

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
МЕХАНИКИ И ОПТИКИ»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

**ПОЛУЧЕНИЕ ДИЗАЙНА МЕТАПОВЕРХНОСТИ С ЗАДАННЫМИ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ**

Автор: Мельников Роман Вячеславович _____

Направление подготовки: 01.03.02 Прикладная
математика и информатика

Квалификация: Бакалавр

Руководитель: Ульянцев В.И., канд. техн. наук _____

К защите допустить

Руководитель ОП Парfenov V.G., проф., д.т.н. _____

«_____» 20____ г.

Санкт-Петербург, 2019 г.

Студент Мельников Р.В.

Группа М3439 Факультет ИТиП

Направленность (профиль), специализация

Математические модели и алгоритмы в разработке программного обеспечения

Консультанты:

а) Барышникова К.В., канд. физ.-мат. наук _____

ВКР принята « ____ » 20 ____ г.

Оригинальность ВКР ____ %

ВКР выполнена с оценкой _____

Дата защиты « ____ » 20 ____ г.

Секретарь ГЭК Павлова О.Н. _____

Листов хранения _____

Демонстрационных материалов/Чертежей хранения _____

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
МЕХАНИКИ И ОПТИКИ»**

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ОП
проф., д.т.н. Парфенов В.Г. _____
«_____» 20____ г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**

Студент Мельников Р.В.

Группа М3439 Факультет ИТиП

Руководитель Ульянцев В.И., канд. техн. наук, научный сотрудник ФИТиП

1 Наименование темы: Получение дизайна метаповерхности с заданными функциональными свойствами с использованием эволюционных алгоритмов

Направление подготовки (специальность): 01.03.02 Прикладная математика и информатика

Направленность (профиль): Математические модели и алгоритмы в разработке программного обеспечения

Квалификация: Бакалавр

2 Срок сдачи студентом законченной работы: «_____» 20____ г.

3 Техническое задание и исходные данные к работе

Необходимо разработать и реализовать эволюционные алгоритмы для автоматической генерации металинз с заданным фокусным расстоянием.

4 Содержание выпускной работы (перечень подлежащих разработке вопросов)

1. Описание предметной области. Описание математической модели. Постановка задачи. Обзор существующих работ по смежным темам.

2. Описание реализации расчета целевой функции и реализации эволюционных алгоритмов.

3. Проведение экспериментов с эволюционной стратегией и генетическим алгоритмом. Сравнение результатов полученных в результате работы данных алгоритмов.

5 Перечень графического материала (с указанием обязательного материала)

Графические материалы и чертежи работой не предусмотрены

6 Исходные материалы и пособия

a) Novotny L., Hecht B., *Principles of nano-optics*. — The Edinburgh Building, Cambridge CB2 2RU, UK : Cambridge University Press, 2006.

7 Дата выдачи задания «_____» 20____ г.

Руководитель ВКР _____

Задание принял к исполнению _____

«_____» 20____ г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
МЕХАНИКИ И ОПТИКИ»

АННОТАЦИЯ
ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Студент: Мельников Роман Вячеславович

Наименование темы ВКР: Получение дизайна метаповерхности с заданными функциональными свойствами с использованием эволюционных алгоритмов

Наименование организации, где выполнена ВКР: Университет ИТМО

ХАРАКТЕРИСТИКА ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1 Цель исследования: Разработка и реализация алгоритма для генерации метаповерхностей с заданными функциональными свойствами

2 Задачи, решаемые в ВКР:

- а) Реализация математической модели, описывающей метаповерхность.
- б) Разработка эволюционной стратегии и генетического алгоритма, решающих задачу построения металинзы с заданным фокусным расстоянием.
- в) Сравнение эффективности работы реализованных алгоритмов.

3 Число источников, использованных при составлении обзора: 3

4 Полное число источников, использованных в работе: 21

5 В том числе источников по годам:

Отечественных			Иностранных		
Последние 5 лет	От 5 до 10 лет	Более 10 лет	Последние 5 лет	От 5 до 10 лет	Более 10 лет
0	0	0	10	3	8

6 Использование информационных ресурсов Internet: нет

7 Использование современных пакетов компьютерных программ и технологий:

Пакеты компьютерных программ и технологий	Раздел работы
PyCharm	2
numpy	2,3
jsonpickle	2
matplotlib	3

8 Краткая характеристика полученных результатов

Реализована модель поведения метачастиц основанная на дипольном приближении. Разработаны два эволюционных алгоритма для генерации металинз с заданным фокусным расстоянием.

9 Гранты, полученные при выполнении работы

При выполнении работы грантов получено не было.

10 Наличие публикаций и выступлений на конференциях по теме работы

При выполнении работы статей опубликовано не было.

Студент Мельников Р.В. _____

Руководитель Ульянцев В.И. _____

«____» _____ 20__ г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. Введение в предметную область и постановка задачи	6
1.1. Термины и определения	6
1.2. Обзор металинз	7
1.3. Описание эволюционных алгоритмов	8
1.4. Описание математической модели поведения метачастиц	9
1.5. Постановка задачи	11
1.6. Обоснование актуальности	12
1.7. Обзор существующих работ по данной теме	13
Выводы по главе 1	14
2. Разработка и реализация эволюционных алгоритмов для генерации метаповерхностей	15
2.1. Определение понятий, необходимых для эволюционных алгоритмов	15
2.1.1. Определение особи	15
2.1.2. Определение мутации	17
2.1.3. Определение скрещивания	18
2.2. Вычисление значения целевой функции для особи	18
2.3. Описание используемых эволюционных алгоритмов	19
2.3.1. Описание используемой эволюционной стратегии	19
2.3.2. Описание используемого генетического алгоритма	20
Выводы по главе 2	21
3. Вычислительные эксперименты	22
3.1. Эксперименты с эволюционной стратегией	22
3.2. Эксперименты с генетическим алгоритмом	28
3.3. Сравнение эффективности эволюционной стратегии и генетического алгоритма	34
Выводы по главе 3	36
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	37
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	38
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Вычисление интенсивностей электрического и магнитных полей	41
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Псевдокод используемых эволюционных алгоритмов.	43

ВВЕДЕНИЕ

В рамках данной работы планируется разработать и реализовать эволюционные алгоритмы для построения метаповерхностей с заданными функциональными свойствами на основе дипольного приближения, используемого в качестве математической модели поведения метачастиц.

В настоящее время метаматериалам находят активное применение в различных отраслях науки и техники. В данной работе мы будем рассматривать металинзы. Металинзой называется метаповерхность обладающая свойствами линзы. Основным отличием металинз от макролинз является то, что их фокусное расстояние может быть меньше, чем существующая верхняя граница для фокусного расстояния для макролинз при одинаковых длинах падающих волн.

Зная структуру металинзы, можно вычислить ее фокус, величину усиления, размер пятна рассеяния. Однако обратная задача не может быть легко решена. Для решения одной из этих обратных задач, а именно, генерации металинзы с заданным фокусным расстоянием, мы будем использовать эволюционные алгоритмы.

В первой главе данной работы будет произведен обзор предметной области, рассмотрена математическая модель, описывающая поведение метачастиц. Также будет произведен обзор существующих научных работ в данной области.

Во второй главе будет описана непосредственная реализация эволюционных алгоритмов в контексте приложения к данной задаче: строение особи, функция мутации и скрещивания особей.

В третьей главе будут представлены результаты экспериментов по генерации металинз с заданными свойствами. Будет произведено сравнение эффективности работы между эволюционными стратегиями и генетическими алгоритмами.

В заключении будут кратко описаны результаты по каждой из глав данной работы. Также будут описаны направления для дальнейшего развития работы по данной теме.

ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТНУЮ ОБЛАСТЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной главе будет произведено введение в предметную область решаемой задачи, описана используемая математическая модель поведения метачастиц. Также в данной главе будет произведена постановка задачи оптимизации и рассмотрены различные статьи, в которых были использованы эволюционные алгоритмы для генерации метаповерхностей.

1.1. Термины и определения

В данном разделе будут приведены термины, которые будут использованы в тексте этой работы.

Метаматериал — искусственно созданный композитный материал, обладающий свойствами, которые не встречаются в природных материалах, например, отрицательный показатель преломления [10, 17]. Он представляет собой массив элементов, которые являются металлическими или диэлектрическими рассеивателями. Изменение взаимного расположения структурных единиц позволяет метаматериалу манипулировать параметрами электромагнитных волн, поглощая, усиляя и перенаправляя их. За счет линейности уравнений Максвелла, дизайн структуры метаматериала может быть отмасштабирован для различных длин падающих волн.

Метачастица — структурная единица метаповерхности, как правило является металлическими или диэлектрическими рассеивателями с субволновыми размерами. В рассматриваемой нами задаче метачастица представляет из себя сферическую кремниевую (диэлектрическую) наночастицу радиуса 100 нм. Диэлектрические метачастицы используются все чаще в последние десятилетия, поскольку, в отличие от металлических метачастиц, они обладают низким коэффициентом поглощения. Взаимодействие металлических частиц со светом обеспечивает эффективное возбуждение только электрического дипольного резонанса, в то время как для диэлектрических наночастиц возможно возбуждение резонансов различных порядков, причем как электрических, так и магнитных [2, 7, 16].

Метаповерхность — Двумерный аналог метаматериала. Метаповерхность описывается теми же макропараметрами, что и пленка обычного материала. Изменяя геометрические параметры (такие как размер, форма и положение в пространстве) метачастиц, можно контролировать эти параметры (фаза,

амплитуда, поляризация и локальный импеданс [14] отражаемой и проходящей волн).

Металинза — специально организованная метаповерхность, обладающая свойствами линзы [8]. Металинза, в отличие от обычных линз, обладает плоским дизайном толщиной в несколько десятков нанометров, позволяет преодолеть дифракционный предел, а также сфокусировать поля на масштабах в несколько длин волн. Металинза является аналогом линзы Френеля, в которой структурными единицами выступают метачастицы. Манипулируя плотностями структурных единиц, мы воссоздаем такое же изменение фазы падающей волны, как это происходит в линзе Френеля. За счет отрицательного показателя преломления металинзы [17], мы можем преодолеть дифракционный предел и таким образом качественно улучшить линзу по сравнению с обычной линзой Френеля. Преодоление дифракционного предела позволяет увеличить точность и качество получаемого изображения, например, для того, чтобы можно было увидеть клетки живых организмов при использовании микроскопа, использующего видимый спектр света. Использование металинз в оптических модулях позволит уменьшить их толщину. Высокая вариативность дизайна металинз значительно расширит спектр применения возможного применения микрооптики [8].

Эволюционные алгоритмы — это семейство эвристических алгоритмов, основанных на подходах эволюционной теории, популяционной биологии и генетики [21]. Как правило разделяются на **генетические алгоритмы** и **эволюционные стратегии**.

1.2. Обзор металинз

Впервые металинза была представлена в 1948 году, когда Кокк [9] продемонстрировал искусственно изготовленный материал состоящий из металлических антенн встроенных в пенополистероловую основу, который по функционалу представлял собой легковесную линзу,ирующую в микроволновом диапазоне. После чего данный концепт нашел широкое применение в дифракционной оптике [11, 15].

Изначально в качестве метачастиц использовались металлические (или плазмонные) частицы. Это позволяло создавать линзы с субволновой толщиной [13, 18], которые при этом могли преодолеть дифракционный предел. Данный подход хорошо показал себя в радио диапазоне, однако их использование

в световом диапазоне оказалось не очень удобным из-за высокого коэффициента поглощения таких частиц, поэтому для волн светового спектра в качестве структурных единиц метаповерхности стали использовать диэлектрики. Диэлектрические метачастицы способны направлять падающий свет в субволновой области с маленькими потерями на поглощение [7]. Подобные металинзы также могут быть применены для проектирования изображений.

1.3. Описание эволюционных алгоритмов

Эволюционные стратегии — это семейство эвристических алгоритмов, которые используются для решения оптимизационных задач, основанных на биологических понятиях адаптации и эволюции [21]. В простейшем случае мы имеем популяцию из двух особей: текущая (родитель) и особь, полученная произвольной мутацией родитеоля, если мутированная особь лучше удовлетворяет функции приспособленности, то она становится родителем, после чего этот цикл повторяется. Такая эволюционная стратегия называется $(1 + 1)$ – стратегия. В случае, когда генерируются и сравниваются λ мутировавших особей с родителем, эволюционная стратегия называется $(1 + \lambda)$ – стратегией.

Генетические алгоритмы — это семейство эвристических алгоритмов, которые используются для решения оптимизационных задач за счет случайного подбора исходных параметров и последующим использованием механизмов, напоминающих биологические мутации, скрещивание и естественный отбор [21]. Приспособленность особей оценивается с помощью целевой функции (ее максимизации или минимизации, в зависимости от конкретной задачи). Основные этапы генетического алгоритма:

1. Создание начальной популяции путем генерации случайных особей
 2. Произвольное скрещивание особей
 3. Мутирование особей
 4. Вычисление целевой функции для всех особей популяции (учитывая вновь полученные в результате скрещиваний)
 5. Селекция нового поколения (выбор наиболее приспособленных особей)
- Шаги 2 – 5 повторяются до тех пор, пока не будет найдено необходимое количество особей с желаемыми свойствами.

1.4. Описание математической модели поведения метачастиц

Согласно теории Ми [4] субволновые сферические частицы, облученные плоской волной, будут вести себя в некотором диапазоне длин волн как совокупность электрического и магнитного диполя.

Кремниевые частицы радиусом 100 нанометров, хорошо описываются дипольным приближением в диапазоне 600 – 900 нанометров, что покрывает почти весь видимый диапазон.

На графике на рисунке 1 показан вклад электрических и магнитных мультиполей в зависимости от длины волны.

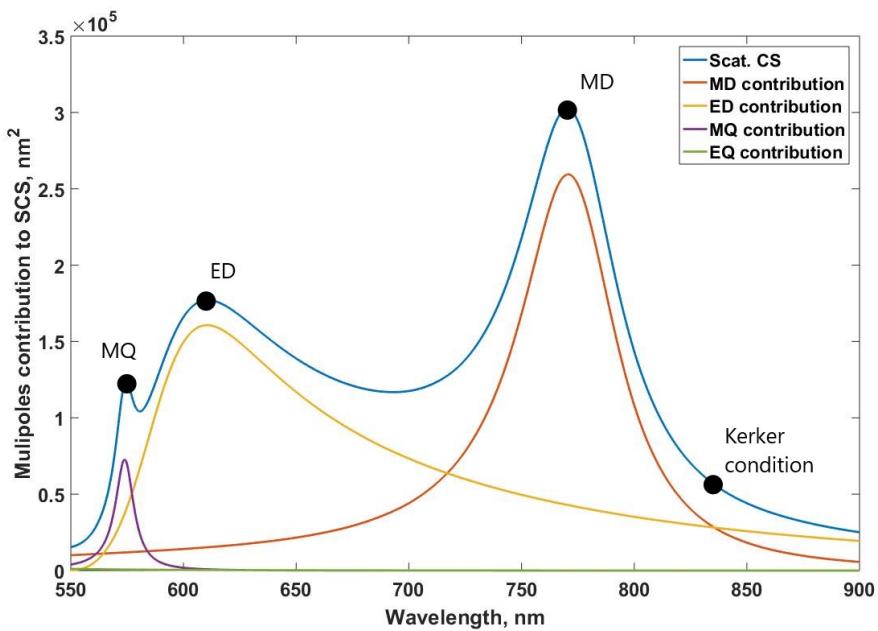


Рисунок 1 – Дипольное приближение

Пусть частица расположена в точке с радиус-вектором \vec{r}_0 . Обозначим электрический дипольный момент рассматриваемой нами частицы за $\vec{\mu}$. Тогда электрическое и магнитное поле электромагнитной волны, рассеянное частицей, в точке, заданной радиус-вектором \vec{r} , может быть получено по следующим формулам:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \omega^2 \mu \mu_0 \overleftrightarrow{G}(\vec{r}, \vec{r}_0) \vec{\mu} \quad (1)$$

$$\vec{H}(\vec{r}) = -\omega [\nabla \times \overleftrightarrow{G}(\vec{r}, \vec{r}_0)] \vec{\mu} \quad (2)$$

Аналогичные выражения могут быть записаны и для частицы с магнитным дипольным моментом \vec{m} :

$$\vec{E}(\vec{r}) = \omega [\nabla \times \overleftrightarrow{G}(\vec{r}, \vec{r}_0)] \vec{m} \quad (3)$$

$$\vec{H}(\vec{r}) = \omega^2 \epsilon \epsilon_0 \overleftrightarrow{G}(\vec{r}, \vec{r}_0) \vec{m} \quad (4)$$

В данных формулах:

- ω — циклическая частота падающей волны
- μ — относительная магнитная проницаемость среды
- μ_0 — магнитная постоянная
- ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды
- ϵ_0 — электрическая постоянная
- $\vec{\mu}$ и \vec{m} — электрический и магнитный дипольные моменты соответственно
- $\overleftrightarrow{G}(\vec{r}, \vec{r}_0)$ — диадная функция Грина для электрического диполя, которая может быть вычислена по следующей формуле:

$$\overleftrightarrow{G}(\vec{r}, \vec{r}_0) = \frac{\exp(ikR)}{4\pi R} \left[\left(1 + \frac{ikR - 1}{k^2 R^2} \right) \overleftrightarrow{I} + \frac{3 - 3ikr - k^2 R^2}{k^2 R^2} \frac{\vec{R} \vec{R}}{R^2} \right] \quad (5)$$

Где $\vec{R} = \vec{r} - \vec{r}_0$, k — волновое число падающей электромагнитной волны, а $\vec{R} \vec{R}$ — тензорное произведение.

- $\nabla \times \overleftrightarrow{G}(\vec{r}, \vec{r}_0)$ — ротор диадной функции Грина, который может быть получен по формуле:

$$\nabla \times \overleftrightarrow{G}(\vec{r}, \vec{r}_0) = \frac{\exp(ikR)}{4\pi R} \frac{k(\vec{R} \times \overleftrightarrow{I})}{R} \left(i - \frac{1}{kR} \right) \quad (6)$$

Электрические и дипольные моменты метачастицы, которая облучается электромагнитной волной, (\vec{E} , \vec{H}) могут быть вычислены как:

$$\vec{\mu} = \chi \vec{E} \quad (7)$$

$$\vec{m} = \chi_m \vec{H} \quad (8)$$

Где χ и χ_m — электрическая и магнитная дипольные поляризуемости частиц соответственно [12].

Каждая из метачастиц, расположенных на плоскости и образующих межповерхность, будучи облученная электромагнитной волной, начинает излучать свое электромагнитное поле. Все эти поля суммируются в соответствии с принципом суперпозиции. В нашей текущей модели мы не будем учитывать

взаимодействие метачастиц друг с другом, лишь их излучение под действием падающей волны, точность таких вычислений была подтверждена сравнением с вычислениями в коммерческом программном пакете **CST Microwave Studio**. Сравнение расчетов CST Microwave Studio и реализованной модели представлено на рисунке 2.

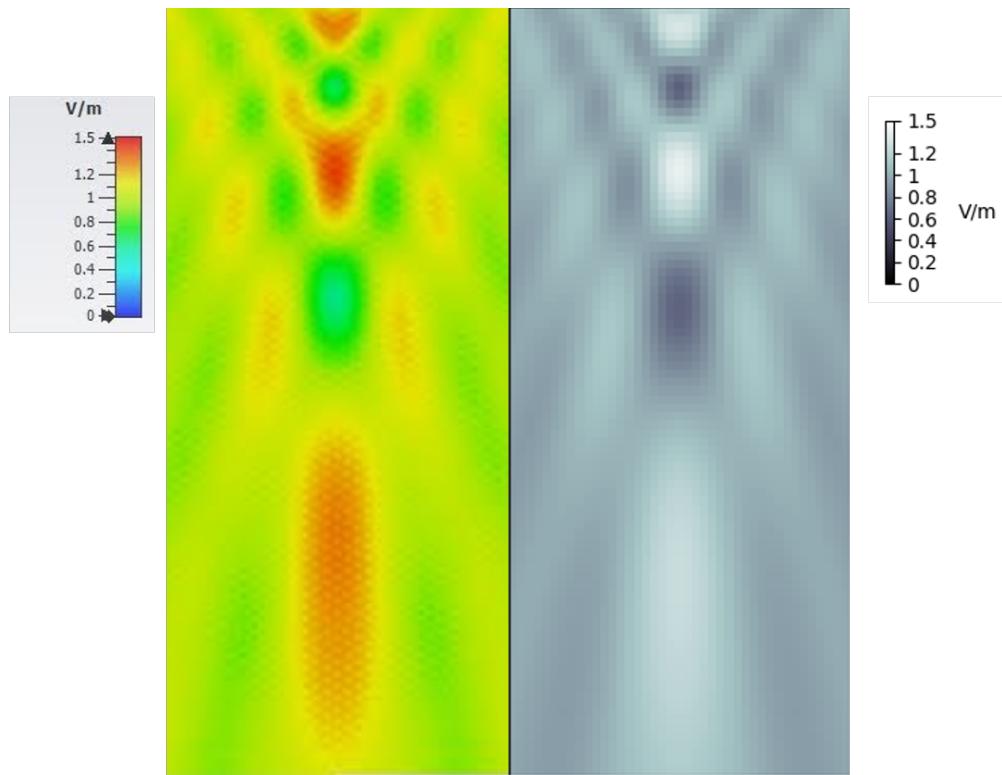


Рисунок 2 – Сравнение расчетов интенсивности в CST Microwave Studio и реализованной модели

В таком случае интенсивность в точке \vec{r} может быть вычислена по формуле:

$$I(\vec{r}) = |\vec{E}(\vec{r})|^2 + |\vec{H}(\vec{r})|^2 \quad (9)$$

Фокусом металинзы будем называть точку с максимальной интенсивностью на оси металинзы.

1.5. Постановка задачи

Для нас первоначальной задачей будет являться построение металинзы с фокусом в заданной точке. Рассмотрим произвольную металинзу и фокус, который мы желаем получить, и введем целевую функцию следующим образом: $f(\text{metalens}, P) = \text{distance}(\text{focus}(\text{metalens}, P), \text{desired_focus})$, характеризующих нашу модель: длина падающей электромагнитной волны и вектор, показатели диэлектрической и магнитной проницаемости среды.

Наша цель — минимизировать эту функцию при заданном наборе параметров. Таким образом, представленную задачу можно отнести к классу задач оптимизации, функцией приспособленности в данном случае будет являться функция f .

Данная работа будет посвящена реализации алгоритмов, которые будут решать данную задачу оптимизации.

1.6. Обоснование актуальности

Эволюционные алгоритмы достаточно активно применяются для генерации метаповерхностей [1, 3, 5, 6, 19, 20]. В данных работах эволюционные алгоритмы использовались для генерации метаповерхностей с различными свойствами:

- Отражение падающего лазерного луча под заданным углом. [3, 6]
- Изменение поляризации падающей волны. [20]
- Оптимизация эффективной площади рассеяния. [1]

Для оптимизации целевых функций в них использовались классический генетический алгоритм, аддитивные генетические алгоритмы, алгоритм **ABC(Artificial Bee Colony)**. Во всех задачах использованные алгоритмы показали хорошую работоспособность, часть из них превзошла существующие методы основанные на градиентном спуске [3]. В следующем разделе часть этих статей (задачи решаемые в них и использованные методы решения) будут рассмотрены более подробно.

В нашей работе мы будем решать задачу по генерации метаповерхности с заданным фокусным расстоянием при пропускании падающей волны. Научная новизна данной работы состоит в используемой математической модели для описания поведения метачастиц, в данной работе будет использоваться дипольное приближение. Модель, в котором каждая метачастица описывается всего двумя константами (электрической и магнитной поляризуемостью). Такое приближение позволяет существенно сократить время расчетов, сохраняя при этом достаточно хорошую точность по сравнению с расчетами в коммерческих пакетах. Последующее развитие данной работы может позволить использовать сгенерированные металинзы для проектирования изображений.

1.7. Обзор существующих работ по данной теме

Существует множество работ посвященных метаматериалам, где были использованы генетические алгоритмы. В этом разделе будут рассмотрены некоторые из них.

В работе *Adaptive Genetic Algorithm for Optical Metasurfaces Design* [6] авторы использовали генетические алгоритмы для решения задачи построения дизайна метаповерхности для отражения падающего лазерного луча в заданном направлении или направлениях. С помощью генетических алгоритмов генерировалась сетка, в клетках которой могли находиться кремниевые метачастицы.

В данной работе был применен адаптивный генетический алгоритм, в котором вероятность кроссовера и мутации определена не как глобальная переменная алгоритма, а определяется на основе значений функции приспособленности для особей популяции.

Результаты экспериментов показали, что адаптивный генетический алгоритм успешно решает задачу по получению дизайна метаповерхности, которая отражает падающую электромагнитную волну в заданном направлении.

В работе *Evolutionary algorithms for designing metalenses* [3] авторы использовали генетические алгоритмы для генерации металинзы, работающей как отражатель лазерного луча. В своих экспериментах они использовали два алгоритма: классический генетический алгоритм, состоящий из селекции, кроссовера и мутации, а также алгоритм **ABC(Artificial Bee Colony)** — алгоритм, моделирующий жизнь колонии пчел. В качестве особи использовался массив из $5N$ элементов, которых характеризовал набор метачастиц, из которых состоит металинза. Количество метачастиц в метаповерхности фиксировано.

Результаты данной работы показывают, что генетические алгоритмы показывают лучший результат по сравнению с градиентными методами. Но значительной разницы между классических генетическим и **ABC** алгоритмом с точки зрения эффективности нет.

В работе *Broadband and Broad-angle Polarization-independent Metasurface for Radar Cross Section Reduction* [1] авторы решали задачу по оптимизации эффективной площади рассеяния падающей волны. Метаповерхность форми-

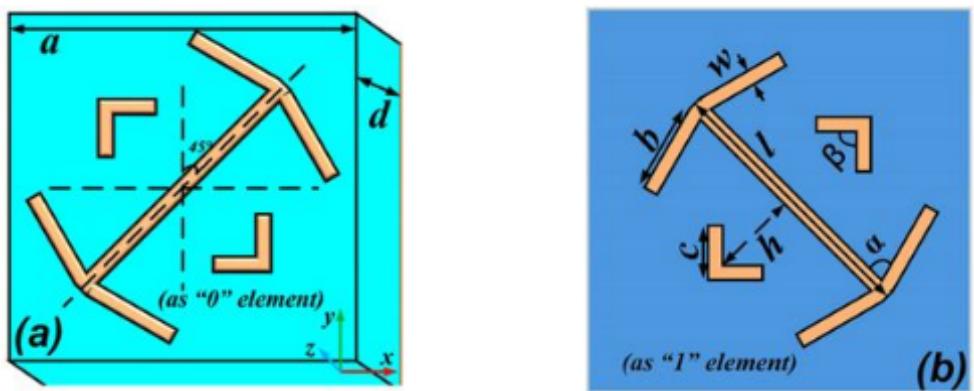


Рисунок 3 – Дизайны ячеек метаповерхности [1]

руется из матрицы 12×12 где каждая из ячеек представляет собой один из двух возможных фиксированных дизайнов ячейки изображенный на рисунке 3, для результирующей метаповерхности определена целевая функция, определяющая минимизацию площади рассеяния падающей волны. Для решения данной задачи минимизации авторы статьи использовали классический генетический алгоритм.

Экспериментально полученные дизайны метаповерхностей показали хорошие результаты на разных частотах не только при численном моделировании, но также при выполнении эксперимента с изготовленной метаповерхностью.

Выводы по главе 1

В данной главе были рассмотрены основные термины и определения из исследуемой области. Была описана математическая модель поведения метачастиц, которая будет использоваться для расчета целевой функции заданной метаповерхности, и приведена постановка задачи оптимизации, которую необходимо будет решать. Также в данной главе были рассмотрены другие работы, где рассматривалось использование эволюционных алгоритмов для генерации метаповерхностей.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ

В предыдущей главе были рассмотрены общие идеи и схемы, применяемые к реализации эволюционных стратегий и генетических алгоритмов. Также была сформулирована задача оптимизации, которая будет решать проблему генерации металинзы с заданным фокусным расстоянием. В данной главе будут описаны этапы разработки и реализации этих алгоритмов в контексте решаемой нами задачи.

2.1. Определение понятий, необходимых для эволюционных алгоритмов

Центральным объектом в эволюционных алгоритмах является особь, мутация и скрещивание. Для того, чтобы использовать генетические алгоритмы необходимо определить данные понятия в контексте решаемой задачи.

2.1.1. Определение особи

В нашей задаче мы генерируем металинзы с заданным фокусным расстоянием. Металинза и будет являться особью в нашей задаче, она представляет собой набор колец, по которым равномерно распределены метачастицы. Подобная радиальная структура удобна тем, что исходя из соображений симметрии фокус такой металинзы обязательно будет находиться на оси, проходящей через плоскость перпендикулярную плоскости металинзы через ее центр.

Каждое кольцо определяется тремя числами:

1. Радиус
2. Количество метачастиц
3. Изначальный угол отклонения

Пример особи, состоящей из 10 колец представлен на рисунке 4. Структура класса, описывающего металинзу приведен на листинге 1.

Также для более удобного хранения металинзы сохранялись в файлы в формате *json*. СерIALIZАЦИЯ и десериализация производилась с помощью библиотеки *jsonpickle*.

Для особи существуют некоторые ограничения, а именно:

1. Метачастицы не могут располагаться слишком близко друг к другу их реальный размер составляет порядка 200 нанометров в диаметре. Число, ограничивающее минимальное расстояние между метачастицами обозначим *MIN_DIST*

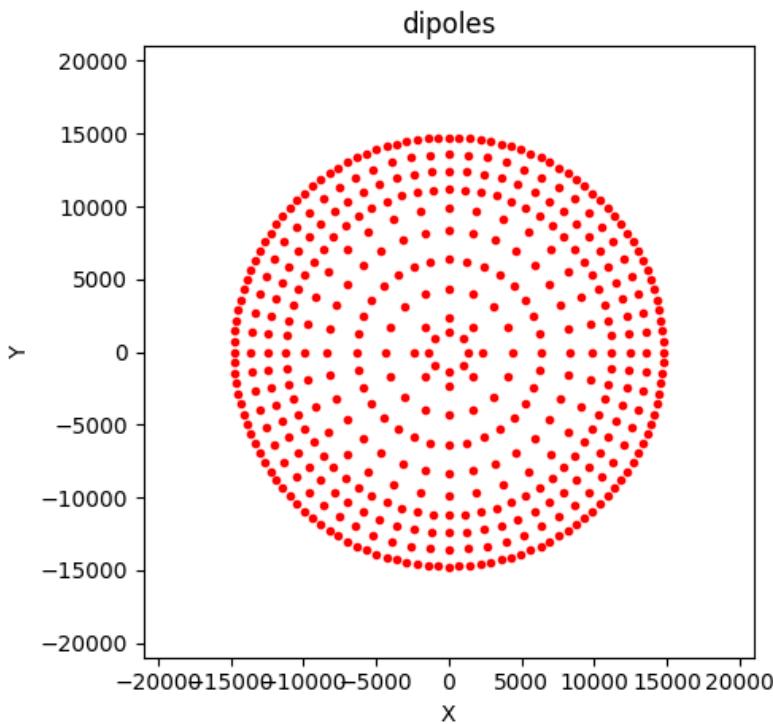


Рисунок 4 – Структура особи, представляющей металинзу

Листинг 1 – Структура класса, описывающего металинзу

```
class Metalens:
    def __init__(self, rads, starts, nums):
        self.rads = rads #rings radiuses
        self.starts = starts #rings initials angle deviations
        self.nums = nums #numbers of particles on rings
        self.score = np.inf #initial score stub

    def __lt__(self, other):
        return self.score < other.score

    def __len__(self):
        return len(self.rads)

    def __copy__(self):
        return Metalens(copy(self.rads), copy(self.starts), copy(self.nums))
```

2. Минимальный и максимальный возможный радиус кольца, обозначаемые MIN_RAD и MAX_RAD соответственно
3. Максимальное число метачастиц в одной особи, обозначаемое MAX_NUM
В случае, когда для особи не выполняется эти ограничения, она признается нежизнеспособной (по аналогии с биологией, некоторые мутации могут быть смертельными для особей).

Изменение данных параметров позволит нам генерировать металинзы заданного размера с ограниченным числом метачастиц.

Код проверки особи на жизнеспособность приведен на листинге 2.

Листинг 2 – Код функции, определяющей жизнеспособность особи

```
def is_alive(lens: Metalens):
    n = len(lens)
    if min(lens.rads) < MIN_RAD or max(lens.rads) > MAX_RAD:
        return False
    for i in range(n):
        if get_dist_to_closest_ring(lens.rads, i) < MIN_DIST:
            return False
        if get_dist_within_ring(lens.nums[i], lens.rads[i]) < MIN_DIST:
            return False
    if sum(lens.nums) > MAX_NUM:
        return False
    return True
```

2.1.2. Определение мутации

Как в эволюционных стратегиях, так и в генетических алгоритмах, особи мутируют. Для того, чтобы мутировать металинзу, мы случайно выбираем одно из колец, после чего, у выбранного кольца, произвольно меняется одна из его характеристик (радиус, количество метачастиц, изначальный угол отклонения). В результате мутации может получиться нежизнеспособная особь.

Код функции мутации приведен на листинге 3.

Листинг 3 – Код функции, возвращающей особь, подверженную произвольной мутации

```
def mutate(subject: Metalens):
    new_subject = copy(subject)
    mutation = np.random.choice(mutations)
    i = np.random.randint(0, len(new_subject))
    if mutation == 'radius':
        new_subject.rads[i] = np.random.randint(MIN_RAD, MAX_RAD)
    elif mutation == 'angle':
        new_subject.starts[i] = np.random.uniform(0, 2 * np.pi)
    elif mutation == 'number':
        new_subject.nums[i] = np.random.randint(0, MAX_NUM)
    return new_subject
```

2.1.3. Определение скрещивания

Центральной операцией в генетических алгоритмах является операция скрещивания. Пусть в одной популяции, все металинзы будут иметь одинаковое количество колец. Тогда новая особь, полученная в результате скрещивания двух металинз, генерируется следующим образом:

1. Каким-то образом упорядочиваются кольца
2. i -ым кольцом новой особи случайно назначается i -ое кольцо одного из родителей

В результате операции скрещивания двух металинз, как и в случае с мутацией, может получиться нежизнеспособная особь.

Код функции скрещивания двух особей приведен на листинге 4.

Листинг 4 – Код функции, возвращающей особь, полученную в результате скрещивания

```
def breed(first: Metalens, second: Metalens):
    lenses = [first, second]
    rads = []
    starts = []
    nums = []
    for i in range(len(first.rads)):
        ind = np.random.randint(0, 2)
        rads.append(lenses[ind].rads[i])
        starts.append(lenses[ind].starts[i])
        nums.append(lenses[ind].nums[i])
    res = Metalens(rads, starts, nums)
```

2.2. Вычисление значения целевой функции для особи

Для того, чтобы оценить полезность особи, необходимо посчитать ее функцию приспособленности. В нашем случае мы минимизируем функцию расстояния до желаемого фокуса металинзы. Как было описано во введении, фокусом является точка с максимальной интенсивностью электрического и магнитного полей.

Металинза находится в плоскости XY , перпендикулярно ей падает волна. Чтобы найти фокус линзы, необходимо найти максимум интенсивности в плоскости XZ , исходя из принципов симметрии, этот максимум обязательно будет находиться на оси Z , а значит, мы можем вести наши вычисления при $X = 0$, что позволяет нам сократить количество операций, которое необходимо для подсчета целевой функции особи. Однако для расчета и отображения

распределения энергии, мы будем использовать полноценную сетку с различными значениями координаты Z .

Основной проблемой вычисления целевой функции является ее ассимптотическое время вычисления, которое составляет $\Omega(\text{len}(X) \times \text{len}(Z) \times n)$, где $\text{len}(X), \text{len}(Z)$ — размеры сетки по координатам X и Z , а n — количество метачастиц у особи. Более того, выполняемые действия достаточно ресурсоемкие, так как производятся различные операции над векторами и матрицами, элементами которых являются комплексные числа.

Вычисление интенсивностей полей будет производиться в несколько этапов:

1. Вычисление исходных электрического и магнитных полей. Код функции, вычисляющей данные поля на заданной сетке, приведен на листинге A.1
2. Вычисление вклада метачастиц в эти поля. Код функции, вычисляющий вклад метачастиц, приведен на листинге A.2
3. Вычисление интенсивностей электрического и магнитного полей. Код функции, вычисляющий интенсивности, приведен на листинге A.3

После этих расчетов, мы ищем точку максимума суммарной интенсивности полей. Эта точка и будет фокусом металинзы. На основе этой точки вычисляется значение целевой функции, она вычисляется как евклидовское расстояние между полученным и желаемым фокусом.

2.3. Описание используемых эволюционных алгоритмов

Для генерации металинз с заданным фокусом будут использоваться эволюционная стратегия и генетический алгоритм. Более подробно их описание будет представлено далее.

2.3.1. Описание используемой эволюционной стратегии

В данной работе будет использована простейшая эволюционная стратегия $(1 + 1)$. Схема ее работы изображена на рисунке. 5

На этапе *инициализации* генерируется случайная особь (родитель), которая и будет подвергаться мутациям.

На этапе *селекции* сравниваются значения целевой функции для родителя и мутировавшей особи и оставляется особь с меньшим значением этой функции.

На этапе *мутации* текущий родитель подвергается мутации, если получившаяся в результате этой операции особь является нежизнеспособной, то

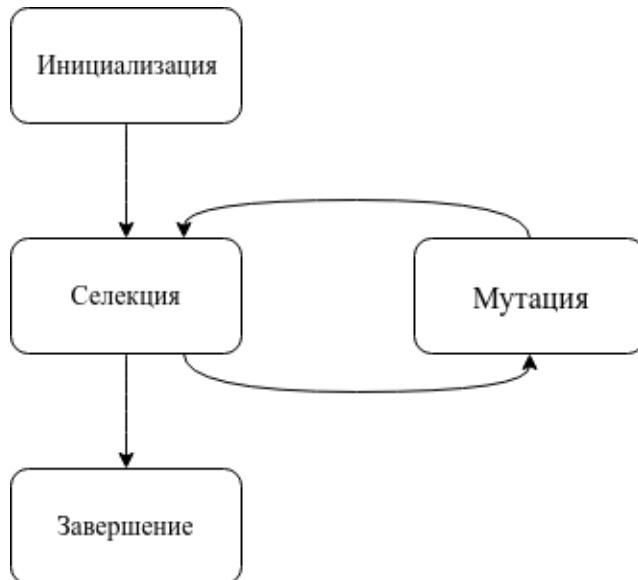


Рисунок 5 – Схема эволюционной стратегии

мутации повторяются до тех пор, пока мутированная особь не окажется жизнеспособной.

Завершение работы происходит при выполнении некоторого условия. Условием может являться достижение желаемого результата целевой функции, либо же исчерпание лимита на количество поколений.

Важным параметров эволюционной стратегии является условие стагнации, это условие, при котором осуществляется перезапуск алгоритма. К сожалению, поиск хорошего условия стагнации очень сложен, поэтому в данной работе мы ограничились установлением максимального числа стагнационных шагов (шагов, которые не улучшают значение целевой функции), которое может совершить алгоритм перед перезапуском. Для экспериментов было подобрано значение в 50 стагнационных шагов. Псевдокод описывающий эволюционный алгоритм представлен на листинге Б.1.

2.3.2. Описание используемого генетического алгоритма

Другим алгоритмом, который будет использован для генерации металинз с заданным фокусным расстоянием, будет классический генетический алгоритм. В отличие от эволюционной стратегии, данный алгоритм работает не с множеством особей, называемым популяцией, размер которой фиксирован.

В наших экспериментах мы будем работать с популяцией, которая состоит из 20 особей. Изначально популяция инициализируется 20 случайными жизнеспособными особями.

Новая популяция формируется из трех частей по следующему принципу:

1. Четыре особи с наиболее низким значением целевой функции попадают в новое поколение по принципу элитизма.
2. 12 особей получаются в результате случайных скрещиваний особей текущей популяции.
3. Четыре особи из текущей популяции, которые были подвергнуты одной произвольной мутации

Алгоритм останавливается, когда будет найдена хотя бы одна особь с желаемым значением целевой функции или при исчерпании лимита на число поколений.

В качестве условия стагнации в генетическом алгоритме используется лимит максимального числа стагнационных шагов. В наших экспериментах мы будем использовать подобранное значение в 20 стагнационных шагов. Псевдокод описывающий эволюционный алгоритм представлен на листинге Б.2.

Выходы по главе 2

В данной главе были описан алгоритм подсчета целевой функции для особи и рассмотрены схемы эволюционных алгоритмов, которые будут использованы для экспериментов.

ГЛАВА 3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В предыдущей главе были описаны алгоритмы подсчета целевой функции и схемы реализаций эволюционной стратегии и генетического алгоритма. В данной главе будут описаны эксперименты, проведенные с использованием представленных инструментов.

В последующих экспериментах расчеты будут проводиться на следующей сетке: 1000 – 10000 нанометров с шагом в 100 нанометров по оси Z и –2000 – 2000 нанометров с шагом в 100 нанометров по оси X .

Во всех экспериментах на линзы будет падать плоская электромагнитная волна с длиной волны 620 нанометров. Для оценивания времени работы алгоритмов необходимо каким-либо образом оценить количество совершаемых операций. Как было указано ранее, асимптотика алгоритма вычисления целевой функции составляет $\Omega(\text{len}(X) \times \text{len}(Z) \times n)$, где $\text{len}(X), \text{len}(Z)$ — размеры сетки по координатам X и Z , а n — количество метачастиц у особи. Размеры сетки постоянны, значит, количество совершаемых операций и время работы эволюционного алгоритма пропорционально суммарному количеству метачастиц, которые содержались в особях, для которых расчитывалась целевая функция.

3.1. Эксперименты с эволюционной стратегией

Изначально в качестве эксперимента был использован алгоритм $(1+1)$, в котором в качестве начальной особи и новой особи в случае преодоления стагнационного предела использовалась случайно сгенерированная особь. Однако, такой подход показал очень плохую сходимость. Было лишь небольшое количество случаев, когда эволюционная стратегия сходилась за разумное время и общее количество шагов не превосходило максимальное (то, после которого алгоритм безусловно завершал свою работу). График изменения значений целевой функции в одном из таких случаев представлен на рисунке 6.

Поэтому в качестве альтернативы данному подходу было решено старовать и перезапускать нашу эволюционную стратегию с особи, представляющей из себя пустую металинзу: генерировались случайные радиусы, однако число метачастиц на каждом кольце, а также начальное отклонение, устанавливались нулевыми. Такой подход показал себя значительно лучше. Пример графика изменения значений целевой функции в самом долгом из случаев представлен на рисунке 7

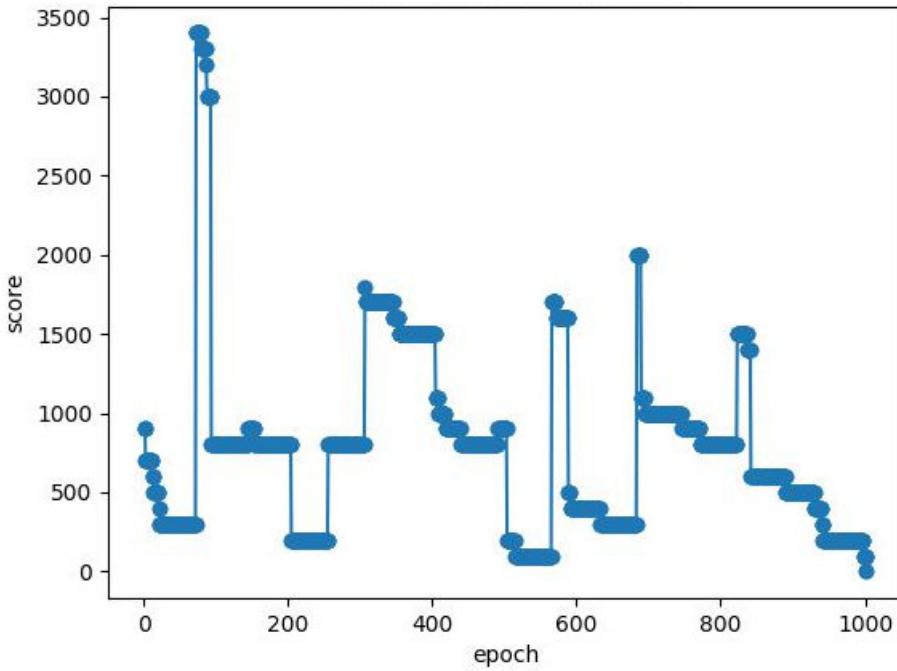


Рисунок 6 – Пример сходимости стратегии $(1 + 1)$ при генерации линзы с фокусом в точке $(0, 3000)$ при использовании случайных особей в качестве начальных. Общее число метачастиц 255214

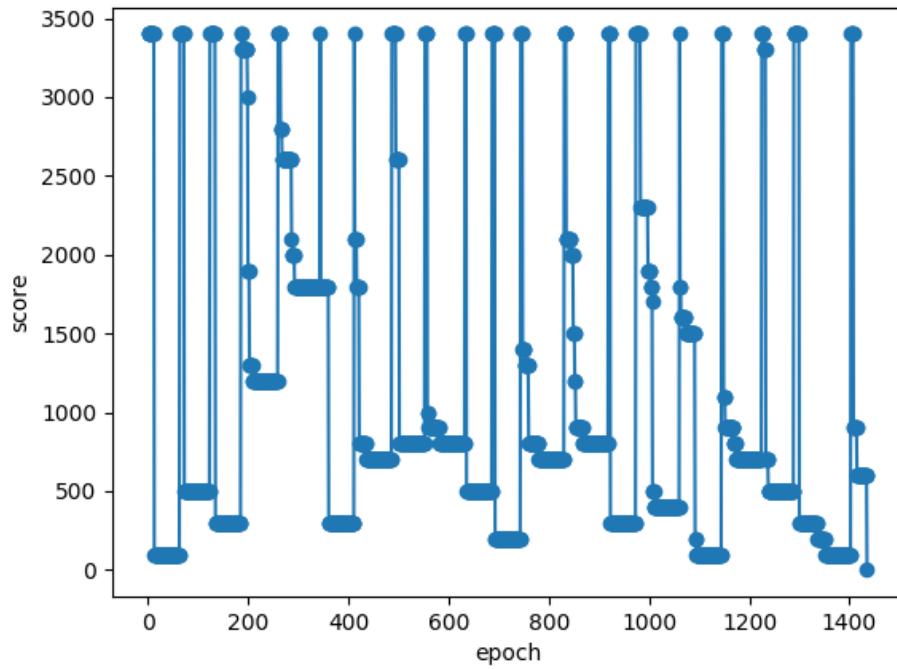


Рисунок 7 – Пример сходимости стратегии $1 + 1$ при генерации линзы с фокусом в точке $(0, 4400)$ при использовании особей представляющих собой пустые металинзы в качестве начальных. Общее число метачастиц 89800

Даже не смотря на то, что в последнем примере для генерации понадобилось почти в полтора раза больше поколений, общее время генерации получилось меньше примерно в три раза.

В качестве начального эксперимента, алгоритм генерирует линзы, состоящие из 10 колец, с фокусами в точках от 3000 до 4000 нанометров с шагом в 100 нанометров. Величины, характеризующие ограничения для структуры особи в первом эксперименте будут иметь следующие значения:

1. MIN_DIST = 500
2. MIN_RAD = 1000
3. MAX_RAD = 15000
4. MAX_NUM = 500

На рисунке 8 изображена металинза с фокусом в точке (0, 3400), сгенерированная генетическим алгоритмом. Ее генерация завершилась через 65 мутаций, результирующая линза состоит всего лишь из 25 метачастиц.

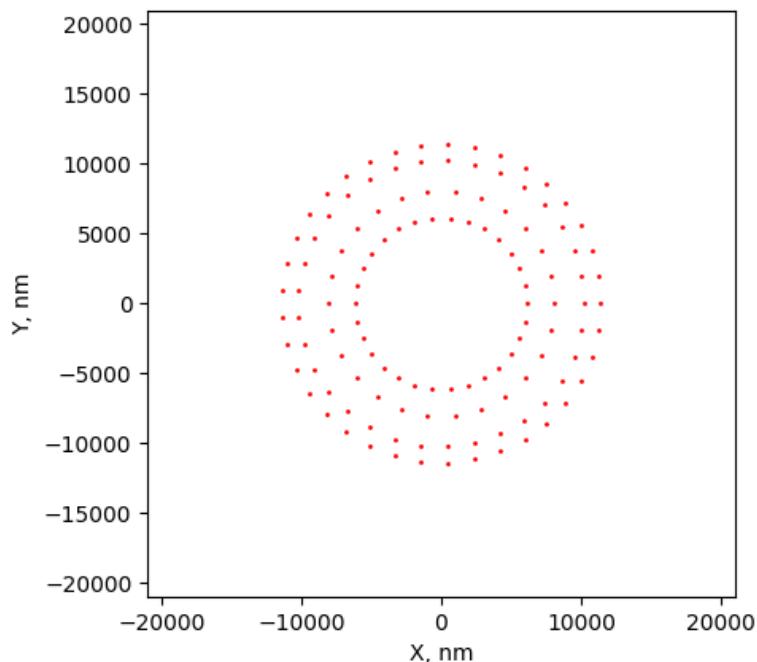


Рисунок 8 – Линза с фокусом в точке (0, 3400), сгенерированная эволюционной стратегией

График распределения энергии для волны проходящей через металинзу изображен на рисунке 9.

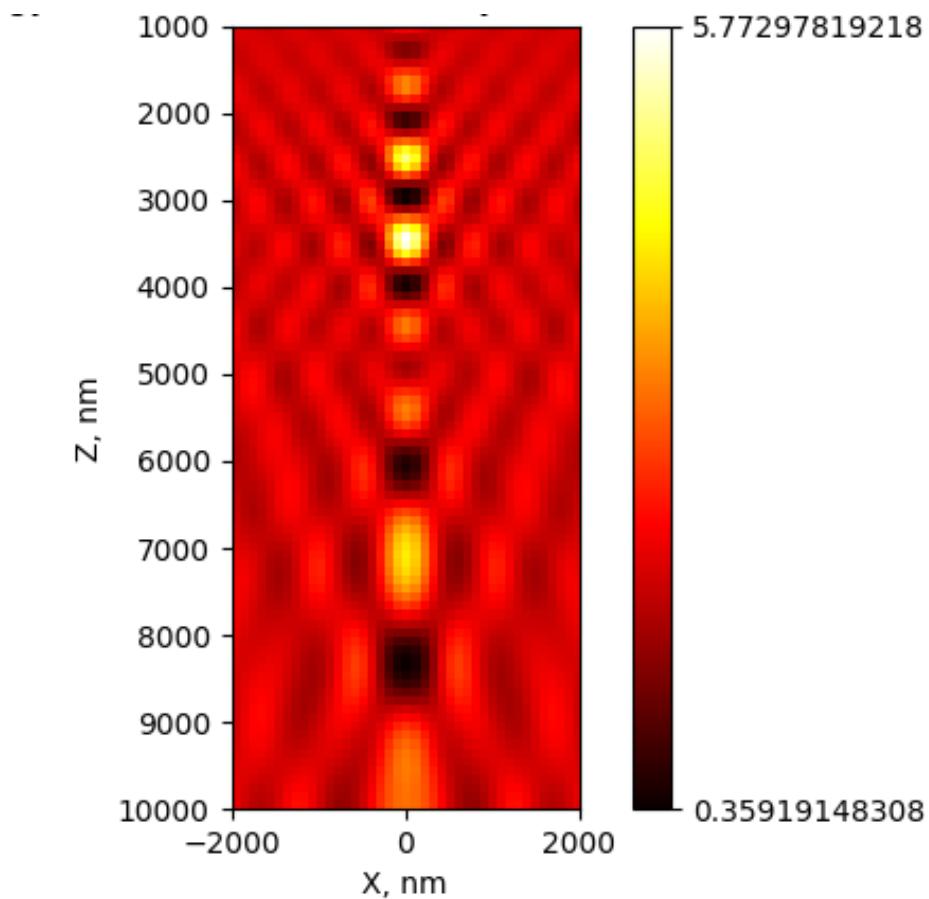


Рисунок 9 – Распределение энергии для линзы, изображенной на рисунке 8

График изменения значения целевой функции для наиболее приспособленной особи из текущего поколения. Исходя из данного графика видно, что потребовалось провести шесть перезапусков, чтобы получить особь, минимизирующую целевую функцию. показан на рисунке 10

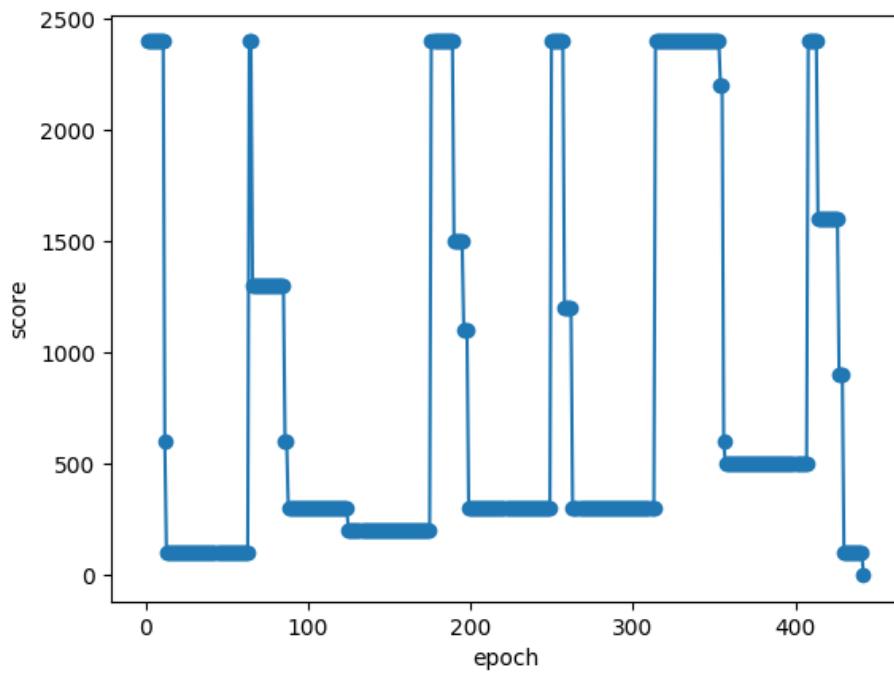


Рисунок 10 – График изменения целевой функции для процесса генерации алгоритмом (1+1) линзы, изображенной на рисунке 8. Общее число метачастиц 22446

На таблице 1 представлены результаты генерации линз с заданными ограничениями на структуру и необходимыми фокусами.

Таблица 1 – Результаты первого эксперимента

Фокус	Количество мутаций в первом эксперименте	Общее число метачастиц в первом эксперименте
(0, 3000)	83	2614
(0, 3100)	187	9024
(0, 3200)	10	173
(0, 3300)	107	5101
(0, 3400)	442	22446
(0, 3500)	114	13356
(0, 3600)	271	19117
(0, 3700)	707	36096
(0, 3800)	76	2035
(0, 3900)	10	273
(0, 4000)	492	44610

В следующем эксперименте значения MAX_NUM и MAX_RAD соответственно равны 300 и 10000.

На таблице 2 представлены результаты генерации линз с уменьшенными ограничениями на структуру и необходимыми фокусами.

Таблица 2 – Результаты второго эксперимента

Фокус	Количество мутаций во втором эксперименте	Общее число метачастиц во втором эксперименте
(0, 3000)	456	12221
(0, 3100)	226	11604
(0, 3200)	168	8013
(0, 3300)	51	2762
(0, 3400)	39	888
(0, 3500)	37	1280
(0, 3600)	60	1234
(0, 3700)	12	220
(0, 3800)	234	9510
(0, 3900)	6	48
(0, 4000)	256	8427

Изменение ограничений не оказывает существенного влияния на время работы алгоритма.

Сравнение величин усиления получающихся металинз представлено в таблице 3. Исходя из данной таблицы видно, что в случае применения эволюционной стратегии, ограничения не оказывают существенного влияния на сложность конфигурации и величину усиления получаемых металинз.

Таблица 3 – Сравнение величин усиления линз в первом и втором экспериментах

Фокус	Число частиц	Величина усиления фокуса в первом эксперименте	Число частиц	Величина усиления фокуса во втором эксперименте
(0, 3000)	25	3,73	12	4,06
(0, 3100)	68	7,42	66	7,68
(0, 3200)	102	6,97	133	7,21
(0, 3300)	34	2,84	106	6,42
(0, 3400)	12	5,77	36	4,02
(0, 3500)	126	6,37	54	6,19
(0, 3600)	105	10,29	49	5,18
(0, 3700)	85	7,51	26	3,32
(0, 3800)	21	3,85	39	3,93
(0, 3900)	73	6,10	29	4,68
(0, 4000)	48	3,49	56	7,13

3.2. Эксперименты с генетическим алгоритмом

В качестве начального эксперимента, алгоритм генерирует линзы, состоящие из 10 колец, с фокусами в точках от 3000 до 4000 нанометров с шагом в 100 нанометров. Величины, характеризующие ограничения для структуры особи в первом эксперименте будут иметь следующие значения:

1. MIN_DIST = 500
2. MIN_RAD = 1000
3. MAX_RAD = 15000
4. MAX_NUM = 500

На рисунке 11 изображена металинза с фокусом в точке (0, 3400), сгенерированная генетическим алгоритмом. Ее генерация завершилась за шесть поколений, результирующая линза состоит из 306 метачастиц.

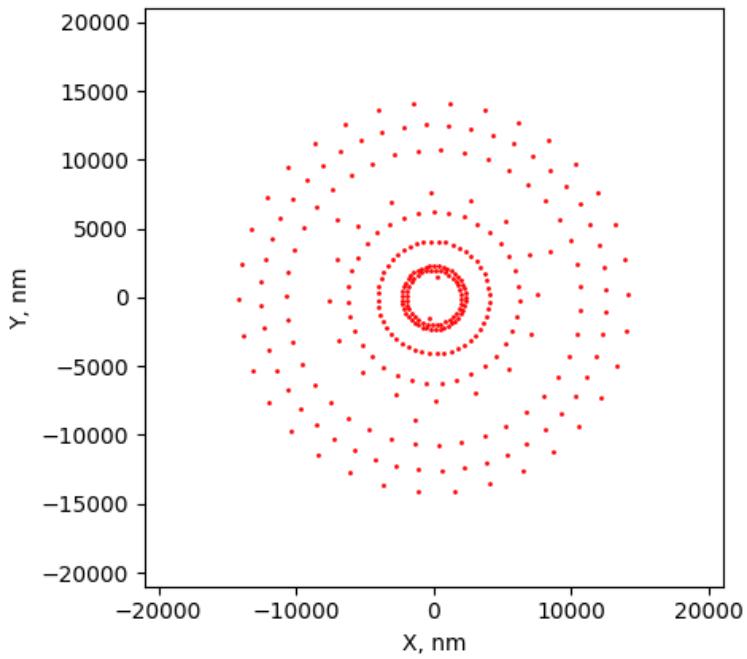


Рисунок 11 – Линза с фокусом в точке (0, 3400), сгенерированная генетическим алгоритмом

График распределения энергии для волны проходящей через металинзу изображен на рисунке 12.

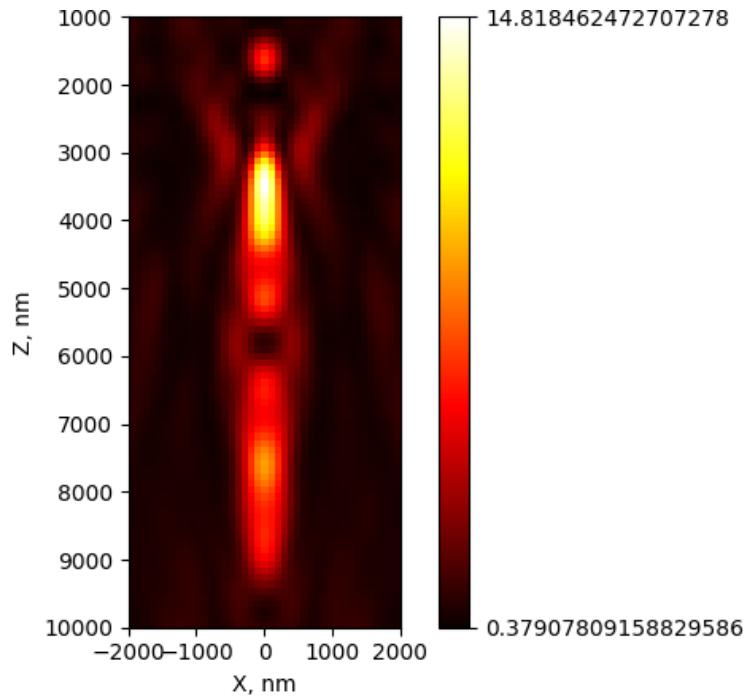


Рисунок 12 – Распределение энергии для линзы, изображенной на рисунке 11

График изменения значения целевой функции для наиболее приспособленной особи из текущего поколения показан на рисунке 13

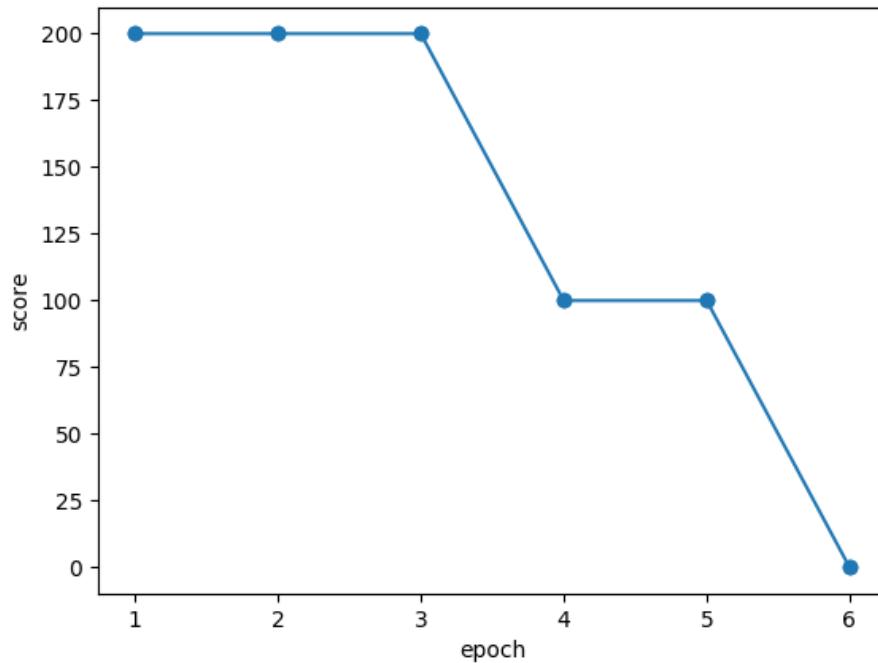


Рисунок 13 – График изменения целевой функции для процесса генерации генетическим алгоритмом линзы, изображенной на рисунке 11. Общее число метачастиц 33743

На таблице 4 представлены результаты генерации линз с заданными ограничениями на структуру и необходимыми фокусами.

Таблица 4 – Результаты первого эксперимента

Фокус	Количество поколений в первом эксперименте	Общее число метачастиц в первом эксперименте
(0, 3000)	7	33419
(0, 3100)	5	26889
(0, 3200)	4	23073
(0, 3300)	6	31237
(0, 3400)	6	33743
(0, 3500)	3	15877
(0, 3600)	3	15225
(0, 3700)	6	28356
(0, 3800)	1	5284
(0, 3900)	2	10058
(0, 4000)	5	26722

Как было указано ранее, изменение ограничений для особи позволяет ограничить размер металинзы. В следующем эксперименте значения

MAX_NUM и MAX_RAD соответственно равны 300 и 10000. Таким образом мы уменьшаем максимальный размер и сложность металинзы.

На таблице 5 представлены результаты генерации линз с уменьшенными ограничениями на структуру и необходимыми фокусами.

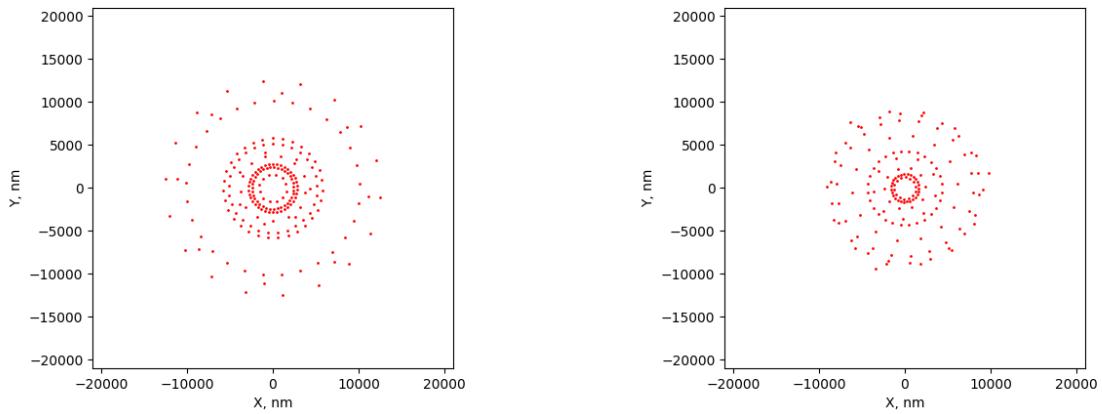
Таблица 5 – Результаты второго эксперимента

Фокус	Количество поколений во втором эксперименте	Общее число метачастиц во втором эксперименте
(0, 3000)	1	2935
(0, 3100)	7	19180
(0, 3200)	1	2990
(0, 3300)	13	43791
(0, 3400)	4	12733
(0, 3500)	1	2984
(0, 3600)	8	24039
(0, 3700)	20	62652
(0, 3800)	8	23879
(0, 3900)	16	55415
(0, 4000)	9	27574

Из получившихся результатов видно, что ограничения на число частиц и максимальный радиус не влияют на скорость работы алгоритма. Однако, во втором эксперименте структура получившихся линз проще.

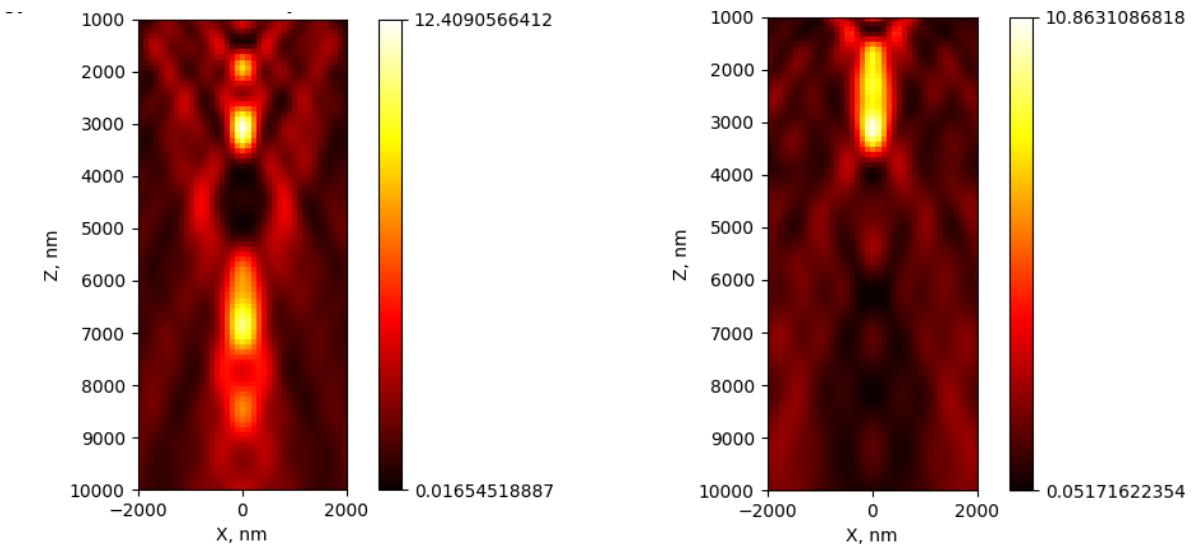
Интересно, что существуют случаи, когда даже в первой эпохе уже встречается металинза с необходимым фокусным расстоянием.

На рисунке 14 представлены линзы с одинаковой точкой фокуса (0, 3100), полученные из первого и второго экспериментов. На рисунке 15 находятся графики распределения энергии для линз расположенных на рисунке 14 соответственно.



Линза, полученная в первом эксперименте,
220 метачастиц Линза, полученная во втором эксперименте,
163 метачастицы

Рисунок 14 – Линзы из первого и второго экспериментов



Распределение энергии для линзы,
полученной в первом эксперименте

Распределение энергии для линзы,
полученной во втором эксперименте

Рисунок 15 – Распределения энергий для линз из первого и второго
экспериментов

Из данного примера, а также из других экспериментальных результатов видно, что линзы, полученные в результате второго эксперимента, имеют более простую структуру, так как состоят из меньшего числа метачастиц, но обладают меньшей величиной усиления. Более подробные результаты значений величины усиления представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Сравнение величин усиления линз в первом и втором экспериментах

Фокус	Число частиц	Величина усиления фокуса в первом эксперименте	Число частиц	Величина усиления фокуса во втором эксперименте
(0, 3000)	201	15,81	146	8,82
(0, 3100)	220	12,41	163	10,86
(0, 3200)	309	14,79	123	8,58
(0, 3300)	272	10,92	141	9,23
(0, 3400)	306	8,64	181	8,91
(0, 3500)	300	8,54	145	8,96
(0, 3600)	280	16,43	102	7,16
(0, 3700)	223	20,16	118	5,44
(0, 3800)	185	9,66	166	11,07
(0, 3900)	288	21,18	158	11,58
(0, 4000)	193	7,20	130	6,88

В самом долгом процессе эволюции полученном в экспериментах потребовалось 28 эпох, чтобы сгенерировать линзу с необходимым фокусом, график изменения целевой функции в этом случае представлен на рисунке 16. Общее число метачастиц, для который был произведен расчет составляет 167236, что соответствует примерно 15 минутам работы реализованного генетического алгоритма на процессоре Intel Core i5-7500HQ.

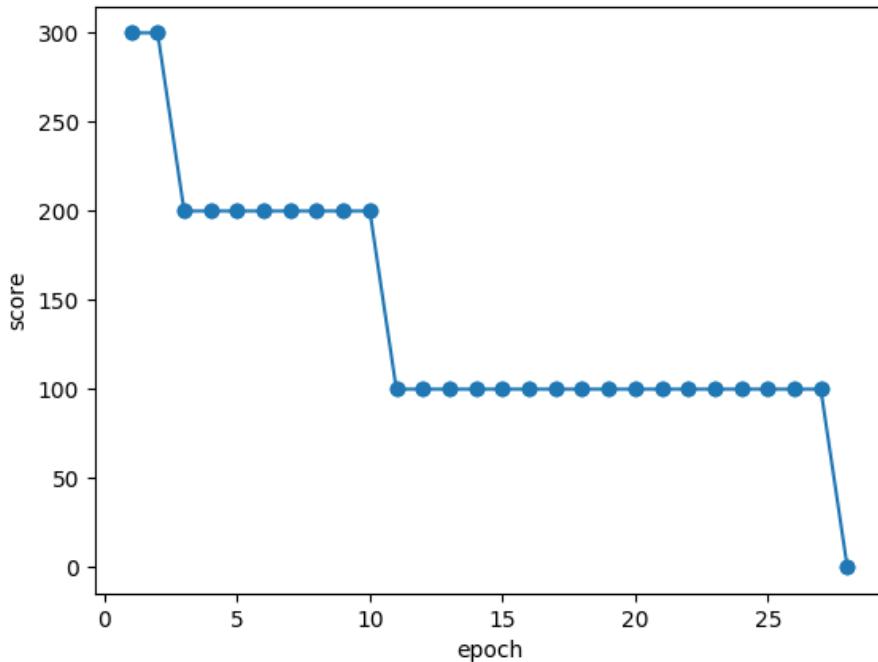


Рисунок 16 – Самый долгий полученный эволюции полученный в экспериментах с генетическим алгоритмом. Общее число метачастиц 167236

3.3. Сравнение эффективности эволюционной стратегии и генетического алгоритма

Для сравнения эффективности работы эволюционной стратегии и генетического алгоритма, каждый из алгоритмов сгенерировал линзы, состоящие из 10 колец, с фокусами в точках от 3000 до 5000 нанометров с шагом в 100 нанометров. Величины, характеризующие ограничения для структуры особей для обоих алгоритмов имели следующие значения:

1. MIN_DIST = 500
2. MIN_RAD = 1000
3. MAX_RAD = 15000
4. MAX_NUM = 500

Время работы алгоритмов пропорционально суммарному количеству метачастиц, которые содержались в особях, для которых рассчитывалась целевая функция. В таблице 7 представлены данные о суммарном количестве метачастиц, которые содержались в особях, во время генерации линз эволюционной стратегией и генетическим алгоритмом. Исходя из данной таблицы видно, что время работы данных алгоритмов в среднем примерно равно, существуют как случаи, когда каждая из стратегий отрабатывает достаточно быстро, так и случаи, когда требуется большое количество вычислений, чтобы сгенерировать необходимую металинзу. Генетический алгоритм почти никогда не

достигает условия стагнации, в то время как эволюционная стратегия достаточно часто достигает его и перезапускается.

Таблица 7 – Сравнение времени работы эволюционной стратегии и генетического алгоритма

Фокус	Общее число метачастиц для эволюционной стратегии	Общее число метачастиц для генетического алгоритма
(0, 3000)	2614	33419
(0, 3100)	9024	26889
(0, 3200)	173	23073
(0, 3300)	5101	31237
(0, 3400)	22446	33743
(0, 3500)	13356	15877
(0, 3600)	19117	15225
(0, 3700)	36096	28356
(0, 3800)	2035	5284
(0, 3900)	273	10058
(0, 4000)	44610	26722
(0, 4100)	4514	21882
(0, 4200)	9801	4806
(0, 4300)	85083	41436
(0, 4400)	89800	9537
(0, 4500)	3080	4583
(0, 4600)	6516	20838
(0, 4700)	27252	28798
(0, 4800)	75040	33242
(0, 4900)	78007	32753
(0, 5000)	5387	4932

Другим важной величиной для сравнения металинз является их величина усиления. На таблице 8 представлены значения величины усиления для линз, сгенерированных эволюционной стратегией и генетическим алгоритмом. Исходя из данной таблицы, видно, что у металинз, генерируемых генетическим алгоритмом величина усиления выше, это связано с тем, что особи, получающиеся в результате работы генетического алгоритма имеют более сложную структуру, чем особи, получающиеся в результате работы эволюционной стратегии.

Таблица 8 – Сравнение величин усиления металинз, полученных в результате работы эволюционной стратегии и генетического алгоритма

Фокус	Величина усиления металинзы полученной с помощью эволюционной стратегии	Величина усиления металинзы полученной с помощью генетического алгоритма
(0, 3000)	3,73	15,81
(0, 3100)	7,42	12,41
(0, 3200)	6,97	14,79
(0, 3300)	2,84	10,92
(0, 3400)	5,77	8,64
(0, 3500)	6,37	8,54
(0, 3600)	10,29	16,43
(0, 3700)	7,51	20,16
(0, 3800)	3,85	9,66
(0, 3900)	6,10	21,18
(0, 4000)	3,49	7,20
(0, 4100)	8,25	10,63
(0, 4200)	6,79	6,90
(0, 4300)	4,83	9,45
(0, 4400)	3,45	10,81
(0, 4500)	8,41	9,29
(0, 4600)	4,55	12,12
(0, 4700)	3,01	23,96
(0, 4800)	5,65	8,55
(0, 4900)	4,51	9,83
(0, 5000)	4,13	9,17

Выводы по главе 3

В данной главе были проведены эксперименты по генерации металинз с заданными фокусными расстояниями с помощью алгоритмов, описанных во второй главе. Как генетический алгоритм, так и эволюционная стратегия оказались способны за разумное время сгенерировать необходимую особь.

В текущей реализации эволюционной стратегии получаемые особи имеют более простую структуру, чем особи с аналогичным фокусным расстоянием, получаемые в результате работы генетического алгоритма. С одной стороны, более простая структура требует меньших затрат при изготовлении реальных металинз, однако, с другой стороны, металинзы с более простой структурой, как правило, имеют более низкую величину усиления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данное работе была успешно реализованна математическая модель поведения метачастиц на основе дипольного приближения, данная модель достаточно хорошо приближает результаты, по сравнению с расчетами в коммерческих программных пакетах.

На основе данной модели были реализованы два алгоритма для генерации металинз с заданным фокусным расстоянием. По результатам экспериментов, реализованные алгоритмы успешно справились с заданной задачей оптимизации по генерации металинз с заданным фокусным расстоянием.

Данную работу планируется продолжать по следующим направлениям:

1. Усложнение математической модели поведения метачастиц (использование частиц с более сложной формой).
2. Увеличение количества параметров оптимизации (два фокуса при различной поляризации падающей волны, поиск линз с заданным фокусом и величиной усиления).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Broadband and Broad-angle Polarization-independent Metasurface for Radar Cross Section Reduction / H. Sun [et al.] // *Scientific Reports*. — 2017. — Jan. — Vol. 7. — DOI: 10.1038/srep40782. — URL: <https://doi.org/10.1038/srep40782>.
- 2 *Decker M., Staude I.* Resonant dielectric nanostructures: a low-loss platform for functional nanophotonics // *Journal of Optics*. — 2016. — Sept. — Vol. 18. — P. 103001. — DOI: 10.1088/2040-8978/18/10/103001. — URL: <https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/10/103001>.
- 3 *Donda K. D., Hegde R. S.* Evolutionary algorithms for designing metlenses // 2018 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP). — IEEE, 02/2018. — DOI: 10.1109/icmap.2018.8354487. — URL: <https://doi.org/10.1109/icmap.2018.8354487>.
- 4 *Hergert W., Wriedt T.* The Mie theory: basics and applications. Vol. 169. — Springer, 2012.
- 5 *Huntington M. D., Lauhon L. J., Odom T. W.* Subwavelength Lattice Optics by Evolutionary Design // *Nano Letters*. — 2014. — Nov. — Vol. 14, no. 12. — DOI: 10.1021/nl5040573. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl5040573>.
- 6 *Jafar-Zanjani S., Inampudi S., Mosallaei H.* Adaptive Genetic Algorithm for Optical Metasurfaces Design // *Scientific Reports*. — 2018. — July. — Vol. 8. — DOI: 10.1038/s41598-018-29275-z. — URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29275-z>.
- 7 *Jahani S., Jacob Z.* All-dielectric metamaterials // *Nature Nanotechnology*. — 2016. — Jan. — Vol. 11, no. 1. — DOI: 10.1038/nnano.2015.304. — URL: <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.304>.
- 8 *Khorasaninejad M., Capasso F.* Metalenses: Versatile multifunctional photonic components // *Science*. — 2017. — Oct. — Vol. 358, no. 6367. — eaam8100. — DOI: 10.1126/science.aam8100. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.aam8100>.

- 9 *Kock W. E.* Metallic Delay Lenses // Bell System Technical Journal. — 1948. — Jan. — Vol. 27, no. 1. — DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01331.x. — URL: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01331.x>.
- 10 *Kshetrimayum R.* A brief intro to metamaterials // IEEE Potentials. — 2005. — Jan. — Vol. 23, no. 5. — DOI: 10.1109/mp.2005.1368916. — URL: <https://doi.org/10.1109/mp.2005.1368916>.
- 11 *Miyamoto K.* The Phase Fresnel Lens // Journal of the Optical Society of America. — 1961. — Jan. — Vol. 51, no. 1. — DOI: 10.1364/josa.51.000017. — URL: <https://doi.org/10.1364/josa.51.000017>.
- 12 *Novotny L., Hecht B.* Principles of nano-optics. — The Edinburgh Building, Cambridge CB2 2RU, UK : Cambridge University Press, 2006. — 539 p.
- 13 *Novotny L., Hulst N. van.* Antennas for light // Nature Photonics. — 2011. — Feb. — Vol. 5, no. 2. — DOI: 10.1038/nphoton.2010.237. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.237>.
- 14 *Pfeiffer C., Grbic A.* Metamaterial Huygens' Surfaces: Tailoring Wave Fronts with Reflectionless Sheets // Physical Review Letters. — 2013. — May. — Vol. 110. — DOI: 10.1103/physrevlett.110.197401. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.110.197401>.
- 15 Photolithographic fabrication of thin film lenses / L. d'Auria [et al.] // Optics Communications. — 1972. — July. — Vol. 5, no. 4. — DOI: 10.1016/0030-4018(72)90086-7. — URL: [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(72\)90086-7](https://doi.org/10.1016/0030-4018(72)90086-7).
- 16 Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces / P. Genevet [et al.] // Optica. — 2017. — Jan. — Vol. 4. — P. 139. — DOI: 10.1364/optica.4.000139. — URL: <https://doi.org/10.1364/optica.4.000139>.
- 17 *Smith D. R., Pendry J. B., Wiltshire M. C.* Metamaterials and negative refractive index // Science. — 2004. — Vol. 305, no. 5685.
- 18 Subwavelength Focusing and Guiding of Surface Plasmons / L. Yin [et al.] // Nano Letters. — 2005. — July. — Vol. 5, no. 7. — DOI: 10.1021/nl050723m. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl050723m>.

- 19 Synthesis design of artificial magnetic metamaterials using a genetic algorithm / P. Y. Chen [et al.] // Opt. Express. — 2008. — Aug. — Vol. 16, no. 17. — DOI: 10.1364/OE.16.012806. — URL: <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-16-17-12806>.
- 20 Ultra Wideband Polarization-Selective Conversions of Electromagnetic Waves by Metasurface under Large-Range Incident Angles / J. Y. Yin [et al.] // Scientific Reports. — 2015. — July. — Vol. 5. — DOI: 10.1038/srep12476. — URL: <https://doi.org/10.1038/srep12476>.
- 21 *Vikhar P. A.* Evolutionary algorithms: A critical review and its future prospects // 2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC). — IEEE, 12/2016. — DOI: 10.1109/icgtspicc.2016.7955308. — URL: <https://doi.org/10.1109/icgtspicc.2016.7955308>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ВЫЧИСЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Листинг А.1 – Код функции, вычисляющей начальные поля

```
def calc_initial_fields(X, Z):
    len_X = len(X)
    len_Z = len(Z)
    electric_initial = np.zeros((len_X, len_Z, 3), dtype=complex)
    magnetic_initial = np.zeros((len_X, len_Z, 3), dtype=complex)
    for i in range(len_X):
        for j in range(len_Z):
            dop = np.exp(1j * np.dot(w, np.array((X[i], 0, Z[j]))))
            electric_initial[i, j] = dop * E_in
            dop_m = np.exp(1j * np.dot(w, np.array((X[i], 0, Z[j])))) / k0
            magnetic_initial[i, j] = dop_m * np.cross(w, E_in)
    return electric_initial, magnetic_initial
```

Листинг А.2 – Код функции, вычисляющей вклад метачастиц в поля

```

def calc_dipoles_fields(particles , X, Z):
    len_X = len(X)
    len_Z = len(Z)
    n = len(particles)
    electric = np.zeros((len_X, len_Z, 3), dtype=complex)
    magnetic = np.zeros((len_X, len_Z, 3), dtype=complex)
    for i in range(len_X):
        for j in range(len_Z):
            e = np.zeros((1, 3), dtype=complex)
            m = np.zeros((1, 3), dtype=complex)
            for t in range(n):
                dipole = particles[t]
                dipole_x = dipole.vector[0]
                dipole_y = dipole.vector[1]
                dipole_z = dipole.vector[2]
                # electric dipoles contribution
                g = green(X[i], dipole_x, 0, dipole_y, Z[j],
                          dipole_z, k1, eps1)
                g_m = -1j * k0 * rot_green(X[i], dipole_x, 0,
                                             dipole_y, Z[j], dipole_z, k1)
                m += np.dot(g_m, dipole.electric)
                e += np.dot(g, dipole.electric)
                # magnetic dipoles contribution
                g = 1j * k0 * rot_green(X[i], dipole_x, 0,
                                         dipole_y, Z[j], dipole_z, k1)
                g_m = green(X[i], dipole_x, 0, dipole_y, Z[j],
                             dipole_z, k1, eps1)
                e += np.dot(g, dipole.magnetic)
                m += np.dot(g_m, dipole.magnetic)
            electric[i, j] = electric[i, j] + e
            magnetic[i, j] = magnetic[i, j] + m
    return electric, magnetic

```

Листинг А.3 – Код функции, вычисляющей начальные поля

```

def calc_intensities(X, Z, electric, magnetic):
    len_X = len(X)
    len_Z = len(Z)
    intensity_e = np.zeros((len_X, len_Z))
    intensity_m = np.zeros((len_X, len_Z))
    for i in range(len_X):
        for j in range(len_Z):
            for t in range(3):
                intensity_e[i, j] += np.abs(electric[i, j, t]) ** 2
                intensity_m[i, j] += np.abs(magnetic[i, j, t]) ** 2
    return intensity_e, intensity_m

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПСЕВДОКОД ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ

Листинг Б.1 – Псевдокод эволюционной стратегии (1+1)

```

def evo(focus):
    current_subject = gen_random_metalens(lens_size)
    current_subject.it = 0
    current_subject.focus = calc(current_subject, X, Y, Z, False)
    it = 0
    expecting = (0, focus)
    lowest_score = +np.inf
    stagnation = 0
    while it < 5000 and lowest_score > EPS:
        new = mutate(current_subject)
        new_focus = calc(new, X, Y, Z, False)
        new.score = distance(new_focus, expecting)
        new.focus = new_focus
        if new.score < lowest_score:
            stagnation = 0
            lowest_score = new.score
            current_subject = new
            current_subject.focus = new_focus
        else:
            stagnation += 1
        if stagnation > 50:
            current_subject = gen_random_metalens(lens_size)
            stagnation = 0
            lowest_score = distance(calc(current_subject, X, Y, Z,
                                           False), expecting)
            it += 1
    return current_subject

```

Листинг Б.2 – Псевдокод генетического алгоритма

```

def genetic(focus):
    global total_calc_number
    total_calc_number = 0
    expecting = (0, focus)
    population = [gen_random_metalens(lens_size) for _ in range(
        population_size)]
    print("random population generated")
    it = 0
    stagnation = 0
    lowest_score = +np.inf
    while it < 1000 and population[0].score > EPS:
        calc_population_scores(population, expecting, X, Y, Z)
        population.sort()
        if population[0].score >= lowest_score:
            stagnation += 1
        else:
            stagnation = 0
            lowest_score = population[0].score
        if stagnation > 20:
            new_population = [gen_random_metalens(lens_size) for _
                in range(population_size)]
            it = 0
            stagnation = 0
        else:
            new_population = population[:elitary] + breed_n(
                population, bred) + mutate_n(population, mutated
            )
            population = new_population
            it += 1
    return population[0]

```