

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційно-аналітичних технологій та менеджменту

(повна назва)

Кафедра прикладної математики

(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Математичні моделі та методи  
комп'ютерного обчислення голограм

(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання, групи ПМм-23-2

Безродний В.В.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 113 Прикладна математика

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Прикладна математика

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Єсілевський В.С.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ПМ

(підпис)

Сидоров М.В.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційно-аналітичних технологій та менеджменту

Кафедра прикладної математики

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 113 Прикладна математика

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Прикладна математика

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри ПМ \_\_\_\_\_

(підпис)

“ 25 ” листопада 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Безродному Владиславу В'ячеславовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Математичні моделі та методи комп'ютерного обчислення голограм

затверджена наказом по університету від 22 листопада 2024 р. № 1223 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 6 січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи штучні нейронні мережі для генерації голограм, алгоритми обробки зображень із використанням інтенсивності та глибини сцен, методи фізичного моделювання хвильових явищ.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

1. Аналіз предметної області

2. Вибір і обґрунтування методу розв'язання

3. Програмна реалізація

4. Результати обчислювального експерименту

5. Аналіз можливих застосувань

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій \_\_\_\_\_

1. Актуальність теми роботи \_\_\_\_\_

2. Постановка задачі \_\_\_\_\_

3. Аналіз предметної області \_\_\_\_\_

4. Метод чисельного аналізу \_\_\_\_\_

5. Результати обчислювального експерименту \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір та вивчення технічної літератури за темою роботи	25 листопада – 1 грудня 2024 р.	виконано
2	Вибір та обґрунтування методу	2 – 8 грудня 2024 р.	виконано
3	Розробка алгоритму і програми	9 – 22 грудня 2023 р.	виконано
4	Проведення аналітичних досліджень та розрахунків	23 – 29 грудня 2024 р.	виконано
5	Робота над текстом пояснювальної записки	30 грудня 2024 р. – 9 січня 2025 р.	виконано
6	Представлення роботи на рецензію в ЕК	10 січня 2025 р.	виконано

Дата видачі завдання 25 листопада 2024 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ доц. Єсілевський В.С.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 66 с., 1 табл., 7 рис., 1 дод., 12 джерела.

КОМП'ЮТЕРНА ГОЛОГРАФІЯ, НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ, ОЦІНКА ГЛИБИНИ, РЕКОНСТРУКЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ, СПЕКТРАЛЬНИЙ МЕТОД КУТА.

Об'єкт дослідження – процеси генерації та реконструкції цифрових голограм у задачах комп'ютерного зору та тривимірної візуалізації.

Мета роботи – розробка математичних моделей та методів комп'ютерного обчислення голограм з використанням нейронних мереж, які забезпечують високу точність тривимірної реконструкції об'єктів при мінімізації витрат обчислювальних ресурсів.

Методи дослідження – математичне моделювання, чисельні методи оптимізації, алгоритми цифрової обробки сигналів, методи машинного навчання, програмні технології для реалізації та тестування моделей.

У роботі виконано дослідження сучасних підходів до генерації комп'ютерно генерованих голограм (CGH). Використано підхід до генерації голограм, що поєднує спектральний метод кута (ASM) із використанням нейронних мере. Реалізовано програмну систему, яка дозволяє генерувати цифрові голограми в реальному часі.

Отримані результати показали значний потенціал застосування розроблених методів у віртуальній та доповненій реальності, медичній візуалізації, тривимірному друку та інших галузях. Запропонований підхід дозволяє досягти високої якості реконструкції тривимірних об'єктів при суттєвій економії обчислювальних ресурсів, що підтверджує його актуальність та перспективність. Подальші дослідження передбачають удосконалення пайплану генерації голограм із використанням таких технологій, як COLMAP та NeRF.

## ABSTRACT

Introductory note: 66 pages, 1 tables, 7 figures, 1 appendix, 12 sources.

ANGULAR SPECTRUM METHOD, COMPUTER-GENERATED HOLOGRAPHY, DEPTH ESTIMATION, IMAGE RECONSTRUCTION, NEURAL NETWORKS.

Object of research – processes of generation and reconstruction of digital holograms in computer vision and 3D visualization tasks.

Purpose of work – development of mathematical models and methods for computer-generated holography using neural networks, ensuring high accuracy in 3D object reconstruction while minimizing computational resource consumption.

Methods of research – mathematical modeling, numerical optimization methods, digital signal processing algorithms, machine learning methods, and software technologies for implementing and testing the models.

The study explores modern approaches to computer-generated holography (CGH). An advanced approach for hologram generation combining the angular spectrum method (ASM) with neural networks for optimizing computational processes was utilized. A software system capable of generating digital holograms in real time has been implemented. The effectiveness of the proposed solutions was experimentally proven in comparison with existing methods.

The obtained results demonstrated significant potential for applying the developed methods in virtual and augmented reality, medical imaging, 3D printing, and other fields. The proposed approach achieves high-quality 3D object reconstruction while significantly reducing computational costs, confirming its relevance and feasibility. Further research aims to improve the hologram generation pipeline using technologies such as COLMAP and NeRF.

## ЗМІСТ

	С.
Перелік скорочень, умовних познач, одиниць і термінів .....	8
Вступ .....	9
1 Аналіз предметної області та постановка задач дослідження .....	11
1.1 Відомості про голографію .....	11
1.2 Математичний опис голограми .....	12
1.3 Відомості про комп'ютерну голографію .....	14
1.4 Змістовна та формальна постановка задачі .....	15
1.5 Постановка задач дослідження .....	16
2 Вибір та обґрунтування методу розв'язання .....	18
2.1 Аналіз основних підходів у комп'ютерній голографії .....	18
2.2 Хвильові методи .....	18
2.3 Променеві методи.....	19
2.4 Методи на основі глибокого навчання .....	19
2.5 Порівняння підходів у контексті різних застосувань.....	21
2.6 Сучасні інструменти для створення комп'ютерних голограм та роботи з 3D сценою.....	22
2.7 Опис та обґрунтування обраних інструментів .....	27
Висновки за розділом 2 .....	29
3 Програмна реалізація .....	30
3.1 Програмні інструменти та середовище.....	30
3.2 Архітектура та навчання системи.....	31
3.3 Створення голограм .....	32
3.4 Опис програми.....	34
Висновки за розділом 3 .....	36
4 Результати обчислювального експерименту та їх аналіз .....	37
4.1 Результати роботи та порівняльний експеримент .....	37
Висновки за розділом 4 .....	40

Висновки .....	41
Перелік джерел посилання .....	42
Додаток А Лістинг програми .....	44

**ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ**

CGH – Computer-Generated Holography (комп'ютерно генеровані голограми);

SLM – Spatial Light Modulator (просторовий світловий модулятор);

FFT – Fast Fourier Transform (швидке перетворення Фур'є);

CNN – Convolutional Neural Network (згорткова нейронна мережа);

GAN – Generative Adversarial Network (генеративно-змагальна мережа);

ASM – Angular Spectrum Method (метод спектру кута);

RGB – Red, Green, Blue (система кольорового кодування);

RGB-D – Red, Green, Blue + Depth (система кольорового кодування з додатковим виміром глибини).

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Комп'ютерна голографія є перспективною технологією, що знаходить застосування у різних сферах, включаючи медицину, наукові дослідження, віртуальну та доповнену реальність, а також візуалізацію в інженерії та дизайні.

Голографія є сучасним напрямом науки, який знаходить застосування у різних галузях: від медицини та промисловості до наукових досліджень і розробок у сфері інформаційних технологій. Комп'ютерно генеровані голограми (CGH, Computer-Generated Holograms) є одним з ключових інструментів у розробці та впровадженні високоточних візуалізацій тривимірних об'єктів. Зростаюча потреба в обчислювальних моделях, які забезпечують ефективність і точність реконструкції голограм, визначає актуальність даної роботи. Світові тенденції розвитку голографічних методів спрямовані на оптимізацію алгоритмів, що зменшують обчислювальні ресурси та підвищують якість результатів.

Окрему увагу привертає використання методів штучних нейронних мереж для створення комп'ютерно генерованих голограм. Нейронні мережі демонструють високу ефективність у вирішенні складних задач обробки сигналів та зображень, що дозволяє значно покращити якість реконструкції голограм і зменшити час обчислень.

**Мета і завдання кваліфікаційної роботи.** Метою кваліфікаційної роботи є розробка математичних моделей і методів комп'ютерного обчислення голограм з використанням штучних нейронних мереж, які забезпечують точну реконструкцію тривимірних об'єктів та мінімізують витрати ресурсів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- провести огляд і аналіз сучасного стану задачі обчислення голограм;
- дослідити існуючі математичні моделі та алгоритми, що застосовуються для генерації голограм;

- розглянути можливості застосування методів штучних нейронних мереж у задачах обчислення голограм;
- розробити та запропонувати удосконалений метод комп'ютерного обчислення голограм з використанням нейронних мереж;
- реалізувати запропоновану модель у вигляді програмного забезпечення;
- оцінити ефективність розробленого методу через порівняння з існуючими підходами.

*Об'єктом дослідження* є процеси генерації та реконструкції голограм у задачах комп'ютерного зору й тривимірної візуалізації.

*Предметом дослідження* є математичні моделі та методи, що використовуються для комп'ютерного обчислення голограм з урахуванням можливостей штучних нейронних мереж.

**Методи дослідження.** У кваліфікаційній роботі використовуються математичні методи моделювання, чисельні методи оптимізації, алгоритми цифрової обробки сигналів, методи машинного навчання, зокрема штучних нейронних мереж, а також комп'ютерні технології для реалізації та тестування розроблених моделей.

**Публікації.** Результати, отримані у кваліфікаційній роботі, було представлено на Information Technology and Implementation Satellite Conference (м. Київ, 21 жовтня 2024 р.) [1].

# 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1 Відомості про голографію

Голографія – це метод отримання та відтворення об’ємного зображення об’єкта шляхом запису і відновлення хвильового фронту світла [2]. Вперше голографію запропонував Деніс Габор у 1947 році, за що отримав Нобелівську премію. В основі голографії лежить явище інтерференції світла, що дозволяє зафіксувати інформацію про амплітуду і фазу хвильового фронту. На відміну від традиційної фотографії, яка фіксує лише інтенсивність світла, голографія зберігає як амплітуду, так і фазу світлової хвилі, що дозволяє відтворювати повну тривимірну інформацію про об’єкт.

Приклади застосування голографії:

- голографічні методи використовуються для високощільного зберігання інформації, що дозволяє зберігати великі обсяги даних на компактних носіях;
- голографія допомагає створювати тривимірні зображення внутрішніх органів, що покращує діагностику та планування хірургічних втручань;
- художники використовують голографію для створення унікальних тривимірних творів мистецтва;
- голографічна мікроскопія дає змогу отримувати тривимірні зображення мікроскопічних об’єктів з високою роздільною здатністю;
- голографічні зображення застосовуються на банкнотах, кредитних картках та інших цінних документах для захисту від підробок.

Класична голографія включає кілька етапів: створення інтерференційного візерунка, запис його на світлочутливий матеріал та відновлення голограми за допомогою оптичних методів.

Види голограм включають:

- голограми Френеля створюються за допомогою когерентного джерела світла та об’єкта, розташованого на певній відстані від фотопластинки [2];

– голограми Фраунгофера отримуються в умовах, коли об'єкт і фотопластинка знаходяться на великій відстані один від одного, що призводить до формування голограми в області далекого поля [2].

## 1.2 Математичний опис голограми

Математичний опис голографії базується на принципах хвильової оптики та теорії інтерференції. Під час запису голограми об'єкт освітлюється когерентним (зазвичай лазерним) світлом, яке розділяється на два пучки: опорний та об'єктний. Об'єктний пучок відбивається від об'єкта та інтерферує з опорним пучком на фоточутливій пластинці, створюючи інтерференційну картину. Ця картина містить інформацію про амплітуду та фазу об'єктного пучка.

Основна суть методу голографії Френеля[2] пояснюється наступним чином. Нехай комплексне збурене поле в площині  $H$  задається виразом:

$$U = Ae^{i\varphi}, \quad (1.1)$$

де  $A$  – дійсна амплітуда;

$\varphi$  – фаза збуреного поля.

Припускаючи, що основна частина когерентного випромінювання, яке падає, не дифрагує, отримаємо, що незбурена частина когерентного випромінювання, яка досягає площини  $H$ , може бути описана як:

$$U_1 = A_1 e^{i\varphi_1}, \quad (1.2)$$

а дифрагована хвиля, яка досягає площини  $H$ , що знаходиться в зоні Френеля, описується як:

$$U_2 = A_2 e^{i\varphi_2}. \quad (1.3)$$

Тоді збурене поле в  $H$  визначається наступним виразом:

$$U = U_1 + U_2 = e^{i\varphi_1} \left[ A_1 + A_2 e^{i(\varphi_2 - \varphi_1)} \right]. \quad (1.4)$$

Інтенсивність, яка реєструється на фотопластині в площині  $H$ , визначається за формулою:

$$I = |A|^2 = UU^* = \left[ A_1^2 + A_2^2 + A_1 A_2 e^{i(\varphi_2 - \varphi_1)} + A_1 A_2 e^{-i(\varphi_2 - \varphi_1)} \right], \quad (1.5)$$

де  $U^*$  – комплексно спряжене значення  $U$ .

Отриманий фотографічний транспарант повертається в початкове положення, об'єкт прибирається, а транспарант освітлюється когерентною хвилею  $U_1$ . У площині, сполученій з площиною об'єкта, формується зображення початкового об'єкта. Амплітудна пропускна здатність транспаранта для когерентного освітлення хвилею  $U_1$  визначається виразом:

$$U_3 = I^{-\gamma/2} U_1 = A_1 e^{i\varphi_1} \left[ A_1^2 + A_2^2 + A_1 A_2 e^{i(\varphi_2 - \varphi_1)} + A_1 A_2 e^{-i(\varphi_2 - \varphi_1)} \right]^{-\gamma/2}, \quad (1.6)$$

де  $\gamma$  – тангенс кута нахилу лінійної ділянки характеристики фотопластини.

Якщо взяти коефіцієнт контрастності  $\gamma = -2$ , рівняння спрощується:

$$U_3 = A_1^2 e^{i\varphi_1} \left[ A_1 + \frac{A_2^2}{A_1} + A_2 e^{i(\varphi_2 - \varphi_1)} + A_2 e^{-i(\varphi_2 - \varphi_1)} \right]. \quad (1.7)$$

Після порівняння рівняння (1.7) з рівнянням (1.4), вираз можна спростити та записати так:

$$U_3 = A_1^2 \left[ U + \left( \frac{A_2^2}{A_1} + A_2 e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} \right) e^{i\varphi_1} \right]. \quad (1.8)$$

Це рівняння пояснює природу відновленого зображення. Перша складова відповідає початковій хвилі, друга є незначною постійною складовою, а третя – це зворотна хвиля, яка створює зображення-дублікати.

Таким чином, формується тривимірне зображення, одна частина якого може бути спотворена через відбиття додаткових хвиль.

### 1.3 Відомості про комп'ютерну голографію

Комп'ютерна голографія (Computer-Generated Holography, CGH) [3] – це технологія, що дозволяє створювати тривимірні зображення на основі цифрових даних, використовуючи принципи хвильової оптики. В основі CGH лежать процеси дифракції та інтерференції світла, що дозволяють зафіксувати інформацію про фазу та амплітуду світлової хвилі, а потім відтворити тривимірне зображення на основі цієї інформації. Відмінною рисою комп'ютерної голографії є те, що вся обробка і генерація зображень відбувається за допомогою комп'ютерних методів, без використання традиційних оптичних систем.

Цифрова голограма складається з сукупності даних, які описують хвильове поле світла, що відбивається від об'єкта або проходить через нього. Головне завдання цифрової голографії – відтворити тривимірне зображення об'єкта, зберігши інформацію про його глибину, перспективу і структурні деталі.

Для генерації голограм використовуються різні алгоритми, що працюють як з реальними, так і з віртуальними об'єктами. CGH кодує як амплітудну, так і

фазову інформацію про відтворювані сцени. Зазвичай для відтворення використовуються просторові світлові модулятори (SLMs, Spatial light modulators), які можуть модулювати лише амплітуду або фазу світлового поля. Тому комплексні амплітудні голограми часто перетворюють на амплітудні (amplitude-only holograms) або фазові голограми (phase-only holograms) для відображення. Фазові голограми широко використовуються завдяки їхній вищій дифракційній ефективності та відсутності двійникового зображення під час відтворення.

Основними проблемами, які постають перед CGH, є значні обчислювальні ресурси, необхідні для створення високоякісних голограм, а також труднощі у відтворенні складних об'єктів із високим рівнем деталізації. Тому велика увага приділяється розробці нових математичних моделей та алгоритмів, що дозволяють оптимізувати процес генерації голограм, знижуючи обчислювальні витрати та підвищуючи точність відтворення.

#### 1.4 Змістовна та формальна постановка задачі

Змістовна постановка задачі передбачає опис реальної проблеми, яку необхідно вирішити, та визначення її ключових аспектів. У випадку комп'ютерної голографії задача полягає у створенні цифрових голограм для відтворення тривимірних зображень на основі двовимірних даних, таких як зображення або відео. Основною проблемою є велика обчислювальна складність процесу генерації голограм, що ускладнює його застосування в режимі реального часу.

Таким чином, основна задача полягає у розробці математичних моделей та алгоритмів, які дозволять оптимізувати процес обчислення голограм, зменшивши обчислювальні витрати та підвищивши якість кінцевих зображень. При цьому необхідно враховувати фізичні принципи, на яких ґрунтується голографія, зокрема процеси дифракції та інтерференції світла.

Формальна постановка задачі передбачає математичне формулювання проблеми та визначення її параметрів і змінних.

Об'єктом дослідження є процеси генерації цифрових голограм на основі заданих параметрів світлового поля.

Треба знайти функцію  $F$ , яка відображає вхідні дані (зображення та глибину) у голограму:

$$H = F_{hol}(N, d), \quad (1.9)$$

де  $F_{hol}$  – функція, яка повинна враховувати процеси дифракції та інтерференції;

$N$  – двовимірне зображення або відео, що представляє інтенсивність світла в точці;

$d$  – глибина сцени (глибина кожної точки), що визначає відстань між об'єктом і спостерігачем;

$H$  – це функція, яка представляє цифрову голограму в двовимірному просторі координат, яка описує амплітуду і фазу хвильового фронту світла в кожній точці голограми.

## 1.5 Постановка задач дослідження

На основі проведеного аналізу предметної області можна виділити кілька ключових задач, які необхідно вирішити в рамках даного дослідження:

а) огляд сучасних методів генерації комп'ютерних голограм: необхідно дослідити існуючі методи синтезу голограм, включаючи класичні алгоритми та новітні підходи на основі штучного інтелекту та нейронних мереж, що дозволить зрозуміти сильні та слабкі сторони різних підходів і визначити напрямки для їх вдосконалення;

б) аналіз математичних моделей та моделей штучних нейронних мереж для опису процесів генерації голограм: потрібно провести аналіз існуючих

математичних моделей, що використовуються для опису процесів дифракції, інтерференції та відновлення тривимірних сцен;

в) розробка нових або вдосконалення існуючих алгоритмів для комп'ютерного обчислення голограм: на основі проведеного аналізу необхідно запропонувати нові або вдосконалені алгоритми, які можуть зменшити обчислювальні витрати або підвищити точність відтворення голограм, при цьому особливу увагу слід приділити методам, що можуть працювати в реальному часі;

г) експериментальна перевірка запропонованих методів: потрібно протестувати розроблені алгоритми на реальних або симульованих даних, щоб оцінити їх ефективність, що дозволить визначити, наскільки запропоновані методи відповідають вимогам до якості та швидкості генерації голограм;

д) порівняння результатів з існуючими підходами: після проведення експериментів слід порівняти отримані результати з сучасними методами, щоб визначити переваги і недоліки розроблених рішень, а також оцінити їх практичне застосування.

Дане дослідження спрямоване на розвиток нових підходів до комп'ютерного обчислення голограм, що дозволить значно розширити можливості комп'ютерної голографії у різних сферах її застосування.

## 2 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ РОЗВ'ЯЗАННЯ

### 2.1 Аналіз основних підходів у комп'ютерній голографії

Комп'ютерна голографія [3] (CGH) – це процес створення тривимірних зображень на основі математичного та комп'ютерного моделювання світлових хвиль. Головна мета CGH – відтворити тривимірну сцену або об'єкт на площині, зберігаючи інформацію про глибину і перспективу. Сучасні методи генерації голограм поділяються на кілька основних підходів, кожен з яких має власні переваги і недоліки залежно від застосування.

До таких підходів належать:

- хвильові методи [4] (wave-based methods), що базуються на математичному описі хвильової оптики та дозволяють моделювати процеси дифракції і інтерференції для отримання голограм;

- променеві методи [5] (ray-based methods), які використовують фізичні принципи трасування світлових променів і моделюють взаємодію світла з об'єктами у тривимірному просторі;

- методи на основі глибокого навчання [3] (deep learning-based methods), які залучають штучні нейронні мережі для автоматичного навчання і генерації голограм з мінімальними обчислювальними витратами.

Кожен з цих методів має свою специфіку, і вибір підходу залежить від задачі, яка стоїть перед дослідником: чи то точність відтворення об'єктів, чи швидкість обчислення, чи можливість працювати в реальному часі.

### 2.2 Хвильові методи

Хвильові методи [4] є найбільш традиційними в комп'ютерній голографії і базуються на принципах хвильової оптики. Вони використовують математичні моделі, такі як швидке перетворення Фур'є (FFT), для обчислення голограм на

основі інформації про фазу і амплітуду світлових хвиль. Ці методи дозволяють точно відтворювати хвильове поле сцени, що є ключовим для отримання реалістичних тривимірних зображень.

Хвильові методи ґрунтуються на обчисленні хвильового фронту, який формується від об'єкта і потім дифрагує на голограмі. Це дозволяє записати інформацію про амплітуду і фазу хвиль.

Швидке перетворення Фур'є (FFT) і перетворення Френеля є найпоширенішими інструментами для розрахунку хвильових методів.

### 2.3 Променеві методи

Променеві методи [5] використовують принцип трасування світлових променів і відстеження їх взаємодії з поверхнями об'єктів. Цей підхід подібний до того, що використовується в комп'ютерній графіці для рендерингу зображень. Променеві методи моделюють розповсюдження світла і його відбиття або заломлення в тривимірному просторі, що дозволяє точно відтворювати складні сцени з багатьма джерелами світла і тінями.

Промінь світла імітується від джерела до об'єкта, відбивається або проходить крізь нього, після чого фіксується на площині голограми.

Методи трасування променів використовуються для обчислення голографічних зображень у контексті фізично точного моделювання світлових ефектів.

### 2.4 Методи на основі глибокого навчання

Останнім часом значний інтерес у комп'ютерній голографії викликають методи на основі глибокого навчання [3]. Вони використовують штучні нейронні мережі, які можуть навчатися на великих наборах даних і генерувати

голограми з меншою обчислювальною складністю, ніж традиційні хвильові або променеві методи. Нейронні мережі, такі як ResNet або U-Net, можуть навчатися генерувати голограми на основі двовимірних зображень або зображень з глибиною (RGB-D).

Мережа навчається за допомогою наборів даних з відомими голографічними зображеннями, після чого вона може генерувати нові голограми на основі нових вхідних даних.

Архітектури нейронних мереж, такі як згорткові нейронні мережі, генеративно-змагальні мережі і автоенкодери використовуються для генерації голограм.

Згорткові нейронні мережі (CNN) демонструють високу ефективність у задачах обробки зображень, що робить їх придатними для генерації голограм. Навчання CNN на великих наборах даних, які містять пари зображень та відповідних голограм, дозволяє моделі вивчити складні відповідності між просторовими характеристиками зображення та його голографічним представленням. Після навчання така мережа здатна швидко та точно генерувати голограми для нових вхідних зображень.

Генеративно-змагальні мережі (GAN) складаються з двох нейронних мереж – генератора та дискримінатора, які змагаються між собою. У контексті голографії генератор створює голограми, а дискримінатор оцінює їх якість, відрізняючи згенеровані голограми від реальних. Такий підхід сприяє покращенню якості синтезованих голограм, забезпечуючи високу точність та реалістичність відтворення тривимірних зображень.

Автокодуювальники – це нейронні мережі, які навчаються стискати вхідні дані до меншого розміру (кодування) та відновлювати їх назад (декодування). У голографії автокодуювальники можуть бути використані для зменшення розмірності даних, що представляють голограму, зберігаючи при цьому ключову інформацію. Це сприяє оптимізації процесу зберігання та передачі голографічних даних, а також прискорює процес їх відтворення.

## 2.5 Порівняння підходів у контексті різних застосувань

Кожен з методів генерації голограм має свої переваги та недоліки, які визначають, наскільки ефективним є той чи інший метод у різних контекстах.

Хвильові методи забезпечують високу точність і реалістичність, оскільки враховують хвильову природу світла. Однак їх обчислювальна складність робить ці методи менш придатними для застосувань, що потребують реального часу. Хвильові методи добре підходять для наукових досліджень, де важлива фізична точність.

Променеві методи дозволяють отримати фізично точні зображення і є корисними для складних сцен з численними джерелами світла. Вони, однак, також є досить обчислювально інтенсивними і можуть бути непридатними для швидкого рендерингу в реальному часі. Вони краще підходять для додатків, де потрібне точне моделювання світла, наприклад у віртуальній реальності або для високоякісної графіки.

Методи на основі глибокого навчання пропонують швидке генерування голограм з достатньо високою якістю. Вони можуть працювати в реальному часі і мають високий потенціал для інтеграції в системи віртуальної та доповненої реальності. Однак їхня точність може поступатися традиційним методам у контексті відтворення хвильових ефектів. Вони є ідеальними для інтерактивних систем, де важлива швидкість, а не точність фізичного моделювання.

Використання методів глибокого навчання у створенні голограм надає кілька переваг:

- після навчання модель може генерувати голограми в реальному часі, що особливо важливо для додатків, які вимагають швидкої обробки, таких як віртуальна та доповнена реальність;

- глибокі нейронні мережі здатні вловлювати складні нелінійні залежності, що дозволяє створювати голограми з високою точністю та деталізацією;

– моделі глибокого навчання можуть бути перенавчені або донавчені для специфічних задач або наборів даних, що робить їх гнучкими для різних застосувань.

Однак існують і певні виклики:

– для ефективного навчання нейронних мереж потрібні великі набори даних, що містять пари зображень та відповідних голограм;

– навчання глибоких моделей вимагає значних обчислювальних потужностей, що може бути обмеженням у деяких випадках;

– моделі, навчені на певному наборі даних, можуть погано переноситися на інші домени або типи зображень, що потребує додаткового навчання або адаптації.

## 2.6 Сучасні інструменти для створення комп'ютерних голограм та роботи з 3D сценою

У сучасних дослідженнях комп'ютерної голографії все більшого поширення набувають методи, що базуються на глибокому навчанні. У цьому розділі наводиться інноваційний пайплайн зі статті “Neural Radiance Fields-based Holography” [6], який поєднує в собі кілька передових технологій для генерації високоякісних голограм на основі звичайних 2D-даних (зображень або відео), без потреби у спеціалізованому 3D-моделюванні або фізичному обладнанні.

Основні компоненти пайплайну (рис. 2.1): COLMAP для оцінки положення та орієнтації камери, NeRF (Neural Radiance Fields) для реконструкції радіанних полів, MiDaS для прогнозування глибини зображення та Tensor Holography для генерації голограм об'єднуються в єдиний інтегрований процес. Кожен з компонентів виконує певну функцію, забезпечуючи точну та швидку генерацію голограм.

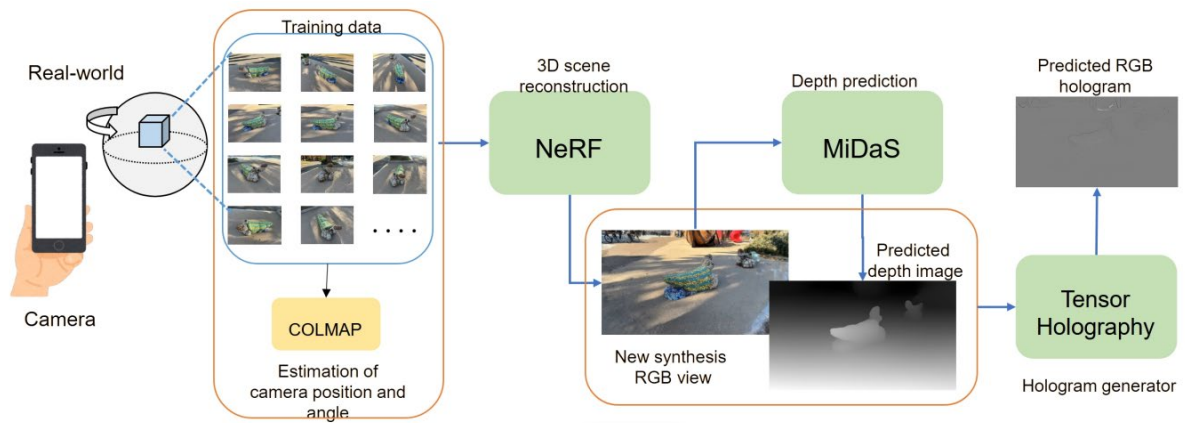


Рисунок 2.1 – Схема пайплайну

COLMAP [7] – цей інструмент використовується для визначення позицій та орієнтацій камери з набору зображень, коли ці дані не доступні. Це дозволяє отримати інформацію про просторове розташування об'єкта на основі двовимірних зображень з кутами огляду, що є необхідним для побудови 3D-сцени.

NeRF (Neural Radiance Fields) [8] – це техніка глибокого навчання, яка реконструює тривимірне поле світлового випромінювання на основі двовимірних зображень. NeRF моделює кожену точку сцени як п'ятивимірний вектор, де просторові координати поєднуються з кутами огляду, що дозволяє передбачати кольори та щільність об'єктів. NeRF виконує ключову роль у формуванні тривимірного представлення сцени, яке потім використовується для створення голограм. NeRF перетворює п'ятивимірний вектор у RGB-зображення шляхом регресії з використанням багатошарового перцептрона (MLP) з технікою об'ємного рендерингу. MLP може бути виражений як:

$$RGB = (r, g, b, \sigma) = N_{NeRF} \{v\}, \quad (2.1)$$

де  $v = (x, y, z, \theta, \phi)$  – п'ятивимірний вектор;

$r, g, b$  – це компоненти кольору для точки у просторі. Вони визначають інтенсивність червоного (red), зеленого (green) та синього (blue) кольорів відповід-

но, які у сукупності визначають колір точки. Ці значення зазвичай знаходяться в діапазоні від 0 до 1;

$\sigma$  – це об’ємна густина (density) у даній точці простору. Цей параметр визначає, наскільки "прозорою" або "непрозорою" є точка, що важливо для моделювання глибини і щільності об’єктів у сцені. Чим більша густина, тим менше світла проходить через цю точку, і тим "щільніше" виглядає об’єкт у даній точці;

$x, y, z$  – це просторові координати точки у тривимірному просторі. Вони визначають положення точки в сцені і вказують її розташування відносно інших об’єктів;

$\theta$  – азимутальний кут, який визначає обертання навколо вертикальної осі (напрямок вліво або вправо);

$\phi$  – полярний кут, який визначає нахил відносно горизонтальної площини (напрямок вгору або вниз).

MiDaS (Model Zoo for Monocular Depth Estimation) [9] – це модель прогнозування глибини, яка здатна створювати карти глибини на основі двовимірних зображень без необхідності додаткового навчання на конкретних наборах даних. Карти глибини, згенеровані MiDaS, разом із полем, що отримується з NeRF, забезпечують точну реконструкцію сцени та поліпшують якість голограм.

$$d = N_{MiDaS}\{RGB\}, \quad (2.2)$$

де  $RGB$  – це вхідне RGB-зображення (Red, Green, Blue), яке є тривимірним масивом, що містить колірну інформацію про сцену. Модель MiDaS використовує це зображення як вхідні дані для передбачення карти глибини.

У MiDaS використовуються різні варіанти основної мережі, як ResNet, DenseNet або Vision Transformer (ViT), які були попередньо навчені на великих наборах даних для завдань класифікації зображень. Ці основні мережі

виконують роль екстрактора ознак, перетворюючи вхідне зображення у високорівневі ознаки, що представляють просторову структуру та візуальні характеристики сцени.

Після екстракції ознак зображення, вони передаються на блоки декодування, які відновлюють просторову інформацію для генерації карти глибини. Блоки декодування використовують комбінації шарів згортки, *upsampling* (збільшення роздільності), та активацій для перетворення високорівневих ознак у детальну карту глибини.

Вихідний шар MiDaS генерує карту глибини, де кожне значення пікселя вказує на відносну глибину сцени у відповідній точці. Карта глибини є відносною, що означає, що модель не обчислює точну метрику глибини, але дає точне співвідношення глибини між різними об'єктами у сцені, що підходить для багатьох застосувань, включаючи 3D-реконструкцію та віртуальну реальність.

Tensor Holography [10] – останній етап пайплайну, який конвертує RGB-зображення та карти глибини в голограми. Ця технологія, що базується на архітектурі ResNet, забезпечує швидку генерацію високоякісних голограм, які можуть бути відтворені на голографічному проекторі або просторовому світловому модуляторі (SLM). Прогнозовані RGB голограми  $H$  за допомогою тензорної голографії, позначені через  $N_{hol}$ , можуть бути виражені як:

$$H = N_{hol} \{RGB, d\}. \quad (2.3)$$

Tensor Holography побудований на основі архітектури ResNet, що дозволяє моделі вчитися на основі великої кількості даних і забезпечує високу точність результатів. ResNet використовується для створення зв'язку між вхідними 2D-даними (наприклад, RGB-зображенням і картою глибини) та вихідним голографічним зображенням, де кожен шар мережі відповідає за різні рівні деталізації та просторової інформації.

Tensor Holography використовує RGB-зображення та карти глибини (depth map) як основні вхідні дані. Карти глибини забезпечують інформацію про відстань до кожної точки зображення, що дозволяє моделі визначати тривимірну структуру сцени. Вхідні дані комбінуються в єдиний представницький простір, що дає можливість моделі генерувати детальні голограми на основі доступної інформації.

Використовуючи ResNet, Tensor Holography моделює процес формування голографічного зображення, обробляючи вхідні дані та перетворюючи їх на комплексне світлове поле. Це дозволяє створити голограму у вигляді RGB-зображення, яке може бути відтворене на голографічному дисплеї. Кожна точка голограми зберігає інформацію про амплітуду і фазу світла, що дозволяє відтворити реалістичне тривимірне зображення.

Tensor Holography розроблений для забезпечення максимальної швидкості обчислення та мінімізації обчислювальних витрат. Це дозволяє генерувати голограми майже в реальному часі. За рахунок використання спеціалізованих оптимізацій та паралельних обчислень модель може ефективно працювати навіть на пристроях з обмеженими ресурсами, таких як GPU.

Запропонований пайплайн використовує всі переваги сучасних методів глибокого навчання та комп'ютерної графіки:

- швидкість: завдяки використанню нейронних мереж, зокрема NeRF та Tensor Holography, цей підхід дозволяє генерувати голограми в режимі близькому до реального часу, що значно полегшує інтеграцію голограм у такі сфери, як віртуальна та доповнена реальність;

- якість: точність прогнозування глибини за допомогою MiDaS у поєднанні з можливостями NeRF щодо реконструкції 3D-сцени забезпечує реалістичну глибину і перспективу, що робить голограми дуже детальними і якісними;

- гнучкість: цей метод дозволяє працювати з широким спектром медіафайлів (зображення, відео) без необхідності створення попередніх 3D-моделей або фізичного обладнання для захоплення сцен.

Це дозволяє не тільки покращити якість тривимірних голограм, але й суттєво скоротити час на їх створення.

## 2.7 Опис та обґрунтування обраних інструментів

Основою для дослідження та розробки були дві наукові статті: “Neural Radiance Fields-based Holography” [6] та “Real-time intelligent 3D holographic photography for real-world scenarios” [11]. Ці роботи надали важливу теоретичну та практичну базу для створення голограм та оцінки методів їх формування. Ці роботи надали важливу теоретичну та практичну базу для створення голограм та оцінки методів їх формування.

Для генерації карт глибини у роботі використовується нейронна мережа MiDaS[9]. MiDaS обрано через її здатність генерувати високоякісні карти глибини для широкого спектра сцен та об’єктів. Цей інструмент забезпечує ефективну оцінку глибини зображень, що є ключовим етапом для подальшого формування голограм.

Основні переваги MiDaS:

- висока точність оцінки глибини;
- широка область застосування (реальні та синтетичні сцени);
- легка інтеграція з іншими методами глибинного навчання.

Нижче наведена порівняльна таблиця 2.1 моделей MiDaS на основі статті “MiDaS v3.1 - A Model Zoo for Robust Monocular Relative Depth Estimation”.

На основі порівняльного аналізу моделей MiDaS, було обрано дві моделі для використання у роботі: найточніша модель серед MiDaS v3.1 BEiT512-L та застарілу з попередньої версії DPT Large.

BEiT512-L базується на покращеній архітектурі Vision Transformer (ViT), відомій як BEiT (Bidirectional Encoder representation from Image Transformers). Модель використовує ієрархічний підхід до обробки зображень, що передбачає розділення на кілька рівнів із зменшенням роздільної здатності. BEiT512-L працює з роздільною здатністю 512x512, що забезпечує більш детальне відтворення структури сцени.

DPT Large, у свою чергу, є класичною моделлю Vision Transformer, яка базується на енкодер-декодерній архітектурі. Енкодер моделі витягує важливі

ознаки з вхідного зображення, а декодер використовує ці ознаки для формування карти глибини. Модель працює з роздільною здатністю 384x384 і має більшу кількість параметрів, що забезпечує стабільну роботу та якісні результати.

Таблиця 2.1 – Відмінності між моделями MiDaS

Модель	FPS	Переваги	Недоліки
BEiT512-L	5.7	Найточніша, високоякісна оцінка глибини	Низький FPS, вимагає багато ресурсів
BEiT384-L	13	Гарна точність, краще для менш потужних систем	Менш точна, ніж BEiT512-L
SwinV2-L	41	Баланс між швидкістю і точністю	Трохи нижча точність порівняно з BEiT512-L
SwinV2-B	39	Високий FPS	Менша точність порівняно з іншими моделями
LeViT-224	73	Найшвидша модель, підходить для мобільних	Низька точність
DPT Large	61	Добре підходить для задач генеративного AI	Стара архітектура, поступається новим моделям

Для створення голограм запропоновано використовувати модифіковані алгоритми фізичного моделювання хвильових явищ для створення голограм. Зокрема, використано підхід на основі згорткових нейронних мереж (Convolutional Neural Networks, CNN) та методу ASM (Angular Spectrum Method) [12]. Така комбінація забезпечить швидкість та точність, необхідні для створення голограм у реальному часі.

Метод ASM базується на аналізі поширення хвильового поля через його спектральне представлення. Спершу виконується перетворення Фур'є хвильового поля, потім додаються фазові множники для моделювання зміни

хвильового фронту в просторі, а після цього застосовується зворотне перетворення Фур'є для відновлення поля у новій площині.

Основні переваги методу ASM:

- висока точність моделювання хвильових явищ;
- підходить для задач як ближнього, так і дальнього поля;
- ефективність завдяки використанню швидкого перетворення Фур'є.

Комбінація методу ASM із згортковими нейронними мережами (CNN) забезпечує отримання голограм у реальному часі, що робить цей підхід придатним для практичних застосувань, таких як візуалізація та 3D-реконструкція.

## Висновки за розділом 2

В результаті аналізу обґрунтовано вибір інструментів та підходів для створення голограм. Використання нейронних мереж, таких як MiDaS для оцінки глибини, та технологій штучних нейронних мереж дозволяє досягти балансу між якістю, швидкістю та обчислювальною ефективністю. Об'єднання методу ASM зі згортковими нейронними мережами (CNN) дозволяє створювати голограми в реальному часі, що робить обраний підхід придатним для сучасних застосувань.

Таким чином, запропонований підхід забезпечує можливість ефективного вирішення поставлених задач, дозволяючи одночасно досягати високої точності та швидкості генерації голограм для інтерактивних систем.

## 3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

### 3.1 Програмні інструменти та середовище

Python був обраний як основна мова програмування завдяки його потужним бібліотекам (наприклад, NumPy, SciPy та Matplotlib), які підтримують математичне моделювання та візуалізацію. Простота використання Python дозволяє швидко інтегрувати математичні алгоритми та інструменти для візуалізації, що робить його ідеальним вибором для наукових досліджень та інженерних задач.

PyTorch було використано для реалізації та навчання нейронних мереж. Цей фреймворк забезпечує гнучке управління процесом навчання, оптимізації моделей та обробки великих наборів даних. Завдяки PyTorch можливо ефективно вирішувати задачі реконструкції зображень та працювати з великими масивами даних, що є критично важливим для голографії.

OpenCV є ключовим інструментом для комп'ютерного зору. Він дозволяє покращувати якість обробки зображень, зменшувати час виконання завдань та надає широкий спектр алгоритмів для обробки зображень. Інтеграція OpenCV з іншими бібліотеками Python підвищує продуктивність розробки та розширює можливості роботи з візуальними даними.

Для обчислень на графічних процесорах використовувалася платформа CUDA, яка дозволяє паралельно обробляти великі обсяги даних. Це є критичним для швидкої генерації та обробки голографічних зображень. CUDA забезпечує високу продуктивність алгоритмів, таких як FFT, на GPU, що значно прискорює виконання обчислень.

Visual Studio Code (VS Code) використовувався як основне середовище розробки завдяки його зручності, потужним інструментам для налагодження коду та підтримці розширень. Вбудовані функції, такі як IntelliSense, дозволяють ефективно працювати з кодом. Крім того, розширення для Python у VS Code надає повний спектр можливостей для написання, налагодження та

оптимізації програмного забезпечення, включаючи інтеграцію з PyTorch, OpenCV та іншими бібліотеками.

### 3.2 Архітектура та навчання системи

Пайплайн для генерації комп'ютерних голограм на рисунку 3.1 поєднує методи обробки вхідних даних, фізичного моделювання та глибокого навчання. Він забезпечує якісне та швидке формування голограм, що дозволяє здійснювати реалістичну 3D-реконструкцію сцен у реальному часі.

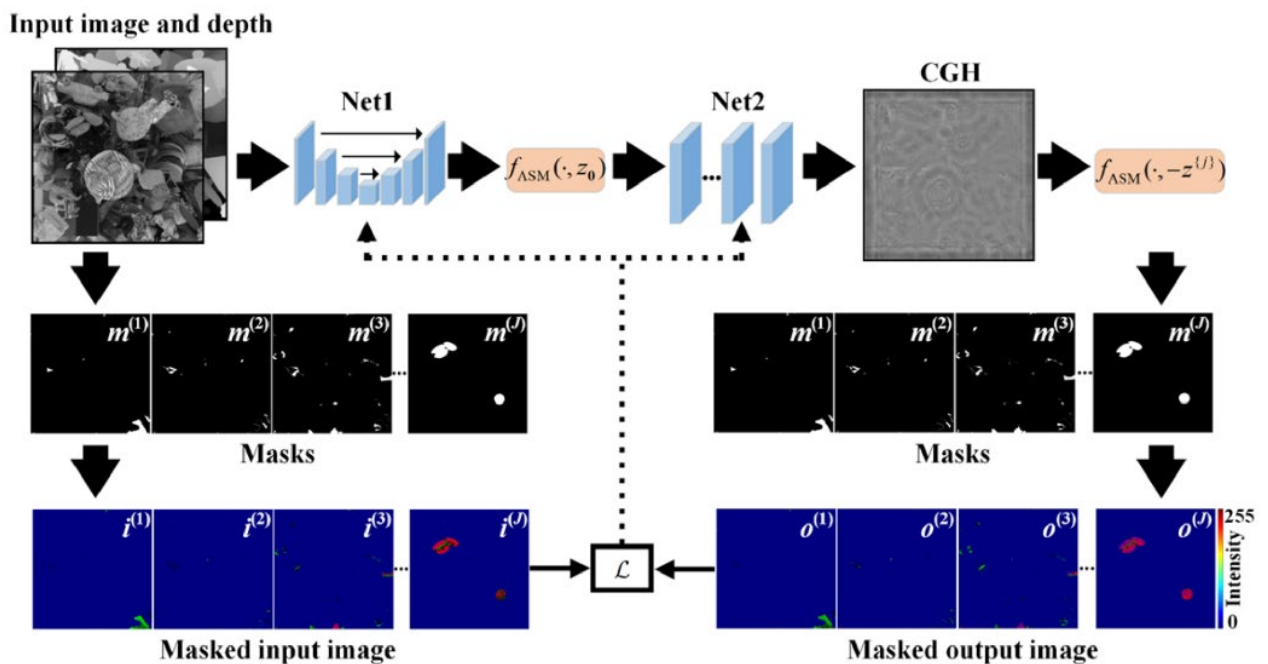


Рисунок 3.1 – Архітектура та навчання системи

На першому етапі система отримує RGB-зображення та карту глибини, що представляють інтенсивність та глибину сцени. Карта глибини слугує основою для поділу об'єкта на кілька шарів, кожен із яких обробляється незалежно.

Використовуючи інформацію про глибину, сцена розбивається на шари за допомогою масок. Кожна маска визначає область сцени, що відповідає певному

рівню глибини. На цьому етапі створюються "масковані" вхідні зображення, які передаються для подальшої обробки.

Масковані дані передаються до першої нейронної мережі (Net1), яка виконує перетворення вхідних карт інтенсивності та глибини у амплітудні та фазові поля. Ці поля описують хвильовий фронт, необхідний для подальшої реконструкції.

На наступному етапі використовується спектральний метод кута (ASM), який забезпечує моделювання поширення світлового пучка. ASM застосовується для обчислення дифракційних властивостей хвильового фронту, що дозволяє врахувати фізичні ефекти під час генерації голограми.

Отримані дані передаються до другої нейронної мережі (Net2), яка відповідає за генерацію фінальної комп'ютерної голограми. Ця мережа оптимізує структуру голограми, щоб забезпечити якісну 3D-реконструкцію.

CGH використовується для створення реконструйованого зображення, що представляє 3D-сцену. Вихідні зображення для кожного шару порівнюються з маскованими вхідними зображеннями для оцінки якості реконструкції.

Для покращення точності використовується функція втрат  $L$ , яка порівнює масковані вхідні та вихідні зображення. Це дозволяє ефективно оновлювати параметри обох нейронних мереж під час навчання.

На виході система генерує високоякісну комп'ютерну голограму, яка забезпечує реалістичну 3D-реконструкцію сцени. Такий підхід може бути використаний для візуалізації складних об'єктів у реальному часі.

### 3.3 Створення голограм

Для генерації комп'ютерної голограми із використанням карти глибини, отриманої за допомогою моделі MiDaS, застосовується поетапний алгоритм, який поєднує методи оцінки глибини, нейронні мережі та фізичне моделювання. Нижче наведено опис ключових етапів цього процесу.

На першому етапі алгоритм приймає на вхід RGB-зображення сцени, яке відображає інтенсивність об'єкта. Для отримання додаткової інформації про глибину сцени застосовується модель MiDaS, яка забезпечує оцінку глибини кожного пікселя зображення. MiDaS демонструє високу точність у створенні карти глибини для широкого спектра зображень, незалежно від їх походження чи змісту. Це досягається завдяки попередньому навчанні моделі на різноманітних наборах даних із різними масштабами та умовами зйомки.

Модель MiDaS обробляє вхідне зображення та створює карту глибини сцени. Ця карта відображає відстань до кожного пікселя, що дозволяє розрізнити об'єкти за їхньою віддаленістю від спостерігача. За необхідності карта глибини масштабуються до фізичних одиниць, що відповідають реальним значенням глибини.

На вхід першої нейронної мережі (Net1) подається поєднання карти інтенсивності та карти глибини, представлене у вигляді тензора розміру  $1 \times 2 \times H \times W$ . Net1 виконує перетворення вхідних даних і генерує амплітудні та фазові поля, які описують хвильовий фронт для кожного шару сцени.

Для обчислення розповсюдження світлових хвиль використовується спектральний метод кута (ASM). Цей метод моделює фізичні процеси дифракції світла, що дозволяє визначити взаємодію між хвильовим фронтом і голографічною площиною. Кожен шар обробляється окремо, враховуючи його амплітуду та фазу.

Амплітудні та фазові поля, отримані після обробки ASM, передаються на вхід другої нейронної мережі (Net2). Net2 поєднує інформацію з усіх шарів і формує фінальну комп'ютерну голограму, яка є інтегральним представленням 3D-сцени.

Узагальнення алгоритму:

а) отримати карту інтенсивності та карту глибини з RGB-зображення за допомогою MiDaS;

б) використати Net1 для генерації амплітудних і фазових полів для кожного шару;

- в) обробити дані ASM для моделювання поширення хвильового фронту;
- г) скомбінувати інформацію з усіх шарів за допомогою Net2 та сформувати CGH.

### 3.4 Опис програми

Система для побудови цифрових голограм складається з кількох основних компонентів, кожен із яких виконує ключову роль у процесі створення високоякісних зображень.

RealTimeHolo – головний модуль системи, що забезпечує генерацію голограм у режимі реального часу. Він використовує функціонал модулів NET1, CNN та propagation\_ASM. Метод forward (рис. 3.2) у RealTimeHolo відповідає за інтеграцію модулів для обробки вхідних даних та створення голографічного зображення.

```
def forward(self, source, ikk):

    target_amp, target_phase = self.network1(source)
    obj_r, obj_i = polar_to_rect(target_amp, target_phase)
    target_field = torch.complex(obj_r, obj_i)

    slm_field = propagation_ASM(target_field, self.feature_size,
                               self.wavelength, self.z, precomped_H=self.precomputed_H)

    slm_amp, slm_phase = rect_to_polar(slm_field.real, slm_field.imag)
    slm_field = torch.cat([slm_amp, slm_phase], dim=-3)

    holo = self.network2(slm_field)

    if self.mode == 'train':
        H_real, H_imag = polar_to_rect(torch.ones(holo.shape).cuda(), holo)
        holo_field = torch.complex(H_real, H_imag)

        distance = (0-self.distance_range)/self.layers_num*ikk
        dis = distance - self.img_distance
        if isinstance(dis,torch.Tensor):
            dis = dis.item()
            dis = round(dis, 6)

        if isinstance(ikk,torch.Tensor):
            ikk = ikk.item()

        recon_field = propagation_ASM(holo_field, self.feature_size,
                                     self.wavelength, dis, precomped_H=self.pre_kernel[ikk])
    else:
        recon_field = 0

    return holo, slm_amp, recon_field
```

Рисунок 3.2 – Метод forward

Цей метод реалізує наступні етапи:

- а) прийом вхідного зображення;
- б) використання NET1 (network1) для виділення ключових ознак із зображення;
- в) застосування Propagation\_ASM для розрахунку поширення хвильового фронту;
- г) генерація остаточного голографічного зображення для виводу, який використовує функціонал модулю CNN (network2).

NET1 – це базова згорткова нейронна мережа, розроблена для попередньої обробки вхідних зображень перед їх голографічною реконструкцією. Мережа NET1 відповідає за обчислення амплітуди та фази зображення, використовуючи комбінацію амплітудного зображення і карти глибини. Ця мережа працює як перший етап аналізу, який забезпечує підготовку даних для наступних етапів.

Propagation\_ASM – це програмний модуль, що реалізує метод Angular Spectrum Method (ASM) для розрахунку поширення хвильового фронту. Даний метод є важливим для точного та швидкого моделювання процесу поширення світла у просторі.

CNN (network2) – це глибока згорткова нейронна мережа. Ця мережа обробляє отримані амплітуду та фазу, забезпечуючи побудову цифрової голограми.

Метод CGH() у файлі predict\_video\_holo.py відповідає за автоматизацію процесу створення голограм із відеопотоку. Його основними етапами є:

- а) кожен кадр витягується з відеопотоку для подальшої обробки;
- б) генерація карти глибини сцени (depth map), використовуючи моделі MiDaS, щоб отримати тривимірну інформацію про сцену;
- в) перетворення амплітуди та карти глибини у формат, придатний для розрахунку голограми;
- г) використання моделі RealTimeHolo, яка реалізує методи комп'ютерної генерації голограм, яка бере об'єднані дані як вхід та обчислює фазовий розподіл голограми.

### Висновки за розділом 3

У третьому розділі було розроблено та описано систему для створення цифрових голограм із використанням сучасних інструментів програмування, нейронних мереж і фізичних методів моделювання. Python з його потужними бібліотеками було обрано як основну платформу розробки, що забезпечило інтеграцію різноманітних математичних і візуалізаційних алгоритмів. PyTorch дозволив створити гнучкі моделі для глибокого навчання, а OpenCV забезпечив ефективну обробку візуальних даних.

Архітектура системи, що включає моделі MiDaS для оцінки глибини, нейронні мережі Net1 та Net2, а також метод спектрального кута (ASM), дозволила досягти високої точності та швидкості генерації голограм. Завдяки використанню CUDA було значно підвищено продуктивність обчислень, що є критичним для роботи в реальному часі.

Реалізована система продемонструвала ефективність у створенні комп'ютерних голограм як для статичних, так і для динамічних сцен (відео). Методологія побудови включає всі ключові етапи: від обробки вхідних RGB-зображень до генерації фазових розподілів та їх візуалізації. Результати роботи підтвердили можливість використання системи для реалістичної 3D-реконструкції сцен у реальному часі, що відкриває перспективи для її застосування у візуалізації, медичних дослідженнях та інших галузях.

## 4 РЕЗУЛЬТАТИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ АНАЛІЗ

### 4.1 Результати роботи та порівняльний експеримент

У рамках цієї роботи не передбачалося самостійне навчання моделі для генерації голограм. Замість цього використовувалися попередньо навчені ваги, надані авторами моделі зі статті “Real-time intelligent 3D holographic photography for real-world scenarios” [11]. Ці ваги були отримані в результаті навчання на спеціалізованому датасеті MIT-CGH-4, що забезпечує високу якість генерації голограм завдяки використанню багатой і збалансованої вибірки тривимірних об’єктів.

Використання готових ваг дозволило уникнути витрат часу та ресурсів на навчання моделі, зосередивши увагу на ключових аспектах дослідження: інтеграції моделі в систему генерації голограм, оптимізації обчислювальних процесів та оцінці ефективності застосування моделі в реальних сценаріях.

Було проведено аналіз продуктивності та точності моделей MiDaS v3.1 BEiT512-L (512x512) та DPT Large (384x512) у системі генерації CGH. Для оцінки ефективності використовувалася стандартна камера з роздільною здатністю 480x640, тоді як для моделі RealTimeHolo використовувалися зображення з підвищеною роздільною здатністю 1024x1024. Цей підхід дозволив встановити вплив різниці у роздільній здатності на результати генерації, особливо в контексті створення високоякісних голограм для реального застосування.

На рис. 4.1 наведено порівняння результатів обробки з використанням моделі MiDaS v3.1 BEiT512-L. Зображено оригінальний кадр, амплітуду, глибину та отриману голограму. Амплітуда демонструє розподіл інтенсивності сигналу, глибина – просторові властивості сцени, а голограма – кінцевий результат обробки, який може бути використаний для відтворення тривимірного зображення.

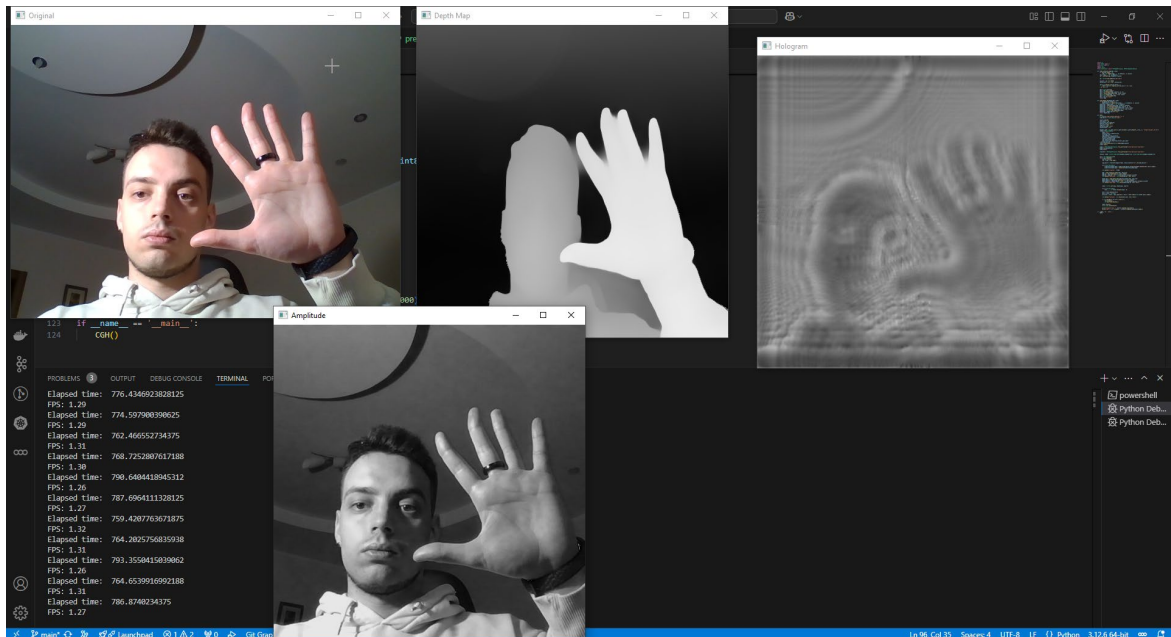


Рисунок 4.1 – CGH з використанням VEiT512-L

Середній час обробки одного кадру з використанням VEiT512-L становив 760 мс, що відповідає продуктивності 1.30 FPS. Модель значно повільніша, що підтверджується даними про час виконання (рис. 4.2), але точніша, що можна побачити на картах глибини та голограмі.

```

Elapsed time: 767.1588134765625
FPS: 1.30
Elapsed time: 749.5521850585938
FPS: 1.33
Elapsed time: 758.7221069335938
FPS: 1.32
Elapsed time: 775.0808715820312
FPS: 1.29
Elapsed time: 761.2326049804688
FPS: 1.31
Elapsed time: 759.792724609375
FPS: 1.32
Elapsed time: 761.87890625
FPS: 1.31
Elapsed time: 757.6807250976562
FPS: 1.32
Elapsed time: 764.184326171875
FPS: 1.31

```

Рисунок 4.2 – Показники з використанням VEiT512-L

На рис. 4.3 зображено кадри обробки на основі DPT Large – оригінал, амплітуда, глибина та голограма.

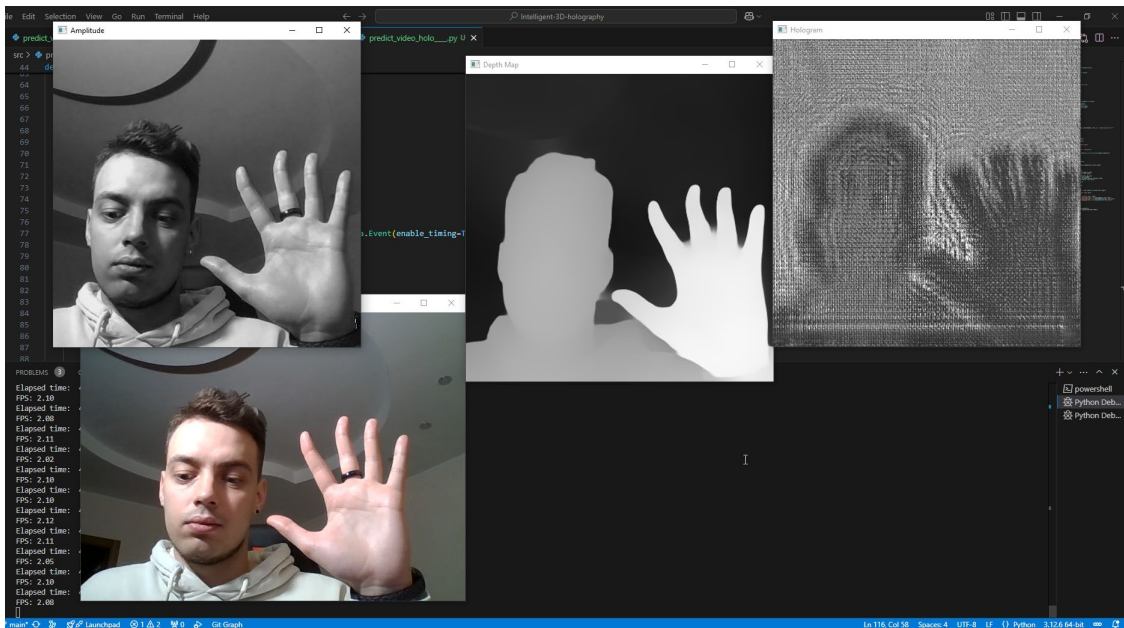


Рисунок 4.3 – CGH з використанням DPT Large

Середній час обробки одного кадру з використання DPT Large становив 475 мс, що відповідає продуктивності 2.10 FPS. Модель продемонструвала більшу швидкість роботи, що підтверджується даними про час виконання (рис. 4.4), але карти глибини мають нижчу деталізацію, межі об'єктів розмиті, а дрібні елементи сцени втрачаються.

```
Elapsed time: 475.45245361328125
FPS: 2.10
Elapsed time: 474.43267822265625
FPS: 2.11
Elapsed time: 473.239013671875
FPS: 2.11
Elapsed time: 477.9471740722656
FPS: 2.09
Elapsed time: 472.68182373046875
FPS: 2.12
Elapsed time: 471.17279052734375
FPS: 2.12
Elapsed time: 472.43707275390625
FPS: 2.12
Elapsed time: 539.4386596679688
FPS: 1.85
Elapsed time: 475.74700927734375
FPS: 2.10
```

Рисунок 4.4 – Показники з використанням DPT Large

## Висновки за розділом 4

Порівняльний аналіз показав, що MiDaS v3.1 BEiT512-L забезпечує більш стабільні результати в контексті точності глибини та загальної якості голограми, тоді як DPT Large досягає трохи вищої швидкості обробки, але з незначною втратою деталізації в складних сценах. У середньому, використання MiDaS v3.1 BEiT512-L дозволило досягти покращення якості голограм у порівнянні з моделлю DPT Large.

Окрім технічних аспектів, дослідження також виявило вплив роздільної здатності вхідних зображень на кінцевий результат. При збільшенні роздільної здатності до 1024x1024 у моделі RealTimeHo10 спостерігалось значне покращення дрібних деталей, особливо у сценах з великою кількістю текстурованих об'єктів.

Таким чином, результати експерименту підтвердили доцільність використання моделі MiDaS v3.1 BEiT512-L у системах генерації голограм для реального часу, особливо у випадках, де якість зображення є ключовою вимогою.

## ВИСНОВКИ

У даній роботі реалізовано математичні моделі та методи комп'ютерного обчислення голограм, які відповідають сучасному рівню розвитку науки і техніки. Проведено детальний аналіз сучасних підходів до генерації комп'ютерно генерованих голограм, включаючи хвильові методи, методи трасування променів і підходи на основі глибокого навчання. Розроблений вдосконалений метод дозволяє досягти високої якості тривимірної реконструкції при збереженні швидкості обчислень. Експериментальна перевірка підтвердила ефективність запропонованих підходів, що забезпечує їхню продуктивність у реальному часі.

Реалізована програмна система демонструє можливість застосування в інтерактивних додатках, таких як віртуальна та доповнена реальність, медична візуалізація, 3D-друк і освіта. Її продуктивність та точність відкривають перспективи для інтеграції технології у промислові процеси та наукові дослідження. Соціально-економічна значущість роботи полягає в зменшенні витрат ресурсів та часу на обчислення, що сприяє широкому впровадженню комп'ютерної голографії в різні сфери.

Запропоновані методи вдосконалюють сучасні технології візуалізації, сприяючи прогресу в комп'ютерному зорі та 3D-реконструкції. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на використання вдосконаленого пайплайну з такими технологіями, як COLMAP та NeRF, що дозволить ще більше підвищити точність та якість генерації голограм. З цього приводу подальше бачення роботи було опубліковано у збірці тез [1], що відображає перспективність і важливість обраного напрямку досліджень. Отримані результати підтверджують актуальність і перспективність роботи, забезпечуючи міцну основу для подальшого розвитку комп'ютерної голографії.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Bezrodnyi V., Yesilevskiy V. Modern methods for computer-generated holograms. *Information Technology and Implementation (Satellite): Conference Proceedings, November 21, 2024, Kyiv, Ukraine* / Ministry of Education and Science of Ukraine, Taras Shevchenko National University of Kyiv and [etc]; Vitaliy Snytyuk (Editor). –Kyiv: Publishing House «Caravela», 2024. 275 p.
2. DeVelis J. B., Reynolds G. O. Theory and Applications of Holography. – New York: *Academic Press*, 1976. 196 p.
3. Progress of the Computer-Generated Holography Based on Deep Learning / Y. Zhang, M. Zhang, K. Liu [et al.]. *Applied Sciences*, 2022. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/17/8568> (дата звернення: 20.10.2024).
4. Resolution Enhancement of Spherical Wave-Based Holographic Stereogram with Large Depth Range / Z. Wang, G. Lv, M. Xu [et al.]. *Applied Sciences*, URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/12/5595> (дата звернення: 05.11.2024).
5. Ichikawa T., Yoneyama T., Sakamoto Y. CGH Calculation with the Ray Tracing Method for the Fourier Transform Optical System. *Optics Express*. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.21.032019> (дата звернення: 05.11.2024).
6. Neural Radiance Fields-based Holography [Invited] / M. Kang, F. Wang, K. Kumanov [et al.]. URL: <https://arxiv.org/pdf/2403.01137> (дата звернення: 20.10.2024).
7. Schönberger J.L., Frahm J.M. Structure-from-Motion Revisited. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2016. URL: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_cvpr\\_2016/papers/Schonberger\\_Structure-From-Motion\\_Revisited\\_CVPR\\_2016\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2016/papers/Schonberger_Structure-From-Motion_Revisited_CVPR_2016_paper.pdf) (дата звернення: 25.10.2024).
8. NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis / B. Mildenhall, P. Srinivasan, M. Tancik [et al.]. 2020. URL: <https://arxiv.org/pdf/2003.08934> (дата звернення: 26.10.2024).

9. Birkl R., Wofk D., Müller M. MiDaS v3.1 – A Model Zoo for Robust Monocular Relative Depth Estimation. URL: <https://arxiv.org/pdf/2307.14460> (дата звернення: 28.10.2024).

1.1 10. Tensor Holography: Towards Real-time Photorealistic 3D Holography with Deep Neural Networks. *GH Research at MIT CSAIL. Center for Computational Holography* / L. Shi, L. Beichen, Ch. Kim [et al.]. URL: <https://cgh.csail.mit.edu/> (дата звернення: 29.10.2024).

11. Real-time intelligent 3D holographic photography for real-world scenarios / Song X., Dong J., Liu M [et al.]. URL: <https://doi.org/10.1364/OE.529107> (дата звернення: 20.12.2024).

12. Neural Holography with Camera-in-the-loop Training. ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Asia) / Peng Y., Choi S., Padmanaban N. [et al.]. 2020. URL: [https://www.computationalimaging.org/wp-content/uploads/2020/08/NeuralHolography\\_SIGAsia2020.pdf](https://www.computationalimaging.org/wp-content/uploads/2020/08/NeuralHolography_SIGAsia2020.pdf) (дата звернення: 26.12.2024).