

Объемная голограмма

Лузгина А.А.*

Столы, отчисленных соседей, ванная комната и ноутбук фирмы "Maxwell equations"

(Дата: 1 июня 2025 г.)

Работа представляет комплексное исследование голографии, сочетающее экспериментальную часть и программное моделирование. В экспериментальной части реализована запись голограмм по методу Денисюка с использованием пластин ПФГ-03М и лазерного источника. Разработана программная модель записи и восстановления голограмм Габора на основе численного моделирования интерференции и дифракции. Для точечных источников продемонстрирована корректная симуляция интерференционных паттернов и параллакса при смене ракурса. Выявлены проблемы при моделировании объёмных объектов, связанные с расчётом фаз, и предложены пути решения через декомпозицию на точечные источники. Экспериментально установлены оптимальные условия записи и выявлены ключевые факторы, влияющие на качество голограмм: вибрации, когерентность излучения и параметры экспозиции.

I. Введение

Голография — метод записи и воспроизведения трёхмерных изображений, основанный на интерференции когерентных волн. В отличие от традиционной фотографии, фиксирующей только интенсивность света, голография сохраняет информацию о фазе волны, что позволяет восстанавливать полное трёхмерное изображение объекта.

Данная работа сочетает экспериментальные исследования и компьютерное моделирование:

1. **Экспериментальная часть** посвящена записи голограмм по методу Денисюка с использованием:

- Голографических пластин ПФГ-03М (5000 штр/мм)
- Лазерного источника (длина волны 532 нм)
- Специализированных химических реактивов (проявитель OD1, фиксаж)

2. **Программное моделирование** реализует:

- Расчёт интерференционных картин для произвольных объектов
- Восстановление изображения методом БПФ
- Визуализацию с учётом положения наблюдателя

II. Цели и задачи

Основные цели исследования:

1. Реализовать экспериментальную запись голограмм объёмных объектов
2. Разработать точную модель симуляции голограмм Габора
3. Установить критические параметры, влияющие на качество записи

Конкретные задачи:

1. *Экспериментальные:*

- Оптимизировать схему установки для минимизации вибраций
- Определить оптимальное время экспозиции (10-20 сек)
- Проверить влияние фона и расстояний на качество записи
- Проанализировать причины неудачных попыток записи

2. *Вычислительные:*

- Реализовать генерацию геометрии объектов (сетка точек)
- Разработать модуль расчёта интерференционных картин
- Визуализировать результат с параллаксом при изменении ракурса

3. *Аналитические:*

- Сравнить качество записи при разных схемах освещения
- Выявить ограничения модели для объёмных объектов
- Предложить улучшения для симуляции сложных сцен

* luzgina.aa@phystech.edu;
<https://old.mipt.ru/education/chair/physics/laboratory-praktikum/>

III. Введение

Голография — это метод записи и воспроизведения трёхмерных изображений объектов. В отличие от традиционных методов получения изображений, которые фиксируют только интенсивность света, голография позволяет записывать как амплитуду, так и фазу световой волны, что делает возможным восстановление полного трёхмерного изображения объекта.

Проект "Симуляция голограммы" направлен на создание программной модели, которая позволяет:

1. Рассчитывать запись голограммы в зависимости от заданной геометрии объекта.
2. Визуализировать восстановленное изображение с учётом положения наблюдателя.

IV. Теоретическая справка

IV.1. Физические принципы

Голография основана на интерференции когерентных волн. Предметная волна $\mathbf{E}_o(\mathbf{r}) = A_o(\mathbf{r})e^{i\varphi_o(\mathbf{r})}$, рассеянная объектом, интерферирует с опорной волной $\mathbf{E}_r(\mathbf{r}) = A_r e^{i\mathbf{k}_r \cdot \mathbf{r}}$. Интенсивность в плоскости голограммы:

$$I(\mathbf{r}) = |\mathbf{E}_o + \mathbf{E}_r|^2 = |\mathbf{E}_o|^2 + |\mathbf{E}_r|^2 + 2A_o A_r \cos(\Delta\phi(\mathbf{r})) \quad (1)$$

где $\Delta\phi(\mathbf{r}) = \varphi_o(\mathbf{r}) - \mathbf{k}_r \cdot \mathbf{r}$. Амплитудный коэффициент пропускания голограммы $t(\mathbf{r}) \propto I(\mathbf{r})$.

IV.2. Восстановление изображения

При освещении голограммы восстанавливающей волной $\mathbf{E}_c(\mathbf{r})$, идентичной опорной ($\mathbf{E}_c = \mathbf{E}_r$), возникают дифрагированные волны:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{вых}} &= t(\mathbf{r})\mathbf{E}_r \\ &\propto \underbrace{(|\mathbf{E}_o|^2 + |\mathbf{E}_r|^2)\mathbf{E}_r}_{\text{нулевой порядок}} \\ &+ \underbrace{A_r^2 \mathbf{E}_o}_{\text{мнимое изображение}} \\ &+ \underbrace{\mathbf{E}_r^2 \mathbf{E}_o^*}_{\text{действительное изображение}} \end{aligned} \quad (2)$$

Мнимое изображение воспроизводит исходное положение объекта, действительное — сопряжённое.

IV.3. Голограмма точечного источника (Габор)

Для точечного источника на расстоянии L (рис. 1):

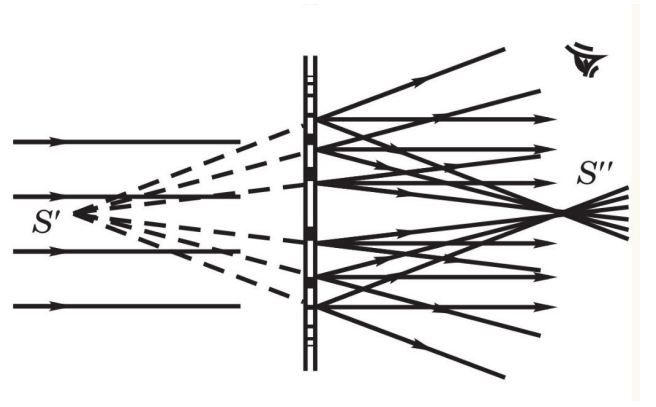


Рис. 1. Голограмма точечного источника

$$\begin{aligned} \Delta\phi(x) &= k \left(\sqrt{L^2 + x^2} - L \right) \approx \frac{kx^2}{2L} \\ t(x) &\propto 1 + \cos\left(\frac{kx^2}{2L}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

При восстановлении плоской волной:

- **Мнимое изображение:** на расстоянии L за голограммой ($z' = -L$)
- **Действительное изображение:** на расстоянии L перед голограммой ($z'' = L$)

При наклонной опорной волне ($\theta \neq 0$):

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_r &= (k \sin \theta, 0, k \cos \theta) \Rightarrow \\ \text{Смещение изображений: } \Delta x &= \pm L \sin \theta \end{aligned} \quad (4)$$

IV.4. Метод Денисюка (объёмные голограммы)

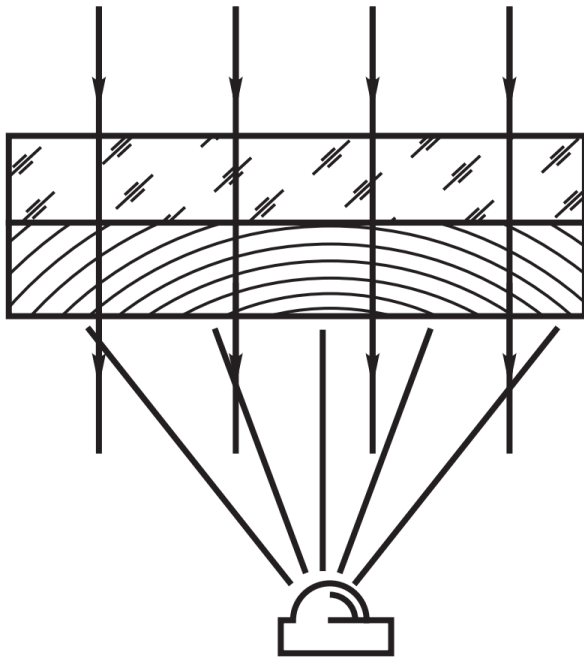


Рис. 2. Схема Денисюка

Опорная и предметная волны распространяются встречно (рис. 2). Интерференция создаёт объёмную решётку с периодом:

$$d = \frac{\lambda}{2n} \quad (n - \text{показатель преломления}) \quad (5)$$

Условие Брэгга для восстановления:

$$2d \sin \alpha = \lambda_{\text{восст}} \quad (6)$$

Особенности:

- Восстанавливается только мнимое изображение
- Селективность по длине волны: $\lambda_{\text{восст}} \approx \lambda_{\text{записи}}$
- Возможно восстановление в белом свете

Разрешающая способность и размер голограммы

Минимальный размер голограммы, использующий разрешение фотоэмульсии (n [лин/мм]):

$$a_{\min} = n\lambda L \quad (7)$$

где L – расстояние до объекта. Размер изображения точки:

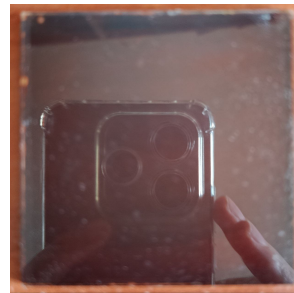
$$b \approx \frac{\lambda}{\sin u}, \quad \sin u = \frac{a}{2L} \quad (8)$$

Требования к эмульсии:

- Разрешение > 3000 лин/мм (для $\theta \sim 20^\circ$: $d \approx 2$ мкм)
- Линейная характеристика почернения

V. Экспериментальная методика

Использованное оборудование: Проявитель OD1, тиосульфатный фотографический закрепитель (фиксаж), голографическая пластинка ПФГ-03М (5000 шт./мм) (3(a)), установка для записи голограммы (3(b), 3(c)), лазерный модуль, безопасный свет (зеленный светодиод). **Создание голограммы:**



(a) пластинка



(b) конструкция, вид сбоку



(c) конструкция, вид сверху

Рис. 3. Инструменты использованные в работе

1. *Подготовка реактивов.* Для записи голограммы нужно подготовить проявитель и фиксаж. Проявитель нужно смешать в одной из кювет с фильтрованной водой в отношении 1 к 3 (40 мл и 120 мл). Фиксаж просто налить в кювету. Также надо подготовить порядка литра чистой фильтрованной воды, для промывки голограммы. Вся использованная вода должна быть порядка 20 градусов цельсия.
2. *Подготовка установки.* Для уменьшения вибраций, которые ухудшают записанную интерференцию,

ренционную картину, было:

- (а) Найдено тихое место (при этом было проверено, что в это время на улице не будет никаких сильных шумов).
- (б) Пластинка и лазер установлены на тяжелую подставку, которая стоит на 4-х губках, которые гасят вибрации.

Также при выборе места записи, важно отсутствие внешнего света, которое засветит пластину.

3. Запись голограммы. (Все эти действия проводятся в полной темноте.)

После разогрева лазера (примерно 5-10 минут), он освещает пластину на протяжении 10 секунд, после чего отключается (пример освещения голограммы лазером представлен на фото 4). Далее пластина помещается на 7 минут в проявитель. На протяжении всего этого времени кювета аккуратно покачивается, для лучшей проявки. После чего пластинка помещается на 2 минуты в фиксаж.

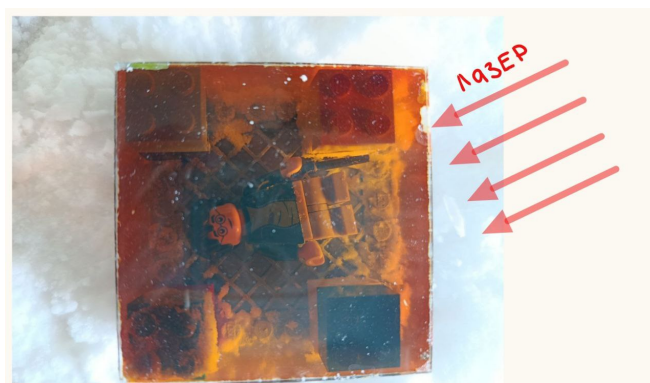
(Далее действия можно проводить при свете.) На протяжении нескольких минут пластинка промывается холодной водой (лучше всего заранее подготовленной фильтрованной). Далее пластина сушится. Для того, чтобы на ней налипло меньше пыли в процессе сушки, лучше всего ее чем-то накрыть (полотенцем). После высыхания при свете фонарика должна быть видна голограмма.



Рис. 4. Пример записи голограммы

VI. Результаты

Было опробовано три метода записи, которые отличаются расстановкой предмета и пластинки относительно лазера (VI).



(а) Пластинка находится над объектом, эмульсией к нему.



(б) Пластинка находится перед объектом, эмульсией к нему.



(с) Пластина находится рядом с объектом, повернута эмульсией к фигурке и лазеру.

Рис. 5. Расположения предмета и пластинки относительно лазера.

Получилось что-то записать только первым способом.

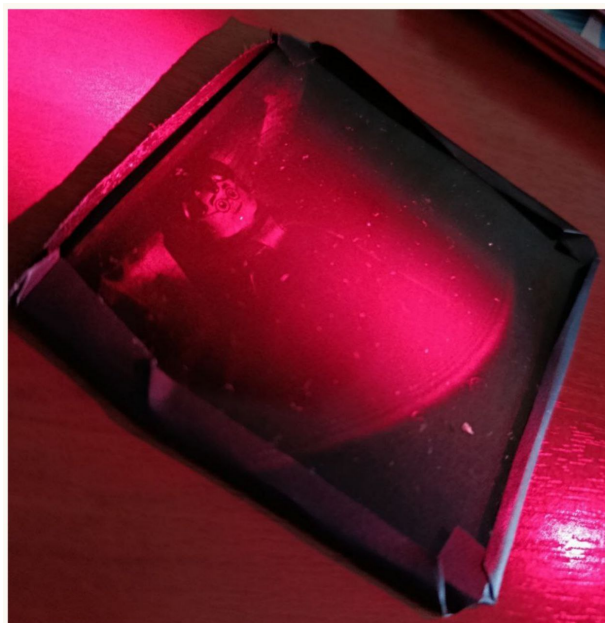
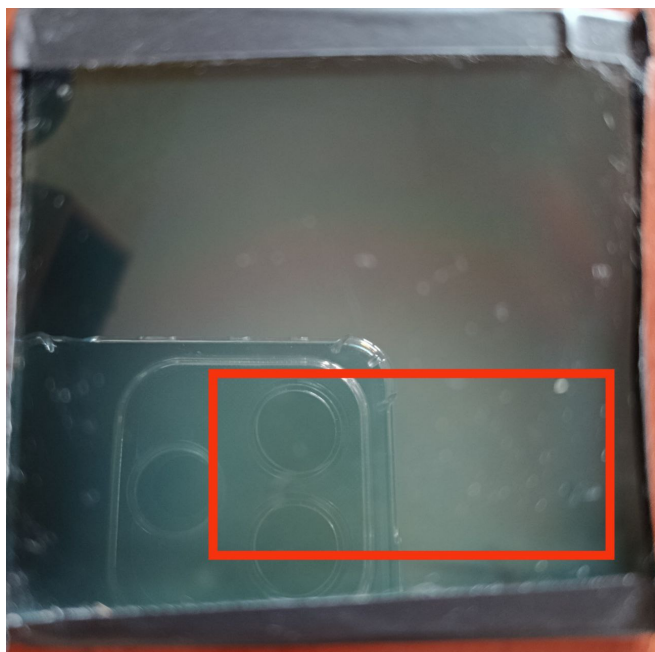


Рис. 6. Записанная голограмма.

В процессе работы было выдвинуто несколько пред-

положений, почему не получалось записать голограмму:

1. Лазер засвечивал пластину, поэтому он был передвинут подальше. Из-за этого времени в 10 секунд для записи стало не хватать, поэтому было попробовано несколько вариантов, первый из которых в 20 секунд представлен на фото, на нем видно, что пластина снова засвечена.



(а) Расположение объектов как на фото 3(б). Время экспозиции 10 секунд.



(b) Расстояние между пластиной и лазером увеличено в два раза. Время экспозиции 10 секунд.



(с) Расстояние между пластиной и лазером увеличено в два раза. Время экспозиции 20 секунд.

Рис. 7. Расположения предмета и пластинки относительно лазера.

2. Не хватает яркости отраженного света. Для этого была проведена запись без экрана (как на фото. 5(б)), с полностью закрытым задним фоном (8), с белым и черным задним фоном (как на фото 3(б)).



Рис. 8. Задний фон со всех сторон закрыт белой бумагой.

3. Ещё одним предположением, почему не удавалось записать голограмму был радиус когерентности. А именно для этого лазера по заявлению продавца он является порядка 15-20 см, таким образом было уменьшено расстояние между объектом и пластиной, чтобы для всех точек выполнялось это условие.
4. Для минимизации вибраций из вне, все записи проводились в середине ночи, когда не ходят электрички, а также по трубам не течет воды.

VII. Описание реализации симуляции

VII.1. Архитектура проекта

Проект состоит из нескольких модулей, каждый из которых отвечает за определённую часть симуляции:

- **Генерация геометрии объекта:** Модуль 'geometry' отвечает за задание формы объекта, разбиение его поверхности на сетку точек и проверку корректности геометрии.
- **Запись голограммы:** Модуль 'hologram_prep' рассчитывает интерференционную картину, создаваемую объектным и опорным пучками, и сохраняет её в виде матрицы интенсивностей.
- **Восстановление изображения:** Модуль 'calculate_visible_field' позволяет восстанавливать видимое изображение объекта с учётом положения наблюдателя.

- **Визуализация:** Используется библиотека OpenGL для отображения восстановленного изображения.

VII.2. Этапы работы

1. Генерация геометрии объекта

Объект задаётся в виде набора поверхностей, каждая из которых представлена четырьмя вершинами:

$$\text{vertexes} = \{\{P_1, P_2, P_3, P_4\}, \dots\},$$

где $P_i = (x, y, z)$.

Пример генерации объекта — плоского квадрата:

cpp

```
std::vector<std::vector<Point>> vertexes = {
{ {0, 0, 0}, {1, 0, 0}, {0, 1, 0}, {1, 1, 0} }
};
obj_geometry geometry(1e-6, {100, 100},
vertexes);
geometry.calculate_points();
```

2. Запись голограммы

Запись голограммы моделируется путём расчёта интерференционной картины.

```
std::string name_from = "file_with_geometry";
std::string name_to =
"file_where_to_save_intensity.txt";
double width = 10.0;
double height = 10.0;
double scale = 1e-6;
std::vector<unsigned int> np = {1024, 1024};
obj_plate plate(scale, np, width, height);
plate.readDataFromFile(name_from);
plate.calculate_intensity_matrix();
plate.saveIntensityToFile(name_to);
```

3. Восстановление изображения

Восстановление голограммы выполняется методом быстрого преобразования Фурье (FFT). Использовалась библиотека 'fftw3'.

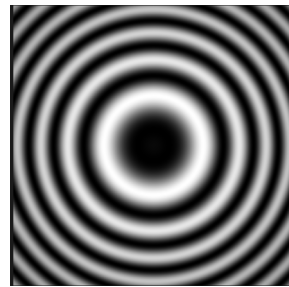
- **FFT** позволяет выделить пучок +1 порядка, содержащий информацию об объекте.
- Результат восстанавливается в виде матрицы интенсивностей, которая затем отображается.

Пример восстановленного изображения:

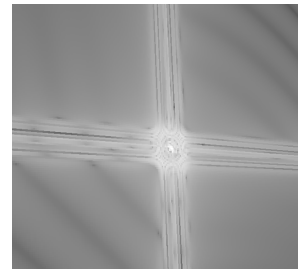
```
std::string name_from = "file_with_intensity";
v_plate = obj_visible_plate(1e-6);
v_plate.read_intensity_matrix(name_from);
...
while(...){ //main loop
...
v_plate.update_visible_matrix(cameraPos.x,
cameraPos.y, cameraPos.z);
...
}
```

VII.3. Результаты моделирования

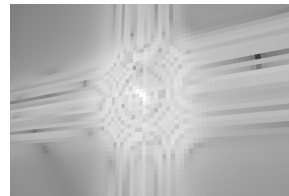
(Получилось мало чего, но мы честно пытались, а еще мысли что делать дальше)



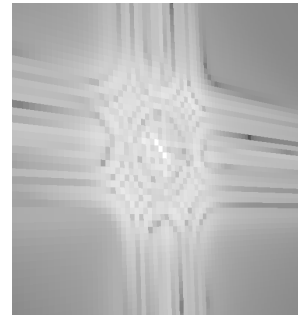
(a) интерференционная картина для точечного источника



(b)



(c)



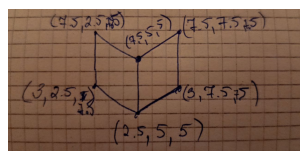
(d)

Рис. 9. Интерференционная картина, которая бы была на transpareнте и изображение точечной голограммы с разных ракурсов (можно заметить, что немного картины интенсивностей, который бы видел человеческий глаз меняются)

VIII. Обсуждение результатов

При записи голограммы, получилось что-то записать и потом это увидеть только один раз. Есть несколько вариантов почему мало что получилось:

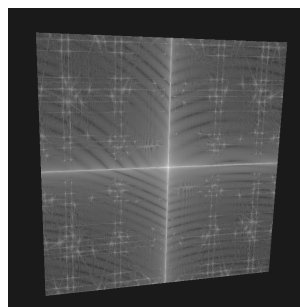
1. Пластины плохого качества (они были заказные);



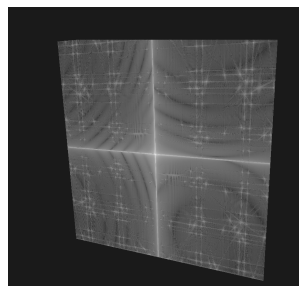
(a) геометрия, рассчитанная в этом варианте



(b) интерференционная картина для точечного источника



(c)



(d)

Рис. 10. Геометрия, интерференционная картина, которая бы была на транспаранте и изображение объемной голограммы с разных ракурсов (можно заметить, что немного картины интенсивностей, который бы видел человеческий глаз меняются)

2. Лазер в процессе работы ломался, поэтому его приходилось чинить (возможно светить он начал, но уже не с теми характеристиками);
3. Возникали шумы (вибрации), не учтенные при работе;
4. Некачественные реактивы.

При моделировании так же возникло много проблем, вот некоторые предположения почему так вышло:

1. Где-то появилась ошибка в задании фазы;
2. Не так подобрана нормировка рассчитанных значений.

IX. Итоги и выводы

1. Записана голограмма объемного источника;
2. Выявлен ряд причин, почему не получалось записать голограмму;
3. Реализована программная модель записи и восстановления голограммы.

X. Ссылки на литературу

1. Hecht, E. **Optics**, Fifth Edition. Pearson Education, 2017.
2. Бутиков Е. И. **Оптика: Учебное пособие**. 3-е изд. Санкт-Петербург: Лань, 2016.

Благодарности

Спасибо, большое Максиму Игоревичу Паукову, который на мои слова: *"Просто результаты не особо впечатляют"*, отвечал: *"если честно, я не вижу проблемы в этом серьезной"*. Это помогло не остановиться.

XI. Приложения

Код проекта расположен по [ссылке](#).