягів виробництва |

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

| Особливості конкурентного середовища                  | В чому проявляється дана характеристика                                     | Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)                        |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Вказати тип конкуренції<br><br>олігополія          | На ринку присутні декілька великих компаній по збуту та виробництву товарів | Підвищувати якість товару за рахунок використання передових технологій та залучення кваліфікованого персоналу |
| 2. За рівнем конкурентної боротьби<br><br>міжнародний | Ринок фірми не обмежується національним рівнем                              | Виходити на міжнародний рівень, налагоджувати міжнародні зв'язки                                              |

Продовження таблиці 4.2

|                                                     |                                                                        |                                                                  |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 3. За галузевою ознакою<br>внутрішньогалузева       | Конкуренція в одній галузі господарства.                               | Покращувати виробництво, впроваджувати новітні технології, тощо. |
| 4. Конкуренція за видами товарів:<br>товарно-видова | Конкуренція між товарами одного виду                                   | Використовувати рекламу                                          |
| 5. За характером конкурентних переваг<br>- цінова   | Конкуренція заснована на різній ціні товару у конкурентів              | Продавати товар за більш низькою ціною                           |
| 6. За інтенсивністю<br>- немарочна                  | Роль торгової марки незначна, хоча марки можуть бути присутні на ринку | Використовувати рекламу                                          |

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі  
за М. Портером

|                  | Прямі конкуренти в галузі                                                                                       | Потенційні конкуренти | Постачальники                               | Клієнти                             | Товари-замінники  |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| Складові аналізу | "Compressive optical scanning holography", "Compressive sensing OSH", "Subsampled scanning holographic imaging" | Немає                 | Товар продається безпосередньо розробниками | Якість та швидкість роботи продукту | Замінники в немає |

Проводження таблиці 4.9

|            |                                                            |                               |                                                                              |                                                     |                |
|------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------|
| Висновки : | Інтенсивність конкурентної боротьби на ринку досить висока | Потенційних конкурентів немає | Оскільки товар продається розробником, постачальники не диктують умови ринку | Клієнти вимагають якості та швидкості роботи товару | Обмежень немає |
|------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------|

Для того, щоб бути конкурентоспроможним на ринку для розробки товару потрібно залучати висококваліфікованих спеціалістів у галузі науки та інженерів для покращення якості товару.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

| № п/п | Фактор конкурентоспроможності | Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим) |
|-------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.    | Висока якість голограми       | Лише один конкурент має даний фактор, що має досить велике значення для голографії                  |
| 2.    | Швидкість вимірювання         | Продукт повинен бути швидкодійним, оскільки це є одним з головних факторів при виборі даного товару |
| 3.    | Наявність наукових ресурсів   | Для покращення якості продукції та технологічного шляху потрібні наукові ресурси                    |
| 4.    | Складність системи            | Занадто велика складність у використанні продукту може відштовхнути потенційних покупців.           |

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

| № п/п | Фактор конкурентоспроможності | Бали 1-20 | Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з “ЗМ” |    |    |   |    |    |    |
|-------|-------------------------------|-----------|-------------------------------------------------|----|----|---|----|----|----|
|       |                               |           | -3                                              | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 |
| 1.    | Висока якість голограми       | 20        |                                                 | +  |    |   |    |    |    |
| 2.    | Швидкість вимірювання         | 19        |                                                 |    | +  |   |    |    |    |
| 3.    | Наявність наукових ресурсів   | 13        |                                                 |    |    | + |    |    |    |
| 4.    | Складність системи            | 17        |                                                 |    |    |   |    |    | +  |

Таблиця 4.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

|                                                                           |                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Сильні сторони: Висока якість голограми та швидкість вимірювання          | Слабкі сторони: Складність системи                                                            |
| Можливості: розвиток нових технологій може призвести до спрощення системи | Загрози: Збільшення собівартості товару за рахунок збільшення вартості ресурсів і компонентів |

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

| № п/п | Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки                                                             | Ймовірність отримання ресурсів | Строки реалізації |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| 1.    | Пошук компаній збуту, пошук інвесторів, пошук наукових ресурсів, налагодження виробництва, вихід на ринок                  | 70 %                           | 2 роки            |
| 2.    | Ефективний розподіл ресурсів, мінімізація витрат, оптимізація розподілу ресурсів, налагодження виробництва, вихід на ринок | 80%                            | 1 роки            |

Обрано альтернативу № 2.

## 4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

| №<br>п/п                                    | Опис<br>профілю<br>цільової<br>групи<br>потенційних<br>клієнтів | Готовність<br>споживачів<br>сприйняти<br>продукт | Орієнтовний<br>попит в<br>межах<br>цільової<br>групи<br>(сегменту) | Інтенсивність<br>конкуренції в<br>сегменті | Простота<br>входу у<br>сегмент |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------|
| 1.                                          | Приватні<br>підприємства                                        | Готові                                           | Високий                                                            | Висока                                     | Середня                        |
| 2.                                          | Науково-<br>дослідницькі<br>центри                              | Готові                                           | Високий                                                            | Висока                                     | Низька                         |
| Які цільові групи обрано: цільова група №2. |                                                                 |                                                  |                                                                    |                                            |                                |

Таблиця 4.15 – Визначення базової  
стратегії розвитку

| №<br>п/<br>п | Обрана<br>альтернатива<br>розвитку<br>проекту | Стратегія<br>охоплення ринку                                                                                            | Ключові<br>конкурентоспромо<br>жні позиції<br>відповідно до<br>обраної<br>альтернативи | Базова стратегія<br>розвитку |
|--------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 1.           | 2                                             | За рахунок<br>великих надання<br>товару важливих<br>особливостей, які<br>відрізняють товар<br>від товару<br>конкурентів | Витрати на<br>виробництво                                                              | Стратегія<br>диференціації   |

Обрано стратегію диференціації.

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

| № п/п | Чи є проект «першопрохідцем» на ринку? | Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів? | Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які? | Стратегія конкурентної поведінки |
|-------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 1.    | Так                                    | Так                                                                            | Так, швидкість роботи                                                       | Виклику лідера                   |

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

| № п/п | Вимоги до товару цільової аудиторії | Базова стратегія розвитку | Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту | Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)    |
|-------|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.    | Висока швидкість, якість            | Стратегія диференціації   | Різна швидкість та якість товару                             | Оптимальне співвідношення ціна/якість, оптимізоване виробництво, співпраця, повна підтримка |

#### 4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

| № п/п | Потреба                                  | Вигода, яку пропонує товар                                               | Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити) |
|-------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 1.    | Збільшення швидкості і якості зображення | За допомогою двостадійного процесу значно підвищується якість зображення | Конкуренти зосереджені або на швидкості, або на якості зображень             |

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

| Рівні товару                                                                                               | Сутність та складові                                                                                              |      |                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------|
| I. Товар за задумом                                                                                        | Використання розпізнання за стисненням для підвищення якості та швидкості роботи методу розпізнання за стисненням |      |                |
| II. Товар у реальному виконанні                                                                            | Властивості/характеристики                                                                                        | М/Нм | Вр/Тх /Тл/Е/Ор |
|                                                                                                            | 1. Збільшення швидкості вимірювання голограм                                                                      | М    | Тх             |
|                                                                                                            | 2. Підвищення якості голограм                                                                                     | М    | Тх             |
|                                                                                                            | 3. Ціна 150 000 грн/од                                                                                            | М    | Вр             |
|                                                                                                            | 4. Доведена якість                                                                                                | М    | Тх             |
|                                                                                                            | Якість: залежить від якості обслуговування та додаткових компонентів                                              |      |                |
|                                                                                                            | Пакування: коробка                                                                                                |      |                |
| III. Товар із підкріпленням                                                                                | Марка: "CS-Hologram"                                                                                              |      |                |
|                                                                                                            | До продажу: гарантія                                                                                              |      |                |
|                                                                                                            | Після продажу: доставка, обслуговування.                                                                          |      |                |
| За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патент, оригінальне програмне забезпечення |                                                                                                                   |      |                |

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

| № п/п | Рівень цін на товари-замінники | Рівень цін на товари-аналоги | Рівень доходів цільової групи споживачів | Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу |
|-------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|       | -                              | 150 000 грн/од               | 10 000 000 грн і вище                    | 100 000 грн/од – 500 000 грн/од                         |

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

| № п/п | Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів   | Функції збуту, які має виконувати постачальник товару | Глибина каналу збуту  | Оптимальна система збуту                         |
|-------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------|
| 1     | Заказ товару на сайті або безпосередньо у розробників | Встановлення контакту, інформування, зберігання       | Канал нульового рівня | Виробник безпосередньо збуває продукцію покупцям |



Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

| №<br>п/<br>п | Специфіка<br>поведінки<br>цілових<br>клієнтів           | Канали<br>комунікацій,<br>якими<br>користуються<br>цілові<br>клієнти                                                                     | Ключові<br>позиції,<br>обрані для<br>позиціонуван<br>ня                                 | Завдання<br>рекламного<br>повідомлен<br>ня                                                                              | Концепція<br>рекламного<br>звернення                                                                            |
|--------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1            | Застосува<br>ння товару<br>для<br>отримання<br>голограм | Прямі - канал<br>комунікації,<br>коли<br>інформація<br>передається<br>безпосередньо<br>від<br>інформатора<br>до<br>інформованої<br>особи | Підвищення<br>швидкості<br>вимірювання<br>та якості<br>голографічно<br>го<br>зображення | Поширення<br>знань про<br>підприємств<br>о і<br>характерист<br>ики товару<br>серед<br>можливих<br>компаній-<br>клієнтів | Звернення<br>засноване на<br>відмінностях між<br>рекламованим<br>товаром і тим, що<br>пропонують<br>конкуренти. |

#### 4.6 Висновки до розділу

Можливість ринкової комерціалізації проекту є досить високою через відсутність прямих конкурентів та присутність відмінної характеристики товару. Також, ринок 3D зображень розвивається дуже швидко, що підвищить шанси залучити фінансування. Єдиною завадою може слугувати висока складність у використанні товару у порівнянні із найближчими конкурентами.

## ВИСНОВКИ

1. На сьогоднішній день цифрова голографія становиться все більш перспективним напрямом для розвитку. Оскільки необхідність у тривимірній інформації про об'єкт є важливим у багатьох напрямках науки та інформаційних технологіях.

2. Одним з перспективних методів для отримання голограм є оптичної скануючої голографії. Вона менш чутлива до вібрацій та може бути використана в кімнаті, що освітлюються джерелом світла. Також великою перевагою є використання точкового сенсору, що може бути використано у нетрадиційних діапазонах, таких як ультрафіолетовий чи інфрачервоний. Головний недолік – це час необхідний для вимірювання. Оскільки для отримання 3D інформації проводиться сканування, ця техніка не підходить для вимірювання у реальному часі. Результати роботи методу оптичної скануючої голографії були представлені на конференції «Image Processing and Image Understanding» (7-9 лютого 2018, м. Чеджу, Республіка Корея).

3. Також було показано, що наш запропонований метод оснований на блочній реконструкції зображень методом розпізнання за стисненням здатен відновлювати зображення з меншою кількістю вимірювань ніж звичайний метод розпізнання за стисненням. Наш метод представляє підхід, який знаходиться у компромісі між вимірюванням з використанням одного сенсору та вимірюванням камерою з великою роздільною здатністю. Оскільки він дозволяє значно зменшити кількість вимірювань, ми сподіваємось, що наша робота зробить внесок в розвиток швидких приладів для фіксації зображень заснованих на методі розпізнання за стисненням. Результати були представлені на конференції «Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2018» (15-19 квітня 2018, м. Орландо, США)

4. Для подальших досліджень необхідно визначитись з оптимальною кількістю блоків для відновлення зображення. А також, необхідно виміряти час

необхідний для реконструкції зображення малої якості на першому кроці та його вплив на весь час вимірювання.

5. Використання розпізнання за стисненням для того, щоб зменшити час вимірювання методом оптичної скануючої голографії може бути потенціальним для зменшення часу вимірювання. Ми розробили та продемонстрували можливість зменшення кількості вимірювань поєднуючи ці два методи. Це стало можливим завдяки тому, що методи розпізнання за стисненням та оптичної скануючої голографії використовують точковий сенсор. За результатами дослідження планується публікація у журналі “Optica”.

6. Недоліками даного методу є необхідність вручну визначити відстань до об’єкту, проте для подальших досліджень можливо використати алгоритми для оптимізації цього процесу. Також ми сподіваємось, що наша робота зробить свій внесок у системи вимірювання голограм у реальному часі.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Корешев С. Н. Основы голографии и голограммной оптики / С. Н. Корешев. – Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2009. – 97 с.
2. Schnars U. Digital Holography / U. Schnars, W. Jueptner. – Berlin: Springer, 2005. – 165 с.
3. Poon T. On the fundamentals of optical scanning holography / Ting-Chung Poon. // American Association of Physics Teachers. – 2008. – №76. – С. 738–746.
4. Poon T. DIGITAL HOLOGRAPHY AND THREEDIMENSIONAL DISPLAY Principles and Applications / Ting-Chung Poon. – New York: Springer, 2006. – 435 с.
5. Wendt J. Computer Generated Holography : дис. канд. / Wendt James – Claremont, 2009. – 43 с.
6. In vivo imaging and quantitative analysis of zebrafish embryos by digital holographic microscopy / G.Jian, J. Lyon, D. Szeto, J. Chen. // BIOMEDICAL OPTICS EXPRESS. – 2012. – №10.
7. Leportier T. Digital Holography : дис. докт. / Leportier Thibault – Seoul, 2017. – 107 с.
8. Федоров Б. В. Лазеры основы устройства и применения / Б. В. Федоров. – Москва: ДОСААФ СССР, 1988. – 119 с.
9. Sawatari T. Optical Heterodyne Scanning Microscope / T. Sawatari. // Applied Optics. – 1973. – №11. – С. 2768–2773.
10. Poon T. Optical Scanning Holography / Ting-Chung Poon. // PROCEEDINGS OF THE IEEE. – 1996. – №5. – С. 753–765.
11. Poon T. Recent Progress in Optical Scanning Holography / Ting-Chung Poon. // 2004. – №1. – С. 6–25.
12. About Lock-In Amplifiers [Электронный ресурс] // Stanford Research Systems – Режим доступа до ресурсу:  
<http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/ApplicationNotes/AboutLIAs.pdf>.

13. Poon T. Optical Scanning Holography with Matlab / Ting-Chung Poon. – New York: Springer, 2007. – 157 с.
14. Cheng H. Sparse Representation, Modeling and Learning in Visual Recognition / Cheng. – London: Springer, 2015. – 34 с.
15. G. F. Marshall, "Risley Prism scan patterns," Proc. SPIE. 3787, 74-86.
16. W. C. Warger, and C. A. DiMarzio, "Dual-wedge scanning confocal reflectance microscope," Opt. Lett., 32(15), 2140-2142 (2007).
17. R. G. Baraniuk, "Compressive sensing," IEEE Signal Proc. Mag., 24(4), 118-124 (2007).
18. E. J. Candes, J. Romberg, and T. Tao, "Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information," IEEE Trans. Inf. Theory, 52(2), 489-509 (2006).
19. W. L. Chan, K. Charan, D. Takhar et al., "A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing," Appl. Phys. Lett., 93(12), (2008).
20. M. F. Duarte, M. A. Davenport, D. Takhar et al., "Single-pixel imaging via compressive sampling," IEEE Signal Proc. Mag., 25(2), 83-91 (2008).
21. T. Leportier, Y. T. Lee, D. K. Hwang et al., "Holographic imaging with a single pixel sensor," Proc. SPIE, 9927, 992713 (2016).
22. D. L. Donoho, "Compressed sensing," IEEE Trans. Inf. Theory, 52(4), 1289-1306 (2006).
23. Draganić A. On some common compressive sensing recovery algorithms and applications / A. Draganić, I. Orović, S. Stanković. // Facta Universitatis Scientific Journal. – 2017. – №1.
24. Краничин О. Н. Рандомизация измерений и l1 минимизация [Электронный ресурс] / О. Н. Краничин. – 2009. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.math.spbu.ru/user/gran/soi5/Granichin5.pdf>.
25. Candès E. Compressive Sensing – A 25 Minute Tour [Электронный ресурс] / Emmanuel Candès. – 2010. – Режим доступа до ресурсу:

<https://www.raeng.org.uk/publications/other/candes-presentation-frontiers-of-engineering>.

26. D. Zonoobi, A. A. Kassim, and Y. V. Venkatesh, “Gini Index as Sparsity Measure for Signal Reconstruction from Compressive Samples,” *Ieee Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 5(5), 927-932 (2011).

27. E. Candès, J. Romberg, and Y. V. Venkatesh, “Sparsity and Incoherence in Compressive Sampling” (2006).

28. Tsang P. Adaptive Optical Scanning holography / P. Tsang, T. Poon, J. P. Liu. // *Scientific Reports*. – 2016. – C. 7.

29. Chan A. Subsampled scanning holographic imaging (SuSHI) for fast, non-adaptive recording of threedimensional objects / A. Chan, K. Tsia, E. Lam. // *Optica*. – 2016. – №8. – C. 911–918.

30. Compressive sensing holography based on optical heterodyne detection / [Y. Hu, D. Zhou, S. Yuan та ін.]. // *Optics & Laser Technology*. – 2016. – №86. – C. 152–156.

31. Optical scanning holography based on compressive sensing using a digital micro-mirror device / [S. A-qian, Z. Ding-fu, Y. Sheng та ін.]. // *Optics Communications*. – 2017. – №385. – C. 19–24.